

2024/2025

中国产业用纺织品
技术发展报告

2024/2025 Technology Development Report of China Industrial Textiles

中国产业用纺织品行业协会 编著

2024/2025

中国产业用纺织品
技术发展报告

2024/2025 Technology Development Report of China Industrial Textiles

中国产业用纺织品行业协会 编著

《2024/2025 中国产业用纺织品技术发展报告》
编委会

顾 问 高 勇 孙瑞哲 周 翔 蒋士成 孙晋良
俞建勇 王玉忠 朱美芳 陈文兴 徐卫林
孙以泽 何亚琼 曹传贞 郑 艳 曹学军

主 编 李陵申

执行主编 李桂梅

副 主 编 祝秀森 李昱昊

编 委 (以姓氏笔画排序)

王 宁 白 晓 刘东明 安茂华 孙蓓蓓
李昱昊 李冠志 李桂梅 李陵申 杨 柳
杨耀林 吴 桐 宋名扬 张曙光 范业萌
季建兵 赵东瑾 段守江 祝秀森 徐 瑶
黄景莹 符 芬 韩 竞 雍思宽

前言

《2024/2025 中国产业用纺织品技术发展报告》由中国产业用纺织品行业协会（以下简称中产协）编著，主要围绕近两年中国产业用纺织品行业的技术进步、产品创新、应用拓展等方面，将来自骨干企业、科研院所的先进科研成果、技术报告以及应用分析等汇集成册，以飨读者，旨在推动行业的科技进步和产业升级。

我国纺织行业在全球价值链中的地位稳步提升，产业链整体竞争力不断增强，行业研发取得显著进展，特别是在航天军工、土工建筑、安全防护等领域，多项技术成果达到国际先进水平。产业用纺织品行业也在科技创新方面取得显著成就，行业在纳米纤维加工技术、高性能复合材料制备、安全防护、医疗健康等领域进一步深化研究，实现了一系列技术突破和应用转化。

“十四五”时期，多项鼓励和引导产业发展的政策落地实施，对纺织新材料产业的支持力度不断加强，我国产业用纺织品行业在科技创新、新产品开发、标准化工作和产品质量方面与发达国家的差距逐步缩小，在智能制造和绿色制造方面取得阶段性成果，行业各重点领域的科技创新工作都取得了进展。

近年来，我国产业用纺织品行业在原料多样化、非织造复合加工技术、高端编织成型技术、后整理技术应用与推广、智能制造等方面取得显著成效，实现了部分关键、共性技术的突破，行业自主创新能力、技术装备水平和产品开发能力整体提升。产业用纺织品的研发，也助推了医疗健康、安全防护与应急救援、航空航天、海洋产业与渔业、交通运输、土工建筑、过滤与分离等应用领域的快速发展。

针对产业用纺织品分类广泛的特点，本书从原材料、工艺和设备、技术研究及应用，到智能制造等方面，甄选了涵盖产业用纺织品多领域的最新进展，集研究性、实用性与前瞻引导性于一体。同时，本书也收入了产业用领域的国家企业技术中心，国家级工业设计中心，国家技术创新示范企业名单以及 2024 年国家标准制修订清单，行业标准制修订清单，中产协发布团体标准清单等丰富内容，使本书成为业内人士不可多得的一本专业实用的工具书。

本书为“发展报告”系列图书之一，与之同期出版的还有《2024 中国产业用纺织

品行业发展报告》，聚焦产业用纺织品行业的各重点领域、产业集群与上下游行业的发展情况。

由于编著时间有限，书中难免有疏漏及不妥之处，诚请各会员企业和广大读者批评指正。本书出版得到中产协各分会和许多业内专家学者的支持与配合，在此一并对大家表示衷心的感谢！

编委会

二〇二五年十月

目录

第一篇 年度报告

中国产业用纺织品行业科技发展报告（2024 年度）	2
---------------------------------	---

第二篇 非织造布

熔喷非织造布的驻极技术研究进展	34
改善超纤革用非织造布力学性能的研究进展	43
水刺非织造布在遮阳领域的应用及其技术展望	49
再生纤维素非织造材料的性能对比分析	57
珍珠纹水刺非织造布质量控制探讨	68

第三篇 安全防护

电磁屏蔽织物的技术发展现状及应用进展	79
我国纺织品相关个体防护用品标准现状与展望	93
防爆服装冲击防护性能测评技术研究进展	102

第四篇 航空航天

飞机蒙皮材料的研究现状	113
降落伞用新型伞绳与伞带连接方式的试验研究	121
三维机织复合材料 T 型接头的拉伸性能	128

第五篇 海洋渔业

水产养殖绳网系统现状及发展趋势	140
-----------------------	-----

HMPE 纤维在绳缆制造过程中各环节的强力变化及分析	145
----------------------------------	-----

第六篇 医疗健康

水刺工艺对医用复合非织造材料防水透湿性的影响	154
医用植入非织造材料的研究进展	168
海藻酸盐基非织造医用敷料的研究进展	175
纤维素基止血材料的研究进展	184
纳米纤维在人工神经导管中的应用与研究进展	194
可吸收手术缝合线研究进展	205

第七篇 交通运输

碳纤维铝蜂窝复合材料在汽车保险杠横梁中的应用与性能优化	217
国产大丝束碳纤维在轨道车辆部件中的应用研究	227

第八篇 土工建筑

熔体直纺玻纤复合聚酯长丝胎基布的生产及应用	236
聚丙烯长丝针刺土工布性能及在工程中的应用优势	243
针刺机针刺效果对聚酯长丝胎基布性能的影响	252
新型三维土工格栅的设计、制备及其加筋性能	258

第九篇 过滤分离

自吸过滤式防颗粒物呼吸器过滤效率的测定能力验证结果分析	269
静电纺空气过滤纳米纤维材料研究进展	276
袋式除尘用聚苯硫醚纤维的研究进展与展望	286

一种耐腐蚀耐冲刷高精度复合滤料的性能探究及应用	296
功能性空气过滤材料研究进展	306
水刺法非织造材料及工艺在过滤领域的应用	316

第十篇 其他

纤维增强复合材料拉挤成型工艺研究进展	323
碳纤维及其树脂基复合材料成型工艺与应用研究进展	334
大型真菌及菌丝体复合材料的应用研究进展	349
柔性抗冲击纺织材料及其结构的研究进展	357
废旧纺织品循环利用产业发展空间及促进机制	366
产业用纺织品隔声降噪研究进展	376

附录

2024年发布的纺织标准目录	385
----------------------	-----

2024/2025

中国产业用纺织品技术发展报告

2024/2025 Technology Development Report of China Industrial Textiles

第一篇 年度报告

中国产业用纺织品行业科技发展报告 (2024 年度)

一、行业和科技工作简况

2024 年全球经济保持中低速增长，复苏进程仍面临地缘政治紧张、贸易保护主义风险上升等诸多不稳定和不确定性因素。面对国际竞争挑战，我国产业用纺织品行业经济运行呈恢复性增长和稳步复苏态势，多项主要经济指标回升向好，出口额同比增长 6.7%。2024 年，行业规模以上企业（非全口径）营业收入和利润总额分别实现 5.3% 和 10.1% 的增长。行业继续加大研发投入，研发投入强度达到 3.4%，与 2023 年基本持平。行业研发取得显著进展，特别是在航天军工、土工建筑、安全防护等领域，多项技术成果达到国际先进水平。

（一）行业科技创新和服务体系建设

行业科技创新平台建设方面，截至目前，产业用纺织品行业及相关领域已有国家企业技术中心 20 家、国家级工业设计中心 9 家、国家技术创新示范企业 7 家，国家重点实验室 2 家，国家级研究中心 1 家、国家级技术中心 1 家（附表 1~附表 5）。同时，中国产业用纺织品行业协会（以下简称“中产协”）持续依托行业重点企业和产业聚集地，不断打造行业科技创新平台，借助上海先进技术纺织品制造业创新中心、湖北省先进纤维材料综合型技术创新平台、浙江省现代纺织技术创新中心等新型创新平台，鼓励跨行业、跨领域和跨学科的产学研合作，推动国家级中心建设，助力企业拓展新应用领域。第二届中国产业用纺织品行业科技发展大会等重点活动助力行业技术交流。与湖北省先进纤维材料综合型技术创新平台开展产业用纺织品科技成果转移转化战略合作，推动产学研合作。

行业公共服务平台建设方面，行业通过提升检验检测平台服务能力、扩大服务范围，不断满足行业多样化检测需求。这些平台不仅提供常规的纺织品检测服务，还涵

盖了功能性检测和特种性能测试，为企业提供全面的技术支持。此外，中产协加强了与国内外相关检测认证机构的合作，推动了国内外检测认证结果的互认。行业主要公共服务平台名单见附表 6。

（二）行业标准化工作情况

近年来，行业日益重视标准化工作对支撑行业发展、引领传统产业转型升级的重要作用。2024 年，行业成立了全国产业用纺织品标准化技术委员会（SAC/TC606）（以下简称“TC606 标委会”），并于 9 月 18 日召开了第一届 TC606 标委会成立大会。未来，标委会将围绕我国产业用纺织品行业发展新需求，以国家标准提升引领传统产业优化升级，实施支持绿色低碳发展的标准体系，对接国际规则实现标准相通相容。

在标准化具体工作方面，截至 2024 年底，产业用纺织品行业共有国家标准 63 项（含 1 项职业标准）、行业标准 72 项、团体标准 32 项。2024 年，产业用纺织品行业相关国家标准 2 项、行业标准 5 项，团体标准 7 项（附表 7-附表 9）发布，涉及非织造布、医疗、卫生、土工、安防、过滤等多个应用领域，包括绿色制造、产品标准、方法标准等相关标准，助力行业高质量发展。

行业完成了《土工合成材料 有效孔径的测定 干筛法》及《土工合成材料 动态穿孔试验 落锥法》等国家标准，《口罩用熔喷法非织造布技术规范》《无熔滴防静电织物》等行业标准，《厕用湿巾》《登山装备 辅绳》等团体标准制定工作。开展了《纺织品 木浆复合水刺非织造布》《遮阳篷和野营帐篷用织物》《吊床》《纤维绳索 拉伸疲劳性能试验方法》《纤维绳索 蠕变性能试验方法》《海洋平台定位系泊纤维绳 第 1 部分：通用技术规范》等标准研制工作。由浙江华基环保科技有限公司、江苏蓝天环保集团股份有限公司、安徽元琛环保科技股份有限公司、浙江鸿盛新材料科技集团股份有限公司、清华大学盐城环境工程技术研发中心、东华大学、广州检验检测认证集团有限公司等单位共同制定的《工业烟尘超低排放用滤袋技术要求》团体标准（T/CNITA 05105—2021），入选工信部“2024 年团体标准应用推广典型案例”。

2024 年，中产协作为国际标准化组织土工合成材料技术委员会（ISO/TC 221）国内技术对口单位，继续积极参与国际标准化活动，推动中国标准与国际标准的接轨，提升中国在国际标准化领域的影响力。2024 年 11 月，在山东泰安召开了 ISO/TC 221 第 21 届全体会议和国内技术对口工作组会议，在 ISO/TC 221 全体会议上，国内专家介绍了中国土工合成材料产业发展现状、国内技术对口工作组情况和国内专家为国际

标准化工作所做的贡献；在全体会议前的 WG 3 和 WG 5 工作组会议中，国内专家详细展示了中国提出的 ISO 新工作项目提案和修订提案，并对与会专家提出的问题进行了解释和说明，中国提出的 ISO 新工作项目提案和修订标准提案都得到了工作组召集人的赞赏和认可。在国内技术对口工作组会议上，各位专家委员围绕 ISO 标准我国新提案、ISO 标准转化国标建议、相关工作完善等议题进行了交流并成立了新一届国内技术对口工作组专家委员会。

（三）行业科技创新荣誉和项目

产业用纺织品行业继续在科技创新方面取得显著成就。行业在纳米纤维加工技术、高性能复合材料制备、安全防护、医疗健康等领域进一步深化研究，实现了一系列技术突破和应用转化。

2024 年 6 月 24 日，2023 年度国家科学技术奖励大会在北京人民大会堂隆重举行。北京化工大学、天津科技大学、天津工业大学、天津泰达洁净材料有限公司合作完成的“聚合物熔体纳米纤维绿色高效制造技术及应用”项目获得了 2023 年度国家技术发明奖二等奖。

2024 年度中国纺联科技奖共评选出自然科学奖、技术发明和科技进步奖共计 59 项，产业用纺织品行业有 17 项科技成果获奖，占 28.8%，其中，自然科学一等奖 1 项，科技进步奖一等奖 5 项、二等奖 11 项（附表 10、11），获奖成果主要分布在安全防护、医疗健康、土工建筑、过滤分离、海洋工程等领域。

2024 年，行业及会员单位企业共有 5 件专利获得中国专利奖（附表 12），其中银奖 1 项、优秀奖 4 项；行业内 43 项产品荣获 2024 年度工信部“十大类纺织创新产品”称号（附表 13），其中，河南逸祥卫生科技有限公司“纯水湿厕纸”产品荣获“十大精品”称号。

2024 年，行业 4 项项目获得“纺织之光”应用基础研究项目经费支持（附表 14），行业多项项目通过了中国纺联组织的科技成果鉴定（附表 15），产业用纺织品领域有 10 项项目在第一批中国纺联科技指导性计划项目中立项（附表 16）。

（四）科技及职业技能人才队伍

2024 年，4 位专家荣获“纺织之光”中国纺联科学技术奖特别贡献奖——桑麻学者荣誉，13 位专家荣获 2024 中国纺织工程学会科学技术奖（附表 17、18）。

为提升本行业劳动者就业创造能力，培养壮大技术工人队伍，协会 11 月 26~28 日，

2024年全国行业职业技能竞赛——全国纺织行业“阜宁杯”缝纫工（滤袋）职业技能竞赛全国决赛在阜宁成功举办。通过全国东中部赛区、东北赛区、东南部三个赛区的初赛角逐，最后选送54名优秀选手进入决赛。最终评出金奖1名，银奖2名，铜奖3名（附表19）。在“以赛促训、以赛育才”理念的指引下，通过竞赛为平台传承“工匠精神”，逐渐涌现出一大批先进操作能手，正形成行业的“大国工匠”队伍。

二、行业重点领域科技成果情况

（一）医疗卫生领域

由河南逸祥卫生科技有限公司（Deeyoo 德佑品牌）牵头,中原工学院、优奈新材料（河南）有限公司、郑州智联机械设备有限公司、恒天重工股份有限公司和东华大学联合完成的“高清洁可冲散擦拭制品产业化关键技术”项目，荣获2024年度中国纺织工业联合会科学技术进步二等奖。项目主要攻克了可冲散擦拭材料的高清洁结构设计、制品的产业化应用以及智能高速生产等技术难题。项目被广泛应用于德佑湿厕纸的生产制作中，极大地提升了湿厕纸的生产效率，同时从各个维度提升了湿厕纸的质量和性能。其中研发的天然提取物抗菌亲肤基液配方，有效平衡了人体安全性、长效防腐性和生物降解性，显著提升了清洁能力。项目所开发的可冲散擦拭材料具有湿强大、易冲散、抗菌、可生物降解和高清洁的特点，助力湿厕纸实现了质量提升和性能升级。此外，项目使得可冲散擦拭制品的抽破率 $\leq 0.1\%$ 、连抽率 $\leq 0.1\%$ 、包装密封性 $\geq 40\text{kPa}$ ，为湿厕纸的“不连抽、不易破、不易渗”标准提供了重要技术支撑。

由江南大学、江苏集萃先进纤维材料研究所、东华大学、无锡市第九人民医院、江苏华宜医用新材料、常州市康蒂娜医疗科技、南通新帝克单丝科技、日照天一生物医疗科技等单位，共同完成的“人体修补医用网状材料成形制备关键技术与应用”项目，荣获2024年度中国纺织工业联合会科学进步二等奖。人体修补医用产品和生产所需核心材料都被国外医药巨头垄断，如何研发具有完全自主知识产权的人体修补材料是降低患者经济负担与提高人民健康水平的一个艰巨挑战。研究团队面向人民生命健康，依托纺织交叉学科优势，开展了医用纺织材料领域的科技攻关。项目通过自主研发的可降解医用级聚合物多维杂化改性关键技术，成功制备了多种具有异形结构的纤维原料。这些原料不仅强度高、韧性好，还能在人体内安全降解，大大减轻了患者的术后负担。同时，引入复合初生单丝液态冷却理论，解决了复合单丝成形时的技术难

题，使得医用级单丝在保持高性能的同时，更易于加工和成型。弥补了医用级单丝力学性能和外形尺寸的缺陷。项目深入研究了可降解人体缝补医用材料的经编结构设计理论。通过构建几何模型和仿真变形力学模型，能够真实模拟不同使用场景下的材料表现，为医生提供精准的定制化手术方案。这一技术的应用，使得每一块修补材料都能根据患者的具体需求进行个性化设计，不仅提高了手术的成功率，更在术后恢复方面发挥了重要作用。为解决医用人体修补材料生产效率低与环保性差的问题，项目建设了首条整经—编织—定型一体化生产线，从原料到成品，每一个环节都经过精心设计和严格控制，确保产品的质量和安全性。建设了更适合医用纺织材料的生产系统与制造车间，减小了材料运输过程的二次污染风险，可降低原料损耗 10%以上。

（二）土工建筑领域

天鼎丰控股有限公司、东华大学、天鼎丰聚丙烯材料技术有限公司、天鼎丰非织造布有限公司、北京高能时代环境技术股份有限公司等单位共同承担的“高强粗旦聚丙烯纺粘针刺土工布制备关键技术及产业化”项目，开发了长丝纤度粗旦化的缓冷固化技术，研制出气流均匀缓冷固化系统，攻克了粗旦聚丙烯长丝在牵伸工序中过冷断头的难题，产业化制备出直径不匀率小于 10%的粗旦聚丙烯长丝；研发了粗旦长丝结晶可控的多级复合牵伸增强技术，研制了倍数及温度可控机械牵伸及气流牵伸的多级复合系统，产业化制备出纤度为 4~14 旦、强度 $\geq 3.5\text{cN/dtex}$ 的高强粗旦聚丙烯长丝；创建了长丝各向同性分布的动态摆丝铺网系统，开发了高精度调控长丝铺网均匀性的摆幅动态摆丝装置，产业化制备出聚丙烯长丝取向度均匀分布、纤网纵横向强度均匀性高度各向同性的土工布。该工艺和设备可实现侧吹风冷却能耗降低 28%、同强度下长丝用量减少 23%、同强度下产品克重降低 15%等指标。产品已应用于北京大兴国际机场、引江济淮工程、南水北调、新疆高速公路、雅万高铁等国内外重点工程，经济与社会效益显著。

（三）安全防护领域

由陕西元丰新材料科技有限公司（原陕西元丰纺织技术研究有限公司）、西安工程大学、泰和新材集团股份有限公司、优普泰（深圳）科技有限公司、四川大学、天津工业大学共同完成的“个体热防护纺织品及其检测仪器研制与产业化”项目荣获中国纺织工业联合会科学技术奖一等奖。项目完成了个体热防护纺织品及其检测仪器研制与产业化，形成了热防护面料及服装性能评价体系，研发出多种热防护性能评价与

检测设备，形成了一系列专利和标准，建成多条生产线。研制的金属熔融飞溅测试仪填补了国内空白；研发的系列热防护面料和防护服，显著提升了热防护效能与穿着舒适度，实现了高等级个体热防护服的国产化替代。项目研发的系列个体热防护服与国外高端产品相比，性能更优，价格降低 20%，完成国产化替代，产品在满足国内需求的同时远销海外，经济效益显著。项目成果提升了我国在安全防护领域的竞争力与影响力，显著提升特种热环境下从业人员安全防护水平，降低事故发生率，保障人民群众生命财产安全，维护社会安定。

由浙江理工大学、杭州路先非织造股份有限公司、世源科技（嘉兴）医疗电子有限公司、东纶科技实业有限公司、中纺标检验认证股份有限公司等单位共同完成的项目“可溶性聚乙烯醇非织造防护材料研发及其在核防护中的典型应用”该项目荣获中国纺织工业联合会科学技术奖一等奖。项目提出制备水溶性 PVA 水刺非织造材料和水溶性 PVA 微孔薄膜 2 种防护材料，创制 1 套核防护废弃物高减容比减量化处理装备，解决了 PVA 纤维水溶性和水刺成形间的突出矛盾，突破了 PVA 薄膜难以热塑加工的局限，破解了核防护废弃物难以超高减容比减量化处理的难题，形成了核防护用可溶性 PVA 非织造防护材料产业化加工技术体系。项目在水刺材料和薄膜成形及废弃物减容的关键设备与工艺技术等方面取得突破，整体技术达到国际先进水平。项目产品逐步替代不可降解的聚烯烃防护服，有力推动核放射性颗粒污染物防护材料行业的技术进步，对保卫国家能源安全、支撑核电高质量发展意义重大。

（四）海洋工程领域

由江苏正道海洋科技股份有限公司牵头，联合江苏赛弗道管道股份有限公司、江苏正道可燃冰管道有限公司、江苏高升特种管业有限公司、南通大学等单位共同完成的“海洋油气输送用耐腐蚀铠装柔性动态立管关键技术及应用”项目，荣获 2024 年度中国纺织工业联合会科技进步奖二等奖。针对我国在海洋油气输送用耐腐蚀铠装柔性动态立管设计开发领域的关键问题，项目团队形成了一整套系统性海洋铠装柔性动态立管设计理论和方法，一举攻克了我国海洋动态立管复杂结构设计能力弱的问题；构建了海洋铠装柔性动态立管一体化高效成型成套装备，填补了该领域的国内空白；制备了能适应复杂海况的耐腐蚀、耐高压、非粘结柔性结构铠装动态立管，为我国海洋油气开采提供了有力的技术支撑，对建设海洋强国具有重要意义。项目开发的海洋铠装柔性立管已在国内外形成大规模销售，项目产品已应用于多个重大项目，广泛应用

于海洋油气开采、陆上油气开采等领域，近三年累计经济效益超过 18 亿元，经济及社会效益显著。项目成果为我国海洋油气开采提供了有力的技术支撑，对保障国家能源安全及建设海洋强国具有十分重要的意义。

（五）航空军工领域

由华中科技大学武汉光电国家研究中心、材料学院和体育学院教授，智能纤维器件与装备研究中心主任陶光明作为第一完成人领衔多学科交叉团队完成的“柔性光电超构织物的多物理量精准响应机制与稳定成型技术研究”项目荣获中国纺织工业联合会科学技术奖自然科学奖一等奖。项目发现了微观无序-宏观有序结构与光-热物理量精准响应规律，阐明了多外场耦合作用下多物理量精准调控织物的稳定成型理论，揭示了多场景下织物的多物理量精准耦合调控机制。团队建设了世界上首条光学超材料织物质件生产线，实现了从材料到器件的万吨级全流程宏量稳定生产能力，积极推动了传统产业的高端化升级。研究成果已在国内外多家龙头企业以及国家重大需求领域实现工程应用示范，研发的降温织物服务于中国兵器工业第五九研究所等单位称为：“具有优异的红外图像融合度”“推进我国强国强军发展具有十分重要的意义”“具有国际领先水平”。针对室外恶劣环境中公安干警等人员面临的高低温防护问题，相关成果被列入《湖北省科技兴警三年行动攻坚团队实施方案》。

由南京玻璃纤维研究设计院有限公司、中国船舶集团有限公司第七二四研究所完成的高性能中空织物复合材料设计与制造关键技术项目荣获中国纺织工业联合会科学技术奖自然科学奖一等奖。项目围绕中空织物复合材料的结构-功能一体化设计、高精度制造及典型应用评价开展深入研究，攻克中空织物多场耦合调控设计、高效持续稳定织造、高均质复合成型及整机系统考核验证等关键技术。项目成果获授权发明专利 21 件，含 PCT 国际专利 3 件。项目实现了规模化生产，开发的系列化天线罩产品用于舰载雷达、气象雷达、导航雷达等，制备的围框、地板、导流罩等轻量化结构件用于大型舰船、高速列车等。项目形成了中空织物复合材料的结构/功能设计、高效织造、成型制备及测试评价的全流程技术，推动了产业用纺织品多项技术的创新发展与应用。

（六）工业过滤领域

由广州市华滤环保设备有限公司、武汉纺织大学、广州检验检测认证集团有限公司、清远华滤环保设备有限公司完成的多工况下高效低阻复合长滤筒关键技术及产业化项目获得了 2024 年中国纺联科技进步奖二等奖。项目该项目创新性从过滤材料、折

叠滤筒结构优化设计及成套设备关键技术研发角度出发，先后开展高通量高效无轧点过滤料研发、滤料自动折叠、无胶等间距热熔粘合绑带、螺旋无焊缝骨架、超长一体成型滤筒等系列技术攻关及滤筒成套装备集成技术研发工作，取得了具有自主知识产权的滤筒折叠与定距装置和高强度无焊缝骨架加工方法和设备，打破国外对关键材料、装备和技术的垄断，突破滤料“卡脖子”技术难题。项目攻克了国内外传统滤筒长度的限制，掌握3米以上的一体化超长滤筒制备关键技术，实现了多工况下高效低阻复合长滤筒成套装备关键技术国产化。该项目成功突破了清灰困难、排放超标和高能耗等难题，为钢铁、水泥、铸铁、焦化等行业提供了高效、可靠的可持续发展解决方案，展现了其强大的市场竞争力和环保价值。项目产品实现产业化生产，经济和社会效益显著。项目为行业提供了更加广泛、有效的应用解决方案；也是纺织行业向绿色制造转型迈出的坚实一步，促进了产业链上下游企业的环保协同与可持续发展。

（七）其他领域

由现代纺织技术创新中心副主任、浙江理工大学纺织科学与工程学院（国际丝绸学院）研发的“车用超纤革反应性聚氨酯涂层加工新技术及产业化”项目，针对传统车用革生产加工过程及制品普遍存在高能耗、高污染、溶剂残留等问题，历时5年从原理机制、工艺技术和生产装备三大层面联合攻关，掌握了新一代PU涂层加工新技术。项目总体技术达到国际先进水平，其中PU预聚物管式混合反应器和高速共混高精度喷射涂层技术达到国际领先水平。经产学研深度融合、协同创新，浙江禾欣控股有限公司以此确立了三大绿色制造方向，即反应性PU树脂绿色低碳合成、超细纤维绿色低碳纺丝和超纤合成革绿色低碳制备，为新能源车内饰输出了多款高物性、轻量化的高端产品。项目开发了阻燃、自清洁等系列车用高端产品，打破了国际技术垄断，近三年新增销售12.9亿元、利润2亿元。产品经第三方检测评估碳足迹，每合成和涂覆1公斤反应性PU涂层能耗和CO₂排放较传统溶剂型PU减少37%和45%，经济、社会和环境效益显著，有助于我国车用超纤革涂层加工技术由跟跑向全球领跑推进。

三、行业绿色低碳发展

（一）绿色体系建设

2024年协同行业减污降碳工作，开展中国工程院重点项目《纺织产业减污降碳协

同增效实施路径研究》产业用领域研究工作。

推动行业开展节能诊断、能源管理体系认证、碳核查、碳足迹工作，助力行业实现“双碳”目标，研究建立符合行业特色的“双碳”标准体系。推动绿色设计产品工作，在分领域开展工作。逐步开展绿色企业、绿色园区、绿色供应链，以及能源管理体系等研究和试点示范工作。

2024年8月，中产协通过了绿色制造公共服务平台第三方评价机构自我声明，具备开展绿色工厂等相关评价工作的基础，为全面服务行业绿色发展、推动绿色制造体系建设、助力“双碳”目标实现增添新服务手段。

（二）认证赋能和社会责任

绿色可持续和低碳环保是我国非织造布行业高质量发展的必经之路，为了推动我国非织造产业转型升级绿色发展，促进人与自然和谐共生，提升企业品牌形象、品牌价值与核心竞争力，促进消费升级，引导绿色消费，行业于2021年开始开展可生物降解、可冲散等认证工作，截至2024年末，已有60个认证单元通过“可生物降解”认证（附表20），8个认证单元通过“可冲散”认证（附表21）。

2024年4月，为推动非织造擦拭行业的可持续发展，中国产业用纺织品行业协会携手11家非织造擦拭产业链重点企业，共同向行业发出“中国非织造擦拭行业可持续发展行动倡议”，主要反映了当前我国非织造布行业社会责任相关的活动和事件。发布仪式在上海举行。倡议单位包括：中国产业用纺织品行业协会、赛得利集团、金三发集团&浙江优全护理用品科技股份有限公司、杭州白贝壳实业股份有限公司、北京京东世纪贸易有限公司、河南逸祥卫生科技有限公司、杭州诺邦无纺股份有限公司、扬州倍加洁日化有限公司、上海泰慈康实业有限公司、杭州路先非织造股份有限公司、江华新材料科技（江苏）有限公司和浙江宝仁和中科技有限公司。

2024年8月，《柔巾》（GB/T 40276—2021）标准于2021年12月实施，为了更好地进行标准宣贯。协会发布了“关于《柔巾》（GB/T 40276—2021）标准相关情况和行业倡议的函”，倡议按照不低于国家标准的指标要求进行柔巾产品生产；规范标明柔巾产品的纤维成分及含量；科学宣传引导，共同维护良好的市场环境。

（三）绿色“双碳”工作

行业积极贯彻落实国家“双碳”战略目标要求，推进行业绿色发展、转型升级和高质量发展。2024年，行业29家单位入选绿色工厂（附表22）。截至目前，全国共

有 2810 家企业获评工信部“绿色工厂”示范企业称号，其中，产业用纺织品行业 64 家。2024 年，江苏联发纺织股份有限公司入选绿色供应链管理企业，截至目前行业共有 3 家企业获此荣誉。

2024 年 8 月，中产协通过了绿色制造公共服务平台第三方评价机构自我声明，具备开展绿色工厂等相关评价工作的基础，为全面服务行业绿色发展、推动绿色制造体系建设、助力“双碳”目标实现增添新服务手段。

附表 1 国家企业技术中心（产业用领域）

序号	年份	企业名称	企业技术中心名称	地区
1	2007	宜宾丝丽雅集团有限公司	宜宾丝丽雅集团有限公司技术中心	四川省
2	2008	福建恒安集团有限公司	福建恒安集团有限公司技术中心	福建省
3	2008	中材科技股份有限公司	中材科技股份有限公司技术中心	江苏省
4	2009	巨力索具股份有限公司	巨力索具股份有限公司技术中心	河北省
5	2009	连云港中复连众复合材料集团有限公司	连云港中复连众复合材料集团有限公司技术中心	江苏省
6	2010	唐山三友集团有限公司	唐山三友集团有限公司技术中心	河北省
7	2011	际华三五零二职业装有限公司	际华三五零二职业装有限公司技术中心	天津市
8	2013	江苏联发纺织股份有限公司	江苏联发纺织股份有限公司技术中心	江苏省
9	2015	山东晨阳新型碳材料股份有限公司	山东晨阳新型碳材料股份有限公司技术中心	山东省
10	2017	天津膜天膜科技股份有限公司	天津膜天膜科技股份有限公司技术中心	天津市
11	2017	威海光威复合材料股份有限公司	威海光威复合材料股份有限公司技术中心	山东省
12	2017	新兴际华集团有限公司	新兴际华集团有限公司技术中心	河北省
13	2019	重庆国际复合材料股份有限公司	重庆国际复合材料股份有限公司技术中心	重庆市
14	2020	杭州福斯特应用材料股份有限公司	杭州福斯特应用材料股份有限公司技术中心	浙江省
15	2021	北京纳通科技集团有限公司	北京纳通科技集团有限公司技术中心	北京市
16	2021	厦门中创环保科技股份有限公司	厦门中创环保科技股份有限公司技术中心	厦门市
17	2022	安徽元琛环保科技股份有限公司	安徽元琛环保科技股份有限公司企业技术中心	安徽省
18	2022	湖南中泰特种装备有限责任公司	湖南中泰特种装备有限责任公司企业技术中心	湖南省
19	2022	中复神鹰碳纤维股份有限公司	中复神鹰碳纤维股份有限公司企业技术中心	江苏省
20	2023	科顺防水科技股份有限公司	科顺防水科技股份有限公司技术中心	广东省

附表 2 国家级工业设计中心（产业用领域）

序号	批次	企业技术中心名称
1	第一批	福建恒安集团有限公司卫生用品工业设计中心
2	第三批	鲁泰纺织股份有限公司工业设计中心
3	第五批	华纺股份有限公司工业设计中心
4	第五批	泰安路德工程材料有限公司工业设计中心
5	第五批	青岛海丽雅集团有限公司工业设计中心
6	第五批	愉悦家纺有限公司工业设计中心
7	第六批	巨力索具股份有限公司工业设计中心
8	第六批	山东日发纺织机械有限公司工业设计中心
9	第六批	鲁普耐特集团有限公司工业设计中心

附表 3 国家技术创新示范企业名单（产业用领域）

序号	企业名称
1	青岛明月海藻集团有限公司
2	连云港中复连众复合材料集团有限公司
3	湖南鑫海股份有限公司
4	威海光威复合材料股份有限公司
5	山东路德新材料股份有限公司
6	泰和新材集团股份有限公司
7	重庆再升科技股份有限公司

附表 4 国家重点实验室（产业用领域）

序号	实验室名称	依托单位
1	纤维材料改性国家重点实验室	东华大学
2	特种纤维复合材料国家重点实验室	中材科技股份有限公司

附表 5 国家级研究中心、技术中心（产业用领域）

序号	实验室名称	依托单位
1	产业用纺织品教育部工程研究中心	东华大学、中国产业用纺织品协会、海天轻纺集团
2	国家非织造材料工程技术研究中心	欣龙控股（集团）股份有限公司

附表 6 行业主要公共服务平台表

	平台名称	承建单位
1	中国产业用纺织品行业测试中心（广东）	广州检验检测认证集团有限公司
2	中国产业用纺织品行业测试中心（上海）	劲实检测科技（上海）有限公司
3	中国产业用纺织品行业测试中心（天津）	天纺标检测认证股份有限公司
4	中国汽车纺织内饰及声学材料技术研发测试中心	上海申达股份有限公司
5	中国产业用纺织品行业协会医用纺织品检测中心（广东）	佛山中纺联检验技术服务有限公司
6	中国卫生和母婴用品研发测试中心	浙江优全护理用品科技股份有限公司
7	中国产业用纺织品行业协会土木工程用纤维材料测试中心	山东华衡材料检测有限公司

附表 7 国家标准制修订清单（2024 年，产业用领域）

序号	标准编号	标准名称
1	GB/T 17630—2024	土工合成材料 动态穿孔试验 落锥法
2	GB/T 14799—2024	土工合成材料 有效孔径的测定 干筛法

附表 8 行业标准制修订清单（2024 年，产业用领域）

序号	标准编号	标准名称
1	FZ/T 01180.1—2024	非织造布及其制品接缝强度的测定 第 1 部分：条样法
2	FZ/T 01180.2—2024	非织造布及其制品接缝强度的测定 第 2 部分：抓样法
3	FZ/T 60054—2024	工业除尘滤料接缝性能的测定及评价
4	FZ/T 64113—2024	无熔滴防静电织物
5	FZ/T 64114—2024	口罩用熔喷法非织造布技术规范

附表 9 中产协发布团体标准清单（2024 年）

序号	标准编号	标准名称
1	T/CNITA 17101—2024	粘合衬专用基布 涤纶长丝机织物
2	T/CNITA 15102—2024	登山装备 辅绳
3	T/CNITA 15105—2024	张紧式深海气候观测用浮标锚泊缆绳
4	T/CNITA 09113—2024	厕用湿巾
5	T/CNITA 01006—2024	聚丙烯长丝纺粘针刺非织造土工布的鉴别
6	T/CNITA 07101—2024	超宽幅底网造纸毛毯
7	T/CNITA 09118—2024	夜用成人纸尿裤

附表 10 中国纺联自然科学奖（2024 年，产业用领域）

级别	项目名称	承担单位	主要完成人
一等奖	柔性光电超构织物的多物理量精准响应机制与稳定成型技术研究	华中科技大学、武汉纺织大学、青岛大学、浙江大学、电子科技大学	陶光明、夏治刚、田明伟、马耀光、吴嘉威、于贺

附表 11 中国纺联科技进步奖（2024 年，产业用领域）

级别	序号	项目名称	承担单位	主要完成人
一等奖	1	高强粗旦聚丙烯纺粘针刺土工布制备关键技术及产业化	天鼎丰控股有限公司、东华大学、天鼎丰聚丙烯材料技术有限公司、天鼎丰非织造布有限公司、北京高能时代环境技术股份有限公司	王先锋、聂松林、刘力奇、王学利、镇 奎、孙丰华、吴玉灿、刘冲
	2	高性能中空织物复合材料设计与制造关键技术	南京玻璃纤维研究设计院有限公司、中国船舶集团有限公司第七二四研究所	姜鹏飞、赵大娟、陈文俊、王晓文、张艳红、常德杰、匡 宁、石 磊、王芸毓、王蕴之、魏雅斐、万佳、董继萍、林家庆
	3	个体热防护纺织品及其检测仪器研制与产业化	陕西元丰纺织技术研究有限公司、西安工程大学、泰和新材集团股份有限公司、优普泰(深圳)科技有限公司四川大学、天津工业大学	樊 威、李世雄、王 芳、郑振荣、刘 琳、樊争科、迟海平、吴 银、蔡普宁、赵 雷、周绪波、邹亮、徐炎炎、韩 祥、唐 凯
	4	可溶性聚乙烯醇非织造防护材料研发及其在核防护中的典型应用	浙江理工大学、杭州路先非织造股份有限公司、世源科技(嘉兴)医疗电子有限公司、东纶科技实业有限公司中纺标检验认证股份有限公司、嘉兴大学、浙江省轻工业品质量检验研究院、现代纺织技术创新中心(鉴湖实验室)、中国医学科学院放射医学研究所、浙江格尔泰斯环保特材科技股份有限公司	于 斌、马咏梅、唐 岷、张 芸、刘东生、董向红、肖 婷、刘北壬、叶翔宇、刘 强、刘国金、朱斐超、崔 利、余德游、罗云英
	5	车用超纤革反应性聚氨酯涂层加工新技术及产业化	浙江理工大学、浙江禾欣科技有限公司、浙江禾欣新材料有限公司、现代纺织技术创新中心(鉴湖实验室)、禾欣可乐丽超纤皮(嘉兴)有限公司浙江理工大学绍兴柯桥研究院有限公司	戚栋明、徐欣欣、钟 齐、汪 旗、段慧敏、徐华伟、黄志超、纪尚超、杨 浩、徐一剡、晏雪生、陈 永、周志军、石磊、赵烈
二等奖	1	热防护服功能设计与评估, 关键技术及产业化应用	东华大学	李 俊、王云仪、苏云、田苗、王朝莉、李小辉、王敏
	2	大型纺织复材新能源汽车关键结构件设计、制造及应用	东华大学、重庆长安汽车股份有限公司、中国汽车技术中心有限公司凯勒(南京)新材料科技有限公司江苏新视界先进功能纤维创新中心有限公司、南通大学、上海市纺织科学研究院有限公司	阳玉球、高 聪、孟宪明、谢马岩、张 庆、张 林、杨 琨、王志白、许福军
	3	弹性纺熔非织造布关键技术研究及产业化	青岛大学、山东恒鹏卫生用品有限公司、山东科技职业学院、青岛理工大学、恒鹏(浙江)卫生材料有限公司	江 亮、陈韶娟、常丽、王玉梅、邓林林、周彦粉、刘颜光、吴韶华、陈鑫成、徐延梅

级别	序号	项目名称	承担单位	主要完成人
二等奖	4	道路适用型高性能纤维及土工材料关键制备技术与工程应用	南通大学、交通运输部公路科学研究所、南通新帝克单丝科技股份有限公司、安徽皖维新材料股份有限公司、苏州混凝土水泥制品研究院有限公司、宏祥新材料股份有限公司、中复神鹰碳纤维股份有限公司	张伟、高强、肖倩、马海燕、吴福胜、骆静静、刘好武、李果、马进、顾俊杰
	5	多工况下高效低阻复合长滤筒关键技术及产业化	广州市华滤环保设备有限公司、武汉纺织大学、广州检验检测认证集团有限公司、清远华滤环保设备有限公司	蔡光明、王锦、罗磊、王向钦、曾志松、余绍毅、岳程飞、欧阳屹伟、袁嘉、叶中天
	6	多射流静电纺纳米超细纤网宏量化制备及高精密滤材产业化	中原工学院、河南工程学院、平原滤清器有限公司、河南中纤新材料科技有限公司	邵伟力、韩鹏举、刘凡、齐琨、何建新、孙晚艳、李想、周玉嫚、张惠
	7	高灵敏高分辨力敏电子纺织品产业化技术	青岛大学、武汉纺织大学、稳健医疗(武汉)有限公司、上海百琪迈科技(集团)有限公司、四川润厚特种纤维有限公司、四川豪尔泰服饰有限公司、青岛天银纺织科技有限公司	田明伟、毕曙光、纪华、冉建华、袁小燕、郭庆峰、曹良波、王航、卜庆革、杨应奎
	8	高清洁可冲散擦拭制品产业化关键技术	河南逸祥卫生科技有限公司、中原工学院、优奈新材料(河南)有限公司、郑州智联机械设备有限公司、东华大学、恒天重工股份有限公司	杨自强、甘益、张恒、夏宇飞、康桂田、许士学、靳向煜、乔建才、陈华、杨帅锋
	9	海洋油气输送用耐腐蚀铠装柔性动态立管关键技术及应用	江苏正道海洋科技股份有限公司、南通大学、西北工业大学、合肥神马科技集团有限公司、江苏高升特种管业有限公司、江苏赛弗道管道股份有限公司、江苏正道可燃冰管道有限公司	夏平原、孙启龙、陈东阳、周章银、赵绍东、陆小敏、范杨、韩东、朱晓林、陈江华
	10	人体修补医用经编网状材料成形制备关键技术与应用	江南大学、江苏集萃先进纤维材料研究所有限公司、东华大学、无锡市第九人民医院、江苏华宜医用新材料有限公司、常州市康蒂娜医疗科技有限公司、南通新帝克单丝科技股份有限公司	马丕波、董智佳、周家良、朱丽萍、陈超余、赵刚、丛洪莲、储开元、陈小菊、马海燕
	11	防护口罩测试装置计量校准关键技术研究及应用	浙江省计量科学研究院、浙江省轻工业产品质量检验研究院、中纺标检验认证股份有限公司、国家纺织计量站上海分站、温州市大荣纺织仪器有限公司、浙江三工匠仪器有限公司	潘孙强、叶翔宇、戚海洋、刘素梅、胡有杰、陈佳勇、王金平、徐华东、麻可爱

附表 12 中国专利奖名单（第二十五届，产业用领域）

级别	序号	专利号	专利名称	专利权人	发明人
银奖	1	ZL201410437006.5	一种聚四氟乙烯中空纤维膜双向拉伸装置及拉伸方法	浙江理工大学	郭玉海、朱海霖、王峰、张华鹏
优秀奖	1	ZL201410369874.4	柔性无机纤维材料及其制备方法	嘉兴富瑞邦新材料科技有限公司	丁彬、毛雪、单浩如、韩伟东、宋骏、司银松、俞建勇
	2	ZL201610247886.9	一种具有局部耐久结构的血管支架织物覆膜及其制备方法	东华大学	王璐、林婧、杜佳、王富军、关国平、朱丹婕
	3	ZL201610893553.3	梳理机出棉机构的剥棉罗拉剥棉装置	江苏迎阳无纺机械有限公司	范立元
	4	ZL201811430788.4	一种用于三维自动编织设备的大容量储纱器	中国纺织科学研究院有限公司	李姗姗、杨桂、李静、王京红、雷同宝

附表 13 十大类纺织创新产品（2024 年，产业用领域）

序号	分类名称	产品名称	企业名称
1	时尚流行产品	再生涤纶静音环保收纳床架	江苏佰家丽新材料科技股份有限公司
2	非遗创新产品	福字鼠标垫	张家界旅典文化经营有限公司
3	数字科技产品	具有身份识别及定位功能的照明工装	大连启新智能科技有限公司
4		AI 仿生试衣机器人	望墨科技（武汉）有限公司
5	运动功能产品	“Tabary II” 攀岩安全带	广州凯乐石运动科技有限公司
6		“流云小筑” 户外帐篷	广东骆驼服饰有限公司
7	母婴用产品	轻柔木浆熔喷芯体卫生巾	福建省时代天和实业有限公司、江西东沁新材料科技有限公司
8		竹柔巾	宜宾丽雅新材料有限责任公司
9		感温变色医用退热贴	珠海国佳新材股份有限公司
10	老年用产品	警示定位防走失多功能冲锋衣	沈阳娅思丹莉服装有限责任公司
11		医用护理垫	河北宝塔医疗器械有限公司
12		成人纸尿裤	杭州千芝雅卫生用品有限公司
13	安全防护产品	±1100kV 带电作业用屏蔽服	丹东辽科工业丝绸防护织品有限公司
14		轻薄型保暖防护工装	浙江蓝天海纺织服饰科技有限公司、中国石化仪征化纤有限责任公司、陕西埃克森新能源科技有限公司、延川梁家河丰源服装有限公司、陕西省延长石油丰源有限责任公司服装分公司

序号	分类名称	产品名称	企业名称	
15	安全防护产品	“安欣”阻燃抗静电工装	山东尚服饰文化有限公司、魏桥纺织股份有限公司、山东魏桥特宽幅印染有限公司、山东魏桥纺织科技研发中心有限公司	
16		儿童防护手套	山东星宇手套有限公司	
17		森林作业防护手套	沈阳保力威防护技术装备有限公司	
18		警用摩托车骑行防护服	泰安东升服装有限公司	
19		核工业放射性颗粒物防护服	耐呗斯(嘉兴)安全防护用品有限公司、厦门当盛新材料有限公司	
20		抗极寒半导体智能防爆加热服	优普泰(深圳)科技有限公司、天津瑞肯新型材料科技有限公司、北京中安科创科技发展有限公司	
21		轻量化焊接防护服	湖南永霏特种防护用品有限公司	
22		高效阻燃耐酸碱防护服	思迈(青岛)防护科技有限公司	
23		四防防护服	福州春晖制衣有限公司	
24		阻燃防静电服	甘南海羚安全环保服务有限公司、陕西元丰纺织技术研究有限公司	
25		特种专业防电弧服套装	江苏联发纺织股份有限公司、江苏联发高端纺织技术研究院、南通大学	
26		超柔防割服	常州科旭纺织有限公司	
27		医用一次性防护服	日照三奇医疗卫生用品有限公司	
28		多功能消防雨衣	际华三五零六纺织服装有限公司	
29		多功能安全鞋	旭美控股集团有限公司	
30		超透气医用外科口罩	浙江蓝禾医疗用品有限公司	
31		多功能复合防护绳	山东鲁普科技有限公司	
32		柔软质轻型防弹衣	北京航天雷特机电工程有限公司	
33		健康卫生产品	宠物清洁湿巾	凌海市展望生物科技有限公司
34			柔感抱抱裤	杭州可靠护理用品股份有限公司
35	蚕丝卫生巾		辽宁中天蚕业科技有限公司	
36	宽芯全护丝薄卫生巾		佛山市啟盛卫生用品有限公司	
37	莱赛尔洗脸巾		维达商贸有限公司、赛得利(常州)纤维有限公司	
38	活氧泡泡洗脸巾		武汉中森医疗用品有限公司	
39	富氢面膜伴侣		杭州路先非织造股份有限公司	
40	咧咪美辛巴布膏		湖北兵兵药业(集团)有限公司	
41	绿色低碳产品	软底 FPE 方块地毯	威海海马地毯集团有限公司	
42		多功能车饰三件套	浙江梅盛新材料有限公司	
43	十大精品	纯水湿厕纸	河南逸祥卫生科技有限公司	

附表 14 “纺织之光”应用基础研究项目
(2024 年, 产业用领域)

编号	项目名称	承担单位	资助经费/万元
J202403	聚乳酸熔喷水驻极非织造材料的关键制备技术及空气过滤应用研究	东华大学	10
J202404	多层级 Janus 结构生物活性纳米纤维膜的构筑及其在重度牙周炎治疗中的应用研究	青岛大学	10
J202405	高效超薄水下吸声纺织复合材料优化制备关键技术研究	西安工程大学	10
J202406	陶瓷纳米纤维/微球复合膜的制备及其在锂电池自然安全防护应用研究	浙江理工大学	10

附表 15 中国纺联科技成果鉴定项目
(2024 年, 产业用领域)

序号	项目名称	承担单位
1	海洋牧场用生物环境在线监测养殖网箱关键技术研发及产业化推广	山东金冠网具有限公司和青岛大学
2	纺织基高端生物医用敷料产业化关键技术	稳健医疗用品股份有限公司、五邑大学
3	预制体形性调控结构设计、关键制备技术及应用	南京玻璃纤维研究设计院有限公司和航天材料及工艺研究所
4	多工况下高效低阻复合长滤筒关键技术及产业化	广州市华滤环保设备有限公司、武汉纺织大学、广州检验检测认证集团有限公司、清远华滤环保设备有限公司
5	高灵敏高分辨力敏电子纺织品产业化技术	青岛大学、武汉纺织大学、稳健医疗(武汉)有限公司、上海百琪迈科技(集团)有限公司、四川润厚特种纤维有限公司、四川豪尔泰服饰有限公司、青岛天银纺织科技有限公司
6	可溶性聚乙烯醇非织造防护材料研发及其在核防护中的典型应用	浙江理工大学、杭州路先非织造股份有限公司、世源科技(嘉兴)医疗电子有限公司、东纶科技实业有限公司中纺标检验认证股份有限公司、嘉兴大学、浙江省轻工业品质量检验研究院、现代纺织技术创新中心(鉴湖实验室)、中国医学科学院放射医学研究所、浙江格爾泰斯环保特材科技股份有限公司
7	高清洁可冲散擦拭制品产业化关键技术	河南逸祥卫生科技有限公司、中原工学院、优奈新材料(河南)有限公司郑州智联机械设备有限公司、东华大学、恒天重工股份有限公司
8	车用超纤革反应性聚氨酯涂层加工新技术及产业化	浙江理工大学、浙江禾欣科技有限公司、浙江禾欣新材料有限公司、现代纺织技术创新中心(鉴湖实验室)、禾欣可丽超纤皮(嘉兴)有限公司浙江理工大学绍兴柯桥研究院有限公司
9	弹性纺熔非织造布关键技术研究及产业化	青岛大学、山东恒鹏卫生用品有限公司、山东科技职业学院、青岛理工大学、恒鹏(浙江)卫生材料有限公司

附表 16 中国纺联科技指导性计划项目
(2024 年, 产业用领域)

序号	项目名称	承担单位
1	高隔热陶瓷纤维气凝胶复合材料研究	吉祥三宝高科纺织有限公司等
2	涂层织物类建筑膜材料的传热性能研究	中原工学院等
3	防粘附高舒适熔融金属飞溅防护服制备关键技术研究	南通大学、常熟市宝沣特种纤维有限公司、宜禾股份有限公司等
4	闪蒸非织造防护材料研发及产业化	江苏青昀新材料有限公司、苏州大学等
5	PPS 复合隔膜制备研究开发及其应用于海水无淡化原位制氢的示范	四川省纺织科学研究院有限公司等
6	三维混编间隔织物增强复合材料设计及其电磁性能调控研究	西安工程大学等
7	纳米 SnO ₂ 纤维构建网格结构覆银复合材料及工业化应用	西安工程大学等
8	高性能医用单丝的研发及其在精细缝合中的应用	苏州大学等
9	孔隙缺陷影响下三维编织复合材料湿-热-力耦合失效机制	苏州大学等
10	可冲散低落絮水刺非织造材料关键技术研究	绍兴文理学院等

附表 17 中国纺联科学技术奖特别贡献奖
——桑麻学者(2024 年)

姓名	工作单位
胡旭东	浙江理工大学
刘琳	山东中康国创先进印染技术研究院有限公司
王宏志	东华大学
武海良	西安工程大学

附表 18 2024 中国纺织工程学会科学技术奖名单
(2024 年)

奖项	姓名	专业技术职称	工作单位
2024 纺织科学成就奖	房宽峻	教授	青岛大学
	孟焯	教授	东华大学
2024 纺织科技创新奖	樊威	教授	西安工程大学
	李新荣	教授	天津工业大学
	刘莉	教授	北京服装学院
	王富军	教授级高级工程师	东华大学
	王先锋	研究员	东华大学

奖项	姓名	专业技术职称	工作单位
	相恒学	研究员	东华大学
	张世超	研究员	东华大学
首届纺织前沿科学奖	陶肖明	正高级工程师	香港理工大学
2024“中复神鹰”纺织青年科技奖	邱志成	正高级工程师	中国纺织科学研究院有限公司
	王黎明	研究员	东华大学
	张典堂	研究员	江南大学

附表 19 全国纺织行业“阜宁杯”缝纫工（滤袋）职业技能竞赛全国决赛获奖名单（2024 年）

排名	姓名	单位	奖项
1	秦圆圆	中材科技膜材料（山东）有限公司	金奖
2	刘晔	江苏蓝天环保集团股份有限公司	银奖
3	何加丽	江苏正大森源集团有限公司	
4	濮文萍	南京玻璃纤维研究设计院有限公司江宁分公司	铜奖
5	丁丽杰	辽宁鸿邦装备技术有限公司	
6	洪锋花	浙江严牌过滤技术股份有限公司	

附表 20 通过“可生物降解”认证信息表（截至 2024 年末）

序号	企业名称	产品名称
1	赛得利（中国）纤维有限公司	可生物降解水刺无纺布、100%再生纤维素纤维
2	稳健医疗用品股份有限公司	全棉水刺无纺布、35 克
3	浙江优全护理用品科技股份有限公司	湿巾、柔巾、干巾、棉柔巾、洗脸巾、一次性洗脸巾、抽取式洗脸巾、棉柔洁面巾；优全生活、诗帛、棉品天下、洁莎芙、棉工匠、优全猫、知云
4	大连瑞光非织造布集团有限公司	水刺非织造布、Silriclean、Cr100P、Cn100P、R100
5	杭州贝咖实业有限公司	婴儿湿巾（手口）、BC2103007
6	福建福能南纺卫生材料有限公司	全粘胶水刺非织造布、30~150 克
7	福建福能南纺卫生材料有限公司	全棉水刺非织造布、30~150 克
8	湖北欣柔卫生用品股份有限公司	全棉水刺无纺布、35~150g/m ²
9	湖北欣柔卫生用品股份有限公司	全粘胶水刺无纺布、50~150g/m ²
10	宜宾丽雅卫生材料科技有限责任公司	水刺非织造布、100%粘胶
11	浙江王金非织造布有限公司	粘纤/棉水刺非织造布、30~120g/m ²
12	浙江王金非织造布有限公司	再生纤维素纤维水刺非织造布、30~120g/m ²

序号	企业名称	产品名称
13	山东德润新材料科技有限公司	可生物降解水刺无纺布、100%粘胶纤维、100%莱赛尔纤维
14	南通通州江华纺织有限公司	全粘胶水刺非织造布、50g、65g、75g、90g
15	南通通州江华纺织有限公司	全棉水刺非织造布 45g、65g
16	浙江金三发卫生材料科技有限公司	水刺非织造布、28-100g/m ²
17	亚太森博(广东)纸业有限公司	可生物降解水刺无纺布、100%再生纤维素纤维
18	山东格林汇能科技有限公司	婴幼儿湿巾、厨房湿巾、卫生湿巾、擦皮鞋湿巾、酒精湿巾、小白鞋湿巾、湿厕巾、驱蚊湿巾、羽绒服湿巾、婴幼儿手口柔湿巾; 45~100g
19	山东格林汇能科技有限公司	干湿两用棉柔洁面巾、干湿两用绵柔洁面巾、洗脸巾、浴巾、毛巾、爱之游床品、非织造布; 50~100g
20	江阴市顺浩新材料科技有限公司	水刺无纺布、MM-1、MM-2、MM-3、MM-4、MRJ-1
21	安徽金春无纺布股份有限公司	可生物降解水刺非织造布、20~200g
22	中顺洁柔纸业股份有限公司	新棉初白牌棉花柔巾、XR010、XR011、XR012、XR004
23	中顺洁柔纸业股份有限公司	洁柔面子牌棉柔巾、JR001; 洁柔面子牌棉柔巾(卷筒)、JJ001、JJ003
24	中顺洁柔纸业股份有限公司	洁柔面子牌洁面巾 JR214、JR302、JR308、AR002; 洁柔面子牌柔巾 JR215、UR001、UR004; 洁柔面子牌洁面巾(卷筒) JJ001、JJ003、JJ004、AJ001; 洁柔面子牌婴儿柔巾 AR005、AR007
25	杭州诺邦无纺股份有限公司	100%再生纤维素纤维可生物降解水刺非织造布 100%、20~180g/m ²
26	盘锦锦玉无纺布有限责任公司	100%粘胶水刺非织造布、JV100#, 40~120g/m ²
27	浙江真邦实业有限公司	全棉水刺非织造布、型号: 56000025J~56000150J、56000025P-56000150P、56000025E-56000150E、56000025M-56000150M, 规格: 25g/m ² ~150g/m ²
28	中顺洁柔纸业股份有限公司	洁柔面子牌洁面柔巾, NH001、NR001、NJ001; 洁柔面子牌洁面巾, JR001、JR302、JR003; 洁柔面子牌洁面巾(卷筒), JJ001、JJ003、JJ004
29	尤妮佳生活用品(中国)有限公司	Silcot®柔巾、mmoony®婴儿柔巾 150mm×200mm
30	山东昌诺新材料科技有限公司	再生纤维素纤维水刺非织造布、100%粘胶, 粘胶+木浆
31	四川雅卫新材料有限公司	全粘胶水刺非织造布 B10、木浆复合水刺非织造布 S16、可冲散水刺非织造布(木浆复合水刺非织造布) S76
32	四川雅卫新材料有限公司	棉柔洁面巾 200mm*200mm*60 抽、棉柔洗脸巾(卷装) 200mm*200mm*240g、干湿两用棉柔巾 200mm*180mm*60 抽、湿厕纸 200mm*135mm*40 抽
33	山东爱舒乐卫生用品有限责任公司	卫生湿巾 1 抽~80 抽; 干湿两用巾 10 抽~80 抽
34	赛得利(常州)纤维有限公司	100%纤维素纤维(克重: 30~100 g/m ²); 100%莱赛尔纤维(克重: 30~100 g/m ²); 纤维素纤维+莱赛尔纤维(克重: 30~100 g/m ²); 木浆+纤维素纤维(克重: 30~100 g/m ²); 木浆+莱赛尔纤维(克重: 30~100 g/m ²); 木浆+纤维素纤维+莱赛尔纤维(克重: 30~100 g/m ²)
35	浙江华昊新材料有限公司	全粘胶水刺非织造布、35~150g/m ²
36	可优比母婴用品有限公司	KubiForest 柔巾、60 抽、200mm×200mm、KubiForest 擦手柔巾、100 抽、200mm×150mm

2024/2025 中国产业用纺织品技术发展报告

序号	企业名称	产品名称
37	可优比母婴用品有限公司	KubiForest EDI 纯水湿巾、200mm×150mm
38	河南逸祥卫生科技有限公司	德佑牌柔巾、YX0416
39	河南逸祥卫生科技有限公司	德佑牌洗脸柔巾、YX0880
40	河南逸祥卫生科技有限公司	德佑牌卫生湿巾、YX0755、YX0928、YX0751、YX0745、YX0272、YX0717
41	诺斯贝尔化妆品股份有限公司	OLAY 水感透白光曜钻纹弹力面膜、高资特安补水精华液冰膜玉泽舒缓保湿 B5 冻干面膜
42	中顺洁柔（湖北）纸业有限公司	洁柔面子牌洁面巾、JR302；洁柔面子牌洁面巾（卷筒）、JJ001、JJ003
43	福建恒安集团有限公司	心相印牌卫生湿巾、XCY001（三款）XCY005（三款）XCY007（六款）；XCY007+P1（三款）XCY040（三款）XCY040+P1（二款）；XCY040（小箱）（二款）XCY040+P3（二款）XCY080（三款）；XCY080+P1 XCY080+P2（二款）XCY007+P2（女性）（二款）；XCY044（女性）（二款）；湿厕纸：HKXCY007+P1；心相印牌湿巾：XAY010 XAY040 XAY060
44	福建恒安集团有限公司	心相印牌卫生湿巾、心相印牌卫生湿巾 XCY040（三款）；心相印牌卫生湿巾 XCY040+P1（二款）；心相印牌卫生湿巾 XCY080（三款）；心相印牌卫生湿巾 XCY080+P2（二款）
45	福建恒安集团有限公司	心相印 100%进口木纤维柔巾 XCD020、XCD060
46	福建恒安集团有限公司	心相印 100%进口木纤维柔巾 XCD050、XCD060、XCD080、XCD080+P1
47	奥美（荆门）医疗用品有限公司	MINISO 棉柔系列珍珠纹洗脸巾（抽取式 100 片）、MINISO 棉柔系列超厚 EF 纹抽取式洗脸巾（60 片）、洗脸巾+加厚型、洗脸巾 CLEANSING FACE TOWEL、Ourmed life facial towels、MINISO 婴儿平纹洗脸巾（升级版卷抽式 90 抽）、MINISO 珍珠纹洗脸巾（卷抽式 90 抽）、名创优品一次性浴巾（旅行系列）、名创优品一次性压缩毛巾（旅行系列）、MINISO 珍珠纹 AB 双面洗脸巾、MINISO 棉柔系列超厚 EF 纹抽取式洗脸巾（便携装 20 片）
48	湖北欣柔卫生用品股份有限公司	全粘胶水刺无纺布
49	湖北欣柔卫生用品股份有限公司	全棉水刺无纺布
50	安庆市嘉欣医疗用品科技股份有限公司	MINISO 全棉系列洗脸巾（120 抽） MINISO 全棉系列洗脸巾（婴儿款 120 抽）
51	安庆市嘉欣医疗用品科技股份有限公司	名创优品一次性加厚加大压缩毛巾（25 粒） 名创优品一次性多功能干用毛巾 名创优品压缩浴巾毛巾套装（4 毛巾+2 浴巾） 名创优品一次性加厚加大浴巾（2 条）
52	赛得利（铜陵）无纺材料有限公司	可降解水刺非织造布
53	中顺洁柔（云浮）纸业有限公司	洁柔面子牌洁面巾
54	浙江优全护理用品科技股份有限公司	优全生活 R 湿厕纸 棉品天下 R 绵柔洁面巾
55	浙江金三发卫生材料科技有限公司	水刺非织造布 28g/m ² -100g/m ²

序号	企业名称	产品名称
56	山东格林汇能科技有限公司	棉柔洁面巾: MCE-3104 绵柔洗脸巾: MS-1271 绵柔洁面巾: DSN4013、DSN4044、DSN-31684 良品道@绵柔巾: LPD-1790
57	山东格林汇能科技有限公司	屁屁卫生湿厕纸: DSN4037、DSN4051 康林卫盾@卫生湿巾: LWD-3120、KLWD-3121、KLWD-1387 良品道@卫生湿巾(湿厕纸): LPD-1820
58	安徽半语品牌管理有限公司	尔木萄 压缩柔巾 尔木萄 加厚卷筒洁面柔巾 尔木萄 绵柔亲肤卷筒式柔巾 尔木萄 加厚亲肤抽取式柔巾 尔木萄 绵柔亲肤抽取式柔巾 AMORTALS 尔木萄一次性云感绵柔巾 尔木萄湿敷化妆绵柔巾 尔木萄 一次性浴巾柔巾 尔木萄 云你一起婴童柔巾
59	杭州白贝壳实业股份有限公司	Bc Babycare 柔巾
60	杭州白贝壳实业股份有限公司	Bc Babycare 柔巾

附表 21 通过“可冲散”认证信息表(截至 2024 年末)

序号	认证申请人名称	产品名称
1	尤妮佳生活用品(中国)有限公司	苏菲®女性湿巾
2	四川雅卫新材料有限公司	可冲散水刺非织造布
3	福建恒安集团有限公司	心相印牌卫生湿巾、心相印牌卫生湿巾 XCY040(三款); 心相印牌卫生湿巾 XCY040+P1(二款); 心相印牌卫生湿巾 XCY080(三款); 心相印牌卫生湿巾 XCY080+P2(二款)
4	福建恒安集团有限公司	心相印牌卫生湿巾 XCY001(三款) XCY005(三款) XCY007(六款) XCY007+P1(三款) XCY040(三款) XCY040+P1(二款) XCY040(小箱)(二款) XCY040+P3(二款) XCY080(三款) XCY080+P1 XCY080+P2(二款) XCY007+P2(女性)(二款) XCY044(女性)(二款)湿厕纸 HKXCY007+P1 心相印牌湿巾 XAY010 XAY040 XAY060
5	河南逸祥卫生科技有限公司	德佑牌卫生湿巾、YX0755、YX0928、YX0751、YX0745、YX0272、YX0717
6	优奈新材料(河南)有限公司	可冲散水刺非织造布、50-100g/m ²
7	安徽金春无纺布股份有限公司	可冲散水刺非织造布、20-200g
8	赛得利(铜陵)无纺材料有限公司	可冲散水刺非织造布

附表 22 工信部“绿色工厂”示范企业
(2024 年度, 产业用领域)

序号	企业名称	序号	企业名称
1	天津东泉膜技术有限公司	16	江西卫棉纺织集团有限公司
2	河北金博士卫生用品有限公司	17	山东泰鹏环保材料股份有限公司
3	山西钢科碳材料有限公司	18	沁阳市立标滤膜有限公司
4	中材锂膜(内蒙古)有限公司	19	际华三五零六纺织服装有限公司
5	吉林碳谷碳纤维股份有限公司	20	金士达医疗(咸宁)有限公司
6	长春富维高新汽车饰件有限公司	21	稳健医疗(天门)有限公司
7	尤妮佳生活用品(中国)有限公司	22	延锋(武汉)座椅系统有限公司
8	江苏共创人造草坪股份有限公司	23	湖南鑫海股份有限公司
9	维达纸业(浙江)有限公司	24	北新防水(广东)有限公司
10	浙江嘉名染整有限公司	25	广州樱泰汽车饰件有限公司
11	安徽雪龙新材料(集团)有限公司	26	重庆华峰新材料有限公司
12	安庆市嘉欣医疗用品科技股份有限公司	27	贵州卡布婴童用品有限责任公司
13	泉州天娇妇幼卫生用品有限公司	28	北新防水(咸阳)有限公司
14	江西合协织带有限公司	29	陕西美兰德新材料股份有限公司
15	江西南方尼龙粘扣有限公司		

附件 1 行业科技成果鉴定和奖项申报工作简介

行业科技成果的确认和科技类奖项荣誉，对于提高企业核心竞争力、提升企业综合实力、争取各级科技及政策支持等具有重要意义。目前，中国纺联的科技类项目主要包括科技指导性项目和应用基础研究项目，其中，科技指导性计划项目经费由承担单位自筹解决，中国纺联负责组织项目审批和鉴定。通过鉴定的项目成果可参加“纺织之光”中国纺联科学技术奖等科技奖励的申报，获得中国纺联科学技术奖一等奖的项目，将择优推荐申报国家科学技术奖。

中国纺联科技指导性计划项目一般在每年的 4 月~5 月完成立项工作，“纺织之光”中国纺联科学技术奖一般在每年 5 月~6 月完成申报工作。为了提升会员单位的科技成果质量和奖项申报水平，中产协一直在项目立项、成果鉴定材料审核、报奖材料提升各环节为会员单位提供辅导和推荐，请有意向的会员单位积极与协会联系。

联系方式：

李冠志，18710083779，liguanzhi@cnita.org.cn

李昱昊，13810687465，liyuhao@cnita.org.cn

附件 2 中产协标准化工作简介

中产协全面对接全国纺织品相关标准化技术委员会，建设有中国产业用纺织品行业协会标准化技术委员会，同时也是纺织行业国家军用标准化归口管理单位和国际标准化组织土工合成 ISO/TC 221 国内技术对口单位，可为会员企业提供国际标准、国家标准、国家军用标准、行业标准、海关单耗标准、团体标准等标准化全方位服务。

中产协作为纺织领域国家军用标准化工作的归口管理单位，负责根据军委装备发展部计划要求、遵循“应培尽培”原则，组织纺织行业的国家军用标准化知识培训，从而提升行业对国家军用标准化工作的认识水平，了解军用标准化工作中的重点任务，提高军用标准的编制能力。

联系方式：

黄景莹，18601291714，huangjingying@cnita.org.cn

赵东瑾，13466691457，zhaodongjin@cnita.org.cn

李昱昊，13810687465，liyuhao@cnita.org.cn

附件3 “可生物降解” “可冲散” 认证工作简介

一、认证工作背景

近年来，非织造材料在一次性卫生和护理用品领域蓬勃发展，实现了各类干巾、柔巾、湿巾、化妆棉、面膜、溢乳贴、隔尿垫、擦拭布、湿厕纸等产品逐渐应用于擦拭、洁肤、卸妆、厕用等多个应用场景的消费升级和产品替代。

绿色可持续和低碳环保是我国非织造布行业高质量发展的必经之路，为了推动我国非织造产业转型升级绿色发展，促进人与自然和谐共生，提升企业品牌形象、品牌价值与核心竞争力，促进消费升级，引导绿色消费，协会推动行业开展了可生物降解、可冲散等认证工作。

可生物降解的干巾、柔巾、湿巾、化妆棉等产品，为解决白色污染、微塑料污染提供一个可选择方案，可以部分解决用即弃产品的环境问题。

可冲散产品，如厕用湿巾（湿厕纸），具有良好的洁净效果和消费体验，且使用后可直接丢入马桶冲散，得到了广大消费者的青睐，可冲散产品具有可冲散、可降解等特性，有利于保障城市地下管网及排污设施安全。

“可生物降解”“可冲散”认证工作，以第三方认可、引导的形式，有利于更好地规范行业行为和市场秩序，有利于消费者选购。

二、认证工作的意义

助力环境保护和行业绿色可持续发展

体现企业绿色可持续发展社会责任

提高企业行业影响力和品牌价值

提升企业生产管理水平及产品品质

引导消费者高端消费、精准消费、责任消费和绿色消费

促进消费升级，提升消费品质和消费体验

三、如何申请认证

1. 认证范围

可生物降解：非织造布及制品（非织造制品包括以非织造布为原料制成的各类干巾、柔巾、湿巾、化妆棉、面膜布、擦拭布等）。

可冲散：非织造布及制品（湿厕纸、婴儿擦拭巾、擦拭纸、女性卫生用品、湿巾、家庭清洁擦拭巾等一次性非织造产品）。

2. 认证申请主体

非织造布及制品的生产、销售企业。

3. 认证工作流程

（1）认证申请：

认证申请单位向认证机构提出申请，填写申请书，并提交相关资料（申请书和相关材料具体内容请到附件中下载）。

（2）认证预审：

协会结合行业情况，对认证申请材料进行预审。

（3）文件审查及签订合同：

认证机构对通过预审的申请方发放认证受理决定通知单。与申请方确定认证产品单元、检测项目，认证收费项目、收费标准、认证过程中双方所具有的权利和义务等信息后，与申请方签订认证工作合同。

（4）现场检查：

认证机构组织专家和检查员赴申请方生产现场进行检查，综合考评申请方的质量保证能力和产品一致性。

（5）产品检测：

可生物降解：由认证机构指定的检测机构参照申请方所申请产品的相关产品标准和 T/CNITA 23101—2023《非织造布及制品 生物降解性能评价》标准要求，对所申请产品进行检测。

可冲散：由认证机构指定的检测机构参照申请方所申请产品的相关产品标准和《GB/T 40181—2021 一次性卫生用非织造材料的可冲散性试验方法及评价》标准要求，

对所申请产品进行检测。

(6) 颁发证书:

认证机构对审查资料、工厂检查结果、产品检验进行综合评价,对通过综合评价的申请方颁发认证证书,并签订认证标志授权使用协议,获证方可以按照《认证标志使用协议》使用和管理水刺非织造布及制品可生物降解标志,认证证书的有效期为两年。



“可生物降解”标志



“可冲散”标志

(7) 获证后监督:

是指认证机构对获证产品及其生产者/生产企业实施的监督,通过实施有效的跟踪检查以验证生产者/生产企业的质量保证能力持续符合认证要求、确保获证产品持续符合标准要求并保持与型式试验样品的一致性。获证后监督采取获证后抽样检测或者检查的方式实施。

(8) 标志管理:

认证机构和协会对获证方的“可生物降解”“可冲散”标志使用情况进行监督管理。

(9) 复审换证:

产品认证证书有效期满后,认证机构和协会按认证工作规定进行复审,并为通过复审的单位换发新的认证证书。

四、认证信息查询

通过认证后,认证机构将在一个月内将通过认证信息上报国家认监委备案。完成备案后,企业和相关方可在国家认监委网站自愿性产品认证板块查询认证产品信息。



“可生物降解” “可冲散” 认证介绍

五、咨询联系

认证工作网址：

<http://www.cnita.org.cn/kjcx/lfsz/rzgz/>

联系方式：

李冠志，18710083779，liguanzhi@cnita.org.cn

李昱昊，13810687465，liyuhao@cnita.org.cn

2024/2025

中国产业用纺织品技术发展报告

2024/2025 Technology Development Report of China Industrial Textiles

第二篇 非织造布

熔喷非织造布的驻极技术研究进展

孟娜¹ 王先锋^{1,2} 李召岭¹ 俞建勇² 丁彬²

(1. 东华大学纺织学院; 2. 东华大学纺织科技创新中心)

新冠肺炎疫情 (COVID-19) 疫情暴发以来, 口罩、防护服及呼吸器等安全防护用品成为常态化防疫期不可或缺的物资和必需品。熔喷非织造布是一种由熔喷工艺制备的具有微纳米结构的非织造材料, 是口罩过滤、防护环节的关键材料, 其结构蓬松、容尘量大, 能起到优异的吸附、捕获和隔绝有毒有害物质等防护作用, 且应用广泛。但高品质熔喷非织造布生产和实际应用过程中仍存在技术壁垒高、使用寿命短、过滤阻力大等问题, 因此, 设计开发具备高效低阻性能过滤材料是关乎民生大计的重要课题之一。

为开发高效低阻的高品质熔喷非织造布, 研究者利用驻极技术提升熔喷非织造布的综合性能, 其通过机械拦截和静电吸附效应, 实现对微小颗粒的过滤。然而, 电荷存储及存储稳定性是影响驻极熔喷非织造布过滤性能的关键因素, 且与驻极效果密切相关, 如何提高驻极熔喷非织造布的静电存储及其稳定性具有重要意义。本文主要综述了熔喷工艺及熔喷非织造布的驻极技术, 并对电晕充电和水驻极技术当前的应用状况进行讨论。同时详细探讨了驻极体材料、驻极工艺以及聚合物晶体结构对静电存储性能的影响。此外, 针对驻极技术在应用领域面临的挑战, 对未来熔喷非织造布研究和驻极技术进行展望, 期望能为驻极熔喷非织造布的发展提供借鉴。

1 驻极熔喷非织造布研究现状

1.1 熔喷工艺

熔喷工艺是通过聚合物挤压成网制备非织造材料的一种加工方法, 其原理是利用高速高温空气对喷丝孔熔融挤出的熔体细流进行迅速牵伸, 同时两侧补入的冷空气使

其凝固成超细纤维，然后均匀接收到输网帘上，通过自黏合的方式形成熔喷非织造布，工艺如图 1 所示。该材料在过滤、吸附、保暖等方面具有优异的性能优势。

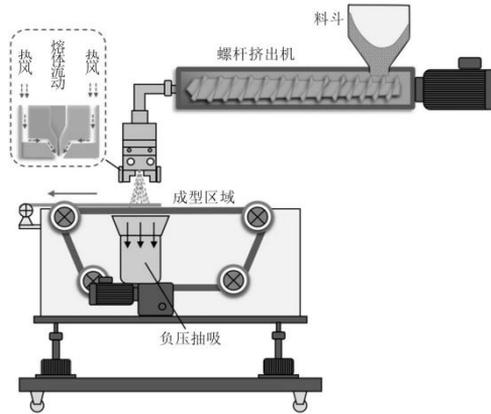


图 1 熔喷工艺示意图

近年来，除在原材料方面不断改进外，研究者们也对熔喷工艺设备进行了优化，出现了以改进喷丝板为主的高孔密熔喷、多排熔喷及组合式薄型熔喷等新工艺，以及熔喷纺粘化和插层熔喷复合、驻极熔喷复合等新技术。其中驻极熔喷非织造技术的不断创新可有效推动长效驻极熔喷过滤非织造材料的发展。

1.2 驻极技术

熔喷非织造布的驻极方法主要有电晕充电法、水驻极、静电纺丝法等，常用的驻极方法及其驻极机制、过程和特点见表 1。

表 1 静电驻极机制和过程及特点

驻极方法	驻极机制及过程	特点
电晕充电	非均匀电场引起空气局部击穿，产生的离子束轰击电介质使材料带电	工业应用广泛
摩擦起电	物体接触摩擦时产生的热激发作用，使物体间发生电子转移带电	效率低
静电纺丝	在静电场中，高分子溶液或熔体流动与变形使材料带电	操作简单
热极化	电介质材料在高温电场下，经高温热活化的偶极子沿电场方向取向，进入低温电场后分子冻结取向带电	电荷分布不匀，温湿度的影响大
低能电子束轰击	低能电子束轰击电介质，被电介质捕获并储存使材料带电	不易实现工业化
水驻极充电	利用经过特殊处理过的水溶液对熔喷非织造布进行穿透，通过水溶液与纤维的摩擦带电	产生的电荷稳定、能耗高

表 1 中列出的几种静电驻极方法中，就静电驻极机制及过程和特点而言，电晕充电法驻极效果佳、工艺简单，目前在熔喷布驻极市场使用率高；摩擦起电法是市场上一直使用的驻极方法，但其驻极效率低，由于自身特点不适用于熔喷布的驻极；静电纺丝法和低能电子束轰击法虽然操作简单、驻极效果优异，但其静电驻极机制复杂，产业化难度比较大。热极化法在驻极过程中易受温湿度影响、电荷分布不均匀率高，限制了其广泛应用。

1.3 电晕充电驻极技术及其应用现状

电晕充电是熔喷非织造布在工业及实验室中使用最多的驻极处理技术，其设备由静电发生器和平板电极构成，驻极原理如图 2 所示。当施加高压时，静电发生器针状电极下端的空气局部击穿产生电晕电离，在电场作用下，一部分载流子沉积在表面，另一部分载流子被表层陷阱捕获，成为驻极体材料。

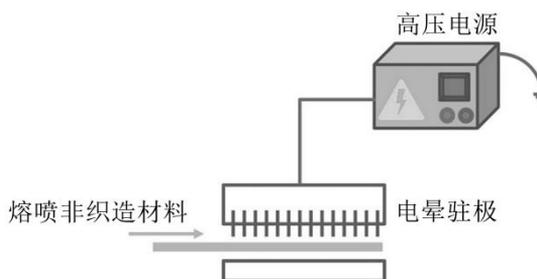


图 2 电晕充电原理图

驻极过程的施加电压、距离和驻极时间的长短等工艺参数，是影响熔喷非织造布带电效果的主要因素。Moreno 等通过在电晕针尖与下极板间加栅网的方式对熔喷设备进行改进。高锰等通过热刺激放电技术和表面电位分布测量技术，研究了不同驻极工艺（距离、电压）和熏蒸后处理等对非织造材料电荷存储性能的影响。结果表明：驻极过程施加的电压和驻极距离对材料的过滤效率影响显著，正电晕优于负电晕驻极；酒精熏蒸能引起材料电荷的急剧衰减，使过滤性能下降；水熏蒸对材料的电荷衰减影响小，为熔喷聚丙烯（PP）驻极体非织造材料的生产及其使用、存储环境提供了参考。

Zhang 等研究了驻极电极和熔喷非织造布之间产生的蓝光现象与过滤效率之间的

关系，研究发现：高充电电压、低充电距离和长充电时间有利于提升熔喷非织造布的过滤性能，通过观察蓝色发光的形态，可以在线预测熔喷非织造布的过滤性能。任煜等采用外置式电晕充电技术处理高性能熔喷聚乳酸（PLA）材料，研究表明：驻极处理能增加 PLA 熔喷非织造布的表面粗糙度，但对材料的透气性没有显著影响，使过滤效率显著增加。于斌等研究了驻极体含量对 PLA 复合材料可纺性的影响，得出了少量驻极体的添加能有效提高 PLA 材料的结晶度，随着驻极体含量的增加，PLA 材料的可纺性也得到了改善。

1.4 水驻极技术及其应用现状

水驻极技术是近年来发展起来的较为新颖的驻极技术。杭州氢源素生物科技有限公司通过高压水泵将驻极溶液输送到喷射装置，利用喷嘴进行熔喷非织造布喷射，二者摩擦产生静电。水驻极熔喷非织造布具有过滤阻力低（约可降阻 3%~40%）、过滤效率高（油性最高 99.97%）、静电量饱和、电荷存储长效稳定等优点。水驻极技术处理过程主要包括 2 个部分：1）在一定角度、压力、流速下驻极水溶液进行喷射、摩擦熔喷非织造布，产生静电；2）烘干锁电，显著提高熔喷非织造布的电荷存储稳定性，其工艺原理如图 3 所示。

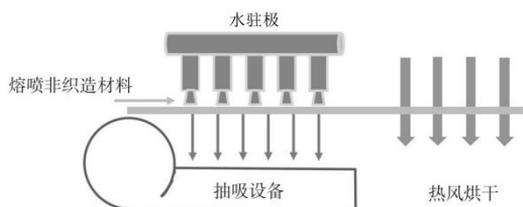


图 3 水驻极工艺原理图

近年来，随着对熔喷非织造布驻极效果的要求不断提升，研究者在水驻极处理工艺方面做了深入探究。Im 等通过离线式水驻极方法，制备出过滤阻力为 81.6 Pa，过滤效率达到 94.98% 的熔喷非织造布，且存放 13 周后过滤效率未发生明显变化。姬苏倩等对比了电晕驻极和水驻极 2 种方法处理的熔喷非织造布的形貌特征、过滤效率及透气性等，发现水驻极熔喷非织造布的气流阻力更低，透气性更好，是一种更优的驻极方式。周文乾公开了一种水驻极处理熔喷非织造布的加工方法及喷水装置，其中增

加了循环水源装置，显著降低了水消耗和新进水源过滤产生的成本。李君等发明了一种可以节能的水驻极处理熔喷布烘干系统，其将熔喷机散发的热能通过通气管抽送至烘干系统进行烘干，有效减少了电能消耗，实现能量的再次利用。唐相等公开了一种塑料熔喷丝融合高压水雾丝设备，涉及强静电非织造布制备技术领域，熔喷丝在成布前通过水驻极方式进行摩擦产生静电并附着于熔喷丝上，制备出过滤阻力低、过滤效率高的熔喷非织造布；采用低能耗的空气烘干方式代替传统电热丝烘干，以 3 层 S 形正面反面循环烘干，保证了熔喷非织造布的质量稳定。陈谢宇等将 PP 与驻极母粒混合，然后利用水驻极技术进行驻极处理制备了过滤效率达 99.94%、过滤阻力低至 19.62 Pa 的 PP 熔喷非织造材料。陈苗苗等对比了电晕驻极和水驻极 2 种工艺处理的熔喷非织造材料的过滤效率和表面电荷分布，并对水驻极机制进行探究，发现水驻极能显著提高低面密度熔喷材料的过滤效率。

通过对近几年熔喷非织造布驻极技术研究现状的分析与总结发现，电晕驻极技术在产业化领域已经得到了广泛应用，技术趋于成熟。随着市场的更新迭代，水驻极处理技术也在不断完善。相对于电晕驻极技术，水驻极技术在制备高效低阻熔喷非织造材料方面有突出优势。

2 熔喷非织造布的电荷存储性能

2.1 静电存储及稳定性机制

驻极体材料的空间电荷和偶极电荷的捕获手段包括 3 种结构层次：（1）材料的特殊分子结构位置；（2）相邻分子间原子基团；（3）聚合物的结晶区位置或聚合物的晶相与非晶相界面位置。

驻极体电荷存储模型如图 4 所示。在对熔喷非织造布进行电晕驻极处理时，由于电场力对电子的驱动较小，电子向纤维膜表面运动，沉积在纤维膜的表面和浅表面成为束缚电子的表面陷阱。当一部分电子能量大于表面陷阱的束缚能 E_s ，便可越过表面陷阱储存在纤维膜表面，成为浅阱电荷；另一部分低能电子的运动能小于 E_s ，则被体内陷阱捕获，成为深阱电荷。深阱电荷对电子的束缚能大，因此，电子不易逃逸，存储稳定性更高。

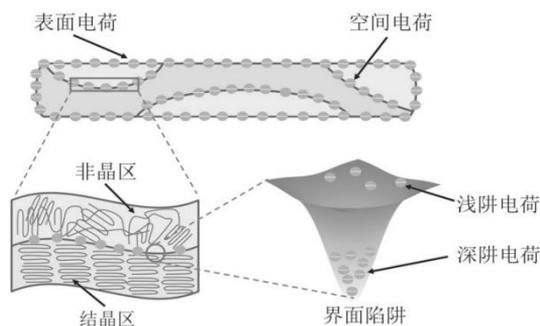


图4 驻极体电荷存储模型

2.2 静电存储性能的影响因素

2.2.1 驻极体材料

驻极过程中，均可通过添加驻极体材料来提高非织造布的静电存储性能。典型的无机驻极体电气石材料有二氧化硅（ SiO_2 ）、钛酸钡（ BaTiO_3 ）、钛酸镁（ MgTiO_3 ）、钛酸锶（ SrTiO_3 ）等钛酸盐和各类滑石。Tischenko 等研究发现，对 SiO_2 进行表面化学处理后，能制备具有电荷存储稳定性高的驻极体。Shim 等通过加速衰减测试分析发现，添加大于 1% 的 BaTiO_3 能显著提高 PP 的电荷存储稳定性。刘凡等通过复合 SiO_2 纳米颗粒/聚氨酯（PU）制备了高表面电荷量的纳米纤维膜，其在 15 d 后仍能保持 94.26% 的过滤效率和 29.71 Pa 的过滤阻力。蔡诚等通过添加纳米 SiO_2 驻极体进行改性，显著提高了 PLA 的结晶度，从而提高了复合 PLA 熔喷非织造材料的过滤效率。

有机驻极体材料复合或矿物驻极体与有机驻极体材料复合均可有效改善电荷存储性能，如聚偏氟乙烯（PVDF）和 BaTiO_3 、PVDF/高钛酸铅压电陶瓷（PZT）、PVDF/压电橡胶复合。王珊等利用静电纺丝技术制备了 PVDF/聚四氟乙烯（PTFE）纳米纤维膜，当 PTFE 纳米颗粒质量分数为 0.05%，电压为 40 kV 时，PVDF/PTFE 纳米纤维膜的表面电势可达 3.63 kV，电荷衰减率低至 17.5%，电荷存储稳定性有大幅提升。张玉霞等为了提高 PLA 的驻极体性能，采用有机改性蒙脱土（OMMT）熔融掺和 PLA 制备了 PLA 基纳米复合材料，结果表明 OMMT 改性的 PLA 是一种有效的可生物降解驻极体。Li 等制备了一种聚苯乙烯和 PVDF 双组分全聚合物驻极体纤维，二者产生的互补介电特性改善了驻极体效应，可增强驻极体性能和结构的连续性，实现了材料的高过滤效率（99.75%）和低过滤阻力（72 Pa），延长了使用寿命。刘妙峥等以一定比例

混合 PTFE 超微粉与 PP 切片,采用外置式电晕驻极技术制备驻极熔喷非织造复合材料发现,PTFE 可有效提高材料的静电存储能力。同时研究表明,骨骼、血液和血管等构成生物体的大分子都是天然生物驻极体材料,是一种新兴的驻极体,储存着较高密度的偶极子和分子束缚电荷。

2.2.2 驻极工艺

驻极工艺是使熔喷非织造材料变为驻极体材料的过程,其储存的电荷主要分为极化电荷和空间电荷。空间电荷易受环境介质影响,驻极熔喷非织造布会从环境中吸附极性分子,当极性分子进入驻极熔喷非织造布后,会作为脱阱电荷的载体,加快材料表面和内部电荷的衰减。驻极效果主要受充电电压、充电时间、充电温度、充电湿度、驻极距离等驻极工艺参数的影响。

姚翠娥等研究了驻极工艺参数对 PP 熔喷非织造布表面静电势衰减的影响,结果表明:熔喷非织造材料表面静电势随充电电压和充电时间的增加而增加,随充电距离减小而增加;环境湿度升高可加快材料表面电荷衰减速率。Ono 等利用激光诱导压力脉冲技术(LIPP)和热刺激去极化电流法(TSDC)研究了不同充电温度对 PP 材料驻极体电荷空间和能量分布的影响,研究发现当充电温度高于 80 °C 时,PP 内部形成大量电荷;随着充电温度的升高,表面电荷易进入熔喷非织造布内部,提高电荷存储稳定性。宋聚平等探究了不同充电参数条件下,恒栅流电晕充电与栅控恒压电晕充电的硅(Si)基 SiO₂ 薄膜驻极体空间电荷的存储稳定性发现,恒栅流电晕充电形成的具有较高浓度体电荷的 Si 基 SiO₂ 薄膜驻极体表现出较低的电荷存储稳定性。Zhang 等经过充电前退火处理、热充电和循环充电的热刺激充电方法进行充电,引起电荷重新捕获,制备了高过滤效率、低过滤阻力的非织造过滤材料,经 3 次循环充电处理后,材料的电荷存储稳定性大大提高,过滤效率高达 99.65%。Godrich 等通过对薄膜进行略低于玻璃化转变温度的预退火,可以在纳米水平上降低潜在电荷衰减,同时也提出了主要的电荷衰减机制为:热效应增强了表面陷阱中电荷载流子的释放,随后电荷迁移到背电极,为熔喷驻极材料电荷存储稳定性的研究提供了新思路。

Yovcheva 等研究了不同相对湿度对 PP 驻极体表面电荷衰减的影响,发现存放过程中的环境相对湿度是影响材料静电存储稳定性的关键。当 PP 材料在高湿度环境存储时,湿度越大电荷衰减速率越快。Liu 等利用电晕电荷制备驻极体熔喷非织造布,系统研究了 24 h 内不同温度和相对湿度条件对非织造布结构、形貌、过滤性能和表面电位的影响发现:高温会导致电荷逃逸,降低静电吸附效果。在相同温度下,增加相对

湿度会加速电荷释放,使过滤效率下降更多,因此,为了保证防护效果,建议从原料到最终使用的各个环节,都应避免驻极体熔喷过滤材料在高温高湿条件下进行。

大气压力会影响 PP 材料的电荷衰减速率,压强越低,材料的电荷衰减越快。Ikezaki 等探究了不同大气压力(不同真空度环境)条件下 PP 驻极体的电荷衰减性能发现:驻极体材料储存环境的真空度越高,电荷衰减速度越快。

2.2.3 聚合物晶体结构

晶相结构与材料的静电存储性能密切相关,熔喷非织造布存在大量晶相和非晶相结构,结晶区与结晶区之间、结晶区与非晶区之间的电导率存在的差异形成了界面陷阱,可用于捕获空间电荷。

Kilic 等采用退火处理技术探究退火温度对 PP 纤维充电性能和表面形貌的影响,经退火处理后 PP 纤维表面结晶度高,静电存储稳定性好。Yovcheva 等研究了 γ 射线对 PLA 结晶状态的影响, γ 射线辐照的 PLA 材料经电晕充电后,改变了 PLA 的结晶状态,增加了陷阱电荷的数量,使表面电位明显高于未辐照 PLA 材料。

结晶尺寸也是影响 PP 驻极体材料静电存储性能的因素之一。Thyssen 等研究了 PP 球晶尺寸对材料静电存储稳定性的影响,发现电荷衰减速率随材料结晶尺寸的减小而变慢,静电存储稳定性也随着结晶尺寸的减小而提高。Zhang 等研究了硬脂酸镁(MgSt)对 PP 熔喷非织造材料电荷存储稳定性的影响,电荷增强剂 MgSt 的引入提高了 PP 的结晶度,减小了 PP 的晶体尺寸,有利于电荷的稳定。

3 驻极熔喷非织造布发展前景

3.1 多种驻极技术复合改进

驻极处理工艺能显著提升熔喷非织造布的电荷存储稳定性和过滤效率,是熔喷制备工艺中提高过滤效率的关键技术,多重驻极处理技术的结合更能进一步提高熔喷布的过滤效率和综合性能。通过设备改进从而实现电晕驻极、静电纺丝、热极化、低能电子束轰击、水驻极充电等多种驻极技术的复合,有效提高熔喷非织造布的电荷分布均匀性及驻极效果。

3.2 优化驻极体材料

驻极体材料是提高熔喷非织造布电荷存储稳定性的关键原料,单一驻极材料由于

缺陷、氧化、降解、污染等原因，易导致表面性质的变化，影响驻极电荷的存储稳定性，导致电荷衰减。通过将无机、有机和高分子等多组分材料进行共混，制备的驻极熔喷非织造布能够更好地保留各组分材料本身的驻极性能，实现互相补充，提高熔喷非织造布的表面电荷密度、过滤性能及抗菌性能，成为今后的一个重要发展领域。

3.3 驻极熔喷非织造布制备新技术改进

改进熔喷设备和生产工艺、提高产品性能和生产效率，可以有效促进熔喷非织造布的发展。新技术改进的主要手段包括熔喷设备喷丝头改进、不同工艺复合等。多喷头技术和特殊结构的喷嘴使单一的聚合物原料多样化、截面纺丝异形化，可提高熔喷非织造布产量；采用特殊结构的波形喷嘴或叠片式熔喷模头可以制备纳米级熔喷纤维；主喷嘴协同辅助喷嘴，可延缓气流和温度衰减速度，充分拉伸聚合物熔体，有效降低纤维直径。同时，熔喷工艺可以与水刺、针刺以及缝编等非织造工艺和驻极工艺结合，通过技术复合实现熔喷材料的多功能化。

总体而言，熔喷非织造布除了在新材料开发及技术改进方面会有广泛的应用前景，随着信息化、数字化技术的进步与制造强国进程的加快，智能化驻极熔喷非织造产品也将成为发展的新趋势。

4 结束语

随着全球传染性疾病的不断爆发，人们的健康、安全和防护意识逐渐增强，对防护用品的品质要求愈来愈高，研究与开发具有电荷存储稳定的驻极熔喷非织造布成为亟待解决的科学问题，这对促进我国加强应急公共卫生安全建设具有重要意义。目前，驻极熔喷非织造布主要利用的是静电驻极和水驻极工艺，静电驻极制备方法研究者取得了一些积极成果，但在水驻极的研究尚缺乏研究。未来，随着新型材料和技术的研制，使用寿命更长、功能多样、舒适性好的驻极熔喷非织造布将在过滤材料、阻隔材料及医用材料等领域取得更广泛的应用。

来源：纺织学报 2023 年第 12 期

改善超纤革用非织造布力学性能的研究进展

李佳馨 钱晓明 朵永超 郭寻 唐孝颜

(天津工业大学纺织科学与工程学院)

一直以来,天然皮革因其透气柔软、强度较高等优点而被广泛使用。但是随着人们动物保护意识的加强,天然皮革制品产量愈发减少且价格高昂,为满足需求,制出大量成本较低、性能较好的天然皮革替代品至关重要。在人们的不断探索下,皮革替代品先后经历了人造革、合成革和超细纤维合成革阶段。其中,超细纤维合成革简称超纤革,是目前世界上最接近天然皮革的合成革,它以超细纤维制成的非织造布为基材,复合浸渍聚氨酯浆料。因为超细纤维非织造布纤维直径细化且具有三维网络结构,聚氨酯浆料会形成多孔结构,所以超细纤维合成革真正模拟了天然皮革的结构与形态,其性能也非常接近天然皮革,甚至耐化学、耐腐蚀等性能都已经超越了天然皮革。

超纤革用非织造布与聚氨酯浆料都是超纤革的重要组成部分,它们的性能对超纤革的性能起着重要的决定作用。其中,超纤革用非织造布大多以海岛短纤或橘瓣长丝超细纤维为原料,经针刺或水刺加固等工序制备而成。力学性能作为超纤革的一项重要性能,决定了超纤革的应用范围。为了获得力学性能更加优异的超纤革,制备出质量更好的超纤革用非织造布,找出并探讨各因素对非织造布的影响至关重要。

本文主要从纤维原料、针刺工艺与水刺工艺三方面因素出发,分析纤维强度与断裂伸长率、纤维线密度、纤维长度、纤维卷曲度,针刺密度、针刺深度与水刺压力对非织造布力学性能的影响,为超细纤维合成革的制备提供参考。

1 纤维对超纤革用非织造布力学性能的影响

纤维是组成非织造布最基本的原料。纤维本身的物理机械性能对非织造布的力学性能影响很大。同时,由于要进行后续的加固工序,纤维的影响规律也受针刺或水刺

等加工工艺的影响。

1.1 纤维强度与断裂伸长率

非织造布的拉伸断裂和撕裂，可以看成是纤维自身的断裂和纤维之间的滑移。在同样的加固工艺与参数下，只提高纤维原料本身的强度与断裂伸长率，也能明显地改善非织造布的断裂强度和撕裂强度。纤维强度越高，非织造布的物理机械性能就越好；而纤维的断裂伸长率越大，纤维的韧性越好，在加固过程中纤维的断裂损伤越少，短绒越少，纤维缠结就越牢，从而使非织造布的力学性能更好。

1.2 纤维线密度

纤维线密度影响非织造布力学性能主要靠纤维间交缠抱合产生的相对滑移阻力。一般来说，纤维线密度越小，纤维的抗弯刚度越小，纤维就越容易缠结，且在相同面密度下，纤维的线密度降低，单位面积的纤维根数增加，纤维之间的接触点和接触面积也增加，纤维间的交缠抱合与相对滑移阻力越强，非织造布强度就越高。

胡锦涛选用聚乙烯（PE）/聚酰胺 6（PA6）为原料，40/60 为海岛比，将后纺工艺牵伸倍数分别设置为 2.0、2.4、2.8、3.2 和 3.6，纺制不定岛纤维，分别制成非织造布，测其物理机械性能，发现纤维的牵伸倍数越大，纤维线密度越低，非织造布的剥离强度、撕裂强度、断裂强度就越高，断裂伸长率越低。Li 等以聚对苯二甲酸乙二醇酯（COPET）/聚酰胺（PA）海岛纤维为原料，针刺加固后在 NaOH 溶液中进行碱减量处理，制备超细纤维非织造布。发现完全碱处理后，平均纤维直径由 23.65 μm 减小到 3.95 μm ，并且处理后试样的抗拉强度明显高于未处理试样，纵向（MD）和横向（CD）的抗拉强度分别提高了 18.65%和 43.82%，但处理后试样的撕裂强度低于未处理的试样。减量后，非织造布撕裂强度可能会因为相同面积内纤维数量减少而降低，有时还会因非织造布收缩，出现强度略有回升的现象。当然，纤度过细，纤维自身强度降低，非织造布拉伸强度也会随之降低。Duo 等采用中空橘瓣超细纤维与聚丙烯腈静电纺纳米纤维混合制备超细纤维合成革基布（MSLB），研究了不同直径的纳米纤维对 MSLB 性能的影响。结果表明，纳米纤维的加入降低了 MSLB 的拉伸强度和断裂伸长率。虽然纳米纤维的添加增加了非织造布密度，使纤维之间的缠结变紧密，与未加入纳米纤维的非织造布相比，加入 200nm 纳米纤维的非织造布撕裂强度提高了 105.76%。但是，因为纤维强度过小，所以拉伸强度和断裂伸长率分别下降了 40.55%和 23.22%。而且纤维过细，后续加固工艺也可能难以进行，会损伤纤维，使强度更低。所以，为获得

更优力学性能的非织造布，应多方面考虑，合理调控纤维线密度。

1.3 纤维长度

理论上来说，纤维长度越长，非织造布纤维间的接触点与缠结点越多，抱合力越强，纤维间相互移动的阻力增大，非织造布的强度大，且非织造布结构稳定，不易变形。同纤维线密度一致，纤维过长也不利于加工工序的进行，可能会导致铺网不匀的现象，影响非织造布质量。

Tabor 等对中空橘瓣纤维采用方差分析法，分析 2.54~15.24 cm 不同纤维长度制成的水刺非织造布性能，发现纤维长度越长，非织造布确实缠结越紧密，固相体积分数（SVF）越高，纤维长度为 15.24cm 的非织造布比 2.54cm 的非织造布 SVF 增加了近 6%，透气性减少了约 31.25%，但非织造布顶破强度变化不大，特别是在 5~15 cm 纤维长度范围内，顶破强度不随纤维长度而变化。分析原因，是因为水力缠结过程中虽然结构没有显著固结，但也有足够的缠结和纤维间的摩擦力来实现足够的强度。所以，纤维长度影响非织造布力学性能规律需根据实际加工参数探讨。

1.4 纤维卷曲度

卷曲度小的纤维，纤维表面平直光滑，纤维间的摩擦阻力小，不利于纤维相互抱合缠结，可能会导致成网困难或纤网均匀度差，制成的超纤革用非织造布强度小；卷曲度大的纤维，纤维间的滑移阻力增大，有利于纤维相互交缠，制得的非织造布强度高。

Duo 等制备了高收缩聚酯（HSPET）/PA6 中空橘瓣水刺超细纤维非织造布，对其进行热处理后，HSPET 纤维出现卷曲，比较 HSPET/PA6 非织造布热处理前后的性能，发现热处理后非织造布的断裂强度和撕裂强度都得到了改善，其中纵、横向断裂强度最高提升了约 17%，撕裂强度提升了约 10%。封严将 HSPET 纤维与涤/锦海岛复合纤维混合制成针刺非织造布，用 NaOH 溶液在 95℃ 对其进行开纤处理，得到超纤革针刺非织造基布。研究发现，由于高收缩纤维在 95℃ 条件下受热收缩卷曲，使得纤维更紧密地缠结在一起，经 NaOH 开纤处理后的针刺非织造布，当海岛纤维与 HSPET 纤维体积比为 5:5 时，断裂强度最多增大近 8 倍，撕裂强度最多增大近 10 倍。胡锦涛选用聚乙烯/聚酰胺 6 为原料，40/60 为海岛比，纺制卷曲度为 6 个/2.5cm、10 个/2.5cm、14 个/2.5cm、18 个/2.5cm、22 个/2.5cm 的定岛纤维，分别制成针刺非织造布，测其性能，发现随着纤维卷曲度的增加，非织造布的剥离强度与撕裂强度不断提高，纤维卷

曲度为 22 个/2.5cm 的非织造布与 6 个/2.5cm 的非织造布相比,撕裂强度提高了约 40%,剥离强度提高了约 54%,而非织造布的断裂强度基本无变化,断裂伸长率不断降低。

当然,太多的卷曲也可能会导致纤维抵抗外力不发生形变的能力增强,使得针刺加固效果变差,纤维间的缠结度降低或加工过程中因缠结度过高,出现纤维被刺断的现象,这些现象都会导致非织造布强度的降低。所以,也要根据需求合理调控纤维的卷曲度。

2 针刺工艺对超纤革用非织造布力学性能的影响

针刺加固机理是利用带倒钩的刺针对纤网进行反复穿刺,将纤网表面的纤维带入并留在纤网内部,使纤网中的纤维互相缠结,从而形成具有一定强度的非织造布。一般来说,海岛短纤采用针刺加固的方法,但有时也会由于特殊需要对橘瓣长丝进行先水刺后针刺。非织造布的结构决定其性能,而针刺密度与针刺深度是影响针刺非织造布结构的两个主要参数。

2.1 针刺密度

针刺密度是指纤网单位面积内所受到的针刺数,计算公式(1)如下:

$$D_n = \frac{N_n F}{V_c} \times 10^{-4} \quad (1)$$

式中: D_n ——针刺密度,刺/cm²

N_n ——植针密度,枚/m

F ——针刺频率,刺/min

V_c ——纤网输出速度, m/min

一般说来,针刺密度越大,纤维缠结越紧密,纤维间摩擦滑移阻力越大,非织造布的强度也越大,但达到一定的范围后,再增加针刺密度就会出现断针或对纤维造成损伤,使非织造布的强度下降。杜明兵对不同规格的低密度聚乙烯(LDPE)/PA6 海岛纤维,采用不同钩数的钩针,研究其在不同针刺密度与针刺深度下,制得的针刺非织造布剥离强度的变化趋势,发现总体上,随着针刺密度的增加,针刺非织造布剥离强度先增大后减小,且随着纤维原料、工艺参数的变化,非织造布剥离强度曲线的峰点位置不同。

对于橘瓣超细纤维来说,为了达到更好的开纤效果与节约成本,有时会先对纤维

进行水刺开纤，再对纤网进行针刺整理。由于先后受到水刺力与针刺力作用，非织造布力学性能会随针刺密度的增大而降低。钱么采用 PET/PA6 橘瓣型超细纤维，对其先水刺后针刺，发现在经过针刺之后，橘瓣纤维几乎完全开裂成超细纤维，开裂后的超细纤维细度范围大多数在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ ，并且开纤后非织造布纤维缠结更紧密，过滤效率更高，但由于受到过强的针刺力，纤维容易发生断裂，非织造布整体的力学性能降低。杨娜娜选用 PET/PA6 橘瓣型纤维，采用针刺道数为 3、4、5 和 6 道，分别对应针刺密度为 720、960、1200 和 1440 刺/ cm^2 ，探究针刺密度对橘瓣纺粘超纤革用非织造布力学性能的影响。结果表明，随针刺密度的增加，非织造布力学性能逐渐降低。针刺密度在 $720\sim 1200$ 刺/ cm^2 时，纵横向断裂强度的减小较缓慢，但当针刺密度增加到 1440 刺/ cm^2 时，断裂强度迅速减小，纵横强度达到最小值，分别为 $105.9\text{N}/5\text{cm}$ 和 $130.6\text{N}/5\text{cm}$ ，强度比最大值减小了 60% 左右。

2.2 针刺深度

针刺深度是刺针穿刺加固纤网时，刺针穿出纤网外的长度。针深增加，纤维之间缠结更充分，非织造布强度增大；但针深过深，会使纤维断裂，非织造布强度降低。宗丽华选用海岛比为 3:7 的 COPET /PA6 海岛纤维，采用不同针刺深度制备针刺非织造布，发现随着针刺深度的增加，非织造布的断裂强度、撕裂强度等都逐渐增大，达到峰值后又逐渐下降，断裂伸长率随针刺深度的增加而减小。同针刺密度相同，对于橘瓣纤维来说，由于先后受到水刺力与针刺力作用，而针刺力较刚性，冲击力较强烈，导致橘瓣针刺非织造布力学性能会随针刺深度的增大而降低。

3 水刺工艺对超纤革用非织造布力学性能的影响

水刺加固的机理是极细的高速水射流，穿过纤网后再被纤网下的托网帘反射形成许多反射水射流，在水射流与反射水射流的作用下，纤网中的纤维发生位移，相互穿插、抱合，形成无数的缠结结构，从而赋予纤网一定的力学性能。与针刺加固相比，水刺加固是对纤维原料进行了柔性缠结，所以橘瓣长丝采用水刺开纤加固。同样的，水刺压力作为水刺工艺的一项主要参数，也会影响水刺工艺的加固效果进而影响非织造布的结构与性能。

一定范围内，非织造布的强度随水刺压力的增大而增大，是因为水刺压力增大，纤维的相互缠结更紧密，并且水刺使得橘瓣纤维开纤，纤维线密度更小，接触面积更

大，相互间摩擦阻力更大。但超过这一范围后，水刺压力过大会损伤纤维，使纤维强度降低，非织造布强度降低。赵宝宝采用水刺技术制备了 80、120、160g/m² 不同面密度的 PET/PA6 中空橘瓣超细纤维水刺非织造布，分析了水针压力对力学、透气透湿等性能的影响。结果表明：面密度一定时，随着水针压力从 15 MPa 增大到 22 MPa 再到 28MPa，水刺非织造布的厚度逐渐减小，断裂强度先增加后减小，断裂伸长率先减小后增加，平均孔径减小，透湿透气性降低。其中面密度为 160 g/m² 的变化幅度最大，纵向断裂强度由 644N/5cm 增大到 762.33N/5cm，又降低到 546.67N/5cm，横向断裂强度由 351N/5cm 增大到 375N/5cm，又降低到 354N/5cm。

对于海岛纤维，黄族健采用 COPET/PA6 为原料，制备了海岛比为 70/30 的定岛 37 岛海岛超纤，对其进行水刺加固，在优化工艺过程中，采用高水压，促进了铺网层间纤维的缠结能力，提高了产品的剥离强度。他在海岛超纤层的中部复合一层针刺锦纶长丝基布，然后对其进行针刺处理，得到了针/水刺复合基布，融合了针刺、水刺工艺的优点，提高了海岛超纤革基布的表面平整度、密度和物理机械性能，并改善了产品的手感。由于针刺短纤非织造布表面会有松散的纤维末端伸出，并且刚性刺针可能会在非织造布表面留下较大的针痕。也有学者将针刺工艺与水刺工艺结合，将水刺工艺作为针刺工艺的后整理，用柔性水射流对非织造布进行修面整理，从而达到提高非织造布过滤、力学等性能的目的。所以，对于海岛超纤革，针/水刺复合工艺的使用可能会改善超纤革用非织造布的力学性能。

4 结语

(1) 随纤维强度与断裂伸长率的增大，超纤革用非织造布强度逐渐增大。(2) 随纤维线密度、长度、卷曲度的增大，非织造布强度逐渐增大，增大到一定范围后，反而逐渐减小。(3) 随针刺密度、针刺深度和水刺压力的增大，非织造布强度逐渐增大，增大到一定程度后又逐渐减小。对于针/水刺复合技术，橘瓣长丝先水刺后针刺，制得的水刺非织造布强度随针刺密度与针刺深度的增大而减小；对海岛针刺非织造布适当进行水刺整理，可以改善针刺非织造布的力学性能。

来源：皮革科学与工程 2024 年第 03 期

水刺非织造布在遮阳领域的应用及其技术展望

刘双营 杨景璇

(山东永信非织造新材料股份有限公司)

随着人们对美好生活的追求以及对绿色节能降碳期望的不断增强，遮阳产品的使用越来越普遍。在各种遮阳产品中，遮阳窗帘作为家居常用用品深受关注。其中，由非织造布复合而成的蜂巢帘因隔热节能、吸声降噪、调光便捷和美观典雅的特有优势，在国外遮阳市场具有极高的渗透率；并且蜂巢帘、香格里拉帘在阳光房、宾馆、别墅等建筑领域得到了大力推广。

近几年，随着国内办公、家庭建筑舒适房的改善，以及国家“双碳”目标的实施，我国遮阳窗帘特别是蜂巢遮阳帘在现实生活中开始大量使用。蜂巢帘的使用不仅使人们在享受阳光的同时不受紫外线侵袭，而且能阻挡过强日光照射，保护室内昂贵装饰和家具；除此之外，蜂巢遮阳帘的中空结构能有效减少室外寒气及热量的进入，保证室内维持在较为舒适的温度。因此，别墅、豪庭宅院、露台、阳光房、居室窗户或者商业步行街、咖啡吧、茶坊等场所都广泛利用蜂巢遮阳帘来体现庭院生活的休闲理念。在各种材料中，水刺非织造布作为蜂巢遮阳帘的主要原材料备受瞩目，其发展也十分迅速。下面将对非织造布在蜂巢遮阳帘的应用及发展趋势进行简要概述。

1 蜂巢遮阳帘用非织造布的分类

非织造材料因外观、结构和功能的多样性，在环保过滤、医疗卫生、建筑、家居等领域得到广泛应用。非织造材料的制备过程包括成网、加固、后整理三个步骤。从成网方式上可以将其分为四类：梳理成网、气流成网、纺丝成网以及湿法成网；加固方式通常有机械加固（如水刺、针刺）、化学黏合（如喷淋、浸渍、印花）及热黏合（如热风、热轧）等；后整理方式包括涂层（涂层剂如聚丙烯酯类、聚氨酯类、有

机硅类)、功能整理(如抗菌防霉、抗紫外线、阻燃拒水)和复合(如与镀铝膜复合、地板革基布)。

蜂巢遮阳帘用非织造布可根据其加固方式分为以机械加固为主的水刺法非织造布、以热黏合加固为主的纺粘热轧法非织造布。

1.1 水刺法非织造布生产流程

水刺非织造布是指由短纤维通过梳理成网后,经过高压水射流穿刺在纤网后使纤维相互抱合、缠结,再经过烘干后形成的具有一定强力的非织造布。

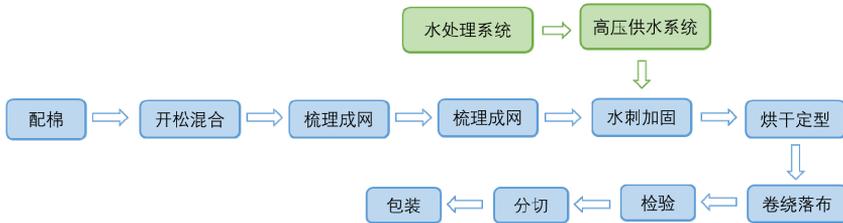


图 1 水刺非织造布生产流程图

1.2 纺粘热轧法非织造布生产流程

纺粘热轧法非织造布是指高分子聚合物经过熔融纺丝成网后,利用一对或两对加热钢辊对纤网进行加热加压导致纤网中部分纤维熔融、流动、扩散而产生黏结,纤网冷却加固而成的非织造布。

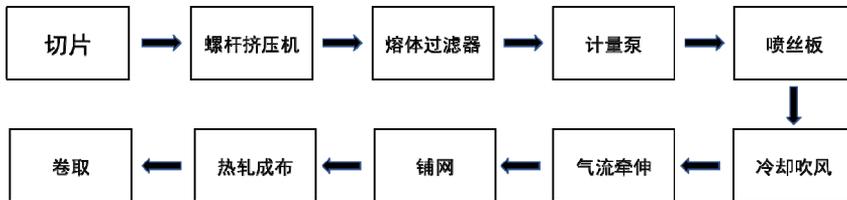


图 2 纺粘热轧法非织造布生产流程图

2 蜂巢遮阳帘的特点及非织造布的选择

2.1 蜂巢遮阳帘的特点与应用

蜂巢遮阳帘顾名思义是由蜂巢形状结构制作而成，也称为“风琴帘”，是一种三维立体结构遮阳装饰用品，如图 3 所示。采用优质涤纶、丙纶纤维非织造材料，具有良好的抗皱性和保形性。由于采用蜂巢状中空结构，具有良好的隔热隔声、抗紫外线的功能。既能保持室内温度还能降低空调能耗，减少温室气体的排放，实现冬暖夏凉和节能环保的效果；并且通过防静电处理的材料不黏附灰尘，容易清洗。蜂巢遮阳帘的特殊结构可使拉绳隐藏在中空层，实现伸缩功能，外观完美，还可设计为半遮光、全遮光的夜帘；也可进行电动智能化设计，实现开启和闭合，达到有效调节光线强度、创造适宜光线的目的。除此之外，也可以进行个性化定制，在窗帘上印刷各种颜色、图案，美观独特。蜂巢帘的伸缩特性使其还可以应用于推拉门、推拉窗、天棚、玻璃/光电幕墙、旋转感应门等领域。在欧美地区的别墅阳光房、星级酒店以及办公场所应用广泛，目前该产品在我国也得到迅速发展（如图 4 所示）。



图 3 蜂巢遮阳帘结构



图 4 蜂巢遮阳帘的应用场景

2.2 蜂巢遮阳帘的加工制作流程

蜂巢遮阳帘的制作工序较多，工艺复杂，主要加工制作设备是拉条机，但还没有形成统一标准。蜂巢遮阳帘的制作工艺流程如下：

具有一定风格的非织造布→复合（全遮光帘需要与镀铝膜复合）→印色（条形状）→分切（幅宽 2.5~7cm）→折叠拉条涂胶→调验色（色调变化一致）→热烘黏合定型（145℃，30min）→展开检验→装配组合成帘。

整个工序对非织造布提出了严格的要求，包括布面风格、杂质异物、硬挺度、色差、厚度等。

2.3 蜂巢遮阳帘用非织造布的性能选择

2.3.1 布面风格

对蜂巢遮阳帘展开透光检验，需要布面均匀、无斑块、无阴影，这就要求非织造布生产过程中纤维成网要均匀，无明显云斑，水刺要无针痕，因而对水质及其洁净度、水针板通透性提出了较高的要求，同时蜂巢帘布面要求纹路清晰、细腻，水刺工艺的特性恰恰符合这一特点。因此从布面风格来看，水刺法非织造布比纺粘法表现更出色。

2.3.2 布面无杂质异物

蜂巢遮阳帘用非织造布对机械成网工艺提出了更高要求，不仅要优选高清洁纤维原料，杜绝僵丝、并丝、异纤，还要保证做到生产机台定期清洁，并防止开清梳理设备管道粘、缠、挂、堵，做到定时清理积尘积屑，确保无杂质异物。一般在线异物检测装置精度需要设置在 0.4mm²，避免做成窗帘后会出现斑点阴影，尤其在印色后布面斑点会更加突出，影响美观。

2.3.3 布面硬挺度

蜂巢遮阳帘制作过程中需要折叠拉条定型，因此需要非织造布具有一定的硬挺度，以便于拉条机折叠整齐。硬挺度偏低，不仅会影响生产效率，而且会出现上侧巢孔拉开而下侧仍旧折叠的现象；同时蜂巢帘展开时需要保持上下均匀地张开，硬挺度过大，自然悬垂长度不够，甚至会出现扭曲现象。因此非织造布要保持均衡的硬挺度。这就要求对非织造布进行涂层浸胶后整理时要均匀，若选择离线涂层，浸胶前可以对布面杂质、异物、浆皮等进行及时处理，同时可以减少在线涂层因黏合剂浓度变化带来前后硬挺度差异。

2.3.4 厚度均匀平整

厚度均匀是蜂巢遮阳帘用非织造布的关键指标之一。蜂巢遮阳帘要求厚度薄，不同单位面积质量（ $30\sim 70\text{g}/\text{m}^2$ ）的非织造布厚度一般控制在 $0.12\sim 0.25\text{mm}$ 之间，每种规格偏差 $\pm 0.02\text{mm}$ ，做到厚度均匀一致。水刺非织造布由于其工艺特点，落布厚度会超过 0.30mm ，因而需要对非织造布进行轧光整理，整理过程中要防止布面打折、局部厚薄不匀状况的发生。

2.3.5 色差

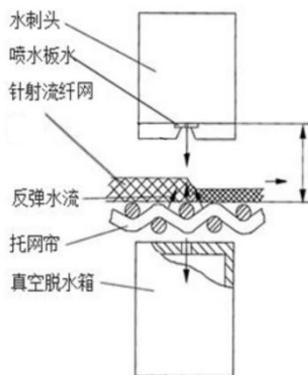
非织造布要有高洁白度，涂层浸胶过程中需要经过荧光增白整理，同时防止出现色差、黄变现象，以确保后续印色鲜艳悦目、色调一致。

3 水刺非织造布和纺粘热轧非织造布的性能及用于蜂巢帘时的表现

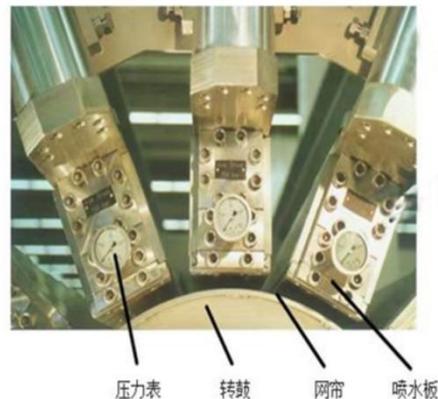
3.1 工艺原理比较

3.1.1 水刺非织造布工艺原理

水刺非织造布采用的原料是高清洁涤纶短纤，经开松梳理成网，再经高压水针穿刺纤网，纤维缠结抱合，经烘干定型，最后经过涂层浸胶、轧光整理，得到水刺非织造布。生产设备如图 5 所示。



(a) 水刺设备示意图



(b) 水刺设备实物照片

图 5 水刺设备图

水刺非织造布根据其成网结构又可分为直铺和交铺水刺非织造布。前者布面均匀、纹路清晰、印色图案美观；后者有纵横向强力均匀、横向强力高等优势，但存在铺网搭接边阴影。目前直铺水刺非织造布由于其纹路清晰、印色美观一致，而得到越来越多的用户认可。

3.1.2 纺粘热轧非织造布工艺原理

纺粘热轧非织造布是由 PP 或母粒经过熔融挤出、纺丝、冷却、牵伸铺网后，经热轧黏合固结制成。纺丝成网热轧非织造材料的特点是由连续长丝随机组成纤网，有很好的物理机械性能，这是短纤维梳理成网非织造材料无法相比的。生产设备如图 6 所示

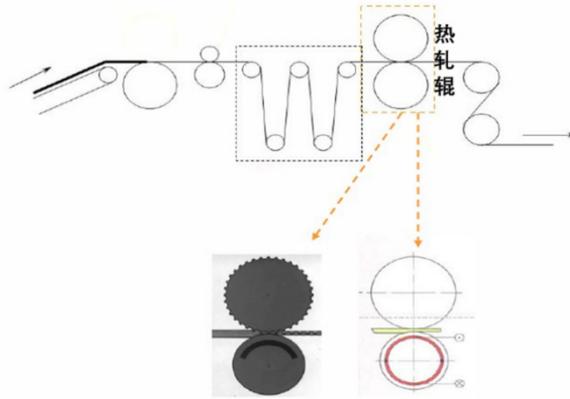


图 6 纺粘热轧法设备示意图

3.2 用于蜂巢遮阳帘的性能比较（表 1）

表 1 水刺非织造布与热轧非织造布用于蜂巢遮阳帘的性能对比

项目	水刺非织造布	纺粘热轧非织造布	性能分析
原料	聚酯纤维 PET，软化点温度 235℃	聚丙烯 PP 或 PET 纤维，PP 软化点温度 145℃	PET 强力高、耐日晒，适合蜂巢帘后加工中高温黏合定型，不易粘连
加工方式	水针机械加工，不损伤纤维	热熔加工，流程短	前者设备复杂，流程长，水质要求高；后者占地面积小，耗能低
布面风格	纹路清晰、透光均匀，手感柔和	长丝成网，纤维分散不匀，布面更轻薄	前者美观典雅，应用广泛；后者横向强力高，不易变形
印色效果	布面平整，印色匀整	杂纹多，散乱，无规律	前者美观典雅，印色鲜艳悦目，视觉效果好

4 蜂巢遮阳用非织造布技术的发展趋势

4.1 轻量化设计

轻量化设计包括结构优化设计、新材料选用和多学科综合优化设计。非织造布越薄，蜂巢遮阳帘折叠压缩后所占用的空间越小，因而非织造布轻薄化是目前水刺技术攻关的方向之一，需要进一步提高产品纤维的细旦化、轧光均匀性。目前国内外水刺生产线产品单位面积质量很难突破 $25\text{g}/\text{m}^2$ ，这主要与梳理机均匀成网及水刺缠绕加固技术有关。同时蜂巢帘非织造布还需通过涂层浸胶技术达到一定的硬挺度，一般成布最低单位面积质量也要达到 $30\text{g}/\text{m}^2$ 。

4.2 功能化设计

4.2.1 阻燃整理

纤维与高温热源接触吸收热量后发生热裂解反应，热裂解反应生成易燃气体，易燃气体在空气中燃烧，燃烧产生热量被纤维吸收后又促进纤维连续热裂解和进一步燃烧，形成一个循环。基于以上原因，遮阳用非织造材料一般采用抗老化的聚酯纤维，同时为提升遮阳非织造材料的硬挺度，需要进行黏合剂涂层浸胶。丙烯酸酯聚合物作为黏合剂具有优异的机械强度、耐水性、耐气候性等，但这类聚合物最大的不足是极易燃烧，如大量使用的聚甲基丙烯酸甲酯，其氧指数只有 7.5，一旦燃烧很难熄灭。目前还没有完全适用于非织造布的可复配的阻燃剂和黏合剂，阻燃剂和黏合剂的相容性已成为生产应用中一个迫切需要解决的问题。

4.2.2 拒水整理

拒水整理是指通过改变纤维表面的性能，使纤维由亲水性转变为疏水性的处理方式。经过拒水整理的织物纤维间仍保留着大量孔隙，这样可使织物既透气又不易被水润湿。经过拒水整理的遮阳材料，可以防止雨水侵蚀。在各种拒水整理剂中，有机硅类拒水剂既有良好的拒水、耐洗性，又有良好的手感，对生产无不良影响，是较为理想的拒水整理剂。但经有机硅拒水整理后的蜂巢遮阳帘用非织造布，其硬挺度会降低，生产成本增加。

随着国内外纺织品的发展和生活需要的提高，人们对开发新型、高效纺织整理剂的需求越来越强烈，开始寻求多种性能合一的产品。即在具有拒水功能的同时，又具有耐磨、抗污染、易去污或阻燃等功能，这就要求业内要加大力度解决多种整理剂合

用出现的相容性难题。

4.2.3 抗静电处理

静电现象会使非织造布吸附空气中的灰尘，给清洁带来较多困难。特别是对于香格里拉窗帘来说，静电会影响窗帘的闭合效果，导致不美观。因此，抗静电整理也成为遮阳非织造布优选方案之一。目前较为常用的去静电方法是表面处理法，通过抗静电剂整理降低材料表面的比电阻，加速电荷逸散。抗静电剂根据其化学结构可分为阳离子型、阴离子型和非离子型。考虑到遮阳材料采用聚丙烯酸酯阴离子型，因而一般采用非离子型抗静电剂。随着科学技术的不断发展，新的抗静电方法不断问世，其中导电纤维的产生与发展为纺织品拥有永久和高效的抗静电性能提供了科学、合理的途径。

4.3 绿色节能

目前，国家提倡绿色制造，并提出了“双碳”目标，因此遮阳用非织造材料生产制造环节的绿色节能显得越发重要，特别是对后整理阶段各种助剂的添加、能耗的增加、废水的排放都提出了较高的要求。如何在做到绿色节能、高效高产的同时，还要注重节约资源、保护环境，实现行业可持续发展，是当前企业技术人员应该思考的问题。

5 结束语

水刺非织造布直铺及交铺在性能上各有千秋。直铺水刺布布面纹路清晰、克重均匀、无搭接边；交铺水刺布横向强力高，但搭接边处有云斑。目前国外蜂巢遮阳帘高端用户还是选择直铺水刺布为主，以体现更好的视觉效果。

蜂巢遮阳用非织造布生产工序多，技术含量高，质量的稳定性对后加工的制成率、美观度有较大的影响，因而，严格管控材料布面风格、厚度、色差、硬挺度等指标是生产的关键。同时随着人们生活水平和安全意识的提升，遮阳产品的安全性、节能环保、功能性也越来越受到关注。

再生纤维素非织造材料的性能对比分析

张帆 张东 郭翠彬 黄伟 李婷 程春祖 程敏

(中国纺织科学研究院有限公司生物源纤维制造技术国家重点实验室)

以再生纤维素纤维为原料制备的非织造材料相较于丙纶、涤纶等其他石油基纤维非织造材料,具有柔软度高、吸湿透气性好和可生物降解等优点,可用于面膜、擦拭纸巾、医用卫生等领域。目前再生纤维素非织造材料原料主要有棉、黏胶、铜氨纤维、Lyocell 纤维等。

Lyocell 纤维除了具有天然纤维本身的特性,如吸湿性、透气性、舒适性、光泽性、可染色性和可生物降解性外,还具有合成纤维强度高的优点。另外,制备 Lyocell 纤维使用的溶剂 *N*-甲基吗啉-*N*-氧化物(NMMO)可高效回收利用,生产过程无废气排放、无明显噪声,且废水排放量非常少,生产过程较为环保。但目前以 Lyocell 短纤为原料的 Lyocell 非织造材料生产成本相对较高。

本文使用的 Lyocell 长丝非织造材料,采用干喷湿法液流牵伸直接成网工艺制成,其具体流程为:纺丝液从喷丝板挤出后,经过一段气隙进入到凝固浴装置中,凝固浴装置为采用了特殊结构的矩形漏斗,纺丝液在凝固浴装置中完成凝固和牵伸。成形长纤维从凝固浴装置出来后直接落在铺网装置上,铺网装置在向前传动的同时做左右往复摆动,纤维最终在铺网装置上形成相互交错的纤网,再经过水刺、水洗、烘干、卷绕等后处理,制备出 Lyocell 长丝非织造材料样品。相较于短纤非织造材料,直接成网工艺省去了切断、烘干、开松、梳理等工序,流程短,设备投资少。

本文将 Lyocell 长丝非织造材料与 Lyocell 短纤、黏胶短纤、铜氨长丝 3 种非织造材料进行对比分析,测试 4 种非织造材料的微观形貌、结晶度、吸水性、透气性、柔软度、强度等性能,探究 Lyocell 长丝非织造材料的性能优势及其可应用的领域。

1 实验部分

1.1 实验材料

Lyocell 长丝非织造材料（面密度 38g/m^2 ，自制）；Lyocell 短纤非织造材料（面密度 38g/m^2 ，东纶科技实业有限公司）；铜氨长丝非织造材料（面密度 38g/m^2 ，日本旭化成公司）；黏胶短纤非织造材料（面密度为 38g/m^2 ，东纶科技实业有限公司）。

1.2 测试与表征

1.2.1 微观形貌结构观察

采用 S4800 型场发射扫描电子显微镜（日本日立公司）对 4 种非织造材料样品的微观形貌进行观察。使用 Image Pro Plus 6.0 软件（美国 Media Cybernetics 公司）观察样品的电子显微镜照片，取 50 根测量单根纤维直径，取平均值。

1.2.2 单根纤维性能测试

采用 D8ADVANCE 型 X 射线衍射仪（XRD）（德国布鲁克公司）对 4 种非织造材料样品的结晶性能进行分析测试，扫描的范围为 $10^\circ\sim 60^\circ$ ，扫描速度为 $0.02^\circ/\text{s}$ 。采用 Peakfit 软件（AISN 公司）进行分峰处理，计算纤维的结晶度。

分别从 4 种非织造材料中抽取单根纤维，采用 XQ-1C 型纤维强伸度仪和 XD-1 纤维细度仪（上海利浦应用科学技术研究所），分别测试 4 种纤维在干湿态下的断裂强度、断裂伸长率和纤维细度。

1.2.3 掉屑性能测试

将透明胶带分别与 4 种非织造材料黏合，然后剥离，过程重复 5 次，用黏下来的纤维质量和样品初始质量的比值来表示掉屑率，并使用显微镜（日本 OLYMPUS 株式会社）观察胶带上脱落的纤维。

1.2.4 吸湿性能测试

参照 GB/T 24218.2—2009《纺织品 非织造布试验方法 第 2 部分：厚度的测定》，使用 YG141 型数字式织物厚度仪（常州双固顿达机电科技有限公司）测试样品的厚度，预加压力为 100cN ，压脚面积为 $2000\mu\text{m}^2$ ，加压 10s。

非织造材料孔隙率计算公式为：

$$\rho = \frac{T}{\pi (d \times 10^{-6}/2)^2 \times 10000} \quad (1)$$

$$n = 1 - \frac{m}{\rho \sigma} \quad (2)$$

式中： n 为孔隙率，%； ρ 为纤维密度， g/m^3 ； σ 为材料厚度， mm ； m 为材料面密度， g/m^2 ； T 为纤维线密度， dtex ； d 为纤维直径， μm 。

参照 GB/T 12704.1—2009《纺织品 织物透湿性试验方法 第 1 部分：吸湿法》，使用 DH-450 型透湿试验装置（日本大荣公司），在温度（ 38 ± 2 ） $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度（ $90\% \pm 2\%$ ）的条件下对 4 种非织造材料样品的透湿率进行测试。

参照 GB/T 24218.15—2018《纺织品 非织造布试验方法 第 15 部分：透气性的测定》，使用 FX3300 型透气性分析仪（瑞士 TEXTEST 公司）对 4 种样品的透气性进行测试。

参照 GB/T 24218.6—2010《纺织品 非织造布试验方法 第 6 部分：吸收性的测定》中液体吸收量的测定方法，在每个样品上剪取 10 块尺寸为 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 的试样，测量试样的吸液率，计算公式如下：

$$LAC = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中： LAC 为吸液率，%； m_0 和 m_1 分别为吸液前后试样的质量， g 。

1.2.5 拉伸性能测试

参照 GB/T 24218.3—2010《纺织品 非织造布试验方法 第 3 部分：断裂强力和断裂伸长率的测定（条样法）》，在每个样品的纵横方向上分别裁取 20 块 $20\text{cm} \times 5\text{cm}$ 的长方形试样，使用 Instron 1122-5500 型强伸仪（英国 Instron 公司）进行拉伸试验。

1.2.6 服贴性分析

参照 GB/T 18318.1—2009《纺织品 弯曲性能的测试 斜面法》，使用 YG207 型织物硬挺度仪（南通三思机电科技有限公司）测试 4 种样品纵横方向上的弯曲长度。通过弯曲长度计算样品的抗弯刚度，抗弯刚度的计算公式为：

$$G = m \times C^3 \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中： G 为抗弯刚度， $\text{mN} \cdot \text{cm}$ ， G 越小，表明试样越柔软； m 为面密度， g/m^2 ； C 为试样的平均弯曲长度， cm 。

柔软度测试是指在规定条件下，用板状测头将试样压入狭缝一定深度（约 8mm）时，仪器记录试样本身的抗弯曲力和样品与缝隙处摩擦力的最大矢量之和，仪器显示值越小，说明试样越柔软。参照 GB/T 8942—2016《纸 柔软度的测定》，每个样品的纵横方向上分别裁取 10 块尺寸为 10cm×10cm 的试样，使用 ZRD-T1 柔软度测试仪（北京新月中科科技有限公司）对 4 种非织造材料样品柔软度进行测试。

2 结果与讨论

2.1 微观形貌结构分析

图 1 为 Lyocell 长丝、铜氨长丝、Lyocell 短纤、黏胶短纤 4 种非织造材料样品放大 30 倍的扫描电镜照片，图 2 为放大 800 倍的扫描电镜照片。

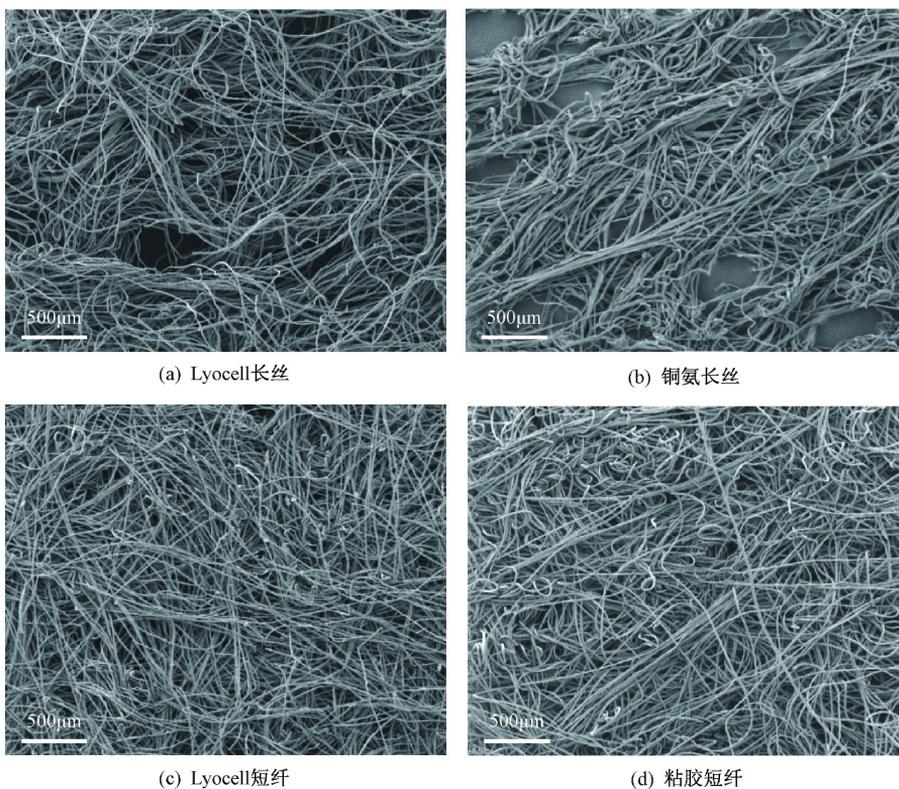


图 1 4 种非织造材料的扫描电镜照片（×30）

从图 1 可以看出, Lyocell 长丝和铜氨长丝非织造材料的纤维排布方式与 Lyocell 短纤和黏胶短纤非织造材料有较为明显的差别, 2 种长丝非织造材料的丝束呈“S”形交错排列, 而 2 种短纤非织造材料的丝束呈无规则的排布。这是铺网工艺的不同造成的, Lyocell 长丝和铜氨长丝非织造材料采用的是机械摆丝成网, 丝束成形后直接落在铺网机上, 并随着铺网机向前传动的同时做左右往复运动, 因此呈现出有规律的“S”形排列; 而短纤非织造材料采用的是气流梳理成网, 被切断的短纤维在铺网过程受气流作用, 纤维呈现出无规则的排列。

从图 2 可以看出, Lyocell 长丝非织造材料和 Lyocell 短纤非织造材料的纤维表面平滑, 结构平直; 铜氨长丝非织造材料纤维表面有数条轻微沟槽, 黏胶短纤非织造材料纤维表面有多条清晰的沟槽。

纤维的形貌差异与纤维的成形工艺有关, Lyocell 长丝和 Lyocell 短纤非织造材料纤维采用干喷湿法纤维制备工艺, 整个工艺流程简单, 纺丝液从喷丝板挤出后经过一段气隙, 喷丝头拉伸倍率较高, 可有效改善丝束出口膨胀现象, 初生纤维结构致密, 纤维光滑平直; 铜氨长丝和黏胶短纤非织造材料纤维采用湿法纤维制备工艺, 工艺流程较为复杂, 成形过程中影响纤维形貌的因素较多, 复杂成形过程中的不均匀性会对纤维的结构造成影响, 使得纤维表面呈现出不同程度的褶皱和沟槽。

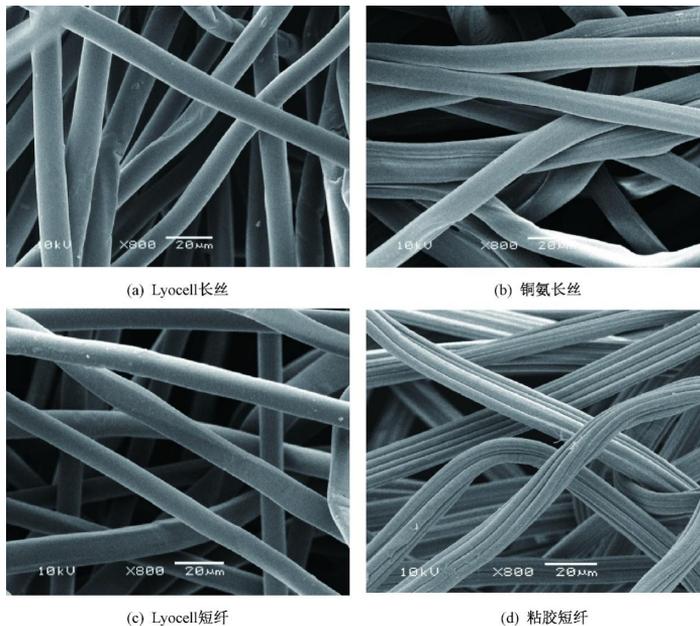


图 2 4 种非织造材料的扫描电镜照片 ($\times 800$)

2.2 单根纤维性能分析

对 4 种非织造材料单根纤维的强度和模量、结晶度进行测试，结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出，4 种非织造材料结晶度和单根纤维干态断裂强度大小顺序一致，即 Lyocell 短纤>Lyocell 长丝>黏胶短纤>铜氨长丝，这主要是由纤维制备工艺不同造成的，Lyocell 长丝和短纤采用干喷湿法纤维制备工艺，纺丝成形阶段纤维拉伸倍率比较高，纤维结构致密，结晶度较高，而黏胶短纤和铜氨长丝采用湿法纺丝，拉伸倍率低，纤维结构松散，结晶度低。

表 1 4 种样品单根纤维的性能分析

样品名称	结晶度	干态断裂强度/ (cN·dtex ⁻¹)	干态断裂伸长率/%	干态模量/ (cN·dtex ⁻¹)	湿态断裂强度/ (cN·dtex ⁻¹)	湿态断裂伸长率/%	湿态模量/ (cN·dtex ⁻¹)
Lyocell 长丝	60.2	3.84	14.4	72.28	3.04	14.1	24.52
铜氨长丝	28.7	1.04	21.1	35.53	0.66	33.1	1.78
Lyocell 短纤	62.5	3.98	10.8	88.60	3.08	11.5	24.71
黏胶短纤	34.6	2.09	23.1	38.36	1.22	21.6	4.75

从表 1 还可以看出，湿态下的 4 种非织造材料纤维的强度和模量均小于干态；铜氨长丝非织造材料湿态下纤维的模量下降得最多，下降了 95%；其次为黏胶短纤非织造材料，下降了 87.6%；Lyocell 长丝和 Lyocell 短纤下降较少，这是因为湿态下，水分子进入纤维无定形区，减弱了大分子间的结合力，分子链在外力作用下容易发生滑移，因此强力和模量下降明显。黏胶和铜氨的结晶度低，水分子进入后对大分子间作用力影响显著。

2.3 非织造材料掉屑性能分析

4 种非织造材料掉屑率结果如图 3 所示，显微镜观察胶带上脱落的纤维照片如图 4 所示。

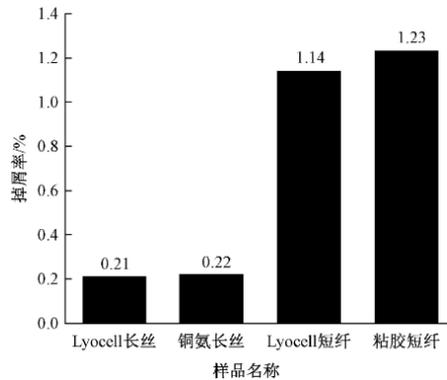


图3 4种非织造材料的掉屑率

从表3中可以看出, Lyocell长丝、铜氨长丝、Lyocell短纤、黏胶短纤非织造材料的掉屑率分别为0.21%、0.22%、1.14%和1.23%。Lyocell长丝非织造材料和铜氨长丝非织造材料掉屑率明显少于Lyocell短纤非织造材料和黏胶短纤非织造材料。从图4也可以看出, 相同面积内Lyocell短纤和黏胶短纤非织造材料的纤维脱落量远大于Lyocell长丝和铜氨长丝非织造材料, 这是因为长丝非织造材料的连续长纤维彼此交缠, 纤维不容易脱落, 而短纤非织造材料的短纤维间彼此缠结力较弱, 纤维更易脱落。

2.4 非织造材料的吸湿性能分析

4种非织造材料的孔隙率结果如表2所示, 4种非织造材料的孔隙率大小为Lyocell长丝>铜氨长丝>黏胶短纤>Lyocell短纤。材料面密度一定的情况下, 非织造材料的孔隙率与纤维直径和非织造布厚度有关, 直径越粗, 厚度越大, 材料孔隙率越大。

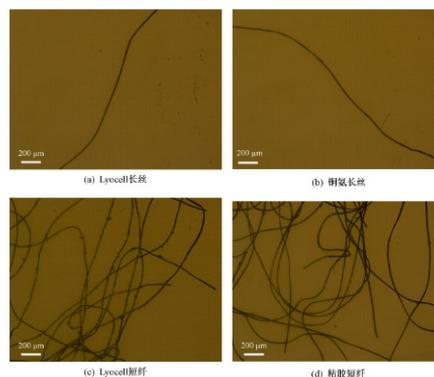


图4 4种非织造材料显微镜下掉屑性能

表 2 4 种非织造材料的孔隙率

样品名称	线密度/dtex	纤维直径/ μm	面密度/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$	厚度/mm	孔隙率/%
Lyocell 长丝	1.33	10.26	38	0.49	95.2
铜氨长丝	1.33	10.52	38	0.38	93.4
Lyocell 短纤	1.33	10.28	38	0.29	91.8
黏胶短纤	1.33	10.75	38	0.34	92.3

4 种非织造材料样品透湿率、透气率和吸液率的测试结果如表 3 所示。

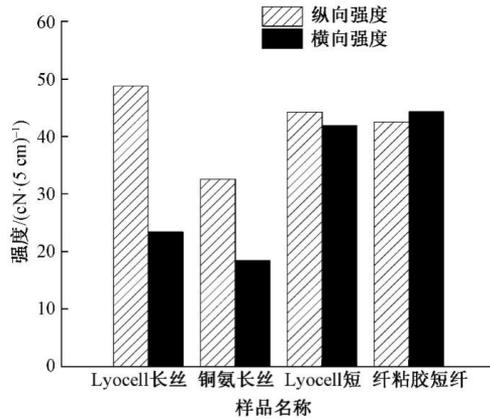
表 3 4 种非织造材料的吸湿透气性

样品名称	透湿率/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	透气率/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	吸液率/%
Lyocell 长丝	572	5 090	1 374
铜氨长丝	546	4 540	1 022
Lyocell 短纤	454	2 770	904
黏胶短纤	483	3 290	930

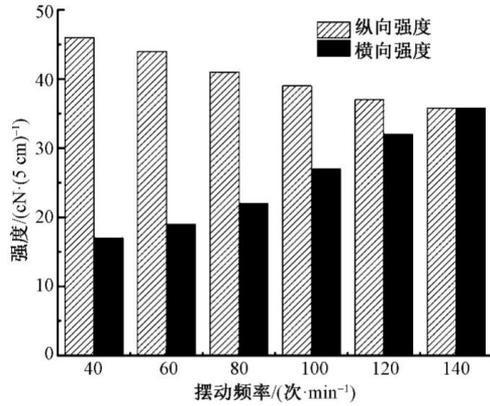
4 种非织造材料样品的透湿率、透气率和吸液率的规律是一致的，即 Lyocell 长丝 > 铜氨长丝 > 黏胶短纤 > Lyocell 短纤。非织造材料吸湿透气性规律与 4 种非织造材料孔隙率大小的规律一致。这是因为孔隙率越大，材料内部空隙距离越宽，水分子和空气更容易渗入，因此吸液率和透气率较高。

2.5 非织造材料的拉伸性能分析

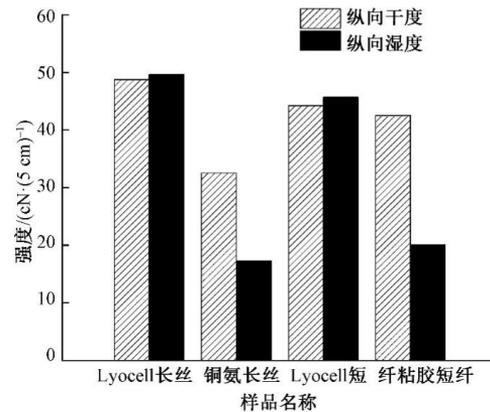
4 种非织造材料干态下的纵横向强度、不同铺网机摆动频率下 Lyocell 长丝非织造材料的纵横向强度和 4 种非织造材料干湿态下的强度测试结果如图 5 所示。



(a) 不同非织造材料干态下的纵横强度



(b) 不同铺网机摆动频率下Lyocell长丝非织造材料的纵横强度



(c) 不同非织造材料干湿态下的纵向强度

图 5 4 种非织造材料的拉伸性能

从图 5 (a) 可以看出, Lyocell 长丝、铜氨长丝、Lyocell 短纤、黏胶短纤非织造材料的纵向强度分别为 48.76N、32.58N、44.26N 和 42.58N。Lyocell 长丝、铜氨长丝、Lyocell 短纤、黏胶短纤非织造材料的横向强度分别为 23.39N、18.42N、41.94N 和 44.28N。铜氨长丝和 Lyocell 长丝非织造材料干态下的纵横向强度差别较大, 纵向强度明显高于横向, 而 Lyocell 短纤和黏胶短纤非织造材料的纵横向强度基本一致。这是因为铜氨长丝和 Lyocell 长丝非织造材料的铺网方式是机械摆丝成网, 丝束随着铺网机左右往复运动, 丝束排列呈“S”形, 纵横方向上的强度受铺网机的摆动频率和摆动幅度影响, 而 Lyocell 短纤和黏胶短纤非织造材料纤维排列是无规律的, 各个方向强度较为均匀。

从图 5 (a) 还可以看出, 非织造材料干态下纵向强度大小为 Lyocell 长丝>黏胶短纤>Lyocell 短纤>铜氨长丝, 这与 4 种样品的单根纤维的干态断裂强度不一致, 这是因为非织造材料强度一方面受单根纤维的强度影响, 一方面受纤维间缠结程度的影响。对于本文 4 种非织造材料样品来说, 纤维间缠结程度对于非织造材料强度的影响大于单根纤维强度。

从图 5 (b) 可以看出, 随着铺网装置摆动频率的增加, Lyocell 长丝非织造材料样品纵向强度减小, 横向强度增加, 摆动频率达到 120 次/min 时, 纵横向强度逐渐趋于一致。

从图 5 (c) 可以看出, Lyocell 长丝、铜氨长丝、Lyocell 短纤、黏胶短纤非织造材料的湿态纵向强度分别为 49.69N、17.32N、45.73N 和 20.04N。铜氨长丝非织造材料和黏胶短纤非织造材料的湿强远低于干强, 而 Lyocell 长丝和 Lyocell 短纤非织造材料的湿强略高于干强。这是因为 Lyocell 纤维的结晶度高, 水分子对于单根纤维的强度减弱得不明显, 水分子进入纤维间解除了部分纤维间的缠结, 使纤维受力更加均匀, 样品强度整体增加。

2.6 非织造材料的服贴性分析

柔软度和抗弯刚度可以表征样品的服贴性, 4 种非织造材料的测试结果如表 4 所示。干态抗弯刚度和柔软度的规律一致, 即铜氨长丝>Lyocell 短纤>Lyocell 长丝>黏胶短纤, 即干态铜氨长丝非织造材料的柔软度最差, 干态黏胶短纤非织造材料的柔软度最好。湿态柔软度排序为 Lyocell 短纤>Lyocell 长丝>黏胶短纤>铜氨长丝, 即湿态 Lyocell 短纤非织造材料的柔软度最差, 湿态铜氨长丝非织造材料的柔软度最好。

表 4 4 种非织造材料的抗弯刚度和柔软度

样品名称	干态抗弯刚度/(mN·cm)		干态柔软度/mN		湿态柔软度/mN	
	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
Lyocell 长丝	0.889	0.140	206.1	60.1	88.5	62.9
铜氨长丝	1.300	0.330	425.0	142.2	46.4	35.2
Lyocell 短纤	0.900	0.431	215.4	102.8	143.3	99.1
黏胶短纤	0.389	0.172	113.8	55.2	70.5	56.9

3 结论

通过对比分析 Lyocell 长丝非织造材料（自制）、Lyocell 短纤非织造材料、黏胶短纤非织造材料、铜氨长丝非织造材料的微观形貌、结晶度、强度、掉屑率、吸湿透气性等性能，得出以下结论：

（1）Lyocell 长丝非织造材料采用干喷湿法直接纺丝成网工艺，材料的结晶度高，纤维断头少，纤维间缠结紧密。材料掉屑率为 0.21%，干态纵向断裂强力为 48.8N/（5cm），湿态纵向断裂强力为 49.5N/（5cm），透气率为 5090mm/s，透湿率为 572g/（m²·h），吸液率为 1374%，这几种性能均优于其他 3 种非织造材料。

（2）Lyocell 长丝非织造材料采用的为 *N*-甲基吗啉-*N*-氧化物（NMMO）体系纤维素溶液直接纺丝成网工艺，流程短，制备过程绿色环保。产品性能优良，具有掉屑率少、干湿态强度高、透气透湿率高、吸液能力强等优点，有很大的发展潜力。

珍珠纹水刺非织造布质量控制探讨

李少锋

(五环非织造材料有限公司)

1 珍珠纹水刺非织造布布面风格影响因素分析

珍珠纹水刺非织造布生产客户对其布面风格一般会要求纹路清晰、立体感强、颗粒饱满，漏低不能太多。影响珍珠纹水刺非织造布布面风格的因素也有很多，以下将从锡林、工作辊和道夫转速，水刺绕布模式，梳理机棉量占比，各段牵伸力，水刺压力，提花水针板用法等方面进行分析。

1.1 锡林、工作辊和道夫转速

锡林转速应根据原料调整，涤纶原料锡林转速应设置高些，粘胶相对低。锡林速度不变时，工作辊转速越高，纤维间被转移、补充的纤维越多，混合均匀效果越好，但分梳能力下降，网面易出现云斑和棉结。反之，若降低工作辊转速，则分梳能力增强。对于低克重的品种，因其纤维量少，稍有不匀就极易出现破洞，故应适当加快工作辊转速，使更多纤维参与转移、凝聚，确保网面均匀；而对于高克重产品或者是在高速生产时，更注重强化梳理作用，应在提高锡林转速的同时降低工作辊转速，确保棉网清晰、棉结少。

在锡林速度一定时，道夫速度越快，纤维转移率越高，产量越高。实际生产中道夫和锡林的速度需要相互配合。若道夫速度过低，锡林上的纤维不能及时转移给道夫进行反复梳理，就会形成小棉结；若锡林速度过低，梳理不充分，网面就会形成云斑；若锡林速度过快，则容易过度梳理，纤维断裂，表现为网面短绒增多及成布强力下降。

因此，在实际生产中，应仔细观察棉网质量和成布质量，再综合调整锡林、工作辊作辊和道夫的转速，使棉网、布面质量均达到最好。

1.2 水刺绕布模式

水刺生产有两种绕布模式（图 1 和图 2），一般平纹水刺非织造布采用模式 1 生产，该模式中棉网经正反面穿刺次数相当，缠结效果更好，生产出的平纹产品更紧密且强力更好；而提花产品多用模式 2 生产，对比两种模式下生产的提花产品，模式 2 成布花纹更清晰，立体感更强。这是因为模式 2 中提花面是直铺面，该面纤维杂乱、经水刺道数少，其缠结程度低于交铺面，但也更易于提花，提花产品颗粒更加饱满，厚度也可以做得更厚。

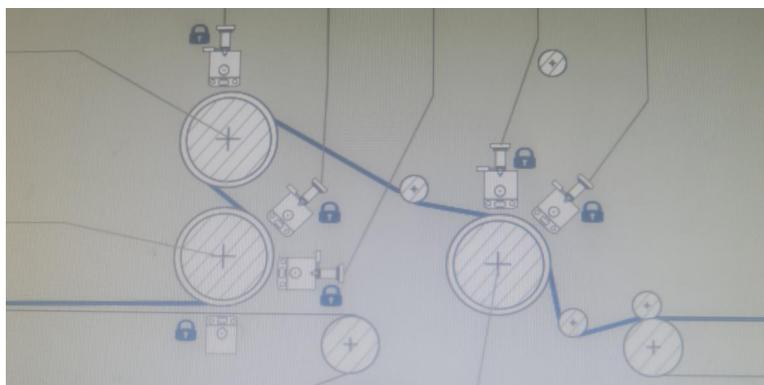


图 1 水刺绕布模式（模式 1）



图 2 水刺绕布模式（模式 2）

1.3 梳理机棉量占比

如上文所述，珍珠纹提花非织造布通常采用水刺模式 2 的绕布模式进行生产，非织造布的提花面对应的是直铺梳理机的棉层，所以在横向强力满足客户需求的前提下，可适当增加直铺梳理机的棉量占比，即增加提花面的纤维量，有助于增加珍珠纹厚度，提升布面凹凸感，成布更加立体美观。

1.4 各段牵伸力

非织造布要提高利润，整线车速必须要高，高产高质量才能提升竞争力。增加水刺工序及之后的牵伸系数对整线车速提升不大，且还会极大地影响成布质量，所以要提高整线车速，主要靠加大棉网在通过交铺梳理机、铺网机和牵伸机时的牵伸系数。交铺梳理因需要铺多层网，本身棉层薄、克重低，故容易存在不匀现象，再经过铺网机和牵伸机拉伸之后，棉网质量会进一步恶化。因长帘速度不受直铺线控制，直铺梳理机对整线车速没有影响，因此可以通过调节直铺垂直帘与长帘的牵伸比来控制直铺车速。增大直铺垂直帘与长帘间的牵伸，则直铺梳理速度降低，道夫到垂直帘全部降速，直铺梳理机棉网牵伸增大；反之，若减小直铺垂直帘与长帘间的牵伸，则直铺线棉网牵伸减小。在采用水刺模式 2 的绕布方式生产时，直铺线棉网是在水刺提花的一面，要提花效果好，直铺梳理棉网的牵伸不宜过大，我们就可以减小直铺垂直帘与长帘间的牵伸，但也不能太小，牵伸过小会在水刺过后，布面形成连续的小块横向条纹，生产中应根据布面效果适当调节。为了不破坏提花效果，水刺及后工序的牵伸在不影响生产及要求指标的情况下，都应尽量小，使珍珠纹非织造布成布效果更美观。

1.5 水刺压力

水刺压力对珍珠纹非织造布布面风格影响很大，其生产水压遵循逐级增大的原则，前中区及前两个转鼓上水刺头压力不宜过大，但也不能太小，否则会导致成布严重起毛，最后的提花转鼓水压可适当加大，但同时需要观察布面，保证提花效果的同时避免出现过多漏底。此外，水刺压力也要根据车速变化适当调整，车速升高，水压也应整体升高。高克重珍珠纹非织造布生产难度不大，提花效果一般不会差。但低克重珍珠纹非织造布生产时需要注意一点，即首先要通过增加直铺梳理机的棉量占比、减小直铺线棉网的牵伸并增加道夫和凝聚辊的凝聚比来增加水刺提花面的纤维量和杂乱程度，否则单靠调整水刺水压，难以达到理想的提花效果。

1.6 提花水针板用法

安德里兹水刺非织造布生产线上的水刺机多采用单排加双排水针板的生产工艺，针板孔径均为 0.12mm，型号有 1J7（单排水针，孔心距 0.7mm），2J14（双排水针，孔心距 1.4mm），2J7（双排水针，孔心距 0.7mm）。

在提花转鼓的两个水刺头上，一般是使用 1J7 和 2J7 两种型号的针板，水针更密，水流量更大，便于提花。使用方式有两种，第一种为让布面先经过 1J7，再经过 2J7；第二种为让布面先经过 2J7，再经过 1J7。两种方式形成的布面风格差异比较大，如图 3（方式 1 生产）和图 4（方式 2 生产）所示，两种非织造布均为同种粘胶原料在相同工艺参数下生产的克重为 70g/m² 的珍珠纹非织造布。对比这两种非织造布的布面效果可以看出，方式 1 生产的非织造布布面立体感强，纹路更清晰，但布面会有不规则的较大的漏底；方式 2 生产的非织造布布面没有较大漏底，但是规则的小针眼较多，颗粒饱满，凹凸感更强，但整个布面竖纹明显，影响珍珠纹的清晰度和布面立体感。两种方式各有利弊，实际生产中可根据客户需求选择生产方式。



图 3 R70g/m² 珍珠纹（方式 1 生产） 图 4 R70g/m² 珍珠纹（方式 2）

2 珍珠纹水刺非织造布厚度影响因素

厚度是水刺非织造布生产质量控制中的一项关键指标，它直接影响后续加工产品

的厚度，特别是包装材料确定后的干巾、湿巾产品，厚度的轻微变化直接影响包装质量及外观效果，影响产品销售。因此，合理控制非织造布厚度是稳定产品质量的重中之重。以下将根据实际生产经验从纤维原料、梳理棉量占比及直铺梳理机凝聚比、水刺压力、提花水针板用法等角度分析影响珍珠纹水刺非织造布厚度的因素。

2.1 纤维原料

纤维原料的特性是影响水刺非织造布厚度的因素之一，一般来说，纤维卷曲度大，则纤维间抱合力大，纤维成网时不易产生破洞，均匀度好，手感柔软、弹性好，产品偏厚。粘胶纤维易缠结、相对紧实，涤纶卷曲度好，相对蓬松，以克重为 60 g/m^2 的涤纶 / 粘胶珍珠纹非织造布为例，从表 1 数据可以看出，在同样的工艺条件下，非织造布厚度随着涤纶含量的降低而变薄。

表 1 不同纤维配比下涤纶 / 粘胶 60g/m^2 珍珠纹非织造布的厚度

涤纶 / 粘胶配比	(母卷) 厚度 / mm
100/0	1.13
70/30	1.08
40/60	1.03
0/100	0.97

另外，因原料厂家的生产工艺不同，在同一水刺工艺生产下，厚度也存在差异。因此，原料的选用对厚度的稳定性有一定影响。

2.2 梳理棉量占比及直铺梳理机凝聚比

直铺梳理机出来的棉网是在上层，用水刺模式 2 生产时，棉网在水刺第三个提花转鼓上反向回绕，上层棉网贴合转鼓成为珍珠纹提花的一面，所以增加直铺梳理的棉量占比就是增加提花面的纤维量，有助于增加珍珠纹水刺非织造布的厚度。表 2 对比了不同梳理棉量占比下的 70 g/m^2 纯粘胶珍珠纹非织造布的厚度，从表 2 可以明显得出，珍珠纹水刺非织造布的厚度随着直铺梳理的棉量占比的增加而增加。

表 2 不同梳理棉量占比下粘胶 70g/m²珍珠纹非织造布的厚度

交铺梳理棉量占比 / 直铺梳理棉量占比	(母卷)厚度 / mm
70/30	1.02
65/35	1.06
60/40	1.09
55/45	1.12
50/50	1.14

另外，直铺梳理机在上下道夫后通常配有凝聚辊（或称杂乱辊），通过增加道夫和凝聚辊之间的杂乱比，可以增加珍珠纹水刺非织造布的厚度。杂乱比越大，纤维由道夫向凝聚辊转移时的聚集程度越高，纤维纵横向排列越乱，厚度越厚，反之厚度越薄。以 65g/m²涤纶 / 粘胶 70/30 珍珠纹水刺非织造布为例（图 3），在其他工艺参数不变的情况下，其厚度随着梳理杂乱比的升高而变厚。

表 3 不同梳理凝聚比下 65g/m²涤纶 / 粘胶 70/30 珍珠纹水刺非织造布的厚度

上下道夫速度 m / min	上下凝聚辊速度 m / min	杂乱比	厚度 / mm
75	44	1.70	1.05
75	41	1.83	1.08
75	38	2.00	1.12

2.3 水刺压力

调整提花产品的厚度，主要是为了突出花纹的凹凸手感。不同于平纹和网孔产品，提花产品一般通过降低前两个转鼓上水刺头（如图 5 中 11、12 和 21）的压力，同时提高提花转鼓上水刺头（如图 5 中 31 和 32）的水压来增加厚度。

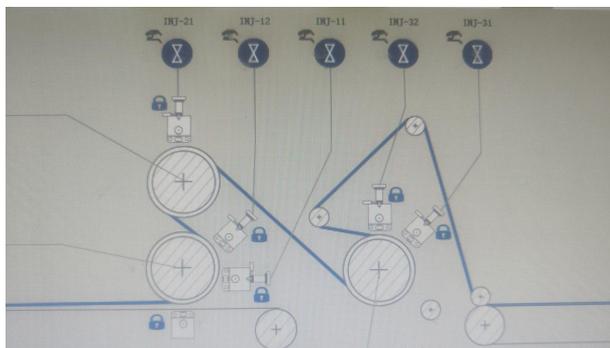


图 5 水刺转鼓与水刺头的位置关系

以 70g/m^2 纯粘胶珍珠纹水刺非织造布为例，从表 4 中可以看出，当前中区（11、12 和 21 水刺头）水压及其他工艺参数恒定时，增加提花转鼓上水刺头的水压，可以使布面凹凸感更强，也有助于增加厚度。当水压增加到一定程度后，珍珠纹厚度就不会再变化了；而当提花水压不变，增加前中区水压时，布缠结系数增加，提花变得困难，所以厚度会有所下降（表 5）。反之，则可以增加厚度。

表 4 $R70\text{g/m}^2$ 珍珠纹非织造布试验数据参数 1

项目 卷号		1119-3	1119-7	1119-8	1119-9
水 刺 压 力	水刺头 11	45	45	45	45
	水刺头 12	55	55	55	55
	水刺头 21	65	65	65	65
	水刺头 31	70	85	95	110
	水刺头 32	80	90	105	115
检测数据					
断 裂 强 力	横向	52.6	54.1	55.6	54.8
	纵向	91.4	92.3	95.1	95.4
断 裂 伸 长	横向	53.7	51.2	51.6	50.1
	纵向	35.7	33.5	36.2	35.8
纵横向强力比 (MD / CD)		1.738	1.706	1.710	1.741
单位面积质量 / ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)		67.7	68.9	68.5	69.2
缠结系数 [MD+CD] / 克重]		2.127	2.125	2.200	2.171
厚度 / mm		0.991	1.032	1.068	1.063

表 5 $R70\text{g/m}^2$ 珍珠纹非织造布试验数据参数 2

项目 卷号		1119-1	1119-3	1119-6
水 刺 压 力	水刺头 11	35	45	50
	水刺头 12	45	55	60
	水刺头 21	55	65	70
	水刺头 31	70	70	70
	水刺头 32	80	80	80

项目 卷号		1119-1	1119-3	1119-6
检测数据				
断裂 强力	横向	54	52.6	56.8
	纵向	82.2	91.4	100.6
断裂 伸长	横向	48.5	53.7	53.7
	纵向	38.6	35.7	33
纵横向强力比 (MD/CD)		1.522	1.738	1.771
单位面积质量 / ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)		70	67.7	68.2
缠结系数 [MD+CD] / 克重]		1.948	2.127	2.308
厚度 / mm		1.094	0.991	0.928

2.4 提花水针板用法

提花转鼓上水针板的用法也对珍珠纹非织造布的厚度同样有很大的影响。一种方法是将非织造布布面先经单排水针初步提花，再经过双排针板加强提花效果。因 2J7 针板水针数量多，水流量大，所以其提花效果更好。第二种方法是先将非织造布用双排针板打出珍珠花纹，再利用单排针板水针压强大、穿透性强的特性，将凸起的珍珠纹顶点再打得更凸起一些，使纤维更好地填充到网孔中，从而使得厚度增加。以 70 g/m^2 纯粘胶珍珠纹水刺非织造布为例，保持其它工艺参数一致，按照两种方法生产，其中前 9 个母卷按第一种方式生产，后 9 个母卷按第二种方式生产，对比这 18 个连续母卷的数据可以看出，第二种方法生产的珍珠纹水刺非织造布厚度更厚。实际生产中，若客户对珍珠纹水刺非织造布厚度有很高的要求，可考虑使用第二种方法生产。

表 6 两种方式生产的 $R70\text{g/m}^2$ 珍珠纹非织造布厚度数据

卷号	0212-3	0212-4	0212-5	0212-6	0212-7	0212-8	0212-9	0212-10	0212-11	平均
厚度	0.92	0.94	0.90	0.92	0.94	0.93	0.92	0.92	0.94	0.926
卷号	0212-12	0212-13	0212-14	0213-1	0213-2	0213-3	0213-4	0213-5	0213-6	平均
厚度	1.04	1.03	1.05	1.02	1.05	1.04	1.03	1.04	1.03	1.037

2.5 含水率

非织造布含水率指标对混纺，尤其是纯粘胶珍珠纹品种的非织造布的厚度指标有非常大的影响，生产中可通过调节脱水风机功率、烘箱温度和除湿风机功率来控制成布的含水率指标。粘胶纤维柔软，在含水较高时其成布强力、抗拉伸、抗挤压能力均减弱。若含水率控制过高，成布母卷卷芯布即经分切后子卷卷尾的布，其厚度会明显变薄。以同一批次的 80 g/m² 纯粘胶珍珠纹水刺非织造布为例（表 7），其对应子卷的厚度随非织造布含水率的减少先增大后趋于平稳。

表 7 不同含水率下 R80gg/m² 珍珠纹非织造布厚度数据

卷号	0212-3	0212-4	0212-5	0212-6	0212-7	0212-8	0212-9	0212-10	0212-11
含水率	7.5%	7.1%	6.8%	6.1%	5.3%	4.9%	4.3%	3.8%	3.6%
厚度 (mm)	0.85	0.86	0.91	0.98	1.06	1.08	1.11	1.10	1.11

因母卷卷芯布在卷绕机换卷时张力增大，同时卷芯布的珍珠纹颗粒面直接被卷绕机压臂压在金属辊表面，若粘胶或混纺非织造布含水率过高，其抗拉抗压能力会明显减弱，珍珠纹颗粒会被直接压成扁平状，其厚度也会明显降低。所以在一些对厚度要求高的粘胶及混纺珍珠纹品种上，或是在消除卷中卷尾非织造布厚度差异上，采取措施适当控制含水率会有明显作用。

2.6 其他因素

珍珠纹非织造布的厚度指标还受其他因素影响，如各工序牵伸、张力，车间温湿度，分切机压辊等。在实际生产中，应根据客户实际需求，合理考虑各个因素，适时调整参数，使产品指标满足客户要求。

3 结束语

珍珠纹品种非织造布的布面风格和厚度指标受多种因素的影响，因直铺棉网层为水刺生产的提花面，所以生产中改善质量应多从直铺梳理机入手，适当增加其棉量占比或道夫、凝聚辊间的凝聚比；生产中需要多观察棉网和布面质量，合理设置梳理工艺；原则上珍珠纹水刺非织造布从直铺线开始往后的牵伸都不宜大，以使花纹清晰美观，同时保证厚度；水刺压力应采用逐级升高的原则，前中区水压不宜过高，适当提

高提花转鼓上的水刺头水压，以提升提花效果，但同时也要注意出现布面起毛和漏底太多的情况；含水率对纯粘胶珍珠纹非织造布的厚度，尤其是母卷卷芯布的厚度有很大影响，在实际生产中应根据客户要求的厚度，合理控制含水率，减小卷芯布与卷尾布的厚度差异，使之满足客户需求；提花针板的不同装法可生产出不同风格珍珠纹产品，同时厚度差异也大，生产中也应根据客户需求进行选择。

来源：纺织导报 2024 年第 01 期

2024/2025

中国产业用纺织品技术发展报告

2024/2025 Technology Development Report of China Industrial Textiles

第三篇 安全防护

电磁屏蔽织物的技术发展现状及应用进展

孙菲菲

(中国纺织信息中心)

电子信息技术的浪潮正重塑人类生活图景，智能终端与数字技术编织出前所未有的高效生活网络，但随之产生的电磁辐射已成为威胁公共健康与安全的隐形风险。研究表明，长期暴露于电磁辐射环境可能引发人体中枢神经系统功能紊乱及神经失调，甚至诱发心血管疾病与癌变风险。在工业领域，电磁干扰易导致精密电子设备运行异常，造成严重经济损失。同时，电磁波还存在泄露风险，危及信息安全和关键系统稳定。在此背景下，电磁屏蔽织物应运而生，其能够阻断电磁波传播，在个体防护、维护设备稳定运行等方面发挥着重要作用。

1 电磁屏蔽织物的工作原理

电磁屏蔽织物是一类可以利用自身特性阻止电磁波在空间传播以实现屏蔽效果的功能性织物。当电磁波传播到该类织物的表面，通常会通过电磁波反射、吸收及多重反射 3 种方式进行衰减（图 1）。织物的屏蔽效能（Shielding Effectiveness, SE）可由公式 $SE=R+A+B$ 来表示，单位为分贝（dB）。其中 R 为织物表面发生的反射损耗， A 和 B 分别为织物内部发生的吸收损耗和多重反射损耗。

当织物具有良好的导电性时，其在磁场中具有可移动载流子，此时织物表面可以对入射的电磁波产生良好的反射作用；当织物具有较高的磁导率和合适的介电常数时，电磁波进入织物内部后，会因为介质内电偶极子和磁偶极子作用导致能量逐渐被吸收并减弱；同时织物内部的多孔结构有利于电磁波在其内部发生多重反射，提高能量耗散效率。

电磁波进入织物内部后，经过复杂的反射、吸收和多重反射作用后，其能量逐渐

衰减，织物所消耗的电磁波能量决定了电磁屏蔽织物的屏蔽效能，在一定条件下，SE值越大，电磁屏蔽织物的屏蔽效果越好。

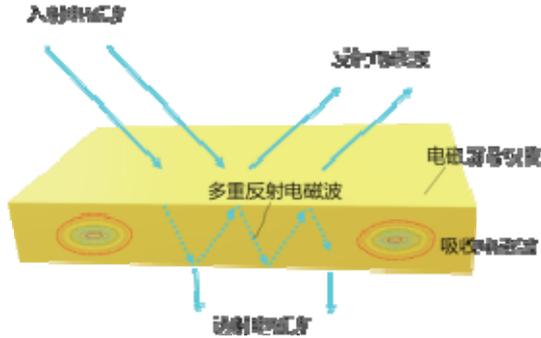


图1 电磁波通过织物时的传输方式示意图

2 电磁屏蔽织物的主要分类

2.1 按工艺方法分

2.1.1 导电纤维混纺型电磁屏蔽织物

通常将具有导电特性的纤维与常规天然或合成纤维进行混纺，制备得到具有优良导电性的混纺纱，随后按照特定的织物组织结构和规格进行上机织造，得到具有防电磁辐射功能的针织物或机织物。常用导电纤维包括金属纤维（不锈钢丝、银丝、铜丝等）、表面镀覆金属的纤维、本征导电高分子纤维、碳纤维等。混纺纤维织物的电磁屏蔽性能取决于导电纤维本身的性能、纤维间的协同作用以及织物结构，该类织物普遍具有物理强度高、电磁屏蔽性能稳定的优势，应用极为广泛。当前，更多研究集中在如何提高混纺纤维电磁屏蔽织物的服用舒适性方面，如采用包芯纱结构，以导电纤维为芯层，常规纤维为皮层，进一步提高织物柔软的手感。

2.1.2 表面改性型电磁屏蔽织物

对常规不导电的纤维或织物进行表面改性，增强其电导性，是制备具有优异电磁屏蔽特性织物的另一有效途径。这一过程通常涉及利用电镀、化学镀（络合法、银渗固法、沉积法等）、磁控溅射、表面涂覆或原位聚合等方法将导电金属粒子或者导电涂料固定在织物表面，使所制备织物的电导率和磁导率得到改善，

进而显著提高对电磁波的损耗。该类方法成本低、适用性广，具有显著的技术优势。目前市场上已实现规模化生产的典型产品有 Ionic+®银纤维系列制品等。此外，借助磁控溅射技术在柔性基材表面构建金属镀层的工艺体系也日益成熟。但需指出的是，金属镀层与基材结合强度不足易导致导电介质剥离，为提高材料功能的耐久性，还需优化工艺参数以获得最佳效果。

2.1.3 填充复合型电磁屏蔽织物

通过熔融共混、溶液共混、原位聚合或共沉淀等方法，将高分子聚合物与导电填料或磁性填料进行混合，随后通过特定的纺织加工方式，如静电纺丝、熔喷纺丝等，制备得到电磁屏蔽织物。该类方法实现了各组分在分子结构层面的混合，同时具有易于成形、适合大批量生产等优点。通过选择具有不同电磁参数的填料进行加工，能够可控调节织物的屏蔽效能。此外，织物的屏蔽效能受填料分散特性的影响较大，当填料在溶液或熔体中分散不均出现团聚时，其屏蔽效能难以完全发挥，织物屏蔽能力也会大大削减。研究表明，对填料进行表面修饰改性，优化其分散性能以增强界面相容性，或引入无机介电颗粒构建多元协同体系，均能有效提升电磁屏蔽织物的性能指标。

2.2 按导电材料种类分

2.2.1 金属基电磁屏蔽织物

金属作为典型的电磁屏蔽材料，在传统的防电磁辐射应用中占据了重要地位。根据材料电磁参数差异，可将金属基电磁屏蔽材料中的导电金属分为铁磁材料和金属良导体两类，部分金属的相对磁导率和电导率如表 1 所示。其中，铁磁材料（纯铁、硅钢片及铁镍系坡莫合金）凭借其突出的磁导性能，在 100 kHz 以下的低频磁场防护中具有独特优势，其作用机理在于通过材料的高磁导特性重新分布磁场路径，从而减少外部空间的磁通量。这类材料由于电导率相对较低，因此更契合低频电磁场的屏蔽需求。相较而言，以不锈钢、银、铜、铝等为代表的金属良导体具有较高的电导率，可适应宽频段电磁防护需求。该类材料处于磁场环境中时，其内部的自由电子会发生移动，进而产生与原磁场方向相反的涡流磁场，有效削弱高频磁场的干扰，进而提供优异的防电磁辐射功能。通过这种电磁能量转换机制，金属良导体在静电防护及高低频电磁屏蔽领域展现出卓越性能，应用十分广泛。

表 1 部分金属的相对磁导率和电导率

金属名称	银	铜	铝	镍	纯铁	钢(45)	坡莫合金
相对磁导率	1	1	1	1	5000	500~1000	$2 \times 10^4 \sim 10^5$
电导率/($S \cdot m^{-1}$)	6.17×10^7	5.80×10^7	3.54×10^7	1.45×10^7	1.0×10^7	$4.6 \times 10^6 \sim 7.5 \times 10^6$	$1.7 \times 10^6 \sim$

2.2.2 本征导电聚合物(ICP)基电磁屏蔽织物

ICP 作为新型电磁屏蔽材料,与传统金属材料相比展现出独特优势,该类材料兼具低密度、高延展性及抗腐蚀特性,同时保留类金属电磁响应特性,典型代表有聚吡咯(PPy)、聚乙烯(PE)、聚氨酯(PU)及聚苯胺(PANI)等。特定条件下,ICP 内部的共轭键允许聚合物分子链中产生载流子,并在分子链之间形成导电通道,从而获得优异的导电特性与介电性能,通过电磁波反射与吸收协同作用,实现电磁防护功能。然而,受限于分子链刚性等本征缺陷,纯相 ICP 存在加工成形困难的问题,通常需通过小分子掺杂或与碳基/金属纳米材料等构建复合体系来优化导电通路,以提升材料电磁屏蔽效能的稳定性。

2.2.3 碳基电磁屏蔽织物

碳材料因质轻、高导电及耐腐蚀等特性,成为开发新型电磁屏蔽织物的重要原料选择,当前采用较多的碳基材料包含氧化石墨烯、碳纳米管、碳纤维、炭黑、金属-有机骨架衍生碳材料以及其他碳杂化物。该类材料与磁性材料复合,可同时增强织物磁损耗和内部多重反射损耗,利于低频磁场屏蔽;与导电聚合物复合,形成导电网络和界面极化,能够进一步提升复合材料的电磁屏蔽性能。然而,碳基电磁屏蔽材料在实际应用中仍面临一些问题:以石墨烯体系为例,纳米片层间团聚引发的堆叠效应会显著降低材料的机械强度;碳纳米管在基体中的分散困难,易造成界面接触阻抗增加,削弱复合材料整体的电磁屏蔽效能。针对这些问题,当前众多研究聚焦于通过表面改性增强碳基材料的分散性能,以及利用晶格掺杂在碳晶格中引入更多缺陷以提升其导电性,从而改善织物的屏蔽效能。

2.2.4 MXene 基电磁屏蔽织物

MXene 材料是一种具有类石墨烯结构的二维纳米材料,表现出高比表面积和高导电性特性。其表面存在丰富的含氧官能团和金属端基原子层,通过氢键作用、范德华力、静电吸附及配位结合等多重界面效应,能够与纺织基体形成稳定界面结合,从而赋予复合材料优异的电磁屏蔽性能。MXene 基电磁屏蔽材料主要依靠其超

高导电网络产生的电磁波反射机制实现屏蔽性能，但受限于材料本征阻抗适配特性，反射的电磁波易引发二次电磁污染。可通过构筑多元复合体系（如与磁性材料复合）或设计多孔结构，有效提升材料的电磁波吸收转化能力，在维持高屏蔽效能的同时降低其电磁污染风险。

3 电磁屏蔽织物的屏蔽效能

3.1 织物电磁屏蔽效能测试方法

当前，织物电磁屏蔽效能测试多采用平面电磁屏蔽材料测试方法，相关的测试标准主要有 GJB 6190—2008 《电磁屏蔽材料屏蔽效能测量方法》、GB/T 25471—2010 《电磁屏蔽涂料的屏蔽效能测量方法》、GB/T 30142—2013 《平面型电磁屏蔽材料屏蔽效能测量方法》等，涉及的检测方法主要包含法兰同轴装置测试法和屏蔽室窗口测试法。

法兰同轴装置是一种同轴传输线小室，模拟均匀的平面波测试环境，该测试方法采用了电磁波的等效电路原理，测试时，将待测样品置于两法兰之间，通过同轴装置输入、输出端之间的传输系数得到试样的电磁屏蔽效能。该方法适用范围较广，覆盖频率从 30 MHz 到 3 GHz，可对厚度小于 10 mm、直径 115 mm 以下电薄材料的平面波屏蔽效能进行测量。此外，法兰同轴装置测试法的动态信号接收范围可到 120 dB，测试效率高，且具有较好的重复性，足以满足单层或多层常见电磁屏蔽织物的测量要求。

屏蔽室窗口测试法中的屏蔽室是由低电阻金属材料构建的接地封闭结构，模拟理想电磁环境，隔绝内外电磁场干扰。该测试方法基于电磁波等效传输线理论，在装置开设的窗口安装测试样品，并在窗口内外布置发射与接收设备，用于测试试样的屏蔽效率。基于屏蔽室窗口法的测试原理，通过调节发射天线的参数配置（如种类、辐射方向以及与屏蔽体的间距），可在 9 kHz ~ 40 GHz 频谱范围内评估材料的屏蔽效能。该方法可有效模拟远场或近场条件下的电磁环境，同时支持不同极化方向条件下的测试需求，实现了复杂电磁环境下材料屏蔽效能的全方位检测，其宽频覆盖特性与参数可调节设置显著提升了实验测试的适用性和操作便捷度。

值得注意的是，以上测试方法对于平面织物的屏蔽效能均具有较好的测试准确度，然而对于三维立体服装屏蔽效能的测试还存在一些问题。这是由于人体穿着电磁屏蔽

服装暴露于磁场环境中时，除织物覆盖部位，还存在服装开口和开缝部位，导致电磁波泄漏，进而影响服装整体的屏蔽效率。有研究表明，电磁防护服装在实际应用中，其屏蔽性能相较于同材质平面织物存在明显的衰减现象。当前，国际标准体系中针对成衣整体电磁防护性能的评估规范尚不完善，具有代表性的技术标准包括美国的 MIL-C-82296B-1984《微波辐射防护连体工作服》、德国的 DIN 32780-100 2002《防护服第 100 部分频率范围为 80 MHz ~ 1 GHz 的电磁场防护要求和试验方法》，以及我国国家标准 GB/T 23463 — 2009《防护服微波辐射防护服》与 GB/T 33615 — 2017《服装电磁屏蔽效能测试方法》等。

3.2 我国织物电磁屏蔽效能评价标准

我国已开展并研究了电磁屏蔽织物的相关性能评估体系，并据此制定了一系列产品标准，针对差异化应用场景，明确规定了各类纺织品适用的电磁波频段及应满足的屏蔽性能，为电磁屏蔽纺织品的研发、生产及质量认证提供了技术支撑。国内部分电磁屏蔽织物的产品标准如表 2 所示。

当前国内针对各类纺织品的评价标准还需进一步完善，应制定针对不同纤维材料以及不同后整理工艺所制成的电磁屏蔽织物的屏蔽效能标准，逐步建立通用的电磁屏蔽织物相关评价标准。

4 电磁屏蔽织物的市场应用进展

随着 5G、物联网（IoT）等技术的迅速普及，智能设备深度融入人们日常生活，由此产生的电磁干扰与辐射对人体健康的影响也逐渐受到关注。在此背景下，全球电磁屏蔽相关产品的需求呈现出稳步上升的趋势。根据市场研究机构 MRFR 分析，2024 年电磁屏蔽相关市场规模已达 73.4 亿美元，预计到 2029 年将增长至 96.9 亿美元，期间复合年增长率约为 5.7%。这一显著增长很大程度上得益于电磁屏蔽材料的广泛应用。其中，基于纺织纤维材料的电磁屏蔽织物以其轻质柔软、可灵活编织、可弯曲可折叠、服用性能优异、电磁屏蔽性能强等优点，广泛应用于个体防护装备、室内环境用电磁屏蔽布、智能网联设备电磁兼容等领域。

4.1 个体防护装备

4.1.1 日常生活用个体防护纺织品

现代生活中，家用电器如微波炉、电磁炉、电热毯，以及办公设备如手机、电脑、无线路由器等在工作运行时均会释放不同频率的电磁波，长期暴露于此环境中会对人体造成不同程度的伤害。针对心肺等重要器官的定向防护需求，电磁屏蔽织物通过有效阻隔电磁波发挥作用，其产品形态多种多样，包涵外套、短裤、帽子、被毯、手套、孕妇托腹带等（图 2）。如 Belly Armor 开发的防电磁辐射肚毯，采用 RadiaShield® 高性能屏蔽面料，针对手机、WiFi 等设备产生的 8 MHz ~ 30 GHz 电磁波具有高效衰减作用（图 3）；SYB (Shield Your Body) 推出的防辐射婴儿毯芯层采用了 SaferBody Silver 18 银纤维屏蔽织物，由极细的银纤维编织而成，可在 5G 频段（最高 26 GHz）实现 99% 辐射阻隔率，有效满足居家防护需求。北京洁尔爽公司开发的 JLsun® 银纤维，通过多靶磁控溅射及复合镀膜技术将纯银与聚酰胺纤维结合，在 0.1 ~ 3 000 MHz 频段内实现 99.999% 电磁波屏蔽效率（屏蔽效能达 60 dB）；其兼具导电、抗菌功能，为贴身电磁防护内衣开发提供了优质解决方案。婧麒 (Joyn - Cleon) 融合深海沉淀与纳米银离子技术，提升面料防辐射性能、透气性及耐磨性，推出马甲、背带裙等多款防护服饰，实现了健康与时尚融合；BabyPort 防辐射服采用双层防护设计：外层纳米银离子面料能有效屏蔽 99.99% 的电磁辐射，内层航天超材料吸收层衰减微量辐射，实现双重防护效果（图 4）。

表 2 国内部分电磁屏蔽织物的产品标准

标准名称	电磁波频段	适用产品范围	指标
GB/T22583—2009《防辐射针织品》	10MHz ~ 3GHz	民用防电磁辐射针织品（由添加金属纤维的针织面料制成）	屏蔽率≥95%
GB/T23463—2009《防护服服装微波辐射防护服》	300MHz ~ 300GHz	连体式防护服（包含头套、手套、鞋袜等）	A 级（SE≥50dB）、B 级（SE≥30dB）、C 级（SE≥10dB）
GB/T23326—2009《不锈钢纤维与棉涤混纺电磁波屏蔽本色布》	0.01 ~ 3000MHz	不锈钢纤维混纺的民用电磁屏蔽织物	SE≥20dB
GB/T26383—2011《抗电磁辐射精梳毛织品》	30 ~ 5000MHz	纯毛、毛混纺和交织及化纤仿毛的抗电磁辐射机织服用纺织品	多离子面料 SE39.5dB；不锈钢合金纤维面料 SE≥28dB；析镀金属离子面料 SE≥69.5dB；银纤维面料 SE≥44.5dB
GB/T30139—2013《工业用电磁屏蔽织物通用技术条件》	30MHz ~ 18GHz	不考核服用性能的工业用屏蔽织物	金属化处理织物 SE ≥ 40dB；导电纤维织物在 30MHz ~ 3GHz 内 SE ≥ 40dB、在 3 ~ 18GHz 内 SE ≥ 30dB



图片来源：DefenderShield 官网。

图 2 日常生活用电磁屏蔽纺织品部分产品类型



图片来源：Belly Armor 官网。

图 3 Belly Armor 防辐射肚毯



图片来源：BabyPort 旗舰店。

图 4 BabyPort 防辐射吊带装

4.1.2 工业生产用电磁屏蔽防护服

从事涉及大功率发射器、设备或仪器的工作人员，面临着更加严峻的电磁辐射暴露风险，需配备专业防护装备。此类电磁屏蔽工装防护服多采用金属纤维混

纺织物或金属镀层织物，通过优异导电性实现高频辐射防护。如山东稀有科技开发的启脉®银纤维采用真空磁控溅射镀银工艺，在聚酰胺纤维、聚酯纤维表面形成纯银镀层，进而开发一系列银丝针织布、银丝网眼布及银丝菱形格面料等，广泛用于电子、电磁等高辐射工作环境用的专业屏蔽服装中。北京凌创合力推出的“普莱特”防微波辐射服，采用3层可拆卸结构（金属化织物屏蔽层），在10 kHz ~ 36 GHz频段内屏蔽效能大于60dB、电磁波穿透率小于0.001%，可有效屏蔽雷达、基站等发出的微波辐射；保定三源、浙江蓝翔、合肥爱家等，也开发出不同导电介质防护服，形成覆盖不同辐射等级的专业产品体系。

4.2 室内环境用电磁屏蔽布

作为建筑电磁防护的关键材料，室内环境用电磁屏蔽布可以有效衰减高压线、变电站及通信基站等设施产生的多频段电磁辐射，为人类创造更加安全、健康的居住与工作环境。瑞士品牌 Swiss Shield®推出的 Evolution Ultra™是一款高效电磁屏蔽面料，由铜/银纤维结合碳材料组成，具备优异的电导性和低频电场屏蔽效果，屏蔽效能达36 dB，广泛应用于窗帘、遮阳篷等家居装饰，提供有效的电磁防护。另一款代表性产品 Naturell Ultra™是一种环保半透明棉质面料，结合银铜镀层并涂覆碳层，面料导电性能优异，兼具高频（10 GHz 时屏蔽阻隔率达99%）与低频（1 000 MHz 时屏蔽率为99.99%，屏蔽效能为40 dB）防护功能，适用于制作床罩、窗帘等家居产品。Mission Darkness™ TitanRF™辐射屏蔽遮光窗帘采用独特的 TitanRF™法拉第织物，结合铜、镍成分及双层结构，可减少来自手机信号塔、电器和其他外部来源的有害电磁波。MAX Blackout CYBER 窗帘的内衬采用菱形网格 CYBER 织物，能有效衰减室内电器产生的电磁波，提供高达70dB的屏蔽效果，该窗帘兼具隔热和降噪效果，适用于家庭、办公室等环境（图5）。

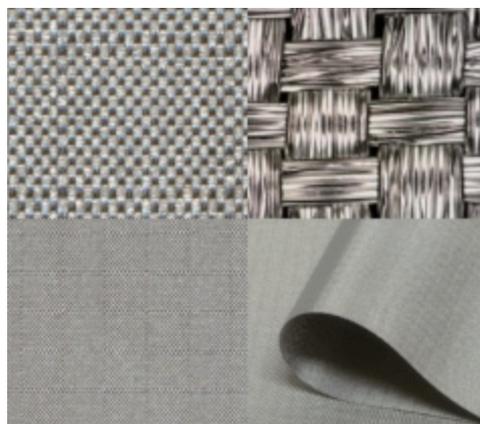
在需要严格保护机密信息的工业生产环境中，电磁屏蔽织物通过阻断电磁波泄露有效维护信息安全。例如，YShield® HNG100 是一款高效的金属化聚酯布，由聚酯纤维及铜镍涂层制成，该织物在1 GHz频率下的电磁屏蔽效能高达98 dB，适用于数据中心、实验室等特殊应用场所（图6）。电磁屏蔽织物在军事领域的应用同样广泛，军事设施、指挥中心等场所采用的电磁屏蔽窗帘，可有效阻隔敌方微波探测并保障通信安全。典型产品如 Amradiel 推出的军用级电磁屏蔽面料，采用铜镍镀层聚酯纤维，具有极高电导性，其法拉第笼效应可抵御高强度电磁干扰，在30 MHz ~ 40 GHz 频

段实现高达 85 dB 的屏蔽效能，适用于军用遮蔽与电子防护场景，为敏感设备提供电磁屏蔽与数据保护双重保障。Mission Darkness™ CYPHER- CYLENT™ 军用级帐篷由高屏蔽 TitanRF™ 法拉第织物及 TitanRFTM 法拉第胶带构成，可阻挡 WiFi (2.4 ~ 5 GHz)、蓝牙、手机信号 (包括 5G 网络)、GPS、RFID、NFC 以及从低频率到 40 GHz 的无线电信号，在安全通信和电子对抗的军事应用中具有重要价值 (图 7)。



图片来源: Faraday Defense 官网。

图 5 MAX Blackout CYBER 窗帘



图片来源: YShield® 官网。

图 6 YShield® HNG100 屏蔽布



图片来源：MOS Equipment 官网。

图 7 Mission Darkness™ CYPHERCYLENT™法拉第帐篷

4.3 智能网联设备的电磁兼容应用

4.3.1 高端电子行业

随着消费电子设备智能化升级与 5G/IoT 技术普及，电磁屏蔽织物需求显著增长。智能手机、可穿戴设备等产品因集成高密度电子元件及多频段通信模块，面临复杂电磁干扰风险，易引发信号失真、通信中断及数据传输故障等问题，具备抗电磁干扰及轻量化特性的电磁屏蔽织物及其衍生产品在消费电子领域的应用需求持续提升。

DuPont（杜邦）旗下 Laird™品牌开发的 Eco - Temp™导电布衬垫（图 8）由金属化织物包覆硅胶泡棉组成，在 50%压缩率下可实现 100 MHz ~ 1 GHz 频段范围内不低于 80 dB 的稳定屏蔽效能，广泛应用于服务器机柜、医疗设备等内部封装的电磁干扰防护元件。深圳飞荣达导电布衬垫的核心导电纤维布以镀铜镍聚酯纤维编织而成，该产品在 100 kHz ~ 1 GHz 宽频范围屏蔽效能稳定，适用于电子机箱、工业设备及移动通讯设备等电磁兼容防护需求。3M™导电胶带 3304BC-S 产品以丙烯酸镍/铜涂层导电非织造布为基材，表面覆盖抗刮擦黑色铜箔，形成低电阻、超高导电性的电磁屏蔽织物，适用于摄像头模块、柔性显示芯片、曲面显示器及印制电路板等精密部件的制造组装（图 9）。此外，Henkel、隆扬电子等也推出一系列芯片级电磁干扰屏蔽方案，通过使用含有导电纤维织物在内的电磁屏蔽材料，构建分区屏蔽体系，助力电子设备小型化、轻薄化设计。



图片来源：Laird 官网。

图 8 不同截面形状的 EcoTemp™导电布衬垫



来源：3M 官网。

图 9 3M™导电胶带 3304BC-S 产品

4.3.2 汽车工业

不仅消费电子领域，汽车工业领域对电磁屏蔽织物的需求同样在持续增长。随着新能源汽车与自动驾驶技术的加速迭代，车载电子系统复杂程度显著提升，ADAS（高级驾驶辅助系统）、ECU（电子控制单元）、ABS（防抱死制动系统）及车载通信模块等关键系统对电磁干扰的敏感度日益凸显。在此背景下，兼具轻量化、柔性特质的

电磁屏蔽织物凸显应用价值。以 3M 公司为代表的创新解决方案中，5113DFT 织物基双面导电胶带以镍/铜/镍金属涂层的导电织物为核心基材，在确保柔韧贴合性的同时，有效缓解电磁信号干扰，为车身精密电子元件提供可靠的屏蔽防护，构建起保障车辆安全运行的关键防线（图 10）。



图片来源：3M 官网。

图 10 3M™导电胶带 5113DFT 产品及其结构示意图

5 结语

电磁屏蔽织物作为现代科技与纺织技术融合的产物，在构建智能化时代的电磁安全屏障方面提供了关键解决方案。当前通过导电纤维混纺、织物表面改性、导电填料填充等技术，显著提升了织物的宽频防护能力与场景适应性，并广泛应用于个人防护、室内环境优化及智能网联设备电磁兼容等多个领域，为人们的日常生活和工作提供了重要的安全保障。

展望未来，电磁屏蔽织物的发展将聚焦于高性能、宽频谱覆盖及高吸收特性。为

了应对不同频段的电磁波，材料设计遵循“低磁高电”的原则，即在低频段提升磁性，在高频段提高导电性，开发适用于多种波段的柔性复合屏蔽材料。另外，屏蔽织物将朝着高吸收型方向发展，通过提高吸波性，减少电磁波的反射和透射，有效缓解现有反射型电磁屏蔽材料的二次污染问题。通过工艺改进、织物结构设计等途径进一步优化电磁屏蔽织物的阻隔性能，以更好地满足日益增长的电磁防护需求，为人们创造更加健康和安全的生活环境。

来源：纺织导报 2025 年第 02 期

我国纺织品相关个体防护用品标准现状与展望

任宇波¹ 陈倩¹ 刘国金¹ 余海倩¹ 朱斐超^{1,2} 叶翔宇³

(1. 浙江理工大学 a. 纺织科学与工程学院, b. 浙江省产业用纺织材料制备技术与研究重点实验室; 2. 绍兴宜可纺织科技有限公司; 3. 浙江省轻工业品质量检验研究院)

个体防护用品是指在劳动生产过程中,劳动者为免遭或减轻事故伤害或职业危害而配备的防护装备。近年来,人们对个体防护用品的关注度和需求量大幅提升。例如,公共卫生事件的频发使得医用防护用品,尤其是由聚丙烯非织造材料制成的外科口罩与防护服等,用量激增。在个体防护用品需求量如此巨大的背景下,保障个体防护用品质量已成为生产商、监管部门及广大消费者共同关注的话题。

个体防护用品标准不仅是评价和衡量个体防护用品质量的重要依据,还是作业者健康和安全生产的重要保障。作为贯通科研、生产、应用三者的桥梁,产品标准已悄然成为推动技术进步的杠杆和提升产业综合实力的助推器,能帮助产品占据市场竞争的制高点。

本文将概述纺织品相关个体防护用品行业及标准现状,探析我国纺织品相关个体防护用品标准,指出其标准化工作中存在的典型问题,以期为我国纺织品相关个体防护用品标准的进一步发展提供参考。

1 我国纺织品相关个体防护用品行业现状

目前,我国纺织品相关个体防护用品行业发展向好。一方面,政府在推动个体防护用品行业发展方面给予了极大的支持,并加强了行业监管,要求企业提高产品质量,并将个体防护用品作为强制性产品引入市场,个体防护用品需求量增加;另一方面,随着社会的发展,安全生产意识日益增强,人们对个体防护用品的要求也越来越高,这不仅给个体防护用品行业的发展带来了机遇,同时也对个体防护用品标准提出了更高的要求。

截至 2023 年 12 月,我国纺织品相关个体防护用品标准共有 381 个(国家标准 210 个、行业标准 171 个)。其中:国家标准涵盖头部、呼吸、眼面部、手部、足部、躯体、坠落、劳动、逃生等方面;行业标准涉及林业、电子、消防、医药、卫生、劳动、煤炭、轻工、化工、核工业、电力、石油、天然气、船舶、机械等领域。

2 纺织品相关个体防护用品国内外标准组织

2.1 国际标准化组织

ISO 是国际标准化组织(international organization for standardization)的英文简称,是目前世界上最大、最有权威性的国际标准化机构,成立于 1947 年 2 月 23 日。我国于 1978 年 9 月 1 日正式加入 ISO,是 ISO 的常任理事国。

ISO 人员安全-防护服装与设备技术委员会(ISO/TC94)是 ISO 下设技术委员会之一,成立于 1959 年,主要工作是对个体防护用品的质量、性能及实验方法等实行标准化。

2.2 国外标准化组织

国外标准化组织大部分是非官方机构。各国标准协会之间通过交流促进标准更好地完善。当前,纺织品相关个体防护用品的主要国外标准化组织有美国国家标准协会(ANSI)、美国试验与材料协会(ASTM)、欧洲标准化委员会(CEN)、德国标准化协会(DIN)、法国标准化协会(AFNOR)、非洲地区标准化组织(ARSO)、澳大利亚标准协会(SA)、新西兰标准学会(NZSO)、英国标准协会(BIS)、日本规格协会(JSA)、日本工业标准调查会(JISC)、瑞典标准化委员会(SIS)等。

2.3 我国标准化组织

我国大部分标准化组织为官方组织,如中国国家标准化管理委员会、中国标准化协会(CAS)、省级专业标准化技术委员会等。其中,纺织品相关个体防护用品标准化组织主要有个体防护装备标准化技术委员会、产业用纺织品标准化技术委员会等。

3 我国纺织品相关个体防护用品标准体系的探索与构建

个体防护用品是经过专业设计的,供劳动者作业时穿着或佩戴的,用于预防辐射、化学、机械、电力、火场等环境伤害或职业危害的,保护生命、健康和安全的装备。

GB/T12903—2008《个体防护装备术语》中将个体防护用品分为10类,即头部、呼吸、眼面部、听力、手部、足部、躯体、坠落、劳动、逃生等。本文主要针对纺织品相关个体防护用品标准展开研究,不探讨听力防护用品及其他不含纺织品的个体防护用品标准。

目前,个体防护产品标准主要分3类:产品或性能规范、测试方法、技术报告或指导文件。其中,产品或性能规范通过定义与危险或风险相关的性能必须满足的水平,设定产品合格或不合格标准;测试方法通过指定一系列测试规范和程序,确保产品质量和性能稳定;技术报告或指导文件提供关于产品的选择、正确使用和维护等信息。本文将按照此分类对纺织品相关个体防护用品标准进行探析,以帮助人们了解各类相关标准的分类、来源及作用。

3.1 产品或性能规范

根据防护的人体部位,本文将纺织类相关个体防护用品分为作业时对人体躯干起保护作用的躯体防护服,和保护人体头面部、足部、手部等部位免受伤害的局部防护装备(图1)。

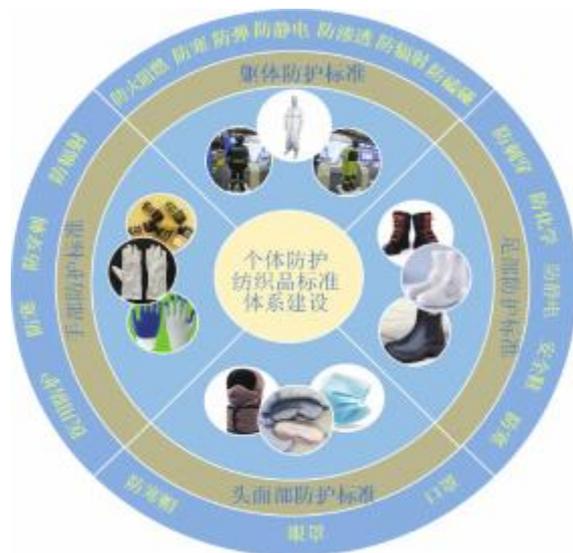


图 1 纺织品相关个体防护用品标准分类

3.1.1 躯体防护服标准

躯体防护服是部分从业人员作业时必须穿着的防护装备。其应能在一定程度上阻隔或减轻工作环境中危险因素对人体生命安全的威胁,同时满足穿着人员的工作活动需要和生理舒适需求。躯体防护服产品种类繁多,如防火阻燃防护服、防寒保暖防护服、化学防护服、医用防护服、防辐射服、防静电服等。

3.1.1.1 防火阻燃防护服

防火阻燃防护服能抵御工作环境中火焰及其他炙热物体等的伤害,是纺织品相关个体防护用品中应用最为广泛的品种之一。国内防火阻燃防护服相关标准有:GB/T8965.1—2020,适用于在有明火、散发火花,或在有易燃物质并有轰燃风险的场所使用的阻燃服;GB/T33536—2017,适用于从事森林扑火作业人员穿用的防护服;XF10—2014,适用于消防员在灭火救援时穿着的灭火防护服,灭火指挥服亦可执行此标准;等等。

3.1.1.2 防寒保暖防护服

防寒保暖防护服内絮为化纤等保暖材料,能在低温或极寒环境中有效阻挡寒冷空气,维持作业人员体温。国内防寒保暖防护服相关标准有:GB/T38300—2019,适用于冷环境中使用的防护服装;GB/T13459—2008,适用于冬季室外作业职工的防寒服装,常年低温环境作业职工的防寒服装亦可参照执行;HY/T088.18—2005,适用于中国海监制式防寒服;等等。

3.1.1.3 化学防护服

化学防护服能保护化学药品使用人员免受可能的化学危害。对有害化学物质的有效防护是化学防护服最基本也是最重要的要求。防渗透性和防渗透性是评价化学防护服防护性能最主要的2项指标。国内化学防护服相关标准有:GB24539—2021,适用于从业人员在作业场所及应急救援工作中所需的化学防护服,不适用于消防等场合使用的化学防护服;XF770—2008,适用于消防员在处置化学事件时穿着的消防员化学防护服装,不适用于灭火及涉及放射性物品、生物制剂、液化气体、低温液体危险物品、爆炸性气体等紧急事件处置时穿着的全套防护服装;等等。

3.1.1.4 医用防护服

医用防护服是医疗过程中用于防止感染的一种特殊服装。防护性是医用防护服的重要性能,主要体现在拒水、拒血液、拒酒精和有效抗静电等方面。国内相关标准有:YY1887—2023,适用于经评估存在病原微生物气溶胶暴露风险的医疗工作环境等场

景下,用于过滤空气中的微生物颗粒,阻隔飞沫、血液等污染物的医用正压防护服,不适用于可重复使用的医用防护服;YY/T1499—2016 适用于标示有液体阻隔性能或液生微生物阻隔性能的防护服;等等。

3.1.1.5 防辐射服

防辐射服也称电磁屏蔽防辐射服,其主要由含金属纤维的织物制成,制造工艺较为复杂。市面上的防辐射服多为民用,受众以孕期女性和特殊职业者为主。防辐射服的屏蔽效能受服装款式、面料材质、测试方法等影响。国内有关标准有:GB/T23463—2009,适用于金属纤维混纺、织物金属化加工等工艺制备的反射型微波辐射防护服;LD86—1996,适用于用不含铅的材料制成的防 100keV 以下辐射的防护服;等等。

3.1.1.6 防静电服

防静电服以防静电织物为面料,其通过降低面料摩擦起电的能力,提高电荷传输效率和衰减速度,达到降低静电积聚、避免静电放电和静电击穿的目的,规避火灾、爆炸以及电路和元器件失效等事故。国内相关标准有:GB/T18136—2008,适用于额定电压 110 (66)~750kV 的交流输电线路和变电站巡视及地电位作业人员所穿戴的交流高压静电防护服装;GB/T28895—2012,适用于石油、石化等行业作业人员穿着的防护服;DL/T1238—2013,适用于额定电压 1000kV 的交流输电线路和变电站巡视及地电位作业人员所穿戴的交流高压静电防护服装;等等。

3.1.1.7 其他躯体防护服

除上述躯体防护服外,其他躯体防护服还涉及军事体育用防护服、防虫服、职业用高可视性警示服、摩托车手防护服、船舶消防员防护服、普通工作防护服、采矿行业爆破用防护服,以及极端条件或训练用防护服等。我国相关标准有:GB/T28408—2012,适用于存在蚊虫、蚂蚁等昆虫侵扰环境中工作的人员穿用的、有驱避昆虫效果的防护服;GB/T24278—2019,适用于以纺织材料、皮革为主要原料生产的成人摩托车手防护服装;DB50/T501—2013,适用于以机织物为主要面料生产的供工人常态下使用的普通防护服装;等等。

3.1.2 局部防护产品标准

局部防护产品是指因作业需要,用于单独防护身体局部如头面部、手部、足部等的装备。

3.1.2.1 头面部防护用品

部分头面部防护用品标准如表 1 所示。其中,劳动防寒帽能保护低温环境中作业的劳动者头部免受低温伤害;眼罩具有遮光、消除眼部疲劳的作用;呼吸防护口罩具备防病毒和液体飞溅物的能力,其防护作用与过滤性、舒适性紧密相关。

表 1 部分头面部防护用品标准

防护类型	标准类型	标准编号	备注
头部防护	地方标准	DB22/T 45—2012	适用于以皮革、毛皮、棉布、毛绒、非织造毡布等面料缝制的劳动防寒帽
眼部防护	行业标准	FZ/T 43033—2014	适用于以丝绸为主要原料制成的眼罩
呼吸防护	国家标准	GB 2626—2019 GB/T 38880—2020 GB/T 32610—2016	适用于防护颗粒物的自吸过滤式呼吸器 适用于 6 岁及以上、14 岁及以下儿童用于过滤空气中的颗粒物,阻隔微生物、花粉、飞沫等所佩戴的口罩 适用于在日常生活中空气污染环境下滤除颗粒物所佩戴的防护口罩

3.1.2.2 手部防护用品

各类作业的完成需要手部的参与,手是最容易受伤的部位,因此手部防护尤为重要。人们穿戴上手部防护用品后,手部的灵巧性会关系到作业完成的准确度与效率。

纺织品相关的手部防护用品大部分为防护性手套。作业环境中,手部伤害因素大致可分为机械性伤害、物理性伤害、化学性伤害及生物性感染伤害等。部分手部防护用品标准归纳见表 2。

3.1.2.3 足部防护用品

足部作为人体下肢末端,支撑着人体站立,并承担着人体运动、负重等重要功能。足部防护用品专为保护人体脚部免受意外伤害或工作环境中危险而设计,因此,其人性化设计非常重要。

纺织品相关足部防护用品主要为鞋类,相关标准涉及防化学品鞋、电绝缘鞋、矿工安全靴、食品和医药工业防护靴、防极寒安全鞋等。部分足部防护用品标准归纳见表 3。

3.2 测试方法

为确保个体防护用品穿着者的安全,对个体防护用品的防护性能进行测试十分重要。不同的防护性能如防水性能、耐渗透性、阻燃防火性等,不同类型的防护服有不同的测试方法,我国也对相关测试方法进行了规范。表 4 就部分个体防护用品的测试方法标准进行了归纳。

表 2 部分手部防护用品标准

防护类型	标准类型	标准编号	备注
手部防护	国家标准	GB 28881—2023	适用于防护化学品及微生物危害的手套 适用于防护火焰、接触热、对流热、辐射热、少量熔融金属飞溅或大量熔融金属泼溅等一种或多种形式热伤害的手套,不适用
		GB/T 38306—2019	适用于消防和焊接作业用手套
		GB 38452—2019	适用于保护穿戴者的手部免遭作业区域电离辐射及放射性污染物危害的手套,可安装在永久性密封箱室的手套,以及手套与永久性密封箱室之间的中间袖筒,不适用于医用辐射防护手套
		GB/T 38304—2019	适用于低至-50℃的气候环境或作业活动中防低温伤害的手套

表 3 部分足部防护用品标准

防护类型	标准类型	标准编号	备注
足部防护	国家标准	GB/T 28288—2012	适用于作为足部防护装备中鞋的部件的保护包头和防止机械刺穿的垫
		GB/T 20265—2019	适用于保护穿着者足部免遭作业过程中化学品伤害的鞋靴
		GB/T 21148—2020	适用于保护穿着者足部免遭作业区域危害或保障工作区域安全的鞋
	行业标准	AQ 6105—2008 AQ 6106—2008	适用于矿工穿用的、保护矿工足腿部免遭作业区域危害的全橡胶和全聚合材料靴 适用于食品和医药工业穿用的、保护穿着者足腿部免遭作业区域危害的全橡胶和全聚合材料靴,也适用于餐饮行业、卫生部门使用的全橡胶和全聚合材料防护靴
团体标准	T/ZZB 1047—2019	适用于具有耐极寒、冰面防滑、保护足趾和防刺穿功能的安全鞋,不适用于全橡胶或全聚合材料鞋	

表 4 部分个体防护用品测试方法标准

标准编号	备注
GB/T 23467—2009	规定了采用假人评估轰燃条件下服装阻燃性能的测试方法
GB/T 31420—2015	规定了阻燃服中偶氮染料、含氯苯酚、重金属等有毒有害物质的检测方法
YY/T 1632—2018	规定了医用防护服材料阻水性冲击穿透测试方法的原理、操作步骤、结果评价与实验报告等
GB/T 22583—2009	规定了防辐射针织品的要求、检验规则、判定规则等项目,适用于鉴定以添加金属纤维的针织面料为主要材料制成的适合于民用穿着的防辐射针织品的品质
GB/T 28287—2012	规定了鞋的防滑性测试方法,适用于具有传统类型鞋底的鞋
GB/T 31009—2020	规定了足部防护鞋(靴)安全性要求的产品分级、技术要求、测试方法、判定规则等项目,适用于保护穿着者足腿部免遭作业区域危害的足部防护鞋(靴)
GB/T 16641—2019	规定了整鞋动态防水性能的试验方法,适用于检测各种类型整鞋的动态防水性能
GB/T 33393—2023	描述了整鞋热阻和湿阻及吸湿透汽性能的试验方法
YY/T 1497—2016	规定了Phi-X174噬菌体悬浮液为替代微生物,对医用防护口罩或口罩材料进行病毒过滤效率的测试方法,适用于有病毒过滤效率评价要求的医用防护口罩或口罩材料

3.3 技术报告或指导文件

技术报告或指导文件涉及纺织品相关个体防护用品的选择、使用和维护等,它们规定了个体防护用品的穿脱方式、适用环境、外观及防护作用等。基于技术报告或指导文件,人们能正确了解和使用个体防护用品,有效防止有毒、有害物质对人体的伤害。部分个体防护用品技术报告或指导文件类标准归纳见表5。

表5 部分个体防护用品技术报告或指导文件类标准

标准编号	备注
DB37/T 2007—2011	普通劳动防护服安全技术条件
YY/T 1498—2016	医用防护服的选用评估指南
YY/T 1799—2020	可重复使用医用防护服技术要求
GB/T 29512—2013	防护手套的选择、使用和维护指南
GB 42298—2022	手部防护通用技术规范
GB/T 28409—2012	足部防护鞋(靴)的选择、使用和维护指南
GB 19083—2010	医用防护口罩技术要求
GB/T 32610—2016	日常防护型口罩技术规范

4 我国纺织品相关个体防护用品标准 体系存在的问题

我国个体防护用品的研发和应用起步较晚。近几十年来,国内个体防护用品发展较快,纺织品相关个体防护用品标准取得了长足进步,但也存在一些不足。

4.1 现有标准分布不均衡,时间滞后

个体防护用品可用于人体各部位,但国内现行的大部分纺织品相关个体防护用品标准仅针对呼吸防护、手部防护、足部防护、躯体防护等方面。此外,国内较多个体防护用品标准未及时进行修订,部分仍为10多年前的标准,未及时体现产品品质的进步。

4.2 标准国际话语权不强

尽管目前我国个体防护用品标准发展较快,但起步较晚,部分标准由国外标准翻译而来,标准权威性不及西方发达国家。

4.3 标准宣贯培训不足

部分人员作业时存在未正确严谨地使用个体防护用品的现象,因此,企业应对作业人员进行相关防护知识的培训,促使他们了解个体防护用品的使用方法。且对于非相关

行业的从业人员,也有必要进行简单的日常防护知识宣传,以及个体防护用品使用方法的普及,增强人们对防护知识的基本了解。

5 展望

随着我国经济的发展和政策的实施,纺织品相关个体防护用品标准发展前景向好,市场规模有望继续增加。本文基于个体防护用品行业现状,分析我国现行的纺织品相关个体防护用品标准存在的问题,提出以下建议:

(1) 加快纺织品相关个体防护用品标准制修订工作。针对存在的标准空白及市场上出现的新产品,及时制定标准,规范行业健康发展;实时关注业内动态,对现行标准及时修订,使标准水平与产品技术提升同步。

(2) 鼓励品牌企业将优势产品和技术制定成标准,以便在贸易竞争中取得优势,推动行业健康、平稳发展,助力我国纺织品相关个体防护用品打开国际市场。

(3) 做好纺织品相关个体防护用品标准宣贯培训工作,让使用者及民众明确个体防护用品的防护特性,正确使用个体防护用品,同时熟悉标准要求,真正做好个体防护。

(4) 鼓励发展绿色低碳个体防护用品材料,如可降解材料,缓解由石油基材料制备的个体防护用品因废弃造成的环境污染问题。

来源:产业用纺织品 2024 年第 03 期

防爆服装冲击防护性能测评技术研究进展

钱江瑞¹ 刘文武² 李俊^{1,3} 方以群^{2,4,5} 徐佳骏²

[1. 东华大学服装与艺术设计学院; 2. 海军军医大学(第二军医大学)海军特色医学中心潜水与高压医学研究室; 3. 现代服装设计与技术教育部重点实验室; 4. 免疫与炎症国家重点实验室; 5. 全军航海医学保障重点实验室]

在工业生产及暴力冲突中,爆炸导致肺、肠等空腔器官生理改变、破片击中人体造成穿透伤、钝挫伤、高温灼伤等,对人员生命安全造成巨大威胁。为减少爆炸事故的伤亡,自20世纪80年代起国内外学者致力研发个体防护装备,包括防爆头盔、防爆鞋、防爆马甲、防爆服等,其中防爆服是为人体提供最高安全防护水平的装备。抗冲击性能是衡量服装爆炸防护能力的重要指标,其测评结果的客观性、准确性关系到实际使用中防爆服对人体的防护效能。

当前服装抗冲击性能的测评方法包括等效载荷物理实验、真人尸体实验、动物实验、假人实验、数值仿真法等。一方面,将材料对冲击载荷的衰减及其力学响应特征参数作为服装抗冲击性能的代表指标;另一方面,构建防护服-生物体组合模拟实际使用状态,通过生物体的存活率、损伤等级、生物力学响应参数等实现服装抗冲击性能的直接评估。每种测评方法均可一定程度上评估服装抗冲击性能,但均进行了一定简化,且不同方法中的测试对象、评估指标不一致,导致其评估结果与防爆服实际防护能力之间存在不同程度的误差,难以直接应用于人体防护预测;而且,不同测评方法的结果无法直接比较,这些问题均制约了个体防爆装备的技术升级和新品开发。因此,针对防爆服装的冲击防护性能测评方法的开发一直是个体防护领域重点关注的问题。本文从防爆服装冲击防护能力的评估内容出发,全面梳理了当前相关测试方法及其评价指标,重点关注不同方法的优缺点、差异因素、应用局限,并提出了未来的发展方向,为综合多种方法进行防爆服冲击防护性能测评提供参考。

1 防爆服构成及其防护性能测评重点

现役防爆服装由 5 层复合结构材料构成:防冲击外层、防弹防刺层、阻燃层、防水透气层和隔热层,以最大程度地抵御爆炸所产生地高压冲击波、高能飞溅破片、高温,并协同人体冲击损伤特点提供多方位的综合防护(见图 1)。根据诱发原因和损伤程度,爆炸引发的人体损伤包括 4 个等级:第 1 级为爆炸冲击伤,指冲击波作用于人体表面组织、空腔器官导致的生理改变;第 2 级为爆炸破片伤,泛指子弹和爆炸物破片击中人体造成的穿透伤和钝挫伤;第 3 级为冲击波动压作用下人体被抛掷所造成的损伤;第 4 级为热/化学烧伤以及辐射、粉尘或有毒气体导致的损伤。由于第 1、2 级损伤是陆地爆炸事故中人员伤亡的主要且直接的原因,防爆服装冲击防护性能的测评重点在于其对爆炸冲击波与破片的阻挡能力。

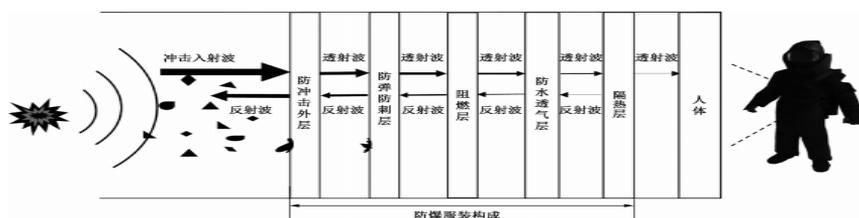


图 1 现役防爆服装构成及各层功能特点

衡量防护材料对应力波的传递、耗散能力是评估其冲击防护性能的关键。爆炸冲击波是一种介质状态突跃变化的强扰动传播,以应力波方式作用于材料及人体表面,产生复杂的力学响应,导致组织器官出现压伤、拉伤、剪切伤等。应力波在不同介质中传递时,将经历持续的反射、折射、透射以及能量与波幅的衰减。此外,爆炸破片通过能量传递及侵入的方式造成人体损伤,材料的防护能力取决于其对破片能量的消耗。当高速破片冲击防护服装材料时,其动能不仅以破片变形、材料变形或破坏的方式消耗,还将通过材料不同层间的相互作用以及内部化学键的破坏转化为热能、声能等。

2 防爆服冲击防护性能测评方法

现有的防爆服及其材料冲击防护性能测评方法根据载荷加载方式可分为爆炸实

验、等效载荷物理实验、数值仿真 3 类，如表 1 所示。

爆炸实验中，已经建立了标准 NIJ0117.01—2016《公共安全防爆服标准》，这也是所有 3 类测评方法中唯一的防爆服测试标准。该方法使用 C4 炸药，以定性描述的服装完整性作为其抗冲击能力的考核指标，没有考虑人体在穿着防爆服后的损伤情况，因此，该方法还需与定量的材料性能参数以及人体损伤特征指标相结合，才能全面合理评价防爆服在冲击载荷下对人体的防护性能。已有研究中的爆炸实验多基于小型装置对材料或材料覆盖下的动物进行，使用 TNT 炸药，基于超压测试获得材料形变毁伤状况及动物伤情等级，评估材料抗冲击性能。此外，爆炸实验存在伦理限制及较高的安全风险。

表 1 服装/材料冲击防护性能测试方法

方法	实验平台	载荷发生方式	冲击载荷	测试指标	缺点
爆炸实验	— 小型实验装置	C4 塑料炸药爆炸 三硝基甲苯 (TNT) 炸药爆炸	冲击波破片 高温	服装防爆完整性 (各组件完整、无滑落等) 冲击波超压衰减、材料毁伤形变模式、动物死亡率、解剖伤情评估等	危险系数高、数据采集困难、实验精准性差
	激波管	高压气瓶	冲击波	冲击波超压衰减	
等效载荷物理实验	霍普金森压杆 轻气炮	气压驱动子弹杆 高压气瓶驱动金属弹丸	应力波 破片	峰值应力、平台应力、吸能量、能量吸收效率、透射能弹丸运动速度变化量、材料毁伤形变模式	仅适用于评估材料对单一冲击载荷的防护能力
数值仿真	ABAQUS、LS-DYNA、AUTODYN 等软件	虚拟载荷	冲击波破片	冲击载荷参数、材料特征参数、生物力学响应参数	需开展实验验证

考虑到爆炸实验的危险性，具有更高安全系数的等效载荷物理实验受到广泛关注，代表性设备有激波管、霍普金森压杆及轻气炮。依赖设备产生冲击波或破片的等效载荷以模拟爆炸环境，通过分析材料对冲击载荷的衰减及其动力学响应特征来评估其冲击防护性能。

由于物理实验会受到实验量、实验参数设置的限制，数值仿真方法被用于爆炸防护研究。对不同尺度材料的冲击防护过程进行模拟，可获得复杂爆炸场景中材料的瞬态变化，由此分析其抗冲击性能，可重复性高。作为一种无损研究方法，数值仿真技术非常适用于爆炸这个极具危害性的场景，并支持深入的防护机制研究，在爆炸冲击

损伤与防护研究领域具有较大的发展潜力和拓展空间。

针对上述不同测试方法的优缺点及适用性，在未来的研究中可尝试构建基于物理实验和数值仿真法的综合评价体系，前者可为后者提供实验验证数据，后者可为前者提供实验设计依据并可拓宽研究的广度和深度，最终目的是建立爆炸冲击载荷、防爆材料/服装、人体损伤间的量效关系，进一步提升防爆装备冲击防护性能测评结果的准确度。

3 测试条件及对象对比

从实验设置的角度看，现有的 3 类测评方法对于爆炸场景以及防爆服着装状态的还原度上有所不同，这会导致测评结果的适用局限。

3.1 测试条件差异

在爆炸事故中，冲击波和破片同时产生，由于二者初始速度及速度衰减率不同，它们作用于目标的先后顺序会随爆炸源距离而变化。在近距离处，冲击波先作用于目标；在某个特定位置，冲击波和破片同时作用于目标；在远距离处，则是破片先作用于目标。据研究，冲击波与破片对目标的联合损伤大于任一单独作用的损伤，且不同的作用顺序也会导致损伤的差异。当前的测评方法中，爆炸实验通过爆炸相似律将冲击载荷等比例缩小，最真实地还原了爆炸场景中冲击波与破片的冲击情况；数值仿真法通过设置冲击波与破片对目标材料的作用时间差来实现不同爆炸环境中冲击波与破片的联合冲击。然而，等效载荷物理实验中所使用的设备尚不能实现 2 种载荷同时加载，导致对防爆服或材料抗冲击性能的高估。

冲击防护性能测试条件中，除冲击波和破片的设置外，还应考虑真实爆炸中同时出现的高温（如陆地爆炸）、湿度（如水下爆炸）等环境条件。以往研究已经分析了单一环境因素对材料力学性能的影响，例如，碳纤维复合材料在 100℃ 下的拉伸强度、模量、压缩强度相比 20℃ 下分别降低了 27.20%、22.1% 和 15.86%；芳纶材料含水率的增加伴随着断裂强力、初始模量的下降。然而，当前在实验测评中考虑冲击波、破片、高温、湿度等多种环境因素的条件设置仍然不足，影响了对于复杂多因素联合作用下的材料动态响应、损伤累积机制、能量耗散机制的深入研究，也不利于有效预测防爆服在实际场景中的防护性能。

3.2 测试对象差异

3.2.1 针对材料性能的测评

性能优良的防护材料是决定防爆服装抗冲击性能的首要因素，在防爆服整体性能测评方法产生之前，材料的防护性能是表征防爆服性能的关键指标。在针对材料防护性能测评的方法中，测试对象可分为材料本身及材料包覆动物活体 2 类。等效载荷物理实验的测试对象均为材料，通过材料本身的动力学指标、冲击前后的外观形态变化表征其对冲击载荷的抵御能力。爆炸实验和数值仿真法中的测试对象则既可针对材料，也可针对材料包覆下的动物，后者通过解剖获得的动物损伤情况或模拟获得的生物学响应特征，近似反映人体在该材料防护下的损伤效应，从而实现对材料防护效能评估。

需要注意的是，当前的材料爆炸冲击仿真模型多将材料视为层合板进行力学本构模型推导，忽略了内部各组分与结构等微观/细观特征对其整体力学性能的影响。而已有研究表明，细观/微观尺度的损伤累积到一定程度才会表现出宏观尺度的材料损伤，简化的宏观材料模型会导致对其内部损伤的忽略，造成防护性能预测结果的偏差。这个问题也已在部分研究中得到反映，例如，胡燕琪将复合材料宏观、细观有限元模型的预测结果与冲击实验结果进行对比，发现细观模型可有效预测材料的抗冲击性能，而宏观模型的拉伸应力预测高估了 16.1%，能量吸收量低估了 18.8%，因此，在使用数值仿真法评估材料爆炸防护性能时，需考虑材料模型的尺度设计。

3.2.2 针对服装性能的测评

针对防爆服装的冲击防护性能测评方法主要有爆炸实验法和数值仿真法。

爆炸实验的测试对象多为穿戴完整防爆服装的机械假人（如 HybridIII、THOR、WIAMan 等），通过压力、加速度传感器测量假人各部位的力学响应，结合冲击载荷计算防爆服吸收或转移的能量，从而实现防护性能的客观评估。然而，机械假人的测评结果存在高估服装防护效能的问题，这是因为机械假人测得的入射冲击载荷与人体真实承担的载荷并不相等，后者可高达前者的 6 倍。有学者采用含有内脏器官、骨骼、肌肉以及内置传感器的仿生假人进行爆炸实验，通过测量器官承担的载荷来评估服装的防护能力。基于仿生假人的服装爆炸防护性能测评方法仍处于探索阶段，成熟度不高，但将是未来的发展和提升方向。

在数值仿真法中，多层防护服装多被简化为单一材料构成。如薛琨等将软质防爆服装简化为 3cm 厚的超高分子量聚乙烯织物，唐刘建等将软防弹服装简化为 50 层

0.2mm 厚的超高分子量聚乙烯纤维增强复合材料织物, 简化的服装模型极大压缩了计算成本, 其预测结果与实验结果也有较好的一致性, 这对于服装材料层面的爆炸冲击防护性能研究具有积极意义。然而, 从人体损伤角度看, 目前的服装性能测评中未考虑服装与皮肤间非均匀厚度的空气层, 而已有研究发现衣下空气层厚度对服装防护性能存在复杂影响。一方面, 空气层形成一个缓冲空间, 冲击波传播经过这个缓冲空间时产生耗能, 减小了最终作用于人体的冲击载荷; 但另一方面, 在冲击载荷作用下, 衣下空气受到强烈压缩形成区域高压, 这种高压环境对人体组织产生强烈的冲击作用, 从而造成损伤。例如, Thom 等研究发现, 人体与软质防爆服装之间存在 10mm 空气层时, 人体损伤程度甚至会大于无防护服时的损伤。

4 评价指标对比

现有的 3 类测评方法所使用的爆炸冲击防护性能的评价指标可分为冲击载荷特征参数、防护材料特征参数以及防护生物体特征参数 3 类, 其应用范围及优缺点如表 2 所示。

表 2 材料/服装冲击防护性能评价指标

指标类型	表征及评价指标	应用范围	优点	缺点
冲击载荷特征参数	超压峰值、压力上升时间等	爆炸实验、激波管实验、数值仿真法	可定量评估材料/服装对冲击载荷的衰减	无法直接表征人体的损伤状况
	V50 值 (达到 50% 击穿概率时的破片速度)、破片运动速度变化量	轻气炮实验、数值仿真法		
防护材料特征参数	最大位移量、失效模式、裂纹扩展长度、损伤面积等 吸能量、比吸能、能量吸收效率、平台应力、峰值应力等	爆炸实验、数值仿真法等 等效载荷物理实验、数值仿真法	通过材料外观形态的变化表征其对冲击载荷的抵御能力 定量表征材料对冲击载荷的抵御能力	材料对冲击载荷的衰减与其对人体的防护能力不等价, 不适合单独使用
生物体特征参数	损伤等级 ASII 评分、AIS 评分等	爆炸实验	从被防护生物体损伤的角度评估材料/服装的防护效能,	不同损伤评分系统导致防护效能评估结果存在偏差
	压力峰值、加速度等	爆炸实验、数值仿真法	是最直观的评价指标	—

4.1 冲击载荷特征参数

冲击载荷经防护材料后的变化是评估其抗冲击性能的重要指标，人体冲击波或破片损伤判定准则中均建立了相应的载荷特征参数与人体损伤概率、损伤程度间的关系。

4.1.1 冲击波参数

基于冲击波特征参数的损伤判定准则主要包括:超压准则、冲量准则、超压-冲量准则、Bowen 损伤曲线等，其中，冲击波超压峰值是所有判定准则中的一个共同指标，多被用于量化表征材料、服装的冲击防护性能。例如:许鲁基于大型激波管，采用冲击波超压峰值表征二氧化硅气凝胶混杂芳纶非织布的载荷衰减能力;张立勇同样采用该指标表征泡沫铝材料对冲击波的衰减特性。除超压峰值指标外，冲击波压力上升时间也是评估材料冲击防护性能的重要指标。例如，Han 等在通过增加人体与防护材料间缓冲空间实现更有效的人体防护的研究中，使用冲击压力上升时间评估其性能优化效果。

现有的爆炸冲击防护性能测评方法中，爆炸实验、激波管实验与数值仿真均首先使用冲击波特征参数作为评价指标，着重考察冲击波压力峰值的衰减情况。当冲击波压力峰值低于损伤阈值时，则使用压力上升时间来进一步比较材料的防护性能。

4.1.2 破片参数

防爆服标准 NIJ0117.01 中弹道极限 V50 值确定为破片防护能力的评价指标，并提出了针对人体不同区域防护的 V50 值要求，从 3001100m/s 不等。高性能防护材料、防弹衣的性能评估中也常使用该指标。然而，防护服装对破片能量的消耗是实现人体防护的关键，基于破片速度的 V50 值无法直接反映人体的损伤情况。

在当前的破片冲击防护性能测评方法中，轻气炮实验与数值仿真均关注破片的能量衰减，可通过破片质量及运动速度计算得到。破片速度的变化量常被用来评估材料的防护性能，例如，余庆波等基于破片运动速度的减小量对聚氨酯、芳纶、软铝等缓冲材料的抗冲击效果进行对比;Bresciani 等也采用这个指标定量评估环氧树脂基芳纶防弹靶板的抗冲击性能，并结合破片冲击速度与损伤判据（如动能杀伤判据、比动能杀伤判据、A-S 杀伤判据等），可以得到防护材料与人体损伤之间的量效关系，从而评价其防护性能。

4.2 防护材料特征参数

防护材料特征参数包括形变毁伤特征与力学性能参数两大类，前者通过材料外观

形态的变化表征其对冲击载荷的抵御能力，后者则通过材料力学性能指标实现定量表征。

4.2.1 材料形变毁伤特征

在爆炸冲击波作用下，防护材料经历复杂的力学响应，拉力、压力和剪切力的耦合作用使其发生不同程度的形变和毁伤破坏，在此过程中，通过耗散能量实现冲击防护。最大位移量是形变程度的常用评价指标，王小伟等采用这个指标研究夹层结构厚度对材料抗爆性能的影响。材料毁伤破坏程度的评价指标包括失效模式的转变、裂纹扩展长度、损伤面积等，然而，此类指标无法准确判定材料对人体的防护效果。一方面，材料通过形变毁伤来吸收、分散冲击能量，从而减轻人体损伤；另一方面，材料强吸能能力伴随着剧烈的形变毁伤，导致材料防护性能下降甚至消失，因此，从人体防护评估的角度，形变毁伤特征指标不适合单独使用，还需结合相关的吸能能力进行综合判断。

4.2.2 材料力学性能参数

材料抗冲击性能测评中，常用的评价指标包括吸能量、比吸能、能量吸收效率、平台应力和峰值应力等，这些指标可定量表征材料在爆炸冲击载荷作用下的吸能和动态力学响应特点。较高的吸能量、比吸能、能量吸收效率、以及较长的平台应力段和较小的峰值应力，均表示材料的抗冲击性能更为优越。需要注意的是，防护材料吸能能力与其对人体的防护能力并不等价。Wang 等研究发现，负梯度多胞金属材料吸能量高于正梯度多胞金属材料，但后者产生的冲击峰值应力小，更有利于人体防护。

4.3 生物体特征参数

生物体特征参数是体现材料/服装爆炸防护效能最直观的评价指标，包括生物体损伤等级和力学响应参数。

4.3.1 生物体损伤等级

在着装动物爆炸实验中，动物死亡率是首先关注的指标。对于未直接死亡的生物体，进一步确认其损伤等级，以此评估材料/服装防护效能。例如，狄凤桐等基于大白兔死亡率评估爆炸防护装具的有效性；薛钰奇等将山羊伤情等级减轻作为聚脲材料抗冲击性能优于高分子量聚乙烯材料的评价指标。

关于动物爆炸冲击损伤评估，应用较为广泛的伤情评估系统有 Yelverton 提出的生物损伤评分系统校正损伤严重度指数（ASII），以及美国医学会、汽车工程师协会等

共同开发的通用损伤严重度评分系统 AIS。前者将损伤等级划分为 5 级:损伤阴性、轻微、轻度、中度、重度;后者则分别对身体 9 个区域进行损伤评价,共 6 级:轻度、中度、较重、重度、危重、极重,取最大值作为最终评分。然而,有研究发现在相同爆炸工况下(300gTNT, 3m 爆炸距离),基于 ASII 损伤评分系统判断动物发生 5 级重度损伤,而基于 AIS 评分则认为动物发生 3 级较重损伤。可见,依据不同损伤评分系统的材料/服装防护效能评价存在偏差,未来有必要建立统一的、标准化的伤情判断指标和准则,以提升材料/服装防护效能评估的准确性。

4.3.2 生物体力学响应参数

生物体力学响应参数可以客观反映损伤组织所承受的负荷水平,包括压力峰值及其加速度。如前文所述,目前的损伤评估准则主要基于入射载荷参数来判断生物体损伤程度。然而,Bar-kochba 等和 Matos 等的研究结果均显示,在爆炸冲击条件下,生物体组织器官(如肺、肝、脾)的响应压力峰值通常大于相应的入射载荷。可见,采用生物体响应的压力峰值来评估材料/服装的防护能力更为可靠。峰值加速度是另一个生物体力学响应参数,在加速度作用下,组织器官经历滞后运动引发的剪切应力和剪切应变,极易导致内部损伤。广为应用的脑部、胸部冲击损伤评价准则中,规定了 3ms 时间内峰值加速度的损伤阈值分别为 72g 和 60g(g 为重力加速度)。

现有的爆炸冲击防护性能测评方法中,着装仿生假人实验、着装生物体数值仿真法中均将冲击作用下生物体响应的压力峰值、加速度作为重点考察指标。温焱珂等通过比较“明胶—胸廓”仿生假人在穿戴防弹衣时心脏和左肺处的压力峰值,评估不同防弹衣的防护效能。Kang 等和 Dong 等构建了防弹衣和人体躯干的有限元模型,利用皮肤、骨骼和内脏器官的响应压力以及加速度来评估防弹衣的防护效力。

5 结束语

防爆服装通过对冲击载荷能量的阻隔或衰减实现爆炸事故中对人体的防护,能否准确评估防爆服装的冲击防护性能,对预测其投入使用后的效力具有重要意义,评估技术及方法的合理有效及标准化是关键。本文对现有的 3 类爆炸冲击防护性能测试方法、测试条件、测试对象、评价指标进行了对比分析,总结如下。

(1) 爆炸实验:最为接近真实爆炸冲击的复杂场景条件。材料或服装整体防护性能的测试载体包括动物、机械假人和仿生假人。动物实验通过存活率统计损伤等级评

估材料性能,不同损伤评分系统的结果存在差异,客观稳定性不足;机械假人可综合评估材料和服装结构特征的影响,但评估指标仍停留在冲击载荷特征参数的层面,通过载荷特征值与人体损伤的关系间接评估人体防护能力,尚存在高估防护效能的问题;仿生假人采用生物体力学响应评价指标,更直接地从人体防护的角度评估防爆服装性能。爆炸实验存在伦理制约和较高的安全风险,限制了该类测评技术的应用广度。

(2) 等效载荷物理实验:现有代表性设备有激波管、霍普金森压杆及轻气炮等,尚不能实现冲击波和破片 2 种载荷的同时加载,影响对防爆服或材料抗冲击性能评估的准确性,且对环境温度、湿度等条件的设置考虑不够充分。该方法主要用于评估材料性能,无法评估服装构成要素以及人体着装状态对防爆服整体性能的影响,也无法直接评估对人体的防护能力。材料形变毁伤特征和力学性能参数是等效载荷实验常用的评价指标,相对更为客观和稳定,但仍受到实验量、实验参数设置的限制,使得材料的冲击载荷衰减机制研究不够充分和全面。

(3) 数值仿真法:具有无损、可重复性高的优点,非常适用于爆炸这种极具危害性的场景。该方法可以通过建立爆炸源、防护材料或服装以及生物机体的模型,最大范围地获取冲击载荷参数、防护材料特征参数以及生物机体特征参数等一系列评估指标,并且可以可视化地呈现防护材料及服装在爆炸冲击下的瞬态变化,支持深入的材料或服装抗冲击机制及人体防护机制研究。然而,当前仿真研究中防爆材料设置以简化的宏观模型为主,导致预测结果的偏差,关于全尺度的防爆服数值仿真研究尚未有充分的报道。

未来的爆炸防护服装性能测评技术研究中,可推进仿生假人设备的研发,通过爆炸实验获得最接近真实爆炸场景中人体损伤的基础数据;开展更为广泛的等效载荷实验,深化材料防护机制研究,优化材料抗冲击性能与人体损伤之间的量效关系;提升数值仿真中防爆服、人体以及着装形态的建模精度,提升服装防护效能的预测准确性。通过提高对真实爆炸冲击环境、防爆服及其材料、人体生理特征的还原度,实现对冲击载荷下着装人体动态响应准确测评,从而更为合理、有效地评估服装的爆炸防护能力,充分保障人员生命安全。

来源: 纺织学报 2025 年第 01 期

2024/2025

中国产业用纺织品技术发展报告

2024/2025 Technology Development Report of China Industrial Textiles

第四篇 航空航天

飞机蒙皮材料的研究现状

徐昌权¹ 朱龙超² 罗明丰² 曹海建¹ 黄晓梅¹

(1. 南通大学纺织服装学院; 2. 连云港神鹰复合材料科技有限公司)

飞机蒙皮类似于飞机的皮肤，是指包覆在飞机骨架外的受力结构件，起到承受和传递载荷以及维持飞机外形的作用。在飞行过程中，机体会面临各种飞行状况，蒙皮的负载情况也十分复杂，而且蒙皮直接与外界接触，还会受到环境气候的影响，所以蒙皮不仅需要强度高、可塑性好，还要力求表面光滑，并具有较高的耐腐蚀能力。

1 飞机蒙皮材料

传统的飞机蒙皮材料大多数为金属材料，包括钢、铝合金、钛合金以及镁合金等。这些金属材料具有较高的刚度、强度和良好的尺寸稳定性，尤其是合金材料，密度小的同时，还具有疲劳强度高、比断裂韧度高、低温韧性良好等优异的性能。因此，合金成为早期蒙皮的主流材料。

与传统金属材料相比，纤维增强复合材料具有更加优异的特性，如相对密度小、强度高、抗疲劳性好、耐腐蚀等，因此复合材料在航空航天领域越来越受欢迎，正逐渐替代传统的金属材料。如美国波音公司 777 客机使用的复合材料占总重的 12%，而波音 787 客机的复合材料使用量提升到 52%；我国的大型飞机 C919 所使用的主要材料中，复合材料占比 11.5%，而 CRJ929 客机中复合材料比例提升到了 51%；空客 A380 采用的复合材料占飞机结构重量的 25%（碳纤维复合材料占比达到 22%），而下一代空客 A350 复合材料占比提升到 52%。复合材料的使用有效降低了机体重量，减少了能源消耗和废气排放。

在航空领域中，如何实现飞机的减重，从而降低所需的燃料，一直是重大的难题。马壮对民用飞机复合材料蒙皮的结构进行研究，发现在过渡区域使用交叉设计方案，

可以减轻蒙皮的重量；姜志平等对一体成型的复合材料加筋壁板进行优化设计，从而使得复合材料加筋壁板的重量减少 45%。碳纤维复合材料因其自身轻质、高强等特性，应用于航空领域中，可有效解决上述难题。如 FAREED 选用碳纤维增强环氧树脂基复合材料来替代飞机铝合金蒙皮，从而实现了飞机蒙皮重量降低 30%。

2 飞机蒙皮的成型工艺及影响因素

对于复合材料蒙皮来说，成型方法有很多，包括模压成型、真空袋压成型、热压罐成型等。复合材料加筋蒙皮结构的成型还涉及到共固化、共胶结及二次胶结等成型方式。成型前的铺层以及成型工艺的选择对蒙皮的综合性能与外观尺寸稳定性具有不可忽视的影响。

2.1 成型工艺

2.1.1 模压成型

模压成型是传统的材料加工成型方法，复合材料的模压成型与金属材料模压相似，都是采用阳模和阴模对原材料进行加热加压成型。模压工艺流程为：按照具体工艺要求，将粉粒状物料、纤维树脂或预浸料等铺放在模具型腔中，通过液压设备对其施加一定的压力和温度，在升温过程中树脂变成可流动的状态，对纤维充分浸润，并充满整个模腔，最终在温度和压力的作用下固化成型，得到相应的产品。

模压成型具有如下特点：原料损耗少，不会造成过多的损失；产品尺寸精度高，内应力很低，且翘曲变形也很小；产品表面光洁，无需进行二次修饰；模腔的磨损很小，维护费用较低；成型产品为较大型平板状制品；生产效率高，便于实现专业化和自动化生产。但其模具制造复杂，成本投入较大；受机型限制，批量生产中小型产品居多；对高尺寸精度要求的制品，该工艺有所短缺；成型后产品的飞边较厚，去除飞边的工作量大；不适合成型存在凹陷、侧面斜度或小孔等的复杂制品。

2.1.2 真空袋压成型

真空袋压技术最早出现在 20 世纪 80 年代，但很长时间内没有得到广泛应用，直到近几年，在节能减排、低碳经济等政策的大力提倡下，才得以应用与发展。真空袋压成型工艺是将纤维织物（预成型体）按照实际工艺要求铺放在模具表面，然后依次铺放脱模布、导流网、导流管、真空薄膜，并在两端分别放置树脂导流管和真空抽气管。采用密封胶对其进行密封，使用真空泵排出内部空气，使得真空薄膜与模具之间

形成一个“真空腔体”。随后，利用大气压力将树脂导入，对材料进行浸润，直至完全浸润。最后，保持真空袋密封，使其一直处于真空状态并完成固化。

真空袋压成型工艺对模具的要求较低，仅需要刚性模具和真空薄膜；对纤维的浸润效果好，负压条件下，树脂充分流动提高了纤维的浸润程度；此外，其属于闭模成型工艺，在固化树脂的过程中限制了有害物质的挥发，可减少对环境的污染。但该方法存在以下问题：对操作人员的技术要求较高，树脂混合及树脂含量的控制很大程度上取决于操作人员的熟练程度；成型后蒙皮的纤维含量低。

2.1.3 热压罐成型

热压罐成型是利用罐内高温高压空气进行加热加压成型的方法。由于罐内空气温度、压力均匀，保证了成型过程受热受压均匀，有助于提升产品质量一致性。具体的工艺流程为：将预浸料铺贴在模具上，然后将脱模布、透气毡等依次铺放，用密封胶将真空袋密封在模具上，放入热压罐中，连接抽真空管道，进行抽真空预压实，并检查装置是否漏气。确认无误后，关闭热压罐，设定相关工艺程序，开始加热加压固化成型，最终得到相应的产品。

热压罐成型具有制品受热均匀、使用范围广泛、模具要求相对简单等特点，适合大面积复杂型面的蒙皮、壁板和机身的成型；热压罐内的温度、压力几乎能满足所有聚合物基复合材料的成型工艺要求；成型工艺稳定可靠。但该方法成型耗时长，能耗高，且固化过程中用到的辅助材料价格昂贵。

2.2 成型影响因素

复合材料成型是指在一定的压力、温度条件下，经树脂浸润的纤维或纤维布在一段时间后实现固化成型。因此，固化的温度、压力和时间是影响复合材料成型的3个基本因素。除此之外，铺层方式和工艺选择对复合材料的成型同样具有重要影响。合理的铺层可以有效消减蒙皮成型后的内部应力及尺寸变形，并能够对蒙皮薄弱处进行补强，提升其承载能力。不同结构特点的蒙皮性能要求各异，因此，为了确保蒙皮成型后达到既定的性能指标，合理地选择成型工艺，甚至是对工艺进行优化，显得尤为重要。

2.2.1 铺层方式

在铺层方面，主要以优化铺层顺序、角度以及厚度来提升蒙皮的性能。如王伟等对碳纤维复合材料机身蒙皮的铺层进行优化，使其应力减小0.6%，应变降低6.2%，

承载能力提升 16.1%，优化后的结构更加稳定；彭翔等对复合材料机翼蒙皮的材料布局 and 铺层顺序进行优化设计，在不增加成本的前提下，提高了机翼的综合性能；彭坚等研究发现，铺层角度对减少甚至消除加筋蒙皮纤维折皱具有重大意义，蒙皮铺层角度与筋条垂直时，纤维折皱消除的效果最好。

2.2.2 工艺选择及优化

成型工艺对蒙皮的性能起着至关重要的作用，好的成型工艺设计可以提升蒙皮的强度，进而提高产品质量。徐荣章等研究了不同成型方法对复合材料加筋蒙皮结构承载能力的影响，发现与二次胶结的加筋蒙皮相比，共固化加筋蒙皮的破坏载荷降低了 18%，二次胶结的加筋蒙皮的承载能力优于共固化加筋蒙皮；刘林鑫等采用真空袋压工艺制备碳纤维树脂基 T 型加筋复合材料蒙皮，发现模具受热发生膨胀，对尚未开始固化的复合材料加筋板产生挤压，从而造成不可逆变形，而且与热压罐成型相比，在烘箱中固化会导致构件受热不均匀，存在较大的温度梯度差，进而产生一定的固化变形；章宇界等对碳纤维增强环氧树脂复合材料蒙皮的制备工艺进行优化，结果表明，采用双真空固化工艺使得 4mm 壁厚蒙皮产品孔隙率能够控制到 1.65%，内部质量得到提升。

由以上可以看出，成型工艺对蒙皮的强度、固化变形和孔隙率的影响不可忽略，通过对成型优化设计，可以有效地改善产品质量。但现有的理论均存在一定的局限性，仍需要进一步探究来构建一套统一的理论。

2.2.3 其他影响

工装是复合材料成型的基础，主要承担着传压、传热以及保障蒙皮形位尺寸的作用。因此，结合蒙皮的成型工艺、结构特点合理地选择成型工装显得很有必要。复合材料成型工装主要分为实体式工装和框架式工装两种。实体式工装虽然强度高、形面稳定，但是重量过大，使用过程中各部位温度均匀性差。框架式工装质量轻、运输方便，且热传递效果好。因此，大型复合材料蒙皮成型主要采用框架式工装。此外，成型温度、压力和时间等基本因素对成型的影响也是不可忽视。

3 飞机蒙皮的性能

对于蒙皮力学性能的研究始终是蒙皮结构设计中非常重要的环节。在飞行过程中，蒙皮会受到来自各个方向的气动载荷，这些载荷通过蒙皮以及与其相连接的构件转化

成拉压、弯扭和剪切的复合载荷来维持飞机平衡。

3.1 拉伸性能

拉伸性能是评价蒙皮材料力学性能的重要指标，通过拉伸测试可以了解材料在受到外力时的抵抗能力。李斌太等分别采用 Kevlar®、超高分子量聚乙烯（UHM-WPE）和聚对苯撑苯并二噁唑（PBO）织物作为增强结构制备蒙皮材料，并对其拉伸性能进行比较，研究发现，PBO 纤维增强蒙皮材料具有较高的拉伸强度，此外，提高增强织物经、纬纱张力的均匀性有利于提升蒙皮材料的拉伸性能。HANDE 等通过拉伸试验和有限元仿真分析，研究铺层角度对复合材料蒙皮拉伸性能的影响，发现 $[+45/-45/0/90]_s$ 层合板的拉伸破坏载荷最高，比 $[+45/+30/0/90]_s$ 层合板提高了约 17%。WANG 等研究了曲率半径对共胶结整体成型 T 型加筋蒙皮结构抗拉强度的影响，发现随着曲率半径的增大，T 型加筋蒙皮结构的抗拉伸能力呈现出先增大后减小的趋势。芦丽丽等研究了温度对玻璃纤维增强环氧树脂复合材料蒙皮力学性能的影响，结果表明，在 $-40\sim 80^\circ\text{C}$ 的环境温度下，蒙皮材料的拉伸强度和拉伸模量均随着温度的上升而降低。

纤维种类、铺层设计、蒙皮的曲率半径以及环境温度都会对飞机蒙皮材料的拉伸性能产生影响。不同纤维对蒙皮材料的拉伸强度增强效果有显著差异，选择合适的纤维制备蒙皮可以有效提升材料的拉伸性能；优化铺层设计可以改善蒙皮承载能力。此外，环境温度对复合材料蒙皮的拉伸性能也具有一定的影响。

3.2 弯曲性能

在不同的飞行阶段，飞机的速度、高度和重量是不同的，所需升力也是不同的，这就造成机翼的弯曲程度不同。在急剧飞升以及遭受恶劣天气的时候，机翼的弯曲程度必然会加大。为保证飞机的平稳飞行，飞机蒙皮特别是机翼蒙皮的弯曲性能不容忽视。COSTANZO 等研究发现，当重量相等时，复合材料蒙皮的性能要优于钛材料蒙皮。FAN 等设计并制造了碳纤维增强格芯夹层复合材料蒙皮，并通过弯曲试验揭示了格芯夹层结构蒙皮的两种典型破坏机制：分层和局部屈曲。缙建杰等采用三点弯曲试验对航空用碳纤维增强环氧树脂基复合材料在低温环境中的弯曲性能进行研究，发现低温会降低树脂基体的韧性，从而导致试样弯曲性能降低。

综上所述，一定条件下，相较于金属蒙皮，复合材料蒙皮的弯曲性能更优异；由于飞机在高空飞行时温度降低，导致树脂基体的韧性降低，所以制备复合材料蒙皮时，

选择耐低温型树脂是十分必要的。

3.3 压缩性能

压缩性能同样是飞机蒙皮重要的性能之一，许多学者对此展开相关研究。谭翔飞等对碳纤维复合材料加筋蒙皮进行压缩试验，发现在轴向压缩载荷作用下，试样的破坏形式主要有筋条断裂、蒙皮撕裂、筋条与蒙皮脱黏等，后屈曲破坏载荷约为屈曲载荷的 2.2 倍。许良等对复合材料加筋蒙皮进行压缩试验，研究发现蒙皮参数对复合材料蒙皮结构的承载能力具有显著影响，优化参数使得蒙皮结构的屈曲载荷提升了 35.4%，后屈曲载荷提升 22.2%。张浩宇等发现筋条的质量状态对于加筋蒙皮的后屈曲承载能力具有重要影响，轴压过程中蒙皮发生屈曲后，筋条会成为主要的承载部件。MO 等对加筋复合材料蒙皮板在轴压载荷作用下的屈曲和后屈曲行为进行了试验和数值研究，并提出了一种预测初始屈曲载荷的工程方法，研究表明蒙皮厚度、相邻筋条之间的距离会对加筋复合材料蒙皮的承载能力造成影响。

加筋结构可以有效增强复合材料蒙皮的抗压性能。加筋蒙皮受压发生屈曲时，筋条会起到主要的支撑作用，使得后屈曲承载能力得到明显提升。此外，复合材料加筋蒙皮受诸多因素影响，选择高质量筋条，优化蒙皮参数（蒙皮厚度、筋条间距等）可进一步提升承载能力。

3.4 剪切性能

蒙皮的剪切强度是衡量其在厚度方向上承载能力的重要指标，剪切强度的高低对复合材料蒙皮的分层等破坏具有最直观的影响。成李南等研究发现，相较于长桁结构形式和长桁间距，蒙皮厚度对蒙皮剪切性能具有更大的影响。LIAN 等对加筋复合材料蒙皮的剪切性能进行了试验和数值分析，结果表明，蒙皮的破坏载荷随其厚度的增大而增大。YANG 等系统地研究了几何参数和材料参数对复合材料蒙皮剪切性能的影响。结果表明，蒙皮长度、宽度以及碳纤维丝束大小对复合材料蒙皮的剪切载荷和临界剪切角有显著影响。ZHANG 等采用经验公式和有限元模型相结合的方法，研究了复合材料加筋蒙皮在湿热环境下的剪切屈曲性能。结果表明，湿热试件的破坏形式主要有面板开裂和加筋脱黏；受湿热环境影响，试件发生老化，其破坏载荷降低了约 25%。

综上所述，蒙皮的剪切性能受蒙皮厚度、蒙皮的结构参数、环境湿热条件等因素的影响，但现有的结论均有一定局限性，仍需要进一步探究来形成统一的理论。

3.5 抗冲击性能

飞机在服役过程中不可避免地会受到如砂石、冰雹、飞鸟或维修工具坠落等不同能量的冲击作用，这些冲击均会对蒙皮造成损伤破坏。高速冲击往往会对蒙皮造成穿透性破坏，而低速冲击则会对蒙皮的表面及内部造成不明显的损伤，并在后续的服役过程中逐渐扩大，进而在飞行过程中产生巨大的安全隐患。关于复合材料蒙皮的冲击损伤及损伤容限，国内外学者已经进行了诸多研究。

3.5.1 冲击损伤

对于不同的冲击能量，复合材料层合板展现出不同的损伤破坏形貌，从小到大可分为以下情况：（1）当冲击能量小于某一界限时，无损伤；（2）当冲击能量大于上述界限，表面无目视可检损伤，内部产生分层；（3）进一步增加冲击能量，表面产生目视可检损伤；（4）冲击能量超过某一值，发生穿透损伤。

齐佳旗等对不同材质的蒙皮蜂窝夹层板的低速冲击损伤进行分析对比，结果表明，碳纤维复合材料蒙皮-铝蜂窝夹层板的吸能、缓冲性能比铝蒙皮-铝蜂窝夹层板更加优异。ZHANG 等对蜂窝夹芯蒙皮在低速冲击过程中的表面变形和能量吸收进行了实验和数值研究，结果表明，蜂窝夹层蒙皮吸收的能量大部分以塑性形变的形式消耗。

为了进一步提升蒙皮的承载能力，通常会在蒙皮复合板上增加一定数量的异形加强筋。冲击后复合材料加筋结构具有多种损伤形式，其中蒙皮分层、筋条与蒙皮脱黏是两种最为常见的损伤形式。此外，在加强筋间的冲击与在加强筋上的冲击会产生不同的损伤。古兴瑾等对复合材料加筋板进行了高速冲击试验和数值模拟，发现筋条对试样的损伤面积有影响，增加筋条的厚度使迎弹面的损伤面积增大，但减少了背弹面的损伤面积。王富生等对复合材料加筋蒙皮的抗鸟撞性能进行研究，发现对于不同的撞击速度，非筋条数量越多，板材的抗鸟撞性能就越好，有时筋条的加入可能会起到反作用。

3.5.2 损伤容限

飞机蒙皮在服役过程中受到损伤后，仍具有一定的承载能力，蒙皮的剩余强度以及是否还满足服役的要求已成为许多学者的研究重点。FENG 等研究了在相同冲击能量下加筋碳纤维复合材料板不同位置的冲击损伤及损伤后的面内剪切性能。结果表明，与无损伤蒙皮相比，冲击损伤蒙皮性能退化和由此引起的脱黏现象是造成损伤后剩余强度降低的主要原因。欧阳天发现在对含冲击损伤的加筋蒙皮的压缩过程中，含损伤的筋条会发生卸载，对薄板支撑减弱，进而使得复合材料加筋蒙皮的承载能力大幅降

低。WANG 对加筋复合材料蒙皮冲击损伤后屈曲行为进行了实验和数值研究。数值结果表明，冲击部位的压缩破坏和剪切分层破坏是导致加筋复合材料蒙皮进一步破坏的主要原因。孟政委等对航用复合材料加筋蒙皮的冲击后剩余剪切强度进行研究，结果表明，断裂破坏主要沿着筋条边缘进行扩展，并没有完全经过受到冲击损伤的位置。YU 等分别对加筋蒙皮的筋条和平板蒙皮的中心进行冲击，并测试冲击后压缩强度。结果表明，与原始试样相比，当冲击位置位于加强筋上时，加筋蒙皮的极限抗压强度显著降低。然而，在相同的冲击能量下，平板蒙皮的极限抗压强度减少幅度较小。

综上所述，对于加筋蒙皮而言，受到冲击的部位对冲击后的剩余强度具有显著的影响。无损伤筋条可以对冲击后的蒙皮起到有效的支撑作用，使得蒙皮的冲击后剩余强度增强；但冲击点在筋条上时，筋条受损发生脱黏，支撑作用减弱，从而蒙皮的冲击后剩余强度降低。

4 展望

长期以来，航空领域追求的目标一直是高速度、高性能、轻量化，以确保飞行安全，降低所需的燃料，实现节能减排。与此同时，飞机不断提速对蒙皮的技术要求也越来越高。复合材料蒙皮因其自身的密度低、比强度和比刚度高等特点，必将是飞机蒙皮未来的主要发展方向。为实现高速度、轻量化的目标，需要充分挖掘现有材料的性能，探寻高性能纤维与树脂基体搭配，优化复合成型工艺等。与此同时，新型高性能材料的研究开发及新型组织结构的设计也十分必要。

来源：纺织导报 2024 年第 06 期

降落伞用新型伞绳与伞带连接方式的试验研究

李甜¹ 宋炳涛¹ 李少腾² 沈明¹ 姜润喜¹

(1. 山东鲁普科技有限公司; 2. 北京空间机电研究所)

太空探测技术发展已久, 探测器回收是至关重要的一个环节, 降落伞是回收系统的主要组成部分。降落伞通常由伞盖、伞带和伞绳组成, 三者之间通过缝纫方式连接在一起, 因此三者的连接强力决定降落伞的质量, 进而关系到太空探测器回收是否成功。以往降落伞伞绳和伞带属于两种产品, 伞绳为纤维编织绳, 伞带为纤维编织带, 两者通过缝纫线缝合连接。然而缝纫会造成伞绳和伞带不同程度的破坏, 造成伞绳与伞带的连接不牢固。近年来, 对于伞绳与伞带的连接方式及提高其连接强力成为研究重点, 本文提供一种新型的连接方式, 可将伞绳与伞带的连接强力提高 10%左右。

1 伞绳与伞带的新型连接方式

传统绳带连接方式有缝接和编眼插接。显然, 从纤维到绳索和纤维到织带, 存在着纤维强力的利用率转化, 而把绳索与织带缝合在一起又存在着缝纫强力转化。这两个强力转化大大降低了绳和带的强力。编眼插接方式工艺比较复杂, 同时编眼插接会破坏绳、带本身的结构, 造成一定程度的强力损失。

连续绳带是一种新型的伞绳和伞带的连接方式, 如图 1 所示, 连续绳带由 A 和 B 两部分连接而成, 不需要借助外力, 其本身为自动连续结构。连续绳带制作技术可实现绳、带连续过渡编织, 编织绳带的经纱连续无接头, 绳带连接部位强力保持率可达到绳或带原始断裂强力较低者的 90%以上。该技术将织带编织组合到三维柱状体绳索编织结构中, 解决了航空降落伞径向带与伞绳之间的连接薄弱的问题, 大幅提升了连接部位的连接强力与连接效率。

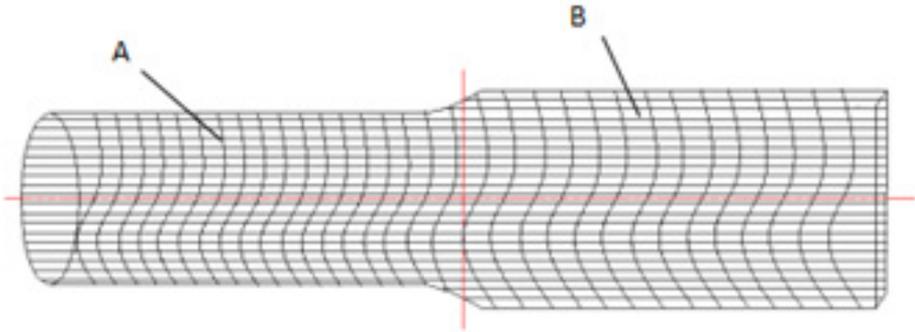


图 1 连续绳带示意图

2 伞绳与伞带新型连接产品的设计

连续绳带是由经、纬两个系统的纱线在织机上相互交织而成的。平行于编织方向的纱线称为经纱，与编织方向垂直的纱线称为纬纱。在形成绳或带时，综框由开口机构控制做上下交替运动，使一部分经纱提升、另一部分经纱不提升，形成梭口，纬纱由引纬机构控制引入梭口，通过打纬机构由钢筘将纬纱推向织口完成经纬纱交织，从而形成连续绳带产品。经纱数量决定了连续绳带产品 A 部分的直径；经纱数量和纬纱的张力决定了连续绳带产品 B 部分的宽度和厚度，当纬纱张力较大时，B 部分的宽度会减少、厚度会增加。

2.1 连续绳带产品的生产工艺设计

捻线：选择长丝原料对其进行加捻。

络筒：通过络筒机将得到的捻线分卷到相应数量的筒子上。

穿纱：(1) 将筒子摆放在纱架上，纱线穿出张力器后平行穿入断纱自停检测装置，过程中避免纱线交叉。为保证纱线有足够的张力，可通过在张力器上增加螺母的方式均匀张力，螺母数量根据经纱粗细调整。

(2) 将纱线均匀穿入分纱箱，穿完纱架第一层纱线，再穿第二层纱线，逐层穿入。

(3) 经纱穿过张力辊，其中绳皮与缝线、绳芯的织造工艺不同，所以分别穿上、下张力辊。张力辊根据纱线数量增加一定配重，避免编织过程中纱线张力太小。

(4) 按照工艺图将纱线穿过综丝和钢筘，在钢筘处均分穿过每个筘齿，确保织带

紧密均匀。

调试：（1）通过控制器调节花纹组织、纬密、纬纱张力、织物宽度等设备参数。

（2）手工调整舌针、送纬针、压针或锁边纱针位置，避免出现漏针、脱针、浮线过长等问题，确保正常编织。

（3）引入梭口的纬纱，依靠打纬机构推向织口与经纱交织，构成织物。

（4）织物中纬纱的排列状况和经纬纱的屈曲情况，随着打纬时经纬纱所具有的不同张力和变形能力而定。

E. 编织

编织完成一定长度绳索后，连接部位通过花纹组织程序切换实现连续编织。

2.2 不同材料的连续绳带产品

2.2.1 连续绳带产品的命名原则

连续绳带产品由 A 和 B 两部分组成，整体简称为 RT。在表示不同纤维材料编织而成的 RT 产品时后缀纤维材料的简称。例如，涤纶连续绳带产品简称为 RT-PET，锦纶连续绳带产品简称为 RT-PA。在实验过程中，为了区分不同材质不同宽度 RT 产品时继续后缀 A 部分直径/B 部分宽度+厚度。例如 A 部分直径为 5mm，B 部分宽度为 12mm、厚度为 1mm 的涤纶连续绳带产品简称为 RT-PET-5/12+1。

2.2.2 原料的选择

20 世纪中叶前，合成纤维尚未开发出来，应用于各领域的纺织纤维主要是天然纤维，如棉纤维、毛纤维和麻纤维等。随着合成纤维的相继问世，其突出的优良性能逐渐取代天然纤维应用于各行业。航空航天领域同样经历了由天然纤维向合成纤维的过渡，目前应用较多是涤纶纤维（PET）、锦纶纤维（PA，主要为锦纶 6 纤维）、对位芳纶纤维（PPTA，主要为缩聚型对位芳纶）和超高分子量聚乙烯纤维（HMPE）等，几种纤维的主要物理性能和耐紫外性能对比见表 1。

表 1 几种合成纤维物理学性能数据表

纤维名称	密度 (g/cm^3)	熔点 ($^{\circ}\text{C}$)	断裂强力 (cN/dtex)	断裂伸长率 (%)	耐紫外性能
涤纶纤维	1.38	260	6.2-8.0	10.0-20.0	好
锦纶 6 纤维	1.14	220	6.2-8.0	20.0-25.0	较好
PPAT 纤维	1.44	450 (发生热分解)	19.5-21.5	3.1-3.7	一般
HMPE 纤维	0.97	144-152	30.9-39.8	3.1-3.6	好

2.2.3 不同材料连续绳带产品的设计

为了更加有效地选择适用于探测器回收降落伞的连续绳带产品，制作了两款不同材质的连续绳带产品，分别是：涤纶连续绳带产品（简称 RT-PET）和对位芳纶连续绳带产品（简称 RT-PPTA）。

表 2 不同连续绳带产品明细

明细产品	组成部分	结构	材质	规格 (D)	根数	张力 (%)
RT-PET-3/8+1.4	A	经纱	PET	3000	18	/
		纬纱	HMPE	200	1	63
	B	经纱	PET	3000	18	/
		纬纱	HMPE	200	1	54
RT-PET-4/10+1.5	A	经纱	PET	3000	36	/
		纬纱	HMPE	200	1	55
	B	经纱	PET	3000	36	/
		纬纱	HMPE	200	1	65
RT-PET-5/13+2	A	经纱	PET	3000	48	/
		纬纱	HMPE	200	1	57
	B	经纱	PET	3000	48	/
		纬纱	HMPE	200	1	81
RT-PET-8/14+3	A	经纱	PET	3000	96	/
		纬纱	HMPE	200	1	67
	B	经纱	PET	3000	96	/
		纬纱	HMPE	200	1	90
RT-PET-3/7+1.7	A	经纱	PET	3000	18	/
		纬纱	HMPE	200	1	63
	B	经纱	PET	3000	18	/
		纬纱	HMPE	200	1	44
RT-PET-3/9+1.3	A	经纱	PET	3000	18	/
		纬纱	HMPE	200	1	63
	B	经纱	PET	3000	18	/
		纬纱	HMPE	200	1	64
RT-PPTA-3/8+2	A	经纱	PPTA	1500	40	/
		纬纱	HMPE	200	1	90
	B	经纱	PPTA	1500	40	/
		纬纱	HMPE	200	1	48

明细产品	组成部分	结构	材质	规格(D)	根数	张力(%)
RT-PPTA-3/10+1.6	A	经纱	PPTA	1500	40	/
		纬纱	HMPE	200	1	90
	B	经纱	PPTA	1500	40	/
		纬纱	HMPE	200	1	60
RT-PPTA-3/12+1.4	A	经纱	PPTA	1500	40	/
		纬纱	HMPE	200	1	90
	B	经纱	PPTA	1500	40	/
		纬纱	HMPE	200	1	73
RT-PPTA-3/13.5+1.3	A	经纱	PPTA	1500	40	/
		纬纱	HMPE	200	1	90
	B	经纱	PPTA	1500	40	/
		纬纱	HMPE	200	1	81

3 性能测试结果与分析

编织完成的连续绳带产品参照 GB/T 8834—2016《纤维绳索 有关物理和机械性能的测定》，检测了产品的强力。参照标准，每款产品取五个样品，在大气环境中进行预调试后进行测试。

表 1 RT 产品的强力

序号	产品	线密度(g/m)	强力(N)			连接效率(%)	
			整体	A	B	与 A	与 B
1#	RT-PET-3/8+1.4	14.55	2873	3144	3169	91.38	90.66
2#	RT-PET-4/10+1.5	26.65	6405	6097	6550	105.05	97.79
3#	RT-PET-5/13+2	35.05	8408	7700	8096	109.19	103.85
4#	RT-PET-8/14+3	75.45	17420	19666	17654	88.58	98.67
5#	RT-PET-3/7+1.7	14.6	2421	3144	2497	77.00	96.96
6#	RT-PET-3/9+1.3	14.4	2863	3144	3581	91.06	79.95
7#	RT-PPTA-3/8+2	16.86	6241	6726	6411	92.79	97.35
8#	RT-PPTA-3/10+1.6	16.73	6757	6726	7210	100.46	93.72
9#	RT-PPTA-3/12+1.4	17.19	6725	6726	7529	99.99	89.32
10#	RT-PPTA-3/13.5+1.3	17.23	6512	6726	7918	96.82	82.24

从表中数据可以看出：

(1) 上述 10 款 RT 样品的连接强力均达到原始 A、B 两部分中强力较低者的 90% 以上，满足了在探测器回收降落伞上使用的基本技术要求。

(2) 1#、2#、3#和 4#样品，随着 RT-PET 产品中 A 和 B 部分直径和宽度的增大，强力逐渐增大，同样线密度也逐渐增大；观察测试中断裂现象，8mm 和 9mmB 部分经纱直接拉断，但 7mm 时少部分纬纱断裂后经纱延伸很快断裂，说明随着 B 部分宽度增加，受力时纬纱不会被提前撑断，最后经纱纬纱同时断裂，全部经纱同时断裂释放能量高破断力大。

(3) 5#、1#和 6#样品，同材质、同 A 部分直径下，随着 B 部分宽度增加、厚度减少，RT 样品的强力先增大后降低。

(4) 7#、8#、9#和 10#样品，同属于 PPTA 材质，在 A 直径相同的前提下，B 部分的强力直接影响着整体的强力；当 B 部分强力低于 A 部分时，整体 RT 产品的强力较低；当 B 部分强力高于 A 部分时，整体 RT 产品的强力较高，且此时 A 和 B 部分强力越接近时整体 RT 产品的强力越高。

通过实验可知，设计开发的新型探测器回收降落伞用伞带和伞绳连接产品的连接强力可以达到“整体连接强力达到两者中原始强力较低者的 90%以上”的技术要求，证明该产品可以应用到回收降落伞上，解决此前伞带和伞绳通过缝纫后连接强力损失大、连接效率低的问题。

4 结语

本文在了解到探测器回收降落伞的伞带和伞绳通过缝纫连接后存在连接强力小、接连效率低的问题，设计开发了一款新型的伞带和伞绳的连接产品，并命名为 RT 产品。原本使用的伞带和伞绳通过缝纫连接后，由于缝纫针和缝纫线对伞带和伞绳有一定的组织破坏性，造成了不可避免的强力损失，导致伞带和伞绳通过缝纫连接后的连接强力达不到两者原始强力中较低者的 90%；而 RT 产品，通过改变生产设备的参数，可以实现从带到绳或者从绳到带的连续编织，使得带和绳的连接不需要通过缝纫，进而消除了绳带之间因为缝纫造成的强力损失。确定了产品的制作工艺后，生产了 PET 材质和 PPTA 材质的 RT 产品，规格大小不一，通过检测，上述 RT 产品的连接强力均达到其组成 A 和 B 部分之间较低强力的 90%以上，符合应用到探测器回收伞的基本要

求。RT 产品作为降落伞伞绳和伞带的替代产品，即保持了高效的连接强力又降低了制作流程和工序。但产品是否能应用在探测器降落伞上还需要经过更加严格的检测和反复试验，以保证探测器回收的安全可靠性。

来源：纺织导报 2024 年第 04 期

三维机织复合材料 T 型接头的拉伸性能

张一帆^{1,2} 安柳絮^{1,2} 闫英杰^{1,2} 邹齐³ 刘晓志⁴ 郭俊华⁵ 陈利^{1,2}

(1. 天津工业大学先进纺织复合材料教育部重点实验室; 2. 天津工业大学纺织科学与工程学院; 3. 中国航发北京航空材料研究院先进复合材料国防科技重点实验室; 4. 中国直升机设计研究所; 5. 江苏科技大学能源与动力学院)

三维机织复合材料由于其优异的抗冲击损伤能力、较高的断裂韧性以及近净成形能力, 被广泛应用于航空航天及国防领域。T 型接头是航空关键结构件中常见的结构形式之一, 是大型结构的基本单元结构, 且拉伸载荷是其最主要的载荷形式。三维机织结构具有优异的可设计性, 通过合理分布纱线及调控纱线取向, 可提升复合材料 T 型结构的承载能力。

近年来, 许多学者围绕复合材料 T 型接头的力学性能开展了大量的研究工作。Tan 等研究了 Z-pin 增强 T 型接头的拉伸性能, 结果表明 T 型接头的初始失效强度和失效模式与底板的厚度密切相关。Kim 等提出了一种新的单线缝合工艺, 利用缝合工艺制备复合材料 T 型接头, 并与使用 Z-pin 工艺制造的 T 型接头进行对比, 结果表明该工艺最大限度地减少了碳纤维的弯曲并防止其断裂, 大幅提高了复合材料 T 型接头的力学性能。Yan 等对 2 种仅在连接处有结构变化的三维机织 T 型接头和层合 T 型接头进行了拉伸试验研究, 试验结果表明三维机织复合材料 T 型接头在极限强度和损伤容限均优于层合 T 型接头, 纤维结构的变化可以改变复合材料 T 型接头的承载能力。Hao 等研究了三向正交机织复合 T 型结构的准静态压缩性能和横向冲击性能, 复合材料内部的经纱和纬纱的直线排列方式, 赋予材料优异的面内性能。

目前, 对复合材料 T 型接头的拉伸性能研究主要集中于层合结构 T 型接头、层间增强层合结构 T 型接头以及三维机织结构 T 型接头等, 但是三维机织结构中纱线取向对 T 型结构承载能力影响的相关研究却未见报道。本文设计并制备了不同结构以及不同连接方式的三维机织复合材料 T 型接头, 对其拉伸性能进行试验研究, 结合非接触

全场应变测试系统获取其应变分布变化规律，并分析其宏观力学行为特点。利用 Micro-CT 测试技术获得 T 型结构的损伤模式并揭示其破坏机制，为三维机织复合材料 T 型接头结构设计及应用提供参考。

1 多层多向机织 T 型结构

多层多向机织 T 型结构是在三维机织 T 型结构的基础上引入斜向纱线，显著提升了结构的整体性，并能够改善其连接位置的应力集中现象，并可根据受载工况优化纱线排列、纱线取向分布以及立筋和底板的连接方式等，可设计性强。图 1 为多层多向机织 T 型结构示意图。其结构主要包括 5 个纱线系统：经纱（ 90° ）系统、纬纱（ 0° ）系统、斜向纱（ $\pm 45^\circ$ ）系统以及接结经纱系统。

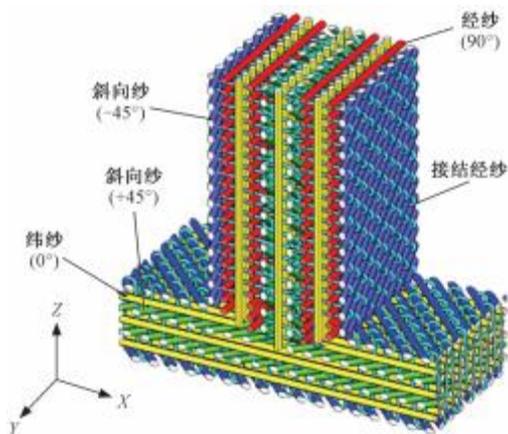


图 1 多层多向机织 T 型结构示意图

2 试验部分

2.1 复合材料 T 型接头的制备

试验选用山西钢科碳材料有限公司生产的 TG800HX-12K 碳纤维为增强纤维，天津晶东化学复合材料有限公司生产的 TDE-86 环氧树脂作为基体材料，碳纤维及环氧树脂材料的性能如表 1 所示。

表 1 材料性能参数

材料	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	线密度/ tex	拉伸强度/ MPa	弹性模量/ GPa	断裂伸长率/ %
碳纤维	1.8	500	5678	290	2.32
树脂	1.2	—	80	3.5	—

设计了 3 种不同结构参数的 T 型接头预制体，分别用 LTL01-A、LTL01-B 以及 MW01 表示，每种接头预制体进行 3 组试验，编号分别为 LTL01-A-1/2/3、LTL01-B-1/2/3、MW01-1/2/3。具体结构参数见表 2。LTL01-A、LTL01-B 立筋和底板采用层联机织结构，MW01 采用多层多向结构。连接处采用分叉连接和交叉连接，分叉连接的 T 型预制体立筋织造完成后，将织物立筋区域预留的纬纱作为织物底板的纬纱，左右分叉引入织物底板区域的左半部分和右半部分；交叉连接的 T 型预制体立筋织造完成后，改变引纬方式，将织物立筋区域预留的纬纱左右交叉引入织物底板区域的右半部分和左半部分，之后再单独引纬，完成预制体的织造，如图 2 所示。T 型预制体是在天津工业大学复合材料研究院自行开发的设备制造。获得 T 型结构预制体后，采用树脂传递模塑（RTM）成型工艺进行预制体复合成型。

表 2 T 型接头预制体及复合材料参数

试样 编号	纱线线密度/tex				织物密度/(根·cm ⁻¹)				织物 结构	连接 方式	纤维体积分 量/ %
	经纱	纬纱	斜向 纱	接结 经纱	经纱	纬 纱	斜向 纱	接结 经 纱			
LTL01-A	1000	1000	—	500	4	4	—	4	层联	分叉连接	54.52
LTL01-B	1000	1000	1000	500	4	4	—	4	层联	交叉连接	55.34
MW01	1000	1000	1000	500	4	4	4	4	多层多向	分叉连接	54.82

2.2 拉伸试验

2.2.1 试样准备

T 型接头拉伸试验参照 GB/T1040.4—2006《各向同性正交和正交各向异性纤维增强复合材料的实验条件》进行。将试样切割成 90mm×30mm×90mm 大小，试样的立筋和底板的厚度分别为 5.7、3.6mm，每种试样的数量为 5。为测量试样立筋与底板连接区域的应变分布，对试样的切割面进行喷漆处理，确保切割面上的黑白漆分布均匀。

2.2.2 试验设备

试验采用的夹具由底座和压板构成，2 个压板通过螺栓固定在基座上，并通过基

座上的槽口进行左右位置的调整，以便压紧试样，整个夹具通过底座底部的腹板与试验机的下部夹头相连接。压板、底座以及螺栓均由高硬度材料制成，具有较高的刚性，不易发生形变。

利用日本岛津 AG-250KNE 型材料试验机对三维机织复合材料 T 型接头进行拉伸试验，并通过德国 GOM 公司的非接触式全场应变测量系统 (DIC) 检测试样立筋与底板连接区域的全场应变。在此基础上，利用上海恩迪检测控制技术有限公司的 diondod2 高分辨率全能型微纳米 CT 系统对试样内部损伤状态进行分析，试验设备如图 3 所示。

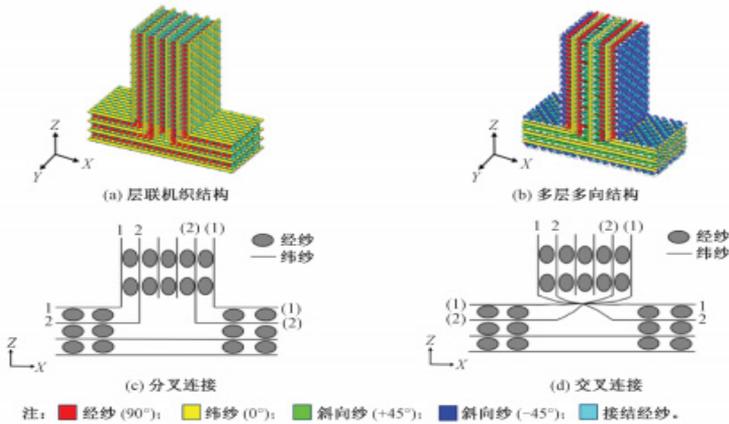


图 2 不同结构及引纬方式示意图



图 3 试验设备

3 试验结果及分析

3.1 拉伸力学行为分析

通过拉伸试验得到的试样载荷—位移曲线如图 4 所示。可以看出，复合材料 T 型接头的拉伸行为具有非线性特点，且具有阶段性，根据曲线特征，可将其拉伸行为划分为 3 个阶段。

第 1 阶段，从加载开始到第 1 次载荷下降（ $0\sim r$ ），此阶段为线弹性阶段，载荷—位移曲线的斜率最大，体现了复合材料 T 型接头的初始刚度，同种结构的各试样曲线几乎重合，说明 T 型接头抗拉性能在此阶段的分散性较小。

第 2 阶段，从第 1 次载荷下降到峰值载荷（ $r\sim p$ ），此阶段随着载荷增加，曲线斜率开始减小，试样表面逐渐出现损伤，开始出现基体开裂以及纤维滑移，试样的拉伸载荷达到极限。

第 3 阶段，从峰值载荷到最终破坏载荷（ $p\sim q$ ），此阶段曲线在载荷达到峰值后，出现短暂的载荷骤降，但下降幅度较小，随后载荷出现小范围波动，这是由于损伤在试样内部进一步扩展，伴随着更多的树脂开裂和纤维断裂，随后拉伸载荷急剧下降，大量纤维被拉断，试样发生结构性破坏。

T 型接头的拉伸强度主要取决于立筋的拉伸强度以及立筋与底板的连接强度，在拉伸测试中，每种试样的数量为 3，从曲线看离散性较小，试样 LTL01-A、LTL01-B、MW01 的拉伸强度的离散性分别为 3.54%、0.67%、2.81%。试样 LTL01-A 的拉伸强度远小于试样 MW01，这是因为 LTL01-A 中直接承受拉伸载荷的纱线只有 0° 方向纱以及 90° 方向纱， 0° 方向纱逐渐失效后，载荷持续下降，结构失去承载能力；MW01 结构中不仅包含 0° 方向纱、 90° 方向纱，还包含 $\pm 45^\circ$ 斜向纱， $\pm 45^\circ$ 斜向纱贯穿底板和立筋，加强了底板与立筋的连接强度，提升结构的整体性，改善立筋和底板连接处的应力集中，有效提高了 T 型接头的拉伸性能。

3.2 试样断裂形貌及应变分布特征

图 5 示出复合材料 T 型接头在拉伸测试后的破坏形貌，发现试样 LTL01-A 的破坏主要集中在立筋与底板的连接区域，其主要破坏形式包括基体开裂和连接处的纬纱断裂，且断裂较为严重。这是由于在拉伸载荷作用下，连接处的纬纱承受主要载荷，随后应力在试样内部扩展，基体开裂并纬纱逐层被拉断，导致试样被完全破坏；从试

样最终破坏形貌来看, 试样的立筋和底板表面出现的裂纹较少, 这是因为在三维层联织结构中, 每 2 层纬纱均通过 1 层接结经纱捆绑, 能够有效限制分层损伤的扩展。

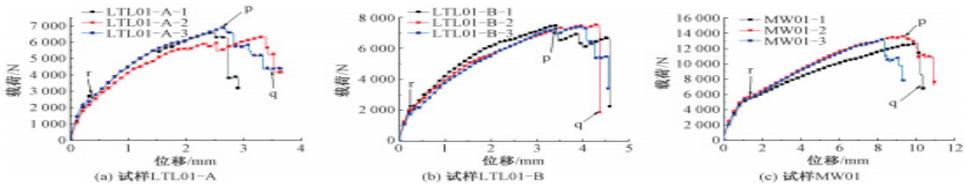


图 4 复合材料 T 型接头拉伸性能

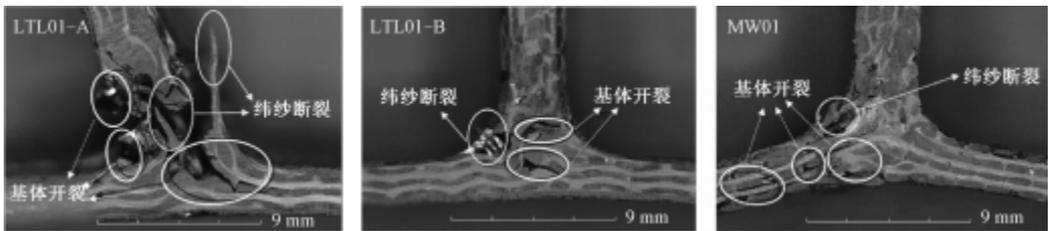


图 5 复合材料 T 型接头断裂形貌

相比之下, 由于连接方式的差异, 试样 LTL01-B 的破坏程度较轻, 从图 5 可以看出, 试样 LTL01-B 的连接区域出现少量基体开裂, 连接处的一侧边缘有纬纱断裂和基体裂纹, 裂纹沿宽度方向延伸, 但整体破坏范围较小, 表明连接区域的交叉纬纱可以有效减少应力集中, 避免在连接区域发生大范围的基体和纤维断裂。

试样 MW01 的损伤集中于立筋与底板的连接区域, 主要表现为底板一侧的基体裂纹以及纬纱断裂, 基体开裂程度较小, 连接处附近的底板无明显基体开裂和纬纱断裂, 试样连接处边缘的裂纹并不显著, 纬纱的断裂程度也较轻, 可见, 多层多向结构由于 $\pm 45^\circ$ 斜向纱的引入可改善试样连接处的应力分布, 提高复合材料 T 型接头底板的抗剪切性能。

为更直观地观察复合材料 T 型接头的内部损伤, 对破坏后试样进行 CT 损伤扫描, 扫描结果如图 6 所示。

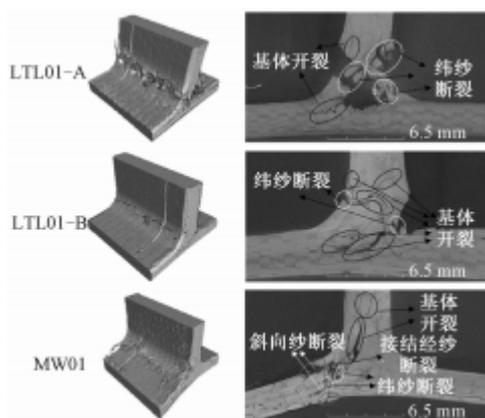


图6 复合材料T型接头CT扫描图

可以看出：试样 LTL01-A 的破坏模式主要表现为基体开裂和纬纱断裂，在试样的连接区域，基体被严重破坏并发生剥离，连接处左右两侧外层纬纱几乎全部断裂，导致试样的立筋和底板几乎完全脱离，属于严重破坏损伤，然而，在试件底板的其他部位和立筋区域，并未观察到明显的基体裂纹或纤维断裂现象，这表明连接区域是应力集中主要部位。试样 LTL01-A 的连接设计导致试件在拉伸过程中的性能较差，连接部位的损伤尤为严重，最终导致试件彻底丧失了承载能力。

试样 LTL01-B 的破坏模式与试样 LTL01-A 相同，主要体现为基体开裂和纬纱断裂，在连接处两侧外层出现纬纱断裂，基体裂痕主要出现在立筋与底板连接部位，裂纹沿宽度方向延伸，但较试样 LTL01-A 损伤较小，仅出现轻微裂纹，整体破坏范围较小，这表明连接处采用交叉连接的纬纱可以分散拉伸载荷带来的应力集中，有效阻止了裂纹扩展，同时通过经纱和基体截面分担拉伸载荷带来的应力，导致连接部位经纱与基体发生界面脱粘，产生基体裂纹。

试样 MW01 的最终损伤模式较前二者复杂，包括基体开裂，纬纱断裂、斜向纱断裂以及接结经纱断裂，损伤主要出现在靠近连接部位的底板区域，主要表现为底板一侧的基体材料出现裂纹以及连接区外侧的纬纱发生断裂，并沿着纵向传播，基体开裂程度较小，连接区域中心无明显的基体裂痕和纬纱断裂，这表明多层多向结构由于 $\pm 45^\circ$ 斜向纱的引入可提高复合材料 T 型接头的抗拉能力，同时由于试样 MW01 在底板厚度方向上仅有 1 层贯穿厚度的接结经纱，抗拉伸能力较弱，在拉伸过程中，靠近连接处底板的基体、斜向纱、接结经纱和纬纱沿厚度方向发生断裂，导致试样失效。

采用 DIC 系统采集试样 3 个阶段初始时刻的应变云图，如图 7 所示。可以看出，在第 1 阶段，试样均未发生明显变形；第 2 阶段，试样 LTL01-A 和试样 LTL01-B 在连接位置出现明显的应变集中，而试样 MW01 的应变集中则不明显；第 3 阶段，试样 LTL01-A 内部已展现出面积较大的应变集中区域，相比之下，试样 LTL01-B 的变形相对较小，对于试样 MW01，其应变主要集中于连接部位的表面区域。

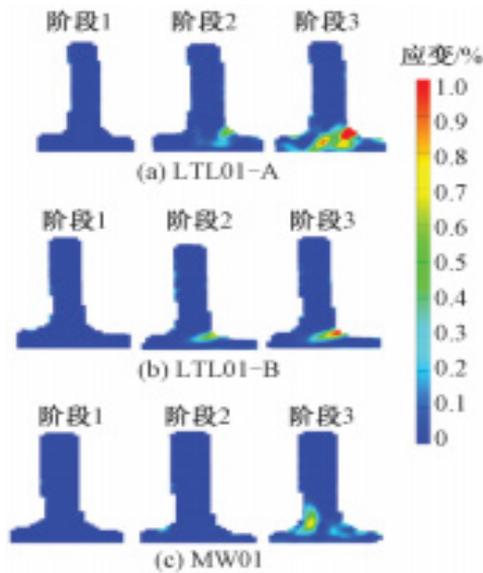


图 7 复合材料 T 型接头应变云图

在 3 个阶段中，试样 LTL01-A 的应变值始终处于最高值，这与其较小的失效位移相关，由于该结构的连接处缺少交叉纬纱，从第 3 阶段开始，试样 MW01 的损伤主要集中于表面损伤。这表明，连接方式的改变以及 $\pm 45^\circ$ 斜向纱的引入，很大程度地减轻了复合材料 T 型接头连接区域的应变集中现象。

3.3 连接方式对材料 T 型接头拉伸性能影响

试样 LTL01-A 和试样 LTL01-B 的立筋和底板均为三维机织层联结构，立筋与底板连接处分别采用分叉连接和交叉连接的方式，进行拉伸试验得到的试样拉伸强度如图 8 所示。可以看出，试样 LTL01-A 的平均拉伸强度为 38.83MPa，试样 LTL01-B 的为 43.67MPa，二者相差不大，但采用交叉连接方式的试样 LTL01-B 略高于采用

分叉连接方式的试样 LTL01-A，拉伸强度提高了 12.46%，表明试样 LTL01-B 中表层纬纱在连接处采用交叉连接的方式引入底板，使得拉伸过程中连接处的应力集中得到缓解，且交叉引入的纬纱还能抵抗拉伸载荷在连接处产生的剪切作用，能够有效限制损伤向试样内部的扩展，可见立筋和底板连接处采用交叉结构可有效提高复合材料 T 型接头的拉伸性能。

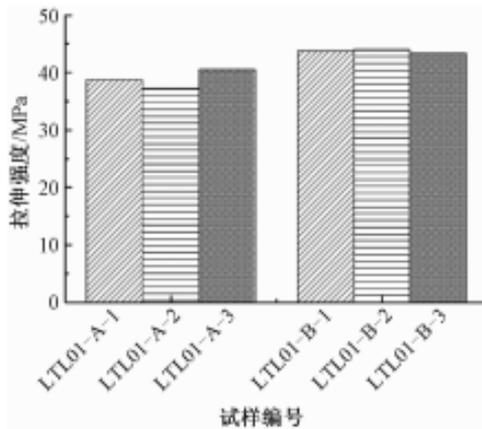


图 8 不同连接方式试样拉伸强度

因此，对于三维层联机织复合材料 T 型接头而言，立筋和底板连接处纬纱的交织方式对复合材料的拉伸强度有一定的影响，当试样采用左右展开的纬纱连接方式时，复合材料的拉伸强度和失效位移较小，试样的最终破坏程度和范围较大，完全失去承载能力，属于严重破坏。当试样采取左右交叉的纬纱连接方式时，其极限应力提高超过 10%，试样的损伤范围较小，抗拉能力较强。

3.4 结构对材料 T 型接头拉伸性能影响

试样 LTL01-A 和试样 MW01 的立筋和底板均采用分叉连接方式，而试样 LTL01-A 的立筋与底板均为三维机织层联结构，试样 MW01 为多层多向结构，图 9 为试样 LTL01-A 和试样 MW01 的拉伸强度对比图。可以看出，试样 LTL01-A 的平均拉伸强度为 38.83MPa，试样 MW01 的为 70.05MPa，相比于试样 LTL01-A 提高了 98.46%，这是因为试样 LTL01-A 中直接承受拉伸载荷的纱线仅有纬纱，随着拉伸位移的增加，基体开裂，纬纱逐渐被拉断，结构失去承载能力，试样最终失效。而试样 MW01 的立

筋和底板中均包含 $\pm 45^\circ$ 斜向纱，不同方向的纱线在载荷加载过程中起到分散和缓冲载荷的作用，可见采用多层多向结构的复合材料 T 型接头能有效缓解立筋与底板连接区域的应力集中现象，从而显著提高 T 型接头的拉伸性能。

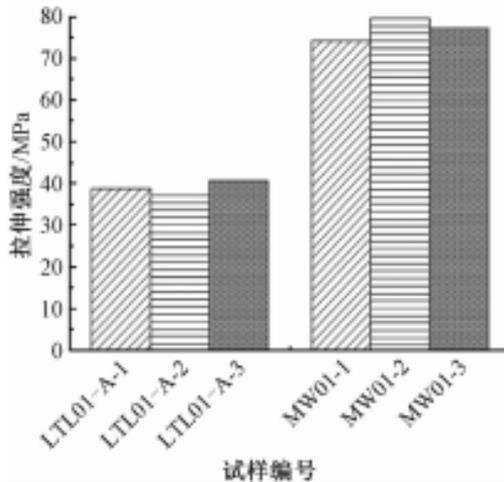


图 9 不同结构试样拉伸强度

4 结论

本文设计了不同连接方式、不同织物结构的 3 种三维机织复合材料 T 型接头，选用山西钢科碳材料有限公司生产的 TG800—12K 碳纤维为增强纤维，天津晶东化学复合材料有限公司生产的 TDE-86 环氧树脂为基体，并利用树脂传递模塑成型工艺制备了复合材料 T 型整体件，之后对其进行拉伸试验，并利用非接触式全场应变测量系统检测试样立筋与底板连接区域的全场应变，分析了织物结构以及连接方式对复合材料 T 型接头拉伸性能的影响，得到以下结论。

(1) 三维机织复合材料 T 型接头的拉伸行为具有非线性特点。试样的载荷位移曲线在开始时均表现出线性响应，随着载荷和位移的增加，试样的刚度开始下降，曲线的斜率开始减小，在载荷达到最大值时，试样发生破坏性损伤，失去承载能力。

(2) 采用交叉连接方式的试样在拉伸过程中体现出较好的抗拉性能，拉伸强度提升超过 10%。交叉引入的纬纱可以抵抗拉伸载荷在连接处产生的剪切作用，该连接方式能够有效限制损伤向试样内部的扩展。

(3) 多层多向复合材料 T 型接头结构的拉伸强度相较于层联机织结构提高了 98.46%。试样 MW01 结构中由于 0° 方向纱、 90° 方向纱、 $\pm 45^\circ$ 斜向纱的引入使得连接处的应力分布有很大改善，大幅提高了复合材料 T 型接头的拉伸性能。

来源：纺织学报 2025 年第 07 期

2024/2025

中国产业用纺织品技术发展报告

2024/2025 Technology Development Report of China Industrial Textiles

第五篇 海洋渔业

水产养殖绳网系统现状及发展趋势

吕呈涛

(山东莱威新材料有限公司)

绳网系统是网箱养殖渔具的重要组成部分，其材料、结构、规格和形状等因素直接影响水产养殖效果。柴油机的发明、渔用材料的研发以及渔业装备的普及等推动了渔业的可持续发展和现代化建设。本文对传统水产养殖和深远海网箱养殖用网衣系统技术及发展进行了调研分析，为相关行业的发展提供参考。

1 传统水产养殖用网衣技术

绳网系统是养殖业和捕捞业重要的组成部分，人们在长久的工作实践中积累了网衣裁剪、拼接、网衣结构设计等经验。随着科技发展和标准意识的提升，人们逐步将这些经验转化成渔业渔具产品和作业标准；同时，材料科学的发展也使渔网材料随之更新迭代，人们在大量使用的经验基础上，制定出不同材料的网片标准，如表 1。

表 1 渔网渔具标准（部分）

序号	标准号	标准名称	标准类型
1	GB/T 3939.1	主要渔具材料命名与标记 网线	基础标准
2	GB/T 3939.2	主要渔具材料命名与标记 网片	基础标准
3	GB/T 3939.3	主要渔具材料命名与标记 绳索	基础标准
4	GB/T 4925	渔网 合成纤维网片强力与断裂伸长率试验方法	检测标准
5	GB/T 19599.1	合成纤维网片试验方法 网片重量	检测标准
6	GB/T 19599.2	合成纤维渔网片试验方法 网片尺寸	检测标准
7	GB/T 6964	渔网 网目尺寸测量方法	检测标准
8	GB/T 6965	渔具材料试验基本条件预张力	检测标准
9	GB/T 18673	渔用机织网片	产品标准

序号	标准号	标准名称	标准类型
10	GB/T 21292	渔网 网目断裂强力的测定	检测标准
11	GB/T 30892	渔网 有结网片的类型和标识	基础标准
12	SC/T 5001	渔具材料基本术语	基础标准
13	SC/T 4028	渔网网线直径和线密度的测定	检测标准
14	SC/T 4039	合成纤维渔网线试验方法	检测标准
15	SC/T 4003	主要渔具制作网衣缩结系数	工艺标准
16	SC/T 4004	主要渔具制作网片剪裁和计算	工艺标准
17	SC/T 4005	主要渔具制作网片缝合与装配标准	工艺标准
18	SC 109	锦纶渔网线	产品标准
19	SC/T 4019	聚乙烯-聚乙烯醇网线 混捻型	产品标准
20	SC/T 4021	渔用高强度三股聚乙烯单丝绳索	产品标准
21	SC/T 4022	渔网 网线断裂强力和结节断裂强力的测定	检测标准
22	SC/T 4043	渔用聚酯经编网通用技术要求	产品标准
23	SC/T 4046	渔用超高分子量聚乙烯网线通用技术条件	产品标准
24	SC/T 5029	高强度聚乙烯渔网线	产品标准
25	SC/T 5021	聚乙烯网片 经编型	产品标准
26	SC/T 4050.1	拖网渔具通用技术要求 第1部分: 网衣	产品标准

2 深远海养殖用网衣技术

随着养殖技术的现代化发展,养殖装备逐步综合化、系统化。近年来,在建设蓝色粮仓、推进水产养殖业绿色发展以及创新驱动中国制造 2025 等国家战略背景下,我国深远海网箱进入快速发展期,尤其自 2017 年 5 月青岛武船重工承建“OCEAN FARM 1”深远海大型养殖网箱交付以来,国内深远海高性能养殖网箱呈现出跃进式发展趋势。

人们在从近海养殖到深远海养殖的逐步发展中,摸索出经验,总结出在海洋环境中进行养殖需要面临的一些问题。一是台风问题,在西北太平洋和南海平均每年有 28 次台风发生,其中对我国沿海有影响的台风平均有 7 次,因此需要网箱材料具有优异的抗台风性能;二是海流问题,由于网箱所处海洋环境复杂,涉及风、浪、流等多种水动力学问题,需要网箱材料具有良好的耐冲击和抗疲劳性能;三是寿命问题,海洋水体盐度大,海上日照强度大,尤其是在水面与空气接触位置更容易发生老化腐蚀,鱼苗养殖需要一定周期,因此需要网箱材料具有良好的耐候性和使用寿命;四是防污

问题，藤壶、贻贝和藻类等海洋污损生物吸附在渔网上，容易导致鱼类等养殖对象得病、网体内外水体交换不畅、水阻力大幅度增加等各种问题，从而给养殖业造成重大损失，要求网箱具有较好的防污性能；五是安装问题，深远海网箱养殖空间大，要求网衣系统在框架上紧固安装，否则有网衣破裂、鱼苗泄漏风险，给渔民造成重大损失。此外，网衣的网目尺寸设计还应适应所养殖鱼苗的大小。因此，在深远海网箱用网衣配套方面，鉴于深远海网箱使用环境的一系列问题，传统的聚乙烯、尼龙等网衣材料存在蠕变性能较差、超疏水表面不耐摩擦、稳定性较差、海洋生物附着严重等问题，严重影响了网衣的性能和寿命，这些材料已经不能满足装备要求。

超高分子量聚乙烯纤维新型网衣材料，由于其密度小、强度高、耐磨性好、延伸性小及抗老化性等特点，所制备的网衣具有降低网具水阻力、节约作业能耗和提高抗风浪性能的优势。国外渔业发达国家已开展了大量的研究和应用，挪威最早使用荷兰帝斯曼公司的超高分子量聚乙烯纤维开发了海水养殖配套网衣，以 Morenot 公司为代表的超高分子量聚乙烯纤维网衣制作技术领先全球；日本的养殖网衣从超高分子量聚乙烯纤维原料的制造技术到网衣编织设备制造技术、网衣涂层整理技术也居于世界前列。

3 深远海网箱装备问题解决方案模式

深远海养殖网箱项目是装备型的大型海洋工程项目，其解决方案模式主要分两种。挪威渔业发达，水产养殖装备先进，在网箱组装，绳网装配方面有着独特工艺，以挪威为例进行说明。

一种是提供全套解决方案的交钥匙工程，即总包式的工程公司模式，如挪威 AKVA 集团。AKVA 是全球最大的水产养殖解决方案和服务供应商，业务范围集养殖设备、平台监控、绳网清洁系统、水下监控、自动化投喂、自动化收鱼等系统于一体，为客户提供完整的解决方案，在积累中形成了庞大完善的服务数据库，凭借热情、承诺以及对行业复杂性的深刻理解，能够应对海上和陆地上最复杂的挑战，并为提高水产养殖的可持续性作出贡献。自 40 多年前在挪威成立以来，开创更美好未来的愿望一直是 AKVA 集团的驱动力，其业务遍及全球所有市场，在 11 个国家及地区设有办事处，员工来自 39 个国家及地区。

另外一种交钥匙工程的一部分，提供绳网配件及布网解决方案，如 Mornot 集团。

Mornot 是挪威优秀的大型网具生产企业，具有 70 年的水产养殖、渔场和离岸产品服务经验，产品、组装、服务符合挪威标准 NS 9415 《海鱼养殖场—设计，尺寸，生产，安装和操作的要求》。Mornot 是青岛武船重工承建的“OCEAN FARM1”大型养殖网箱网衣系统的产品提供商，丰富的经验使 Mornot 集团能够在网、服务、系泊交付、系泊计算等方面满足客户需求；尤其在产品使用和售后服务方面，Mornot 集团开发出 MMCD、Netlog 等数据库，为客户提供和更新与现场主要技术组件相关的证书、手册、维护日志和其他重要文档，这成为公司为客户提供完整方案设计的有力工具。

4 我国深远海 UHMWPE 网衣系统发展情况

国内深远海网箱的研究和应用直到 2017 年才开始起步，对 UHMWPE 纤维网衣系统的技术研究和产业化生产基本处于空白状态。

一方面，UHMWPE 纤维是《巴统协议》中欧美对中国禁售产品，纤维的制备技术属卡脖子关键技术。目前，几大国际超高分子量聚乙烯纤维生产巨头利用其技术垄断和规模化生产优势，对我国高端的超高分子量聚乙烯纤维领域采取技术封锁，致使国内超高分子量聚乙烯生产企业整体技术水平偏低。国内超高分子量聚乙烯纤维行业虽然已经形成了国产化工艺技术格局，但行业整体持续创新能力不足，技术同质化、技术创新薄弱的现象比较严重，工艺路线及生产工艺比较单一，产业化装备、辅料助剂制备等国产化配套能力较低，容易造成恶性竞争，对全行业的发展带来较大风险。因此，UHMWPE 纤维技术的发展，是限制我国深远海网箱用网衣系统发展的原因之一。另一方面，国内对深远海养殖的网衣系统缺少系统研究也是限制其发展的原因之一。国内对于网衣材料性能的研究主要关注于网线的极限破断载荷，对网衣在不同应变速率、蠕变、摩擦及鱼类撕咬等方面尚未建立充分且系统的认识，导致我国尚未形成一套完整规范的网衣系统关键参数设计，无法对网衣材料研究、制备提供规范化指导。此外，高性能纤维强度大模量高，绳网编织及涂层整理技术难度大，国内绳网优势企业少，缺少高性能绳网产品制造经验；且国内掌握大型网箱安装关键技术的团队非常少，国内企业不敢轻易尝试和涉足。以上原因阻碍了我国 UHMWPE 网衣系统的发展。

随着国家“海上粮仓”“海洋强省”等战略规划的助力，国外海洋渔业发达国家成熟的深远海养殖问题解决方案模式以及海洋养殖技术标准，如 NS 9415 《海鱼养殖

场—设计，尺寸，生产，安装和操作的要求》，为我国海水养殖提供了良好的借鉴，我国深远海网箱养殖业进入快速发展期。

5 深远海养殖绳网系统方案解决案例

山东莱威新材料有限公司成立于 2018 年 3 月，定位于提供绳网配件及工程装配解决方案，打造从纤维生产、绳网加工到工程装配和技术服务的全产业链。

公司成立初期，市场、技术和生产部门迅速联动，积极开展各类市场调研，直接对接终端用户，深刻剖析产品痛点，汇总分析海洋环境参数和网衣纲绳产品需求。根据产品需求的数据分析，开展绳网系统设计：对网衣高度、网目大小、网线直径、网目缩结系数、纲绳布置方案、网衣与框架结构连接方案、网衣张紧方案，以及网衣顶部固定方案等进行选型，绘制网衣与附件图纸，确定设计方案后，实施超高分子量聚乙烯绳网产品的编织、涂层、剪裁、拼接和装配。

莱威公司可自主生产深远海网箱专用超高分子量聚乙烯纤维，是全球较早掌握溶剂法直纺连续化生产超高分子量聚乙烯纤维的厂家，其纤维工艺和质量水平均达到国际领先水平，从根本上解决了深远海养殖绳网系统的纤维原材料问题；结合超高分子量聚乙烯理化性质以及经编、绞捻等网片编织结构特点，开发出一种连续化自动化涂层整理设备，解决使用手工涂覆整理费时费力、人工费用高等问题，实现深远海网箱用网衣加工产业化建设；基于绳网组装的专有技术，研究网衣与网纲、网纲与框架立柱、围栏网衣与海底耦合连接等的网衣系统装配工艺，形成成套网衣组装缩结系数和抗冲击能力的解决方案，突破了网衣防撕裂与防磨损、大流速海况下网衣漂移与受流阻力消减技术等安全保障技术，提高了深远海网衣系统的抗风浪能力，实现了深远海网箱用 UHMWPE 纤维网衣系统的国产化和产业化。

目前莱威公司已参与耕海一号、国信网箱、舟山围网、德海项目、经海系列、百箱计划、陶湾网箱、深蓝 2 号等 20 余项深远海网箱养殖工程项目，在深远海养殖领域行业占有率达 80% 以上，可以提供从网衣设计、加工制造、工程装配到系统维护的交钥匙工程解决方案，有效助力海洋强国建设。

HMPE 纤维在绳缆制造过程中各环节的 强力变化及分析

尹延征 李军

[霍尼韦尔综合科技(中国)有限公司]

由于超高分子量聚乙烯(HMPE)纤维具有高强度、高模量、高耐磨性、抗疲劳性优良等特点,已被广泛应用于化纤绳缆中。绳缆的结构和制造过程五花八门,但一种12股绳最为典型,纤维经过并合加捻形成纱线,纱线经过并合加捻形成绳股,12个绳股经过编织形成绳缆。大量数据表明HMPE纤维绳缆的断裂强度只有纤维断裂强度的50%左右,在制造过程中纱线强力基本不变,但纤维磨损等损坏会影响其强度。在纤维加捻过程中,其强力随捻度的变化而变化。研究HMPE纤维在绳缆制造过程中各环节的强力变化规律对于绳索设计制造具有重要意义。绳索使用者亦可以获得相关技术参数,这对产品采购等活动具有重要参考意义。

1 研究对象

根据绳缆的制作工艺流程,选取纤维原料、加捻纱线、绳股、绳缆5个环节的半成品和成品,选择并抽取其中的纤维进行强力测试。针对分层结构的绳股和绳缆,又分别选取其外层和内层的纱线,抽取其纤维进行测试。为了避免在抽取纤维过程中破坏纤维结构损伤纤维强力,对纤维进行涂层处理。根据测试结果研究纤维在制绳过程中强力变化规律并分析影响其主要因素。

纤维经过叠加组合、机械扭转和牵拉等几何形态上变化,未发生化学反应及分子形态变化。为了得出不同样品的一般规律,研究中设定样品的初始强力为参考坐标,相同样品比较其变化前后的强力保留率。

2 绳索中纤维各环节强力的变化

2.1 绳索中纤维试样

涂层纤维选取霍尼韦尔公司的 Spectra S1000 178tex 1779F, 使用霍尼韦尔公司的 HC-R11 涂料进行处理, 线密度 181 tex, 30 根涂层纤维经过并合加捻形成捻线, 40 根加捻纱线反向加捻制成绳股, 绳股在缆绳机上反向退捻制绳。

工艺参数: 加捻纱线 30*181tex, 10 捻/m; 绳股 40*30*181tex, 捻距 200mm, 结构 1+7+13+19; 缆绳 12 股, 直径 76mm, 捻距 608mm。

2.2 试验条件

温度 20℃, 湿度 65%, 测试速度 200mm/min, 预加张力 15N。试验机为 WG028 万能材料试验机 温州方圆仪器有限公司。

2.3 绳索中纤维试样测试结果

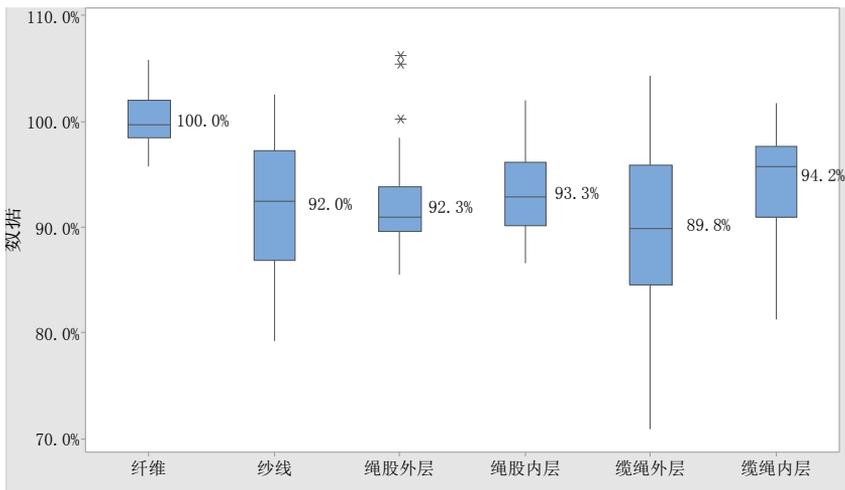


图 1 制绳过程中纤维强力的变化

从纤维到纱线的制绳过程中纤维强力损失了 8%, 随后过程各环节中纤维强力变化很小。在各环节中缆绳外层纤维间强力的离散度最大。

3 测试结果分析

从纤维到纱线过程中，纤维主要受捻度增加和磨损两个因素的影响，磨损又分为外部磨损和纤维间内部磨损。为此选用霍尼韦尔公司的 Spectra S980，HC-R11 涂料进行处理，线密度 181 tex，采用 Instron 5967 英斯特朗万能材料试验机，夹具为 2714-040 用于测试高模量纤维。设计了几个试验来寻找强力损失的原因。

3.1 加捻对纤维强力的影响

纺织上一端被相对固定另一端存在扭转差的过程称为加捻，A 端被握持 B 端旋转、AB 端存在转速差或者 AB 端旋转方向不同都可以形成捻度。每相对旋转一周形成一个捻回，表示纱线加捻程度的指标有捻度、捻回角、捻缩和捻系数等。



图 2 加捻过程示意图

在绳索制造过程中一般采用多根纤维并合后进入加捻机进行加捻加工，为避免纤维间内部磨损造成的强力损失，采用了单根浸胶纤维进行加捻。不同捻度纤维的强力与未加捻纤维强力比较如表 1。

表 1 不同捻度纤维的强力保留率

捻度 (n/m)	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80
加捻机加捻后 强力保留率%	91.7	96.8	99.1	98.9	100.0	95.8	93.4	93.7	93.0	87.5

3.2 无磨损加捻对纤维强力的影响

加捻机加捻过程中，纤维与导线孔、罗拉等都有不同程度的磨损。为规避磨损造成的干扰，使用 YG155A 型纱线捻度仪进行无磨损加捻。加捻后测试其纤维强力保留率，与加捻机加捻的纤维强力数据进行了比较。

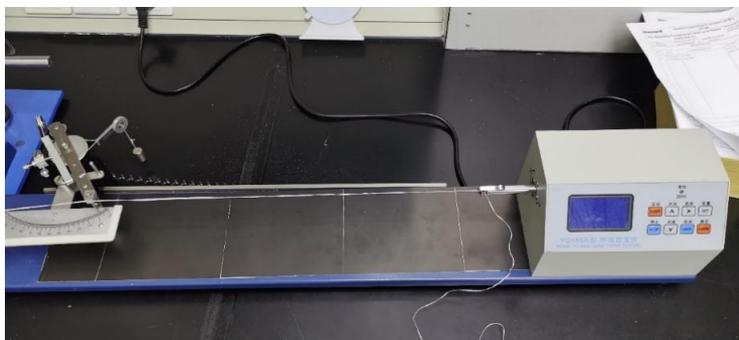


图 3 YG155A 型纱线捻度仪

使用捻度仪可以实现无磨损加捻，并且还可以测量捻缩；捻缩的度量又可以修正纤维直径的测量误差；直径和捻度可以计算得到加捻回角和弧度。

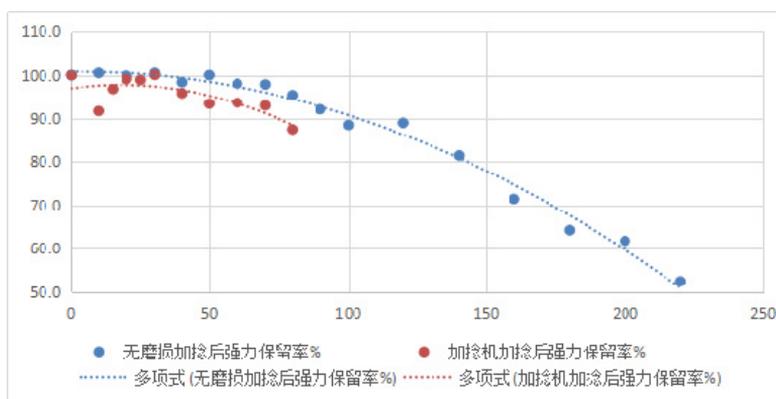


图 4 无磨损加捻与加捻机加捻后纤维强力保留率的对比

可以看出，使用捻度仪比加捻机可以更精确地测量加捻对纤维强力的影响，捻度仪加捻在 50n/m 以内捻度对纤维强力几乎没有损失。在无磨损加捻条件下，强力保留

率与加捻回角度之间是近似余玄函数关系。

3.3 外部磨损对纤维强力的影响

采用定速旋转仪器做试验机，使用周长 18.84cm 的金属做摩擦轮，转速 120r/min，可选 20g/120g/200g 的不同砝码做试验。设定一定的圈数，纤维被磨损后测试其剩余强力保留率。

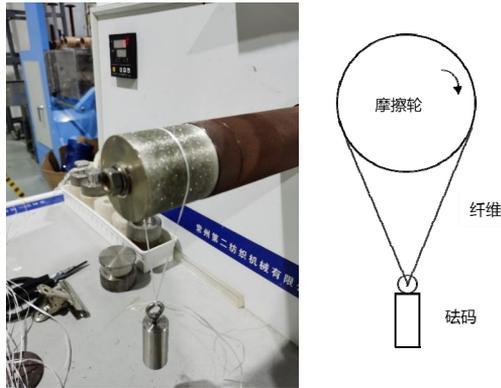


图 5 外部磨损试验机及示意图

加载 20g 载荷在不同圈数磨损纤维后测试其剩余强力保留率，测试结果如表 2。

表 2 外部磨损后的纤维强力保留率

圈数 r	1	3	5	10	20	50
强力保留率%	93.2	89.9	88.2	87.4	81.5	81.3

根据表 2 的测试数据拟合公式：

$$P=98.49 - 5.4\ln(r)$$

P——纤维强力保留率

r——金属摩擦轮磨损圈数 $r \geq 1$

随后进行表 3 所示的大量测试数据证明了该拟合公式具有合理性，这也为纤维的摩擦性能研究提供了一种可行方法。

表 3 实测纤维强力保留率与拟合值的对比

圈数 r	200	1000	10000	436300
实测值%	70.7	58.9	51.2	29.8
拟合值%	69.9	61.2	48.8	28.4

按照该方法加载 120g 和 200g 砝码磨损纤维后测试纤维剩余强力保留率，得到了不同的拟合公式，如图 5 所示。

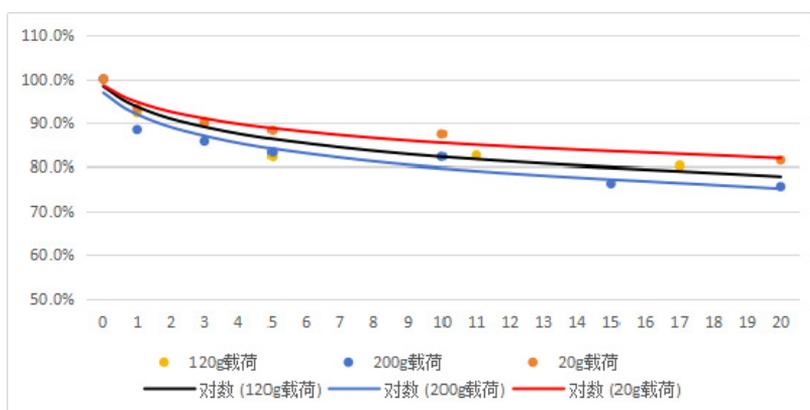


图 5 不同载荷下外部磨损后的纤维强力保留率

纤维与金属等的外部磨损会造成明显的强力损失，在初始阶段强力损失就快速产生，随之扩大，然后趋于平缓直至失效。纤维的强力损失速率随着载荷增加而增大，制绳的载荷远远大于纱线制造时的载荷，这是绳索外层纱线中纤维强力离散度大的主要因素。

3.4 纤维间磨损对纤维强力的影响

在摩擦轮外面均匀缠绕相同纤维，使用上述外摩擦旋转磨损的实验方法，测试纤维与纤维间的磨损造成的强力损失。因为纤维的内部摩擦是多个接触面，因此采用 6 根纤维分别悬挂载荷，然后一起磨损的方法进行测试。

表 4 外部摩擦与内部摩擦后纤维的强力保留率

累计摩擦长度 m	38	188
与金属摩擦强力保留率%	70.7	58.9
与纤维摩擦强力保留率%	100.3	91.1

注：累计摩擦长度 $m = \text{圈数} r \times \text{周长} m$

内外磨损后纤维的强力保留率都呈下降趋势，在相同载荷下内部磨损明显小于外部金属磨损，但应当关注其在绳索使用过程中长期影响。与增加捻度纤维的断裂伸长率增加相反，磨损后纤维的断裂伸长率呈下降趋势。

3.5 加捻前后外部磨损对纤维强力的影响

从纤维到纱线的制造过程中，加捻和磨损是逐渐增加和相伴相生的，从零捻开始每增加一个捻度纤维的磨损也会相应增加。采用无损加捻的方法制备 10n/m 样品，在 20g 载荷下进行外部磨损后测试剩余强力保留率。相应的 30n/m 样品和 50n/m 样品的对照如表 5。

表 5 加捻前后的纤维外部磨损强力保留率

捻度 n/m	0	10	30	50
未磨损强力保留率%	100	100.5	100.5	100
20g 载荷 5 圈强力保留率%	88.2	91.4	89.0	86.8
20g 载荷 20 圈强力保留率%	81.5	85.6	87.1	84.6
20g 载荷 50 圈强力保留率%	81.3	80.1	84.8	82.0

通过合理的加捻方式、适当的捻度来提高纤维强力利用率和改善耐磨性能是可以实现的。

4 结论

通过测试制绳过程中各环节纤维强力数据及数据分析，为研究绳索制造过程中各环节强力变化和纤维强力利用率提供参考。可以发现在制绳过程中纤维强力损失并非绳索强度损失的主要原因，除非受到很大的外部磨损。

本文建立了若干纤维强力变化的模型，为研究纤维在绳索制造使用中的变化提供

了新的方法。通过对纤维磨损的测试、建模及分析，发现并总结了加捻和内外部磨损对纤维强力的影响，纤维强力损失主要是外部磨损造成的。用捻度仪无损加捻的研究发现纤维强力变化更加接近余弦函数。

作者认为纤维所受的外部磨损很难避免，且摩擦阻力越大磨损越严重。因此在设计中要充分考虑到金属材料摩擦造成的强力损失，在绳索制造和使用过程中要尽量避免过大摩擦阻力。

2024/2025

中国产业用纺织品技术发展报告

2024/2025 Technology Development Report of China Industrial Textiles

第六篇 医疗健康

水刺工艺对医用复合非织造材料防水透湿性的影响

韩秀丽¹ 王春红¹ 高涵超¹ 荆妙蕾¹ 赵润² 高欢² 王玉萍²

(1. 天津工业大学纺织科学与工程学院; 2. 江苏新视界先进功能纤维创新中心有限公司)

近年来, 区域疫情多次发生, 严重影响公众身心健康。而疫情防控的关键在于避免感染。医用防护服能够有效阻挡液体渗透, 避免交叉感染, 是传染性突发事件中应急防治的重要医疗资源。目前市面上的防护服大都采用纺粘、熔喷、水刺及闪蒸技术制备的聚丙烯(PP)或者聚乙烯(PE)复合非织造材料制成。复合非织造材料一般通过覆膜、增加阻隔层、后整理等工艺形成, 但现有材料制备的防护服废弃后依靠焚烧处理污染环境, 并且为了提高防护服防护性能, 牺牲了其透气透湿性, 医护人员在长时间、高强度的工作条件下穿着, 影响个人健康以及工作效率。

水刺非织造材料具有强度高、吸湿透气性好、手感柔软等优点, 广泛应用于医疗、卫生及擦拭材料等领域。聚乳酸(PLA)纤维具有优异的可生物降解性、生物相容性、抑菌性。粘胶纤维作为纤维素纤维具有较高的吸湿性, 制备的材料柔软舒适, 是水刺非织造材料的优异原料, 但由于粘胶较低的防护性能, 在医疗领域应用中, 需要进行后处理或增加防护层。熔喷非织造材料(M)具有孔径小、孔隙率高等特点, 具有良好的液体和颗粒物阻隔性以及抗渗水性能, 在医疗卫生、过滤分离等领域具有广阔的应用前景, 但其强度和耐磨性差, 需要与其他材料结合应用于医用防护方面。纺粘非织造材料(S)经过纺丝和固网会使得其强度增强, 可制备具有强度高、透气性好等功能的医用防护材料。将PLA/粘胶水刺非织造材料与PLA熔喷、纺粘材料3层结合, 可制备兼具防水和透气透湿性能的医用防护材料。

医用防护材料不仅需要具有良好的透气透湿性, 还需具有一定的抗渗水性和阻隔性。目前市场上的医用防护服有纺粘/熔喷/纺粘(SMS)复合非织造材料、覆膜复合非织造材料以及闪蒸法非织造材料, 经过测试和相关文献调研发现医用防护服的透湿量大多集中在 $1000\sim 3000\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。张芸等制备了一种基于水刺非织造布的防护服材

料,包括外防护层聚四氟乙烯薄膜、黏合剂层以及经过三拒一抗(拒水、拒血液、拒酒精以及防静电)整理的水刺非织造布层,其透湿量在 $3000\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 左右。Zhang 等通过点黏和的方法制备了手术服用醋酸/聚乳酸非织造材料,具有良好的透气透湿性,但阻隔性差。以上材料虽然具有良好的透气透湿性,但还需进一步整理增加阻隔性,才能满足防护材料的要求。

为了解决防护服的透气透湿性以及可降解性,本文采用 PLA 纤维和粘胶纤维为原料,采用水刺工艺制备水刺非织造材料,通过喷雾胶将水刺非织造材料、PLA 熔喷材料、PLA 纺粘材料紧密黏合,以水刺非织造材料作为内层提供柔软、舒适性,熔喷材料作为芯层提供阻隔性能,纺粘材料作为外层提供良好的强力和耐磨性,制备 SM 水刺复合非织造材料。结合单因素和响应曲面法对水刺非织造材料工艺进行优化,探讨水刺面密度、混合比例以及水刺压力对 SM 水刺复合非织造材料的性能影响,获得水刺非织造材料的最佳工艺条件,并验证优化工艺后的复合非织造材料的性能,并开发兼具透气透湿和阻隔性能的医用防护材料,为可降解纤维应用在医用防护材料提供数据支撑。

1 试验部分

1.1 材料与仪器

材料:聚乳酸纤维(1.5dtex \times 38mm,泉州斯马丁进出口贸易有限公司);粘胶纤维(1.5dtex \times 38mm,山东银鹰化纤有限公司);PLA 熔喷非织造材料(面密度 $25\text{g}/\text{m}^2$,泉州斯马丁进出口贸易有限公司);PLA 纺粘非织造材料(面密度 $20\text{g}/\text{m}^2$,泉州斯马丁进出口贸易有限公司);喷雾胶(3M 中国有限公司)。

仪器:XFH 型小型和毛机(青岛市胶南针织机械厂);罗拉式梳理机(天津工业大学自制);SF-W1571 水刺机(郑州纺织机械股份有限公司);压辊(课题组自制);台式扫描电镜(SEM):PhenomXL(Phenom—World 公司);LFY-216C 透湿量测定仪(山东省纺织科学研究院);YG812F 渗水性测定仪(温州方圆仪器有限公司)。

1.2 PLA/粘胶水刺非织造材料的制备

使用小型和毛机分别将聚乳酸纤维和粘胶纤维开松,将开松后的纤维按照聚乳酸纤维与粘胶纤维质量比 5:5、6:4、7:3、8:2、9:1,即聚乳酸纤维混比为 50%、

60%、70%、80%、90%分别送入梳理机进行梳理成网，水刺铺网顺序为粘胶纤网在下层，PLA 纤网在上层，最后通过水刺机加固而成。

1.3 SM 水刺复合非织造材料的制备

从里层到外层由水刺、纺粘、熔喷非织造材料的结构顺序进行复合，在每一层之间使用喷雾胶黏合，使用量为 $0.55\text{g}/\text{m}^2$ ，然后使用自制的压辊黏合紧密，压辊压力为 100N 。

1.4 测试与表征

1.4.1 表面形貌观察

采用 PhenomXL 型台式扫描电镜对材料表面微观形貌进行观察。

1.4.2 透湿量测试

按照 GB/T12704.2—2009《纺织品织物透湿性试验方法第 2 部分：蒸发法》测试复合非织造材料的透湿量，试样直径 70mm ，测试 3 块试样，取平均值。按照式 (1) 计算透湿率：

$$WVT = \frac{24(m_1 - m_0)}{A \cdot t}$$

式中：WVT 为透湿率， $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ； m_1 为试验质量， g ； m_0 为初始质量， g ； A 为有效试验面积， m^2 ； t 为试验时间， h 。

1.4.3 耐静水压测试

按照 GB/T4744—1997《纺织织物抗渗水性测定静水压试验》测试复合非织造材料的耐静水压，水压上升速率 $6.0\text{kPa}/\text{min}$ ，记录试样上第 3 处水珠刚出现的水压，测试 3 块试样，取平均值。

1.5 水刺非织造材料单因素试验设计

以水刺面密度、PLA 混比和水刺压力为 3 个因素，分别考察其对 SM 水刺复合非织造材料透湿和耐静水压的影响。水刺非织造材料单因素试验情况如表 1 所示。

表 1 单因素试验表

序号	定量	变量
1	PLA 混比 70%水刺压力 2.0MPa	水刺面密度: 30、40、50、 60、70g/m ²
2	水刺面密度 50g/m ² 、水刺压力 2.0MPa	PLA 混比 90%、80%、70%、60%、50%
3	水刺面密度 50g/m ² 、PLA 混比 70%	水刺压力: 1.0、1.5、2.0、 2.5、3.0MPa

1.6 响应曲面法优化设计

基于单因素试验基础, 根据 Box—Behnken 响应曲面的设计原理, 设置 3 因素 3 水平的分析方法进行试验, 以 SM 水刺复合非织造材料的耐静水压 (Y) 为响应值, 以水刺面密度 A、聚乳酸混比 B、水刺压力 C 为考察因素, 分别以自变量 A、B 和 C 表示, 对各因素的试验水平分别以 -1、0、1 进行编码 (见表 2)。

表 2 SM 水刺复合非织造材料的响应曲面因素与水平的设计

水平	水刺面密度 A/(g·m ⁻²)	聚乳酸混比 B/%	水刺压力 C/MPa
-1	40	60	1.5
0	50	70	2.0
1	60	80	2.5

2 结果与讨论

2.1 SM 水刺复合非织造材料表面形貌分析

非织造材料的 SEM 图如图 1 所示。由图 1 (a) 可以明显看出, 水刺非织造材料中的纤维分布杂乱无章, 纤维之间互相交叉缠绕; 从图 1 (b) 中看出熔喷非织造材料纤维比较细, 纤维之间的空隙比较小; 而图 1 (c) 中纺粘非织造材料中纤维之间连接紧密; 图 1 (d) 可以看出 SM 水刺复合非织造材料中水刺材料比较蓬松, 纤维间空隙较大, 作为内层可以提供良好的舒适性。

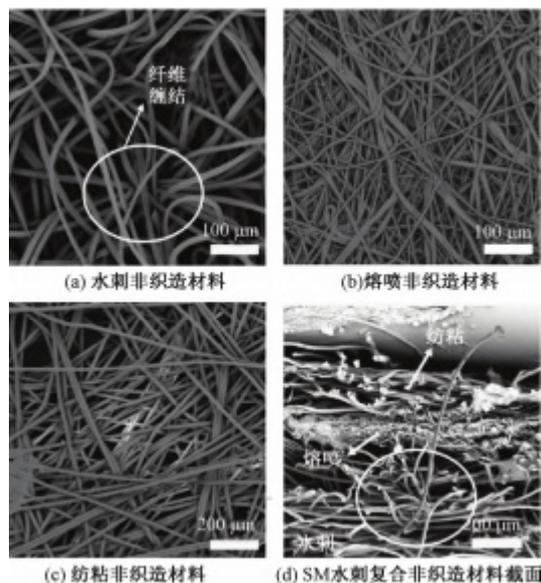


图 1 非织造材料的 SEM 照片

2.2 水刺工艺对 SM 水刺复合非织造材料性能的影响

2.2.1 水刺面密度对材料防水透湿性能的影响

水刺面密度对 SM 水刺复合非织造材料耐静水压和透湿量的影响如图 2 所示。随着水刺面密度的增加，SM 水刺复合非织造材料的耐静水压和透湿量均呈先增加后减小的趋势，但是在水刺面密度高于 $50\text{g}/\text{m}^2$ 时，透湿量又呈现增加的趋势。这是由于在同一水刺压力下，面密度过小时，水刺非织造材料容易被刺烂，孔径比较大，对水珠几乎没有阻力；当面密度过大，水刺压力不能使得纤维完全缠结，制备的非织造材料强力低，导致耐静水压降低，透湿性增加，但整体透湿量高于医用防护要求的 $2500\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。为了保证 SM 水刺复合非织造材料具有良好的抗渗水性，最优工条件水刺面密度为 $50\text{g}/\text{m}^2$ 。

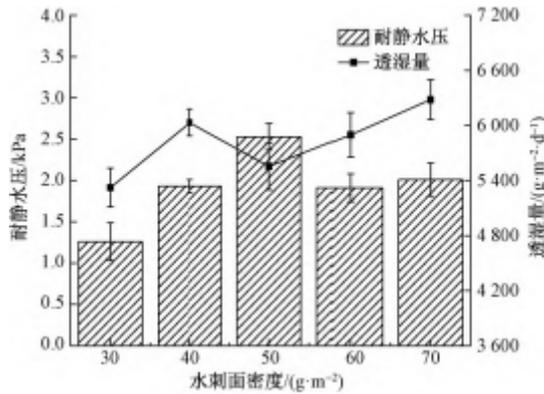


图 2 水刺面密度对 SM 水刺复合非织造材料防水透湿性能的影响

2.2.2 PLA 混比对材料防水透湿性能的影响

PLA 混比对 SM 水刺复合非织造材料耐静水压和透湿量的影响如图 3 所示。随着水刺非织造材料中 PLA 纤维含量减少，复合非织造材料的耐静水压先增加后减小，而透湿量先降低后增加。在 PLA 混比为 70% 时，复合非织造材料的耐静水压较好，为 2.53kPa，而透湿性最差，为 5554g/(m²·d)；在 PLA 混比为 50% 时，耐静水压最差为 0.88kPa。这是由于粘胶纤维密度高于 PLA 纤维，在同一面密度的情况下，水刺非织造材料中 PLA 纤维含量减少，则制备的材料比较薄，抗渗水性能差；当水刺非织造材料中 PLA 纤维含量增加，则材料单位面积内纤维数量增加，水刺固结作用增强，强力提升。当 PLA 纤维含量过大，则制备的水刺材料不完全固结，呈现蓬松的状态，纤维间的空隙比较大，水分易穿透，透湿性增加。选择合适的原料配比能够改善 SM 水刺复合非织造材料的抗渗水性能，本文最优 PLA 混比为 70%。

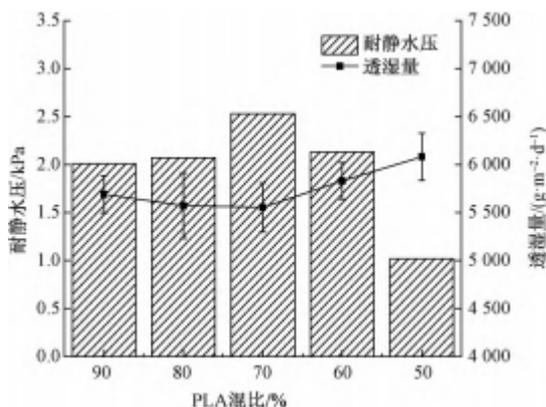


图 3 PLA 混比对 SM 水刺复合非织造材料防水透湿性能的影响

2.2.3 水刺压力对材料防水透湿性能的影响

水刺压力对 SM 水刺复合非织造材料的耐静水压和透湿量的影响如图 4 所示。在水刺面密度和 PLA 混比一定的情况下，随着水刺压力的增加，SM 水刺复合非织造材料的耐静水压先增加后减小，透湿量先减小后增加。在水刺压力为 1MPa 时，SM 水刺复合非织造材料的耐静水压较小，为 1.04kPa，而透湿量较大为 6407g/(m²·d)。这是由于纤维之间的固结作用不强，制得样品强力比较低，孔隙度较高，导致在较小的水刺压力下，材料不能完全固结，阻隔性较差，透湿性较好。随着水刺压力增加，纤维之间的缠结作用增强，形成的水刺非织造材料强力增加，空隙减少，在水刺压力为 2MPa 时，SM 水刺复合非织造材料耐静水压最好；当水刺压力继续增加，水针作用的加强使得水刺非织造材料制作过程中易损坏，空隙增加，其抗渗水性能降低，透湿量增加。因此，本文水刺压力最优工艺条件为 2MPa。

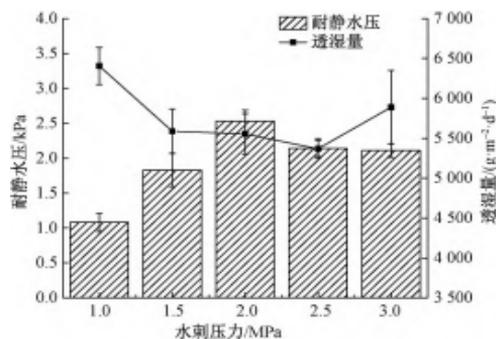


图 4 水刺压力对复合非织造材料防水透湿性能的影响

2.3 水刺工艺对材料防水透湿的影响结果

采用软件 SPSS22 对复合非织造材料的性能影响因素进行单因素分析, 检验各因素对复合非织造材料的耐静水压和透湿性的影响是否显著, 若显著性 $P < 0.05$, 则该因素对结果有影响。SM 水刺复合非织造材料的静水压、透湿量的方差分析见表 3、4。由表 3 可以看出, 水刺压力 P 值为 0.013、水刺面密度 P 值为 0.005、PLA 混比 P 值小于 0.0001, 对 SM 水刺复合非织造材料的耐静水压影响均显著。由表 4 可见只有水刺面密度对复合非织造材料透湿性的影响显著, P 值为 0.014, 水刺压力和 PLA 混比对 SM 水刺复合非织造材料的影响不显著。因此, 水刺工艺参数对透湿性的影响不大, 对耐静水压影响比较大, 以静水压作为响应曲面优化的响应值。

表 3 SM 水刺复合非织造材料静水压方差分析

因素		平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
水刺面密度	组外组内统计	2.276	4	0.569 0.073	7.849	0.005	*
		0.653	9				
		2.929	13				
PLA 混比	组外组内统计	4.605	4	1.151 0.030	37.780	< 0.0001	**
		0.305	10				
		4.910	14				
水刺压力	组外组内统计	3.582	4	0.896 0.163	5.493	0.013	*
		1.630	10				
		5.212	14				

注: **表示差异极显著 ($P < 0.0001$); *表示差异显著 ($P < 0.05$)。

表 4 SM 水刺复合非织造材料透湿量方差分析

因素		平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
水刺面密度	组外组内统计	1674257.906649450.132	4	418564.47772161.126	5.8	0.014	*
		2323708.039	9				
			13				
PLA 混比	组外组内统计	247943.347724494.872972438.	4	61985.837103499.267	0.599	0.675	
		219	7				
			11				
水刺压力	组外组内统计	1465888.552856036.531	4	366472.138142672.7552.569	0.145		
		2321925.083	6				
			10				

2.4 响应曲面法方案设计及优化结果

2.4.1 数学模型的建立及显著性检验

根据单因素试验结果, 确定 3 因素的取值范围, 即水刺面密度 A 为 40~60g/m²、PLA 混比 B 为 60%~80%、水刺压力 C 为 1.5~2.5MPa。运用软件 Design

—Expert12 设计 3 因素 3 水平的随机试验，响应曲面试验设计与结果见表 5，对 SM 水刺复合非织造材料的耐静水压（Y）进行回归分析拟合，得到多项回归模型为： $Y=2.68+0.1488A+0.0575B+0.0563C-0.1375AB-0.03AC+0.1775B\times C-0.2660A^2-0.1235B^2-0.2010C^2$ 。

对回归模型进行差异显著性检验及方差分析，如表 6 所示。SM 水刺复合非织造材料耐静水压和 3 个因素之间的线性关系复相关系数为 0.9734，说明回归方程拟合程度良好，建立的回归模型为显著（ $P<0.05$ ）。对 SM 水刺复合非织造材料耐静水压拟合模型方差分析可知，A、B、C、AB、BC、A²、B²、C² 为显著影响项（ $P<0.05$ ）；由 F 值可知，3 因素对 SM 水刺复合非织造材料的耐静水压的影响顺序为 A（水刺面密度）>B（聚乳酸混比）>C（水刺压力）。

表 5 SM 水刺复合非织造材料的响应曲面设计及结果

试验编号	A/ (g·m ⁻²)	B/%	C/MPa	Y/kPa
1	50	80	1.5	2.16
2	60	70	1.5	2.31
3	60	60	2.0	2.52
4	50	70	2.0	2.69
5	50	70	2.0	2.79
6	60	70	2.5	2.37
7	40	70	1.5	2.00
8	50	60	1.5	2.45
9	50	70	2.0	2.68
10	50	80	2.5	2.62
11	50	60	2.5	2.20
12	40	60	2.0	1.90
13	40	80	2.0	2.34
14	60	80	2.0	2.41
15	40	70	2.5	2.18
16	50	70	2.0	2.63
17	50	70	2.0	2.62

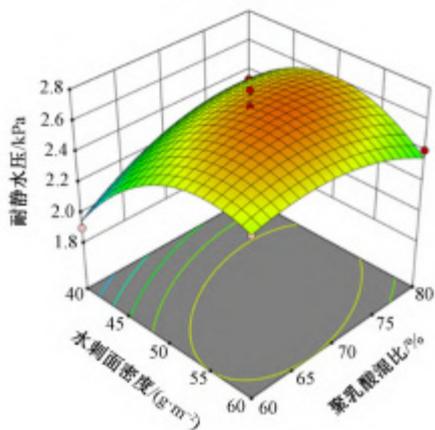
表 6 SM 水刺复合非织造材料耐静水压线性回归表

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1.0200	9	0.1135	28.48	0.0001	*
A - A	0.1770	1	0.1770	44.40	0.0003	*
B - B	0.0265	1	0.0265	6.64	0.0367	*
C - C	0.0253	1	0.0253	6.35	0.0398	*
AB	0.0756	1	0.0756	18.97	0.0033	*
AC	0.0036	1	0.0036	0.90	0.3736	
BC	0.1260	1	0.1260	31.61	0.0008	*
A2	0.2979	1	0.2979	74.73	< 0.0001	**
B2	0.0642	1	0.0642	16.11	0.0051	*
C2	0.1701	1	0.1701	42.67	0.0003	*
残差项	0.0279	7	0.0040			
失拟项	0.0096	3	0.0032	0.70	0.5984	
净误差	0.0183	4	0.0046			
总离差	1.0500	16				
复相关系数	0.9734					

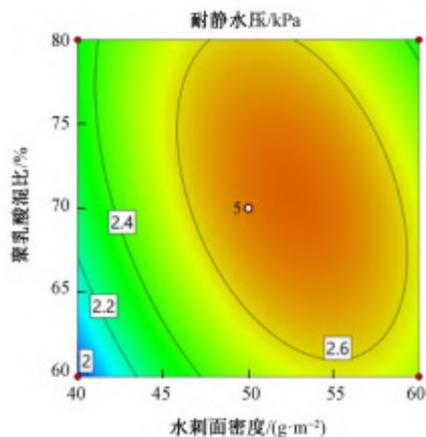
2.4.2 响应图交互作用分析

图 5~7 是各因素对 SM 水刺复合非织造材料的耐静水压交互影响的响应曲面图和等高线图, 其中响应曲面图越陡峭则表明所对应的因素对响应值影响越显著, 等高线图中椭圆形表示 2 因素交互作用显著, 圆形则表明 2 因素交互作用不显著。图 5 为水刺压力为 2.0MPa 时聚乳酸混比和水刺面密度对 SM 水刺复合非织造材料耐静水压交互影响的响应曲面图及等高线图, 在水刺面密度 40~60g/m² 的条件下, SM 水刺复合非织造材料的耐静水压随着 PLA 混比增加先增大后减小, 耐静水压在 PLA 混比为 70% 左右时达到最大值; 对应的等高线图明显呈现椭圆形, 可见水刺面密度和 PLA 混比之间的交互作用对材料的耐静水压显著。图 6 为聚乳酸混比 70% 时, 水刺面密度和水刺压力对 SM 水刺复合非织造材料耐静水压交互影响的响应曲面图及等高线图, 材料的耐静水压随着水刺压力增加先增大后减小, 且在水刺面密度为 40~60g/m² 的条件下, 耐静水压均先增大后减小, SM 水刺复合非织造材料的耐静水压在水刺压力为 2MPa 时达到最大值; 对应的等高线图趋近于圆形, 说明水刺面密度和水刺压力的交互作用对 SM 水刺复合非织造材料耐静水压影响不显著。图 7 为水刺面密度为 50g/m² 时, PLA 混比和水刺压力对 SM 水刺复合非织造材料耐静水压交互影响的

响应曲面图及等高线图，SM 水刺复合非织造材料的耐静水压随着水刺压力的增加先增大后减小，且 PLA 混比在 60%~80% 的条件下，耐静水压均先增大后减小；对应的等高线图线条分布较密且呈现明显的椭圆状，说明聚乳酸混比和水刺压力对材料的耐静水压影响显著。



(a) 响应曲面图



(b) 等高线图

图 5 聚乳酸混比和水刺面密度对耐静水压的交互影响

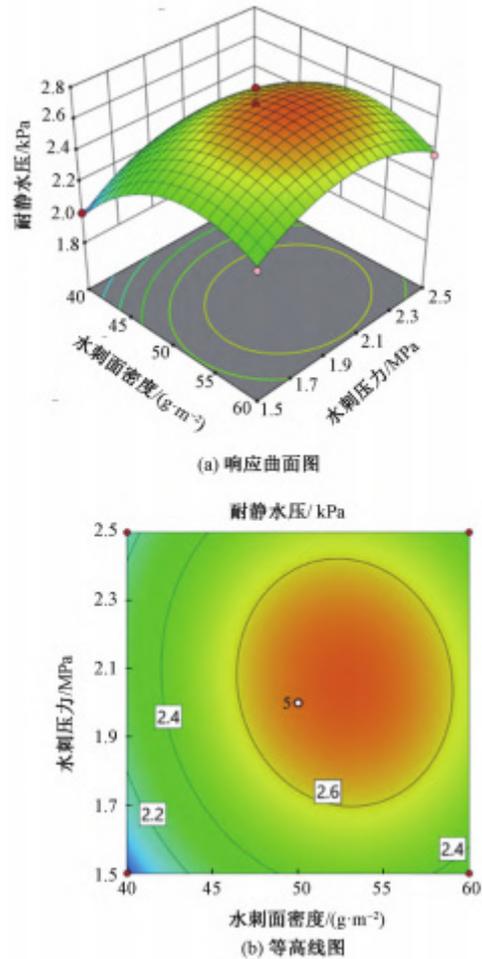


图6 水刺压力和水刺面密度对耐静水压的交互影响

2.4.3 响应曲面优化结果验证

运用软件分析可知 SM 水刺复合非织造材料中的水刺非织造材料最佳工艺条件为面密度 $52\text{g}/\text{m}^2$ 、聚乳酸混纺比 73%、水刺压力 2MPa，预测 SM 水刺复合非织造材料的耐静水压为 2.71kPa，实际测试 SM 水刺复合非织造材料的耐静水压为 2.65kPa，与预测值之间的误差为 2.21%，说明该回归模型能够很好地预测 SM 水刺复合非织造材料的耐静水压。

3 结论

本文通过单因素试验，以纺粘喷（SM）水刺复合非织造材料的耐静水压和透湿性为考察指标，探讨水刺工艺（水刺面密度、聚乳酸纤维混合比例以及水刺压力）对 SM 水刺复合非织造材料的防水透湿影响，并进行显著性分析。结果表明：最优工艺范围为水刺面密度 $40\sim 60\text{g/m}^2$ ，聚乳酸纤维混比为 80%、70%、60%，水刺压力为 $1.5\sim 2.5\text{MPa}$ ，水刺工艺对 SM 水刺复合非织造材料的耐静水压影响显著，对透湿性影响不显著。

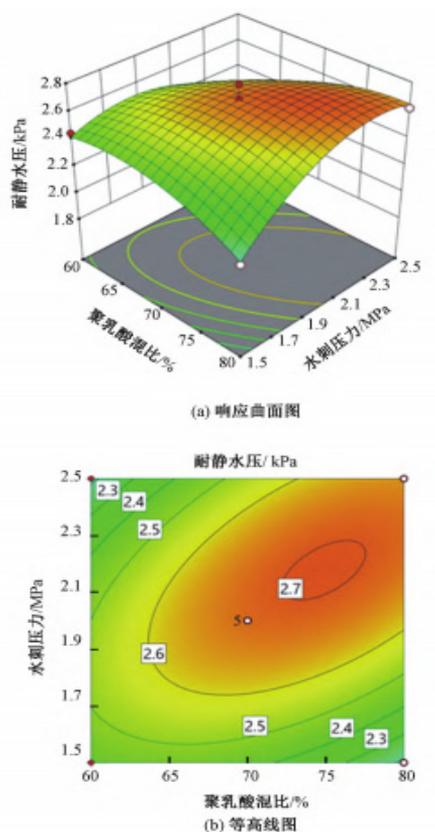


图 7 聚乳酸混比和水刺压力对耐静水压的交互影响

采用响应曲面优化水刺工艺参数,以 SM 水刺复合非织造材料的耐静水压为考察指标,建立 SM 水刺复合非织造材料的耐静水压二次多项式回归模型,其相关系数为 0.9734,模型拟合度较高。模型得出最优工艺参数为水刺面密度 $52\text{g}/\text{m}^2$ 、聚乳酸纤维混比 73%、水刺压力 2MPa,预测 SM 水刺复合非织造材料耐静水压为 2.71kPa,经过验证发现实际值与预测值相差 2.21%。

医用植入非织造材料的研究进展

李蕴琨¹ 陈奕轩¹ 孙晓悦¹ 任煜^{1,2} 张伟^{1,2} 李美贤^{1,2}

(1. 南通大学; 2. 安全防护用特种纤维复合材料研发国家地方联合工程研究中心)

随着当代医疗水平的发展, 医用材料的种类也逐渐丰富。近几年来, 非织造医用产品的使用量一直稳步上升, 不仅应用于医用口罩、消毒布等医用防护产品, 在人工血管、人工器官等各种高技术含量产品中的需求量也在逐渐扩大。与传统的纺织材料相比, 非织造医用卫生材料有着过滤性能高, 消毒灭菌方便, 易于与其他材料复合等优势。在医用植入材料领域, 非织造医用植入材料凭借其优越的生物兼容性和血液相容性等优势从一众材料中脱颖而出。常用的非织造医用材料工艺技术有熔喷、纺黏、静电纺丝、针刺、水刺等, 根据不同产品性能需求可选用不同的制备工艺。多样的工艺技术决定了非织造材料理化性质多样化, 使非织造材料在医用植入材料领域具有重要的地位和广阔的发展前景。

1 人工心脏瓣膜

随着现代生活压力的加大, 如高血压等后天因素引发的瓣膜性心脏病发病率有一定的增加, 我国瓣膜性心脏疾病的发病率达 3.8%。心脏瓣膜疾病会引发中风、心力衰竭甚至猝死, 而治疗方法中最常用的就是心脏瓣膜置换术。心脏瓣膜置换术中使用的传统人工心脏瓣膜为机械瓣膜和生物瓣膜, 但无论采用哪种类型的瓣膜, 都需要建立体外循环。而使用非织造材料制备的人工心脏瓣膜可以通过微创手术避免建立体外循环, 相较之下, 使用非织造材料制备的人工心脏瓣膜价格更低, 风险更小。

非织造材料的人工心脏瓣膜需要具有与天然心脏瓣膜相近的物理性质和良好的生物兼容性, 同时更需要有一定的自主抗凝能力。与天然心脏瓣膜相近的物理性质是为了复原天然心脏瓣膜的各种物理性质如弹性、韧性等, 从而保证人工心脏瓣膜的正常

运作。生物相容性要求人工心脏瓣膜在人体内不会引发病变，否则会引发人体免疫系统的免疫反应，进而导致炎症等一系列病症的出现，甚至会引发基因突变，使正常细胞癌变。

自主抗凝能力一直是人工组织器官研究的热点和难点。当前人工心脏瓣膜中常用的机械瓣膜因为自身的自主抗凝能力低，使用者需终生服用抗凝药物。自主抗凝能力低的材料容易引发血栓，进而影响健康。非织造材料制造的人工心脏瓣膜的优势之一便是在自主抗凝能力的研发方面还存在着潜力。

常用的非织造人工心脏瓣膜主要包括纤网加固而成的二维非织造网片结构和静电纺丝法制成的三维纤维膜结构等。SHINNOKA T 等利用聚乳糖机织网片和非织造聚羟基乙酸网片制备了人工心脏瓣膜支架，并在其网片上种植纤维细胞和内皮细胞，试验结果表明异体瓣膜中有一定的反流现象。RAMASWAMY S 等利用共混聚羟基乙酸和聚乳酸制备了含有骨髓间充质干细胞的非织造结构组织工程心脏瓣膜，研究得出周围环境对其心脏瓣膜的适当机械刺激将促进骨髓间充质干细胞的组织形成。ROSS R 等模拟天然胶原蛋白结构，利用静电纺丝法固定纤维得到非织造结构心脏瓣膜，试验结果表明非织造结构心脏瓣膜的力学性能比纯纤维素心脏瓣膜的力学性能强。通过静电纺丝加固纤维，天然胶原蛋白结构心脏瓣膜模拟图见图 1。

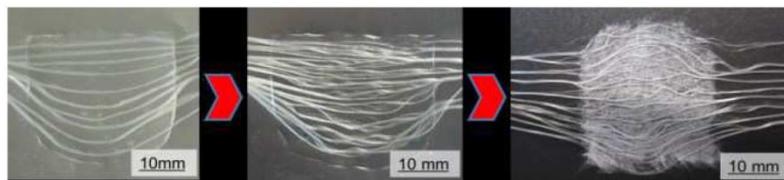


图 1 模拟天然胶原蛋白结构心脏瓣膜

然而，该结构是二维的网片结构，不利于细胞黏附和向内生长。因此，学者们利用静电纺丝技术制备三维多孔结构的心脏瓣膜，其孔隙率高、比表面积高，可模拟细胞外基质结构，有助于细胞黏附和三维生长。DEL GAUDIO C 等利用静电纺丝技术制备了生物可吸收三叶心脏瓣膜，如图 2 所示。试验结果表明，通过静电纺丝技术制成的聚己内酯心脏瓣膜的孔隙率达到 89.13%，有助于营养物质扩散，同时促进细胞黏附和生长。

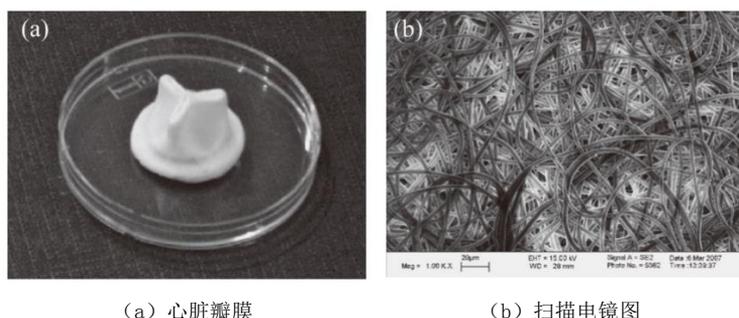


图 2 静电纺丝聚己内酯心脏瓣膜示意及扫描电镜图

国内以非织造材料制备心脏瓣膜的技术仍落后于国外，非织造材料心脏瓣膜的制备工艺技术仍需要提升。介入膜有着生物膜和机械膜无法比拟的优点，手术风险更低且手术费用低廉。

2 人工角膜

角膜疾病引起的角膜盲可通过传统的角膜移植术来恢复视力，但对于严重化学或热烧伤的患者，传统角膜移植手术成功率并不高，且当前角膜供体有限，因此，亟需利用人工角膜来代替患者浑浊的角膜。人工角膜应具有良好的生物相容性、高透光性、高持水性能、较强的机械强度以及高透光性等。常用的人工角膜材料包括聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）、聚氨酯（PU）、明胶等。纯 PMMA 的硬度比天然角膜硬，且其非湿润性会导致眼睛干燥并引发其他副作用，从而需要引入水凝胶等具有湿润性的材料。另外，为了提供细胞外基质环境，需要制备多孔结构的水凝胶材料。通常采用的技术包括相分离法、静电纺丝法、冷冻干燥法等。其中，静电纺丝纳米纤维结构可以模拟细胞外基质，支持细胞黏附、迁移、增殖和分化等，同时可以提高力学性能，因此广泛应用于生物材料支架中。

TONSOMBOON K 等通过静电纺丝法制备了具有随机排列和有序排列两种结构的明胶纤维膜，再利用海藻酸钠水凝胶，得到纳米纤维增强水凝胶角膜支架。研究表明，静电纺丝辊筒接收器的转速越高，其纤维直径越小，纤维取向越好，轴向力学性能越强。

为了重建角膜基质功能，将细胞/干细胞引入材料中，提高其再生能力、减少排斥

反应等。CHEN J 等通过调控丝素蛋白和聚己内酯—乳酸的比例，制备了多种静电纺丝纳米纤维膜，研究角膜内皮细胞在其纤维膜中的增殖效果。研究表明，丝素蛋白和聚己内酯—乳酸比例为 25:75 时，角膜内皮细胞在支架表面上形成单层细胞层，其黏附和增殖效果最佳，证明了其临床潜在应用价值和前景。

3 疝修补片

疝气是普外科一种常见的多发疾病，是体内组织或器官突出体膜破损所致，包括腹股沟疝、股疝、脐疝和腹壁切口疝等，发病率高。

目前，主要以开放式无张力疝修补术和腹腔镜疝修补术为主要治疗手段，在疝修补手术中，生物假体材料及疝修补片的应用十分普遍。当前市场上的疝修补片结构分为纺织结构补片和生物结构补片。

疝修补片中纺织结构可分为针织结构（经编或纬编）、机织结构和非织造结构，其中经编结构疝修补片由于其延展性和弹性较佳，柔软、脱散性小、透气性好，应用最为广泛。此类疝修补片具有孔径大、孔隙率高、强度高、弹性好和柔软等优点，能够减少补片在体内的炎症反应、减少植入部位的纤维化并且能促使组织生长。美国强生的 Vicryl 补片是纺织结构补片的典型代表，多采用针织或编织的织造方法，其抗感染性强、柔韧性好、防黏性能较好，但实际应用中 Vicryl 补片不能有效刺激足够的纤维组织再生，大概率会造成疝气复发。Ethicon 的 Ultrapro 补片是通过使用编织技术将聚丙烯与聚卡普隆缝合线复合在一起形成的一种部分可吸收补片。随着应用时间的增加，合成材料在体内的含量将减少，从而降低组织的异物反应。

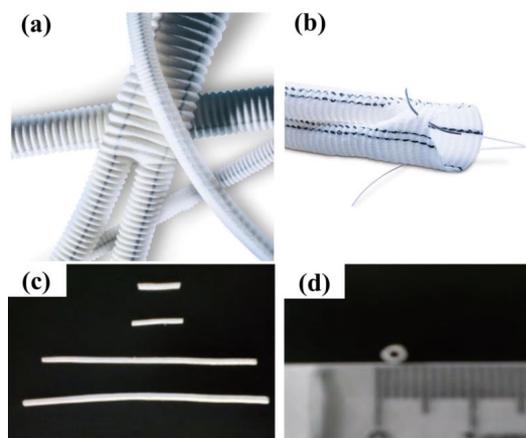
另外，静电纺丝工艺制备的纳米纤维膜可以构建生物补片相近的三维网络结构，使细胞能够在三维结构纳米纤维膜补片上黏附、繁殖、重建，从而逐渐生长出新的组织，起到组织再生作用。杨刚等通过静电纺丝技术制备了聚乳酸/聚己内酯/纤维蛋白原纳米纤维膜补片，研究表明静电纺丝技术制备的补片具有良好的细胞相容性，并通过引入生长因子来促进细胞增殖，使其具有组织再生能力。

4 人工血管

20 世纪 50 年代，维纶人工血管被成功研制，并于次年被成功应用到临床中。经

过 70 年的发展，目前大、中口径人工血管的发展已十分成熟，但小口径（直径小于 6mm）人工血管由于血栓形成和内膜增生等问题，其远期通畅率较低。

人工血管应满足力学特性、可降解性、生物相容性、渗透性和可缝合性等要求。目前，已商品化的人工血管材料主要有聚四氟乙烯、涤纶、聚氨酯和天然纤维材料等。此外，胶原蛋白、聚乳酸、聚己内酯等材料也被广泛研究。其中，聚四氟乙烯具有耐化学腐蚀性强、生物相容性好、延展性强、力学性能强等优点，是当前市场上最常用的人工血管材料之一。Maquet 公司推出针织人工血管、编织人工血管、膨体聚四氟乙烯人工血管等产品，如图 3 所示，其产品占据全球市场的 70%。



(a) Intergard 针织型 (b) Hemashield 铂金双绒编织型 (c) 胶原—聚乳酸静电纺丝人工血管 (d) 胶原—聚乳酸静电纺丝人工血管截面

图 3 Maquet 公司推出的人工血管

制备人工血管的方法有挤出及膨化拉伸法、编织法、3D 打印法、相分离法、静电纺丝法等。近年来，非织造方法中，静电纺丝技术得到了普遍关注，王宪朋等利用静电纺丝技术制备小口径胶原—聚乳酸人工血管，有效调控人工血管的孔隙率，并成功改善了其拉伸强度、爆破强度等力学性能。但由于小口径人工血管仍存在血管栓塞及内膜增生等问题，至今尚未被成功应用到临床中，因此，实现小口径人工血管的远期通畅率是当前亟需解决的难点和热点。

为了改善小口径人工血管的远期通畅率，除了在新材料、新技术、新工艺等方面不断探索与创新，还需要巧妙利用生物活性因子，有效提高其抗血栓性能及生物相容

性，并促进血管再生。

5 人工关节

随着人口平均年龄的增长和老龄化的加剧，各种骨关节疾病的发病率不断升高。虽然服用药物可以治疗或缓解疼痛，但类风湿性关节炎和严重骨坏死等关节发生结构上的变化，需要通过人工关节置换的方法进行治疗。人工关节作为替代病变或损伤关节的植入性假体，用以治疗并帮助患者在日常生活中行走、上下楼梯等基础活动的进行。因此，人工关节不仅要承受复杂的受力负重，还会有拉、扭、转、压和界面剪切及反复疲劳、磨损的综合作用，因此，人工关节材料必须满足一定的强度、塑性、耐磨损性、抗腐蚀性、耐疲劳性等要求。另外，人工关节植入人体后，使用寿命一般为15~20年，因此，人工关节还需要具备良好的生物相容性。

常用的人工关节材料主要包括金属材料、高分子材料及陶瓷材料等。其中金属材料可分为钛基、钴基和铁基，这类材料的可塑性和韧性较好，且易于加工、抗压强度较高，常被制成人工关节中的承重支架；临床应用中的陶瓷材料包括氧化铝等生物惰性陶瓷材料和碳纤维等生物活性陶瓷材料，陶瓷材料硬度、生物相容性和断裂韧性良好，但脆性大，易碎，作为人工关节软骨修复材料有一定的局限性；高分子材料主要为硅橡胶、超高分子量聚乙烯、聚醚醚酮等，这类材料可以提高耐磨损性能，增加人工关节的使用寿命，但高分子材料表面强度低，受力时存在应力松弛和蠕变现象，长期使用容易出现材料失效等问题。

非织造材料制备的人工关节假体不仅可以更好地延长使用寿命，还可以避免摩擦过程中接触界面磨损失效产生磨粒，从而解决成骨溶解等问题带来的危险和疼痛。目前，研究者们开始研究由固、液两相组成的水凝胶等软质材料作为人工关节软骨的替代材料。常用的方法是利用静电纺丝技术制备连续纤维，将静电纺丝有序纤维和水凝胶溶液分层结合，从而构建有序纤维增强仿软骨水凝胶材料。通过静电纺丝法制备有序纤维膜，采用冷冻、解冻及退火工艺构建纤维增强仿软骨水凝胶，研究静电纺丝纤维膜的加入对有序纤维增强仿软骨水凝胶生物摩擦性能的影响。此外，通过观察龙虾关节膜具有的强度、韧性和缺陷容限，ZHANG H 等使用非织造布和橡胶硅制备具有螺旋堆叠和可控的多层软复合材料，发现复合材料表现出明显的容错行为，在裂纹发生时也能保持强度和韧性，这归因于弱基体和螺旋堆积引起的相邻层之间的裂纹偏

转；HE N F 等采用针刺工艺制备关节软骨移植的再生胶原纤维三维多孔支架，研究发现这种三维支架具有良好的吸水能力、合适的生物力学性能及生物相容性，并且有助于细胞生长，是软骨移植的良好候选材料。YARDIMCI A I 等通过静电纺丝技术,开发了随机或有序排列的聚丙烯腈（PAN）/聚吡咯（PPy）纳米纤维支架，发现有序排列的 PAN/PPy 纳米纤维支架具有较高的力学性能，有利于成骨细胞的黏附和生长。

目前的人工关节和软骨制备工艺尚未达到天然关节和软骨的生物学和生物力学特性，但随着人工关节的深入研究，非织造材料在人工关节中的应用将会越来越广泛，其制备工艺和性能将会有更大的突破。

随着非织造材料技术的不断发展和进步，医用植入非织造材料的工艺技术日益成熟，同时也广泛应用到临床中。非织造材料具有孔隙率高、孔隙大小可控等优点，其具有人体内天然细胞外基质结构，从而促进细胞黏附、增殖和再生。然而，医用植入非织造材料仍需要较大提升，例如，人工关节磨损性能的提高，人工血管的抗血栓性能和通畅率改善等问题仍需要进一步研究和改善。作为非织造、生物、医学等交叉学科融合研究产物，医用植入非织造材料可以通过新型原料的开发、制备工艺的改进、组织工程处理等方法来改善目前存在的问题，从而使医用植入非织造材料具有更广阔的发展前景。

海藻酸盐基非织造医用敷料的研究进展

王惠婷¹ 陈宇鉴¹ 刘诗仪² 张显涛³ 陆斌⁴ 邹专勇¹ 王建¹ 张寅江^{1,5}

(1. 绍兴文理学院浙江省清洁染整技术研究重点实验室; 2. 绍兴福清卫生用品有限公司; 3. 振德医疗用品股份有限公司; 4. 杭州杭纺科技有限公司; 5. 武汉纺织大学生物质纤维与生态染整湖北省重点实验室)

医用敷料作为直接覆盖伤口的卫生材料,其主要作用是保护伤口防止细菌感染,吸收伤口渗液及促进其愈合等。随着人口老龄化的加重与糖尿病患者的增多,对能够调控伤口渗液、透气防粘连、抑菌止血及促愈合等高端医用伤口敷料的需求量也在增大。传统伤口敷料如纱布、医用绷带等,仅用于伤口与环境的阻隔,让伤口自行愈合,没有止血抑菌和促进伤口愈合等功能,伤口易反复感染,已逐渐被现代医用敷料替代。海藻酸盐具有良好的生物相容性、止血与促进伤口愈合、吸收渗液强等优异性能,适合用于医用敷料。从19世纪后期海藻酸被提取提纯,到20世纪40年代海藻酸盐纤维基敷料开始出现,再到80年代商用海藻酸盐敷料、含银海藻酸盐敷料以及复合功能型海藻酸盐医用敷料的使用,到当前广泛应用于现代医用敷料,海藻酸盐基医用敷料变得越来越完善。

海藻酸盐基敷料有水凝胶式、海绵形式、非织造材料式及薄膜型等。其中,非织造材料凭借三维空间管理流体的性能优势,越来越多地被应用于医用敷料产品。以非织造工艺制备的海藻酸盐医用敷料,生产高效节能,可携带抑菌、止痛等特定功能性物料,同时具有手感柔软、力学性能好、吸液能力强等优势,使得当前海藻酸盐基非织造医用敷料迅速发展。海藻酸盐基非织造医用敷料具有高效止血等新型功能,同时保留传统医用敷料透气好、手感柔软舒适等优势,可替代传统医用敷料用于伤口愈合。

本文从海藻酸盐基非织造医用敷料的研究现状入手,介绍海藻酸盐的结构与性能,同时系统综述海藻酸盐基非织造敷料的种类、制备方法及最新研究进展,最后从强化抑菌、结构设计、特殊功能等创新角度总结预测海藻酸盐基非织造医用敷料的未来发

展趋势。

1 海藻酸盐基非织造敷料研究现状

1.1 海藻酸盐的结构与性能特征

海藻酸盐主要由 β -D-甘露糖醛酸(M)及其 C5 差向异构体 α -L-古洛糖醛酸(G)残基,通过 1,4-糖苷键以不规则的嵌段方式连接而成的共聚物,其物理和化学性质是由链中 G、M 单元的排列顺序决定。海藻酸盐系白色丝状物,不溶于水与有机溶剂,而其单价盐和酯溶于水并可形成稳定黏性溶液。海藻酸盐含有众多羧基和羟基,具有特殊的离子交换特性,其与各种金属阳离子结合后形成海藻酸盐,该特性使得海藻酸盐拥有良好的伤口止血、促愈与美白功效,且吸液性能优异。此外,海藻酸盐无毒,来源丰富且易获取,已被证明在人体内具有良好的生物相容与降解特性。通过基团修饰、接枝共聚、共价交联等反应对海藻酸盐进行改性,可增强海藻酸盐的止血与抗菌功能,同时改善其不受控制的降解等问题,使其能够更为广泛地应用于医用敷料。

1.2 海藻酸盐基非织造敷料的种类

1.2.1 海藻酸盐非织造敷料

海藻酸盐非织造敷料是由海藻酸盐纤维直接经非织造工艺制得的医用敷料,由于海藻酸盐纤维上的钠离子易与钙离子交换并形成稳固的蛋盒(egg-box)结构,所以现在市面上流通的大部分为海藻酸钙非织造敷料。海藻酸盐非织造敷料可分为高 M 型和高 G 型。高 M 型属于湿分散型,吸收伤口渗出液后会形成厚而软的凝胶,可为伤口愈合提供湿润环境,更好地促进伤口愈合,用后可用温盐水冲洗从创面上去除。高 G 型属于湿稳定型,吸收伤口渗出液后结构保持稳定,用后可整片揭除,避免换药时对伤口的二次伤害,保护新生肉芽。初晓夏等将纱布、明胶海绵止血敷料与海藻酸钙纤维止血敷料进行对比发现,海藻酸钙纤维止血敷料止血速度快且效果好,细胞毒性小,有良好生物相容性和一定抑菌性。

1.2.2 海藻酸盐混纤类非织造敷料

海藻酸盐与其他材料进行共混经湿法纺丝得到改性海藻酸盐纤维,再经非织造工艺制成医用敷料,有物理混合和化学改性 2 种。Fan 等将羧甲基 κ -卡拉胶/海藻酸盐混合液通过喷丝头喷入含有氯化钙和乙醇的凝固浴中,得到的纤维制成敷料具有良好的

拉伸强度和断裂伸长率。潘颖等将纤维素/海藻酸钠(SA)混合作为纺丝原液,经湿法纺丝制得纤维素/海藻酸盐复合纤维,此复合纤维制成的敷料具有良好的生物相容性与降解性,可有效提高敷料的强度、柔韧性与可降解性。王雅琦等将不同分子量聚乙二醇(PEG)接枝到氧化纳米纤维素(CNC)表面,得到CNC-g-PEG纳米晶(其中g代表接枝),再与SA物理共混经湿法纺丝制备CNC-g-PEG改性海藻酸复合纤维毡。Kamal等为改善海藻酸钙纤维的力学性能,采用不同强度的 γ 射线对其进行接枝改性,将聚乙烯醇接枝到海藻酸钙纤维上,改性后的海藻酸钙纤维拥有优异的拉伸强度,制作的敷料具有良好的力学性能。

1.2.3 海藻酸盐后整理类非织造敷料

将海藻酸盐溶液喷涂或涂覆到非织造布上,可通过离子作用、共价交联、热凝胶和细胞交联等在非织造布表面形成凝胶层,为伤口愈合提供良好湿润环境,同时可通过加入天然或有机抑菌剂来提高敷料的抑菌性,加速伤口愈合。Markovit[®]等将聚丙烯非织造布浸泡在低浓度海藻酸盐溶液中,经过挤压后再将样品浸泡在硫酸铜溶液中,得到新型抗菌纳米复合材料。Kudzin等将聚乳酸熔喷非织造布浸入海藻酸盐溶液中,后浸入到氯化锌溶液中得到由聚乳酸/锌/海藻酸盐组成的抗菌可降解复合材料。Sadeghianmaryan等将聚丙烯酸钠和聚2-丙烯酰胺基-2-甲基丙烷磺酸逐层涂覆在非织造织物上,制得的敷料具有高效抗菌活性,水凝胶层促进材料的柔韧、润湿与强度有一定提升。Ahmad等将大麻纤维利用针刺法制成非织造布,再浸泡在海藻酸盐溶液中,最后与氯化钙溶液交联,冷冻干燥后得到的大麻/海藻酸盐水凝胶复合材料具有良好的抗菌与吸液性。余国飞等以海藻酸盐非织造敷料为基材,将壳聚糖季铵盐大分子通过低温等离子体辅助接枝到基材表面,制得一种细胞相容性良好的新型抗菌海藻酸盐敷料。

1.2.4 海藻酸盐纳米纤维类非织造敷料

纳米纤维类非织造敷料是由静电纺丝法、微流控纺丝法、离心纺丝法喷出的纳米纤维或超细纤维形成的非织造医用敷料,得到的纳米纤维材料具有高比表面与孔隙率、直径小、有序纤维结构等独特优势,可有效模拟皮肤的细胞外基质,促进细胞增殖和伤口愈合,同时防止细菌感染。Thairin等将环丙沙星(CIP)、海藻酸盐、聚乙烯醇、明胶(SPG)溶于水,通过静电纺丝得到纳米纤维垫后浸在氯化钙溶液中交联,得到负载海藻酸盐的CIP-SPG纳米纤维垫。Sun等将制得的SA-聚丙烯腈共聚物溶解在丙酮和二甲基亚砷的混合物中,按不同比例与聚乙二醇混合制得静电纺纳米纤维毡,由

丙烯腈接枝改性的 SA 可纺性显著提高。Ding 等将经 85℃ 水浴加热和强磁搅拌的 SA、微晶纤维素、聚乙烯醇和大胡麻水溶液作为鞘流，将氯化钙加入到去离子水溶液中作为芯流，一起通过注射泵挤压进入微流控芯片通道，后交联形成海藻酸钙水凝胶微纤维毡。Akhtar 等采用离心纺丝法制备聚乙烯醇 (PVA)、海藻酸二醛/PVA 和 ADA (腺苷脱氨酶) - 明胶/PVA 纳米纤维，将制备的纳米纤维负载铜银掺杂介孔生物活性玻璃纳米颗粒，具有优异的抗菌效果。

2 海藻酸盐基非织造敷料制备方法

2.1 纺丝法

2.1.1 静电纺丝法

静电纺丝是液滴带电产生射流，然后经拉伸和伸长产生纳米纤维并凝固和收集在集热器上形成纤维网的方法。该方法制备纳米纤维结构材料具有操作简单、成本低与可重复性较强等优点。Han 等将溶解有 PVA 和 SA 的溶液混合于溶有叶黄素的 N, N - 二甲基甲酰胺溶液中，通过静电纺得到叶黄素负载 PVA/SA 纳米纤维。Bakhsheshi-Rad 等将溶有壳聚糖 (CS) 的醋酸溶液与溶有 SA 的去离子水溶液混合搅拌 24h，然后将不同量的庆大霉素 (Gn) 溶解在 CS-SA 中，形成 CS-SA/Gn 溶液，最后通过静电纺丝制得医用敷料。

2.1.2 微流控纺丝法

微流控纺丝技术是利用微流控芯片精确控制内相溶液沿微流芯片微通道的方向流动，在不接触微通道内壁的情况下经物理或化学转化后在微通道内产生固体纤维的一种典型的湿法纺丝工艺。其操作简单灵活，在温和的温度与压力下，可连续生产直径均匀的超细纤维。Ma 等用微流控纺丝法将海藻酸盐自旋成螺旋状微纤维，再用聚丙烯酰胺 (PAM) 填充微纤维的空隙，得到海藻酸钙/PAM 复合材料。Zhang 等将制得的沸石咪唑盐框架-8 (ZIF-8) 纳米材料加入 SA 溶液中搅拌后再加入氯化钙溶液，采用同轴微流控纺丝法得到 SA/ZIF-8 核壳功能膜。

2.1.3 离心纺丝法

离心纺丝法是将聚合物溶液或熔体放入旋转容器中，通过离心力从孔中抛出形成纳米纤维的方法。该方法易于实施，可制备多种形式、形态或取向的纳米纤维。Lu 等将混有海藻酸盐和聚氧乙烯的溶液搅拌均匀后加入盐酸四环素，采用离心纺丝法制备

含亲水性模型药物盐酸四环素的高吸水性海藻酸盐/聚乙烯亚微米纤维。Ibrahim 等将海藻酸水溶液、非离子表面活性剂 Span80 和有机溶剂氯仿混合后加入聚乳酸固体,采用离心纺丝法制备具有与微珠交织的纤维网络材料,其控释给药特性适用于伤口敷料。

2.2 梳理加固法

2.2.1 梳理针刺法

梳理针刺法是将海藻酸盐纤维经开松混合梳理成网后,经针刺加固得到海藻酸盐基非织造布敷料的方法,制备的材料具有通透高、力学性能优良等特点。徐海涛等将不同比例的改性壳聚糖短纤与海藻酸钙短纤混合,采用针刺工艺制得混纺敷料。Zhang 等利用针刺工艺将海藻酸钙纤维制成非织造布后浸泡在 $Zn(NO_3)_2$ 溶液中进行离子交换,晾干后浸泡在氨基超支化聚合物溶液中进行分散、黏结后制得敷料。

2.2.2 梳理水刺法

梳理水刺法是用梳理工艺将海藻酸盐纤维制成纤维网,再用高速水射流使纤维缠结抱合的方法,该材料具有强度高、手感柔软、无化学黏合剂及透气性好等特点,是理想的敷料基材。殷义霞等采用混纺法制备 5%羟甲基纤维素钠(CMC)含银海藻酸盐共混纤维毡,后经梳理水刺制得医用敷料。王树源利用梳理水刺工艺将粘胶吸收芯层与汉麻/粘胶混纺层复合形成敷料基布,再对基布进行海藻酸钙凝胶涂层整理制得敷料。

2.3 后整理法

后整理法是将功能整理剂以涂覆、喷涂或浸泡等方法在非织造材料上进行整理,赋予其抗菌或止血等功能,进而制备成医用敷料。Montaser 等将银/海藻酸盐/纳米颗粒复合材料采用填充-固化技术浸渍后与氯化钙溶液交联,将烟酰胺封装在非织造布上,制得银/藻酸盐/烟酰胺纳米复合材料。Zhang 等将 SA 非织造布浸泡在聚六亚甲基胍盐酸盐溶液中,冷冻干燥后得到海藻酸盐衍生物类抗菌止血敷料。

2.4 复合法

复合法是利用不同纤维组合形成纤维网,或施加不同的加固、后整理等方式制备海藻酸盐基非织造材料的方法。该方法可将不同材料成分、加工方法等优势结合起来,优化敷料功能。Kang 等结合熔喷与静电纺制备新型双层聚氨酯复合材料,以熔喷聚氨酯材料作为基层,以含有氯化银纳米颗粒的静电纺聚氨酯纤维层作为功能层,制得复

合材料。Chao 等将海藻酸盐与白芨溶液搅拌，再与 CaCl_2 溶液交联形成凝胶，将凝胶涂覆黏结在聚乳酸/天丝针刺非织造基材上，用于医用敷料。

3 海藻酸盐基非织造敷料发展趋势

随着海藻酸盐基医用敷料快速发展，传统材料或单一功能化的医用敷料越来越难以满足市场需求，取而代之的是多功能集成化新型海藻酸盐基非织造医用敷料。当前发展趋势为积极寻找来源广泛且无毒、抑菌性良好的天然抗菌剂、其它新型抗菌剂或对海藻酸盐进行改性达到强化抑菌效果；构建新型敷料结构，实现最适合伤口愈合环境并便捷病人使用；开发新型特定功能的医用敷料，满足特殊伤口需求。

3.1 强化抑菌创新

海藻酸盐具有良好的止血功能，但其抑菌性弱，为防止细菌和微生物在伤口处过度繁殖影响愈合，可添加其它抗菌剂或对海藻酸盐进行改性来提升抑菌性能，如图 1 所示。

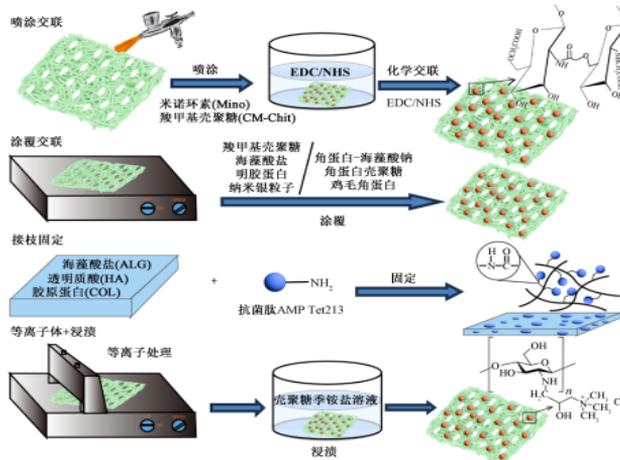


图 1 强化抑菌创新型海藻酸盐基非织造敷料特征图

Gao 等将米诺环素（Mino）/羧甲基壳聚糖（CM-Chit）喷涂到等离子体处理后的海藻酸钙纤维（CAF）非织造布上，然后通过 1, 3-（3-二甲氨基丙基）-3-乙基碳二亚胺盐化钠/N-羟基琥珀酰亚胺（EDC/NHS）交联制得 Mino 负载 CM-Chit 凝胶/CAF 非织造布复合敷料，具有良好的细胞生物相容性与抑菌性。

Shanmugasundaram 等将鸡毛角蛋白、角蛋白-SA 和角蛋白壳聚糖分别涂覆在非织造布上，得到具有良好抑菌效果和促进伤口愈合的医用敷料，表现出良好的细胞活力和生物相容性。Montaser 等将羧甲基壳聚糖、海藻酸盐和明胶蛋白分别涂覆在含有纳米银粒子的非织造布上制备新型医用敷料，得到 3 种非织造基医用敷料，具有较好的抑菌效果和促进伤口愈合能力。Lin 等将抗菌肽 AMP_{Tet213} 固定在海藻酸盐 (ALG)、透明质酸 (HA) 和胶原蛋白 (COL) 的底物上，形成 ALG/HA/COL-AMP 伤口敷料，具有良好的力学性能、生物降解性及抗菌活性。但年华等对海藻酸盐基材进行等离子体处理后浸入壳聚糖季盐溶液中进行接枝改性，反应一段时间后制得抗菌型多功能海藻酸盐敷料。

3.2 结构设计创新

传统结构的海藻酸盐敷料难以满足伤口渗出液快速扩散、使用方便等需求，采用结构创新型海藻酸盐基非织造敷料，如密度梯度、复合增强层、三维结构等，可增强敷料的力学性能，加快伤口愈合，提升伤口渗出液扩散速度与敷料使用方便性等，如图 2 所示。

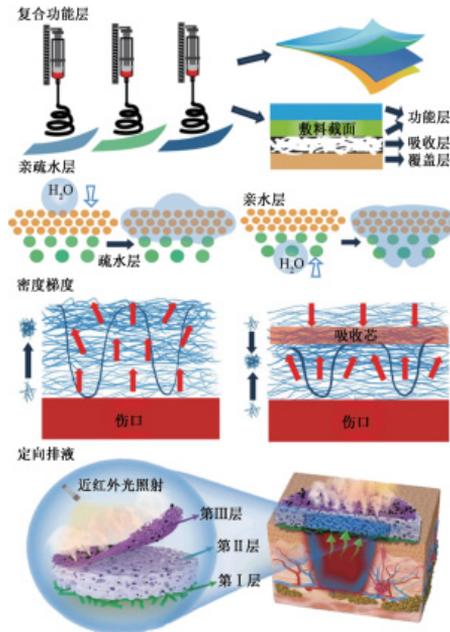


图 2 结构设计创新型海藻酸盐基非织造敷料特征图

邓云龙等发明了一种海藻酸盐创可贴，设计为基带层、海藻酸盐非织造布层和保护层的3层结构，形状与普通创可贴无异，具有祛疤、促愈合、加速止血等优点。Talukder等采用静电纺丝工艺开发了一种下层为壳聚糖/聚乙烯醇和纤维蛋白，中间层为聚乙烯醇/SA，顶层为明胶的新型杂化多层静电纺纳米复合膜，能在最短的时间内最大限度吸收皮肤渗出液，有助于伤口快速愈合。杨璧玲等制得的微纳米海藻酸盐纤维敷料由纳米海藻酸盐纤维层、吸湿非织造布层、聚丙烯熔喷布层和面层等结构组成，具有高效吸液与细菌阻隔特性。Zhang等设计的聚乳酸-姜黄素疏水层、水解聚丙烯腈转移层和聚丙烯腈-紫色羽衣甘蓝素亲水层结构敷料，实现了组织渗液的单向输送，对慢性伤口具有较好的治疗效果。Gao等采用针刺法制备具有密度梯度的三维海藻酸钙纤维敷料，该结构可加快伤口渗出液吸收，同时阻碍伤口渗出液回流，为伤口愈合提供良好湿润环境。Wang等利用冷冻干燥法制备（丝素蛋白膜、壳聚糖魔芋葡甘露聚糖海绵层、醋酸纤维素膜）多孔结构敷料，具有良好的定向吸收组织渗液功能。

3.3 特殊功能创新

为开发特殊功能以拓宽医用敷料应用渠道，通过对医用敷料添加具有特定功能的成分赋予其防海水浸泡、良好水蒸气透过率、提高免疫、监测伤口pH值变化、减少瘢痕、收湿敛疮、促进血液凝固等功能，使敷料拥有特殊功能，实现智能化（见图3）。白爽将I型胶原蛋白和壳聚糖混合液静电纺形成膜，并与海藻酸盐底布复合制成海藻酸盐防海水浸泡敷贴，能起到防海水浸泡、吸收伤口渗液、促进伤口愈合等效果，对海上作业人员伤口愈合具有重要意义。周建大等将SA/羧甲基纤维素钠共混纺丝制成敷料载体，浸渍在臭氧化油中，经加热浸泡、真空干燥灭菌后得到臭氧海藻酸盐抗菌敷料，具有加快伤口附近血液循环、加强新陈代谢和提高免疫等功能。邓云龙等将胶原蛋白溶于纯水后加入一定量酒精，将混合液均匀喷涂到海藻酸盐非织造材料上，得到的医用敷料具有减轻疼痛、加速愈合、减少瘢痕、防粘连等优点。山传雷等将仙鹤草提取物液、SA纺丝液与海螵蛸超细微粉浆料充分混合静置脱泡，得到非均相混合纺丝液后以氯化钙溶液作为凝固浴，制备SA/海螵蛸/仙鹤草提取物共混纤维，以此纤维制得的敷料具有收敛止血、收湿敛疮、抗菌与促进血液凝固等功效。Pakolpakl等将花青素提取物加入SA/聚乙烯醇溶液中，采用静电纺丝制得SA/聚乙烯醇/花青素纳米纤维垫，利用花青素作为天然pH值传感器，在抑菌及促进伤口愈合的同时可有效监测伤口pH值的变化，实现医用敷料智能化。Cui等先用羟丙基三甲基氯

化铵壳聚糖改性海藻酸钙纤维，再用茜素染料和花青素染料分别对其染色，得到具有 pH 值指示功能的海藻酸钙智能纤维，可用于创面愈合的视觉监测。

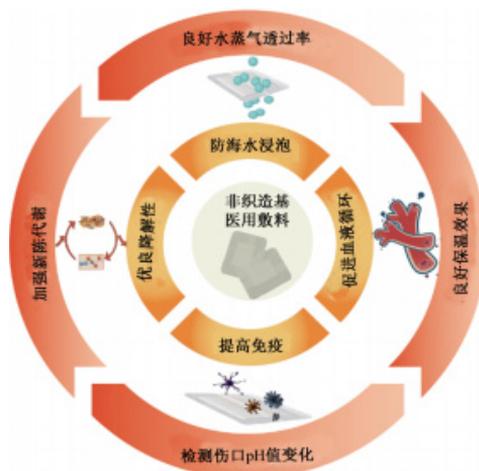


图3 特殊功能创新型海藻酸盐基非织造敷料特征图

4 结束语

海藻酸盐作为天然高分子多糖，具有良好的生物相容与可降解性，其含有众多羧基和羟基，拥有良好的吸收伤口组织渗液、止血、促愈与美白功效，使其在医用敷料应用领域展现出巨大潜力。通过对海藻酸盐进行改性，可增强海藻酸盐的止血与抗菌功能。当前海藻酸盐基非织造敷料可分为纯海藻酸纤维基敷料、海藻酸纤维与其它纤维混合敷料、海藻酸盐后整理改性敷料以及海藻酸盐纳米纤维类非织造敷料，其制备方法主要包括纺丝法、梳理加固法、后整理法和复合法等。

海藻酸盐基非织造敷料本身具有良好的止血功能能力，但抗菌性不足，未来可将海藻酸盐进行修饰改性或添加抗菌剂等进行改善，同时可利用多样化的敷料基材和新型结构来促进加速伤口愈合。另外添加具有特定功能的材料，赋予海藻酸盐基非织造医用敷料相应功能，扩大其应用范围，实现敷料智能化，或开发多功能智能化敷料等均是未来重要的发展方向。海藻酸盐基非织造医用敷料作为新型医用敷料，未来在健康生活中具有良好应用前景。

来源：纺织学报 2025 年第 06 期

纤维素基止血材料的研究进展

符芬^{1,2,3} 王钰涵¹ 丁凯^{1,2,3} 赵帆^{1,2,3} 李超靖^{1,2,3} 王璐^{1,2,3} 曾泳春^{1,3} 王富军^{1,2,3}

(1. 东华大学纺织学院; 2. 东华大学纺织面料技术教育部重点实验室; 3. 东华大学上海市现代纺织前沿科学研究基地)

欧洲创伤后大出血和凝血病处理指南第六版(2023年)载明,出血性创伤患者通过早期止血治疗可预防死亡率达34.5%。在复杂手术过程中,无法控制出血仍然是导致死亡的主要原因,失血过多容易引发各种并发症,如感染、多器官功能衰竭、二氧化碳中毒、凝血功能障碍等,从而造成患者死亡。在战争和事故中,快速及时有效控制出血,可以为手术和后续治疗赢得宝贵时间;在手术中,能避免突发性医疗事故的出现,显著提高手术的成功率。因此,开发新型安全、高效的止血材料势在必行。

目前,市面上的四种主流止血材料各有千秋但尺有所短:天然生物止血材料如明胶、壳聚糖和海藻酸钠等,来源有限、成本较高、力学性能差;合成高分子材料如聚乙烯醇、聚氨酯和聚乳酸等,缺乏足够的生物活性,而且降解产物会引起炎症反应;无机材料如氧化铝、硫酸钙和磷酸钙等,与柔软组织的生物相容性差且止血效果受限;复合止血材料的制备和应用更加复杂,且成本较高。由此可见,理想的止血材料需具有快速止血、操作方便且易保存、安全性高且价格合理及不良反应少的特点,特别是对于凝血功能障碍、实质性脏器出血、体内深层动脉组织出血患者而言,体内可吸收降解的止血材料方为最佳选择。

纤维素是由葡萄糖分子通过 β -1,4糖苷键连接而成的大分子多糖,其来源非常广泛,具有良好的生物相容性、可降解性、无细胞毒性,其作为止血材料被应用由来已久。近年来,研究者普遍通过化学改性包括羧甲基化、氧化等方法,提升纤维素基材料的止血效率;通过研究结构设计对止血效果的影响,优化纤维素基止血材料形态;通过不同纤维素基材料与不同添加剂的组合,优化复合材料的止血效果、生物相容性和力学性能,并探索其在肿瘤手术、难愈合伤口和深部伤口止血中的应用潜力。纵览

国内外研究现状，纤维素基止血材料的研究重点在于进一步提升长期生物相容性和降解性，实现止血、抗菌、促愈功能的复合及其临床应用稳定性；改进纤维素基止血材料的制备工艺，以扩大产能和降低成本；深挖纤维素基止血材料的作用机制，以便更好地指导其设计和应用；开展纤维素基止血材料的临床研究，以验证和提升其安全性和有效性。

本文介绍了纤维素的特点及其止血机制，详细分析对比了目前研究最普遍的三类改性纤维素基止血材料的止血机理、材料设计策略及应用挑战和解决之道，并对纤维素基止血材料的发展方向和前景进行了展望，以期对止血材料的设计改进和应用拓展提供一定的借鉴意义。

1 纤维素的特点及止血机制

1.1 纤维素的特点

纤维素分子链的结构单元带有 3 个活泼型羟基，为纤维素的化学改性提供了多种可能，如氧化、醚化、酯化和接枝共聚等。纤维素所含的羟基多处于氢键中，通过强大且复杂的氢键网络来保持结构的稳定和有序，因此，纤维素不溶于一般性溶剂。此外，纤维素基材料从分子结构角度来说与环境更相融，具有较好的生物降解性，绝大部分在自然界中可以被微生物完全降解为水、二氧化碳和其他小分子，极具环境友好度。纤维素基止血材料因其能够被充分水解吸收、异物反应率低、无免疫风险等特性，已被成功应用于心血管外科、神经外科等多科室手术，尤其适用于毛细血管和静脉渗液的控制。

1.2 纤维素基止血材料的止血机制

止血材料的止血机制可大致分为填塞机制、物理吸附作用和刺激作用。当人体出现创面出血时，纤维素基止血材料与血液接触，快速吸收大量液体，降低伤口部位的液体压力，浓缩血液，激活凝血因子；材料表面的特殊微纳结构或添加剂也会吸引大量血小板、红细胞、凝血酶等物质，促使它们聚集并释放信号分子，进一步激活凝血级联反应，纤维蛋白原在凝血酶作用下转化为纤维蛋白，构成网络，聚拢血小板等物质，形成凝血块，从而有效地控制出血。值得一提的是，完全可降解的纤维素基止血材料后期逐步被身体吸收，为新生的组织提供空间，促进伤口的自然恢复。

2 纤维素基止血材料的分类

纤维素基止血材料是一类重要的生物医用材料，广泛应用于创伤止血、外科手术等领域。根据材料的来源和性质，可以将纤维素基止血材料分为以下 4 类。

2.1 天然纤维素止血材料

天然纤维素具有良好的生物相容性和可降解性，但其止血速度不够快，无法适应紧急情况下的止血控制，可通过物理方法改变其形态和结构来提高止血性能，如将纤维素制成纳米纤维或微米纤维等，它们的高长径比和较大的表面积有利于血细胞和血小板的吸附，因其与天然纤维蛋白的结构相似，能够更有效地截留血细胞、血小板和其他凝血因子，促进凝血过程。为保持长期有效性，还应注意储存条件保持干燥。

2.2 改性纤维素止血材料

虽然纤维素属于亲水性材料，但是其本身的吸水能力只有 0.4 g/g。通过化学改性（包括氧化改性、醚化改性、酯化改性、酰胺化改性、非共价表面改性和接枝共聚改性等），在纤维素上引入特定的官能基团或将纤维素与其他生物活性物质复合，以改善材料的吸水能力，但需要控制改性成本。此外，改性纤维素材料还表现出生物活性，赋予其新的功能特性，如抗菌、促进组织再生等。常用于止血的有可生物降解、吸引血小板聚集、促进血凝块形成的氧化再生纤维素，透明度高、水溶性强、易于形成凝胶态的羧甲基纤维素，吸水膨胀、可吸附血浆蛋白的羟乙基纤维素等，这些止血材料根据不同止血机理用于不同止血场景。当用作可降解止血材料时，可通过调整改性程度和交联密度来精确控制材料的降解速率，以匹配不同伤口的愈合速率。

2.3 纤维素复合止血材料

将其他具有止血、抗菌等功效的物质与纤维素结合，可以制备出兼具两者优点的复合材料，不仅增强了血小板的黏附和聚集作用，还提高了抗菌活性。ZHOU 等通过 CO—NH 交联方法用纤维素纳米纤维修饰羧甲基壳聚糖，开发了一种吸血后快速膨胀的止血海绵，通过提供额外的物理封堵作用，在治疗深部穿透伤口出血方面具有显著优势。还有研究者将其他添加剂如胺化的银纳米颗粒、角蛋白—儿茶素纳米颗粒和功能物质如明胶引入羧化纤维素纳米纤维和纤维素水凝胶中，制备得到具有更强力学性能、自恢复性、良好的黏合性和吸血性、抗菌性及维持创面床液适当平衡的绿色纳米

复合止血水凝胶，导致血液快速凝固。这些探索为纤维素复合止血材料的形态设计、添加剂选择与多功能开发提供了研究基础，需要注意的是成本的控制和添加剂生物相容性、安全性的评估。

2.4 纳米纤维素止血材料

纳米尺度纤维素材料呈现更多特殊性能，与其他微米级/毫米级纤维素材料相比，其具有的高长径比、强力学性能、多功能性和低密度对伤口止血、愈合应用更富吸引力。YIN 等利用这一材料尺度效应，制备了羧基纳米纤维素/蒙脱土复合海绵，具有瞬时吸水能力，通过快速浓缩凝血因子激活凝血级联实现止血效率大幅提升。纳米纤维素止血材料因表面有丰富裸露的羟基基团，可赋予其多功能，并且可再生、可降解，一般通过调整纳米纤维素的制备工艺和配方，提高其在体内环境下的稳定性和药物释放的可控性。

3 纤维素基止血材料的设计及应用

3.1 氧化纤维素止血材料

氧化纤维素类止血材料于 1945 年被引入外科手术，其使用方便，具有良好的生物相容性和杀菌性，在人体内能完全降解，且降解产物无毒性。氧化再生纤维素极易附着在不规则出血面，且不黏附手套、医用器械表面，但因其吸水性较强，取用时需保持器械干燥。有研究表明氧化纤维素的使用会导致细胞毒性增强，抑制成纤维细胞增殖、迁移和基质收缩，也可能发生异物反应，形成肉芽肿、脓肿等，如进口产品速即纱（Surgicel®）应用过程中就存在感染、不完全吸收、压迫神经等不良事件。氧化纤维素生物降解速度缓慢且在伤口产生的酸性环境可能导致炎症反应。因此，氧化纤维素不能用于心脏及颅骨、脊髓和胸膜腔等手术中接近神经和心脏等敏感组织的止血，需要通过其他方法对其进行改性。从国家药品监督管理局注册医疗器械产品目录来看，氧化纤维素止血材料在我国临床应用较普遍，如迈普医学、爱能生物、协合医疗、金玖生物、中英阿诺康（宁夏）生物等科技公司的止血材料已广泛应用于外科手术或外伤创面及非慢性创面出血、渗血的止血。

3.1.1 氧化纤维素的止血机制

相对传统纤维素材料而言，氧化纤维素因为分子链上具有一系列活性羧基基团，

能更快速地与血液中的 Fe^{3+} 结合并激活凝血因子 XII，从而更快地启动内源性凝血途径；氧化纤维素止血材料表面粗糙导致血小板破裂，产生大量血小板凝血因子，将纤维蛋白原转化为纤维蛋白，形成血栓，有利于止血。氧化再生纤维素类止血材料对抑制小血管出血有明显作用，并且在一定程度上能降低创面周围病毒细菌感染。

3.1.2 氧化纤维素止血材料的设计及其应用

氧化再生纤维素止血产品因形态多种多样，包括薄纱状、棉布状、海绵状等，质地柔软且轻薄，则非常易于进行包裹、填塞等止血操作。

3.1.2.1 氧化纤维素止血纤维及织物

氧化纤维素纤维及其纺织制品，广泛应用于口腔外科手术止血。崔等采用纺织工艺设计了一种含乙酰基氧化再生纤维素止血敷料，以降低蛋白吸附量为切入点，提高凝血速度，且生物相容性更高，为提升传统止血纱布性能开拓新视野。相比纱布，非织造布在相同尺寸下，结构表面积更大，可以更快吸附更多有效凝血物质，我国首款可吸收再生氧化纤维素止血产品“吉速亨”（StypCel™），采用可控性选择性氧化非织造布工艺，因其可比肩国际金标准的止血性能及安全性，且可分层及易塑形的特点，能够高度契合临床手术的应用需求而畅销 20 多个国家和地区，有望在神经外科高性能可吸收止血耗材领域打破国际垄断格局。目前临床上使用最多的氧化纤维素类止血产品就是止血纱布和止血非织造布，但其结构较为松散，导致不能很好地黏附伤口而容易引发再次出血，由于产品形态原因，不适用于深伤口的治疗。

3.1.2.2 氧化纤维素止血粉末制剂

粉末状止血剂可以不经特殊处理而直接撒在伤口上，是操作最简单的材料，但清除比较困难。SEZER 等制备了一种氧化再生纤维素粉末，与胶原交联具有良好的生物相容性，不会引起免疫、过敏反应，可以在血管成形术或支架植入手术中安全使用。2022 年，Surgicel® 聚积颗粒在中国国际进口博览会上宣布正式上市，可用于外科手术或内窥镜手术中（眼科、神经外科、泌尿外科除外），辅助控制毛细血管、小静脉和小动脉出血。与传统止血粉末不同的是，该止血颗粒接触血液就会不断分解，迅速穿透血液直达底部，和创面紧密贴合，不会漂浮在血液表面，源头止血更迅速，可在平均 30 s 内实现止血，而且 7~14 天可实现完全吸收，血凝块作用更持久，术中即使冲洗，血凝块也不易掉落，提升了术中止血效率。

3.1.2.3 氧化纤维素止血水凝胶

氧化纤维素具有很强的吸水性，但无论是纤维、织物还是粉末性状，力学强度均

较差,可利用其在水介质中快速形成水凝胶的特性提高力学性能,用于压迫性出血伤口的止血。LIU 等研究出一种纳米氧化纤维素止血水凝胶,具有良好的抗菌、促愈效果,且力学性能得到大大改善,解决了身体关节部位出血时无法使用止血带、传统纱布填塞压迫止血的问题。然而,水凝胶的制备和改性过程相对复杂,成本较高,且其生物降解性和生物相容性需要进一步验证,限制了其在临床上的广泛应用。

3.1.2.4 氧化纤维素止血膜

止血膜携带方便、操作简单。为改善氧化纤维素膜表面的血液润湿性,更利于血液的扩散,CHENG 等以离子液体为溶剂,采用线条涂布技术形成纤维素薄膜,再用二氧化氮/四氯化碳氧化系统处理得到润湿性更佳的氧化再生纤维素膜,显著提升止血效果。NOH 等制备了含有氧化纤维素纳米纤维的新型亲水性透明止血纤维膜,对模拟体液的吸收量高达 5543%,有助于吸收血浆、激活红细胞和血小板,验证了氧化纤维素在骨科手术止血中的应用可能性。相比其他形态止血产品,止血膜保存时效更长、效果更稳定、可视化更优。

3.1.2.5 氧化纤维素止血海绵

止血海绵因其高孔隙率、可造型、能满足不同病症需要而应用普遍。LI 等利用氧化纤维素遇水膨胀特性构建具有超强吸收能力的止血海绵,可有效促进血液成分浓缩,提高了材料生物降解性,对皮肤刺激很小,在促进受损皮肤血管生成和组织修复方面展现出巨大的应用潜力。针对市售 Surgicel® 纱布局部环境酸性、抑菌性弱、生物相容性差、降解速率偏慢等缺陷,洪等将氧化细菌纤维素与壳聚糖和胶原偶联制备了一种体内可吸收抗菌复合止血海绵,止血速度远优于速即纱,且具有良好的强度、广谱抗菌特性和较好的生物降解性,在控制内出血方面具有广阔的应用前景。

3.1.2.6 氧化纤维素止血气凝胶

气凝胶轻质多孔且易于剪裁而受到各领域追捧,但因其制备工艺相对复杂、成本较高而影响市场竞争力。目前,气凝胶因自膨胀性、水触发形状恢复能力与不受控制大出血需要为出血部位提供物理屏障的治疗需求不谋而合,从而成为止血材料研究热点,但可能缺乏足够的力学强度,难以适应血液流体环境需要。XING 等报道了一种由氧化细菌纤维素和血小板细胞外囊泡组成的超轻形状记忆止血气凝胶,避免了其他类型止血剂在穿透性伤口中凝血因子无法到达出血点的缺陷,防止了血凝块被大血流量冲走,不仅在大鼠肝穿孔和兔心脏失控出血模型中快速止血,还能促进大鼠肝脏和兔心脏组织原位再生。这些结果表明气凝胶止血材料在处理不受控制的出血,治疗深

层和穿透性伤口方面提供了有价值的策略。止血气凝胶与止血海绵的空间体积均相对较大，为节约储存空间和方便使用，现多将其制备成压缩状可注射形式，如 Xstat™。

3.2 羧甲基纤维素止血材料

羧甲基纤维素的水溶性非常好，还具有良好的粘结性，可形成透明的薄膜。不同于氧化纤维素包罗万象的应用，普通的羧甲基纤维素止血材料只能用于出血量、渗血量较少的伤口创面，需要与其他止血促凝物质（如透明质酸、活性玻璃、壳聚糖等）经过功能复合才可对大出血创面、深部血管出血及宫腔内出血进行止血。临床上，羧甲基纤维素止血材料常用于普外科、妇产科、心外科、胸外科、骨科、神经外科、泌尿外科等科室的手术止血，但因结构特点导致体内降解吸收速度相对较慢，且其交联产物会影响材料的生物相容性和生物降解性，国产品牌如泰科斯曼的“泰绫”、青岛颐中生物的“数字纱布”等多将其改性为羧甲基纤维素钠盐，制备系列可吸收水溶性止血材料，应用于人体内外创伤及手术止血护创，可用于毛细血管、静脉或小动脉出血的止血。

3.2.1 羧甲基纤维素的止血机制

羧甲基纤维素的止血效用来自多方面：一是结构上丰富的羧基可以触发内在凝血途径，其酸性羧甲基可与血红蛋白中的 Fe^{2+} 相结合，快速吸附血小板等凝血因子，与红细胞和游离血液蛋白之间可形成酰胺交联促进血液凝固；二是在接触血液后会引血管迅速收缩，为血小板的相互黏着和聚集提供机械框架，从而快速形成凝血块；三是生物黏附性较强，可以与组织紧密结合，通过封闭伤口阻止血液外渗。羧甲基纤维素吸液速率可调，且安全无毒，在人体内可降解为二氧化碳和水排出体外，可与黏膜、骨骼、皮肤相容。

3.2.2 羧甲基纤维素止血材料的设计及其应用

目前，羧甲基纤维素止血材料主要采用复合材料设计，以在实现快速止血的同时具有促进组织再生、愈合等功效。

3.2.2.1 透明质酸/羧甲基纤维素止血材料

透明质酸是一种酸性粘多糖，可有效提高复合材料的生物相容性，且分子结构中含有大量羟基，可强化吸水性能，提高创面处血小板和凝血因子浓度。SUCHÝ 等制备了基于透明质酸/羧甲基纤维素/乙酰胺的止血非织造布，明显缩短了止血时间，有效支持组织愈合、再生，复合材料还能防止手术中不良粘连的发生，具备止血、愈合、

防粘连三效合一的特性，在泌尿外科手术、眼科手术、口腔医学方面的应用前景良好。使用过程中注意控制透明质酸的降解速率与需求相匹配，并防范其可能与某些药物发生相互作用，影响药效或增加副作用的问题。

3.2.2.2 生物活性玻璃/羧甲基纤维素止血材料

基于生物活性玻璃既能够与骨组织成键结合，又能与软组织相连接，陈等研发出一种纳米生物活性玻璃/壳聚糖/羧甲基纤维素复合支架，因其合适的降解速率和孔隙率可替代传统骨蜡，被认为是一种潜在的可用于临界尺寸骨缺损修复的局部止血剂。因生物活性玻璃本身具有脆性且活性难保持，严永刚等制备了介孔生物玻璃微球/羧甲基纤维素纳米复合止血海绵，大幅提高材料的体外凝血效果，且细胞相容性更高，能够促进细胞增殖，有利于伤口愈合。由此可见，生物活性玻璃/羧甲基纤维素止血材料在骨修复局部止血剂领域有重大的应用价值。

3.2.2.3 壳聚糖/羧甲基纤维素止血材料

壳聚糖虽然易引起过敏反应，但因其带正电，可吸引、聚集带负电的血小板，提高创面血小板浓度，而常被用于止血材料中，为改善其较差的水溶性，一般采用羧甲基化改性设计以扩大应用。BI 等制备羧甲基壳聚糖/羧甲基纤维素/聚多巴胺止血海绵，因其具有良好的止血效果和抗菌抗氧化性能，能够更好地促进创面修复，可用于皮肤伤口止血和修复；利用儿茶酚修饰可提高材料湿组织黏附性能的特点，研究者制备儿茶酚修饰的壳聚糖/羧甲基纤维素止血材料，成功应对凝血障碍性出血和糖尿病伤口止血需求。

3.3 羟乙基纤维素止血材料

羟乙基纤维素属于非离子型天然纤维素醚类，以中性分子形式分散在水中，无神经毒性，降解速率高于氧化纤维素，在体内可分解成单糖，7~14 天被人体完全吸收。

3.3.1 羟乙基纤维素止血机制

羟乙基纤维素具有增稠作用，可以促进凝血因子如凝血酶的活化，进而催化纤维蛋白原转化为纤维蛋白，增加血凝块的强度和稳定性，有利于在小血管损伤时迅速止血；还可以在伤口表面形成一层维持伤口湿润环境的保护膜，有利于伤口愈合；与众不同的是，羟乙基纤维素可以促进红细胞沉降，减少伤口出血，进一步辅助止血。

3.3.2 羟乙基纤维素止血材料的设计及其应用

羟乙基纤维素具有超高的保水性、生物相容性和生物降解性，在常见纤维素海绵

凝血效果实验中发现，其止血速度快于其他纤维素止血海绵。但其力学性能往往低于氧化纤维素和羧甲基纤维素，所以羟乙基纤维素常被制成水溶性可吸收止血纱布，研究发现其对入牙龈成纤维细胞没有明显细胞毒性，负载阿霉素还能预防乳腺癌手术肿瘤切除术后的复发，表明羟乙基纤维素作为新型的可吸收止血材料在口腔止血、癌症治疗方面具有良好的应用前景。国内云南德华生物药业推出的羟乙基纤维素医用即溶止血纱布在手术创面、创伤急救、烧伤创面的临床止血效果较佳。基于便捷性和高效性的需要，可注射形状记忆类止血材料受到越来越多的关注，DONG 等制备了一种可注射的形状记忆羟乙基纤维素/大豆分离蛋白复合海绵，具有高效的抗菌性能，有利于管理不可压缩伤口的出血，作为多功能止血剂显示出巨大的临床应用潜力。

3.4 其他纤维素基止血材料

上述各类纤维素及其衍生物基于自身特定的物理和化学性质而常被选择用作止血材料，由于止血机理和材料形态差异、材料结构和配方设计的优化选择不同、制备工艺难易程度和成本不一、安全性和稳定性也各有千秋，他们的止血表现不一，适用场景也各有侧重。相比之下，可能因为降解速度不匹配、止血效率低下、安全和稳定性不确定、制作工艺复杂或成本高、临床验证不充分等原因，其他纤维素及衍生物不适合或不常用作止血材料。如纤维素醋酸丁酸酯、纤维素丙酸酯在体内的降解速度过快，导致止血效果不稳定，不适合作为长期的止血材料；纤维素黄酸酯则可能与血液成分发生不良反应，影响细胞的正常功能；一些纤维素纳米材料可能由于尺寸效应，不具有良好血小板吸引和激活能力，导致止血效果不佳；未经充分改性的纤维素衍生物可能存在副作用，影响其长期稳定性和安全性；一些纤维素基复合材料或者衍生物的合成需要特殊试剂或者工艺条件，导致成本高昂和工艺复杂；新型纤维素衍生物的临床应用可能缺乏足够的验证其有效性和安全性。

4 结束语

虽然，纤维素基止血材料在临床应用中广受欢迎，但是，因其自身结构等原因，诸如长期生物相容性、炎症和异物反应、量产和成本经济性等挑战依然存在，在具体实际应用中受到一定限制。纤维素基止血材料未来可以创造性地与细胞、生长因子等结合，用于构建组织工程支架，促进受损组织的修复和再生；或作为药物载体，实现药物的缓释和靶向释放，提高治疗效果；或与温度敏感、pH 敏感或磁响应性材料结合

构建智能型纤维素基止血材料，以实现更精确的控制和治疗；或针对个体差异，与 3D 打印、纳米科技等相融合，制备可定制化的纤维素基止血材料，满足不同患者的特殊需求。每种类型的纤维素基止血材料都有其独特的性能和适用场景，临床医生需要根据患者的具体情况和止血需求，选择最合适的材料进行止血处理。纤维素基止血材料的未来发展将是一个多学科融合、技术创新与临床应用紧密结合的过程，相信纤维素基止血材料未来将为患者提供更多、更优质、更安全、更有效的出血控制方案，为人类健康事业做出更大贡献。

来源：纺织学报 2025 年第 04 期

纳米纤维在人工神经导管中的应用与研究进展

陆宁¹ 陈碧冷¹ 宋功吉¹ 罗忆心¹ 王建南^{1,2} 许建梅^{1,2}

(1. 苏州大学纺织与服装工程学院; 2. 苏州大学纺织行业医疗健康用蚕丝制品重点实验室)

由物理创伤、疾病等引起的周围神经损伤(PNI),全球每年的发病量超过5万例,年增长率约为10%。自体移植是PNI修复的“金标准”,但其存在供体有限、二次损伤、大小不匹配等缺点;异体移植是另一可用选择,但存在免疫排斥的风险。人工神经导管可以克服以上缺点,成为周围神经损伤修复的研究热点。

纳米纤维具有直径小、长度长、比表面积大的特点,可以模仿细胞外基质(ECM)的结构,促进细胞黏附、增殖、分化,引导神经轴突的生长,加速受损神经的修复和再生。目前,静电纺丝法是制备纳米纤维最常用的方法,采用该方法可以先制成纳米纤维膜,再卷曲形成导管;也可以直接在圆柱形芯管表面喷涂纳米纤维,再脱模后形成导管;或将纳米纤维切断,混匀成纳米纤维浆液,再通过模具法制成纳米纤维导管。研究表明取向排列的纳米纤维能更好地促进细胞黏附生长,在促进神经再生方面表现更为优越;而用天然高分子材料如丝素蛋白(SF)、胶原、壳聚糖(CS)等制备的纳米纤维则表现出细胞外基质特性与形貌,更进一步地促进了细胞黏附、分化。静电纺丝过程中,使用导电聚合物或在纺丝液中加入导电介质如聚吡咯(PPy)、碳纳米管(CNT),可以制备具有导电性的纳米纤维。导电性纳米纤维基神经导管在一定电刺激的配合下可以更好地促进受损神经的修复,大大延长神经缺损修复的距离。此外,也有研究采用自组装法生成纳米纤维凝胶、相分离法制备纳米纤维应用于神经导管的制备。

为了更好地修复距离较长的神经缺损,特殊结构的神经导管比中空导管展示出更好的修复前景。多通道结构可以引导轴突定向再生,防止神经错配;导管内填充微米纤维可以引导神经细胞定向生长,加快导管内细胞外基质环境的形成;导管内填充纳米纤维海绵为细胞黏附、生长、迁移提供了仿真的三维细胞外基质环境。本文分析

了纳米纤维基神经导管对 PNI 修复的作用机制，综述了纳米纤维基神经导管的制备材料、制备方法及导管结构。

1 周围神经损伤与修复机制

1.1 神经导管对周围神经损伤修复的机制

周围神经系统（PNS）由脑神经、脊神经及自主神经组成，是连接中枢神经和其他各个系统器官的纽带，具有传递信息的作用。神经元是构成神经系统结构和功能的基本单元。周围神经具有自我修复能力，但这种能力有限，尤其是在严重损伤的情况下。对于近距离损伤，临床上采用直接缝合的方法，而较长的神经损伤则需要通过手术使神经功能得以恢复，目前临床上主要采用自体神经移植或异体神经移植等方式。然而，自体神经移植供体来源有限、易造成二次伤害，异体神经移植后会出现免疫排斥反应等问题，人工神经导管成为替代方案。

周围神经受损后会进行自我修复，修复过程主要分为轴突再生、髓鞘重建、突出重构，但受损长度越大，自愈效果就会变差。文献指出在缺损处提供一段可供轴突生长的人工神经导管可显著提升神经再生自愈能力，这是因为神经导管能够调节神经修复的生理微环境，促进细胞的黏附、迁移和分化，引导轴突生长。神经导管可保护再生神经免受不适当的机械力影响，纵向引导新形成的组织，并将雪旺细胞分泌的生长因子凝结在神经残端之间。

1.2 纳米纤维对神经再生修复的作用与机制

纳米纤维最大的特点是长度长、直径小、比表面积大、孔隙率高，大的比表面积可以提高细胞接触面积，而高孔隙率可以保证氧气和营养物质的供应。利用纳米纤维的尺寸表面效应，能够更好地促进细胞增殖和组织再生。同时，纳米纤维还具有出色的力学性能，能较好地维持神经导管的形态。

此外，几乎所有的人体组织和器官如骨骼、皮肤等都具有纳米纤维的形态和结构，纳米纤维可以模拟细胞外基质的结构和生物学性能，有助于神经再生修复。Stevens 等对材料表面形态结构和细胞黏附及增殖之间相关性进行了研究，结果发现，不同尺寸的支架材料对细胞黏附生长具有重要的影响，其中纳米纤维对细胞的黏附和增殖更有利。此外，取向有序排列的纳米纤维可以促进细胞沿着取向方向增殖及迁移，

促进神经在导管内生长，从而促进神经修复。综上，用纳米纤维来制备人工神经导管较其他微米级纤维而言具有更好的结构和性能优势。

2 纳米纤维基神经导管的制备材料

纳米纤维基神经导管是指主体材料由纳米纤维组成的导管。作为纳米纤维基人工神经导管的材料首先应具有良好的生物相容性、无免疫原性、适当的生物降解性，其次应易于加工成纳米纤维。表 1 示出不同材料、不同结构的纳米纤维基神经导管。可知，壳聚糖、丝素等天然高分子材料是最常使用的材料，常用的合成高分子材料有聚乙醇酸（PGA）、聚己内酯（PCL）等，多种材料复合形成的纳米纤维组成的神经导管往往具有更优异的性能。

表 1 纳米纤维基神经导管

导管材料	导管结构	制备方法	纳米纤维平均直径/nm	生物相容性评价	神经修复体内评价
丝素蛋白	中空 (随机)	静电纺丝	290	种植 4d 后, SCs 在纳米 SF 纤维膜上迅速增殖; 7d 后覆盖整个膜	10 周时, 大鼠坐骨神经运动功能显著提高且管内充满再生轴突神经丝和髓鞘碱性蛋白
壳聚糖	中空 (取向)	静电纺丝	400	SCs 在取向纳米纤维上沿同一方向排列	20 周后, 大鼠坐骨神经感觉和运动功能恢复; 30 周后, 取向纤维轴突数量及直径大于非取向
PLLA	中空 (取向)	静电纺丝	300	NSC 伸长方向及其神经突生长方向与纤维方向平行	—
PCL	多通道	静电纺丝	850±220	—	植入大鼠坐骨神经, 4 周时多通道导管的 SFI 和髓鞘轴突数量大于空心管。
PLGA/ PCL	中空	静电纺丝	280~8000	—	用于大鼠坐骨神经缺损修复时, 诱导了神经再生和 2 条切断的坐骨神经束的功能性连接
PLLA	多通道	相分离	150	将 PC12 细胞和兔髌腱细胞培养 4d 后发现纳米纤维上的细胞增殖数量更多	—
PLLA/P (LLA-CL)	导管内填充 纤维	静电 纺丝	PLLA: 598.2±215.1 P(LLA-CL): 8994±2663	培养 7d 后, SCs 已经覆盖了纳米纤维纱线的大部分表面	—

导管材料	导管结构	制备方法	纳米纤维平均直径/nm	生物相容性评价	神经修复体内评价
PLCL/ 丝素蛋白	导管内填充海绵	静电纺丝+冷冻干燥	导管主体纤维: 975.51±78.21; 导管内海绵纤维: 987.3±102.01	培养 5d 和 7d 时, SCs 在导管上的细胞活力显著高于中空导管, SCs 渗透生长到海绵内部	植入大鼠坐骨神经, 第 4 周和第 12 周含海绵导管的 SFI 值、再生的髓鞘神经纤维均大于空心
PLCL	导管内填充水凝胶	静电纺丝	—	DRG 培养 3d 后神经突在各个方向上都发生生长, 最长的突触平行于纳米纤维方向	修复 10mm 大鼠坐骨神经, 12 周后感觉恢复增强

注: PLLA 为左旋聚乳酸; PCL 为聚己内酯; PLGA 为聚乳酸-羟基乙酸共聚物; PLCL 为丙交酯-己内酯共聚物; P(LLA-CL) 为聚乳酸-己内酯; SFI 值为坐骨神经功能指数; SCs 为雪旺细胞; DRG 为背神经节细胞; PC12 为小鼠肾上腺嗜铬细胞瘤细胞; NSC 为神经干细胞。

2.1 天然高分子材料

目前, 制备人工神经导管的天然高分子材料主要有胶原、丝素蛋白、壳聚糖等。胶原与丝素蛋白是蛋白质类高分子材料, 而壳聚糖是一种天然多糖类高分子材料。利用天然高分子材料构筑与组织相接触的纳米纤维表面, 形成类细胞外基质环境, 为神经再生提供更好的微观生物条件。

胶原是一种分布于结缔组织、皮肤、骨骼、内脏等细胞间质的物质, 在调控细胞生长和分化过程中发挥关键作用。胶原的生物相容性较好且其降解产物无毒, 是一种良好的人工神经导管材料。Cho 等制备了纤维素/胶原纳米纤维基神经导管, 体内外实验结果显示这种神经导管能够修复面部神经损伤。

脱胶的丝素纤维可以直接用于生物医用材料, 也可溶于盐溶液制备成易于多元加工的再生丝素蛋白。丝素蛋白具有良好的生物相容性和生物降解性。与胶原相比, 其降解速度慢且力学性能好。Yang 等将丝素纤维束与小鼠背根神经节 (DRG) 细胞共培养, 观察到细胞迁移到纤维上, 并有轴突沿纤维方向生长, 在纤维表面形成单层或多层细胞包裹着纤维, 说明丝素纤维对神经组织细胞具有良好的黏附、生长引导作用。Park 等制备了静电纺丝素神经导管, 其表现出良好的力学性能, 同时具有良好的细胞相容性, 促进了雪旺细胞的增殖, 对运动功能的恢复具有促进作用。

壳聚糖是由甲壳素脱乙酰基而得到的甲壳素衍生物, 具有优异的生物可降解性、

生物相容性，不溶于水，溶于乙酸溶液。通过模具法或静电纺丝法可制得各类壳聚糖基的神经导管。Wang 等使用壳聚糖制备了内层为取向排列的纳米纤维，外层为随机排列的纳米纤维神经导管，体内外实验结果表明该导管在代替自体移植物上具有较大的潜力。

2.2 合成高分子材料

合成高分子材料的生物相容性普遍低于天然高分子材料，但其在力学性能上却有明显优势。目前，用于制备纳米纤维基人工神经导管的合成高分子材料主要有聚乳酸（PLA）、聚乙醇酸、聚己内酯等。

聚乳酸是由可再生资源淀粉经发酵聚合制成，生物降解性好。Yang 等制备了取向排列的左旋聚乳酸（PLLA）微 / 纳米纤维支架，并使用神经干细胞（NSC）进行体外评估，结果显示神经干细胞的伸长方向和其神经突生长方向与纤维排列方向平行。

聚乙醇酸是可降解的脂肪族聚酯，具有高抗张强度和弹性模量，被广泛应用于生物医学工程领域，但是由于其降解过快、低溶解度等原因在临床使用上受到限制。

聚己内酯作为一种经食品药品监督管理局（FDA）认证的生物医学材料，其生物相容性好、可降解，并且易加工，拉伸力学性能优良。Sanjairaj 等将 PCL 与 PPy 复合制备了一种导电性神经导管，PCL 的添加实现了导管的三维多孔结构，同时也增强了导管的力学性能。

2.3 复合材料

2 种及 2 种以上材料复合制备的神经导管可以弥补单一材料的缺点，发挥多种材料的优势。Chen 等将明胶与 PLA 复合制备三维纳米纤维支架，该支架不仅具有亲水性和超吸水性，还表现出超高的弹性，能够承受高达 80% 的压缩应变，压缩后能够恢复原状。Wang 等设计了 SF/P（LLA-CL）纳米纤维神经导管，结果表明 SF 的添加提高了 P（LLA-CL）的细胞亲和力，使该导管既具有良好的力学性能，又能支持细胞黏附、增殖和分化。

3 纳米纤维基神经导管的制备方法

纳米纤维基人工神经导管常用的制备方法有：静电纺丝法、机械分纤法、相分离法和自组装法，如表 2 所示。

表 2 纳米纤维基神经导管的制备方法

制备方法	适用材料	缺点	优点
静电纺丝	可溶于有机溶剂的高分子材料, 如丝素、壳聚糖、PLA、PCL 等	强度低、成本高、易造成环境污染	工艺简单可控, 可制备功能化纳米纤维
机械分纤	具有多级结构的材料, 如丝素	得率低、尺寸不匀率高	纤维强度高、制备方法简单
	结晶聚合物, 如壳聚糖、PLLA	纤维直径不可控、尺寸不匀率较高	操作相对简便、无需复杂设备仪器
自组装	分子具有自主组装能力的材料, 如 PLA、丝素、多肽等	制备条件严格、得率低	纤维直径小且可控

3.1 静电纺丝法

静电纺丝是目前制备纳米纤维基神经导管最主要的制备方法, 不仅可以制备单一材料的纳米纤维, 还可将多种材料复合制备纳米纤维。静电纺丝法可以将神经营养因子、功能蛋白、生物活性分子等直接渗入纳米纤维中从而实现纳米纤维功能化。此外, 通过改变纺丝液浓度、纺丝参数等, 可以制备出不同结构的纳米纤维, 如图 1 所示。平行排列的凹槽结构可以促进细胞黏附、生长和迁移, 更好地引导轴突定向生长。通过同轴静电纺丝能够制备具备核壳结构的纳米纤维, 控制改变核 / 壳的成分和比例制成具有不同功能的纳米纤维。

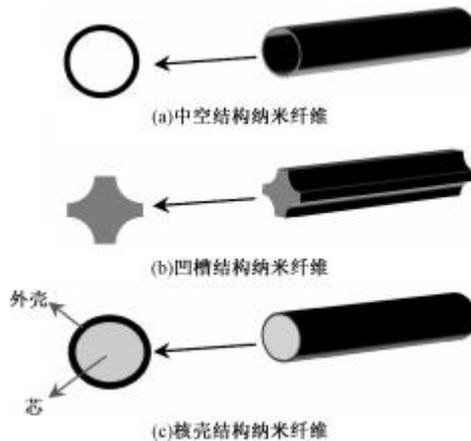


图 1 静电纺丝法制备的不同结构的纳米纤维

静电纺丝法制备的纳米纤维基神经导管具有高孔隙率，能够满足细胞生长的需求，层层堆积的结构也确保了孔道的连通性。文献表明纤维取向对细胞排列有不同的引导作用，细胞倾向于沿纤维取向方向生长，因此常采用静电纺丝法制备取向排列的纳米纤维。

3.2 机械分纤法

机械分纤法利用高速剪切搅拌、超声等物理机械作用使纤维直接分离从而获得纳米纤维。Zhao 等使用超声波技术从多种天然纤维中直接提取出直径为 25~120nm 的纳米纤维。Chen 等使用高速剪切机将柞蚕丝分离成直径为 139.7~196.5nm 的纳米纤维并制备成纳米纤维膜，所制备的纳米纤维膜保留了丝素蛋白的二级结构且表现出优异的力学性能。Li 等将天然蚕丝浸泡 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 三元溶液后再通过高速剪切搅拌得到蚕丝纳米纤维 (SNF) (见图 2 (a))，再与壳聚糖复合制备出 SNF/CS 复合多孔纳米支架。该支架与纯壳聚糖支架相比，在干湿状态下力学性能显著增强。除将纤维直接破碎搅拌外，还有将静电纺纳米纤维膜通过机械分纤成纳米纤维 (见图 2 (b))，这种方法不仅可以制备天然纳米纤维，还可制备出合成材料的纳米纤维。

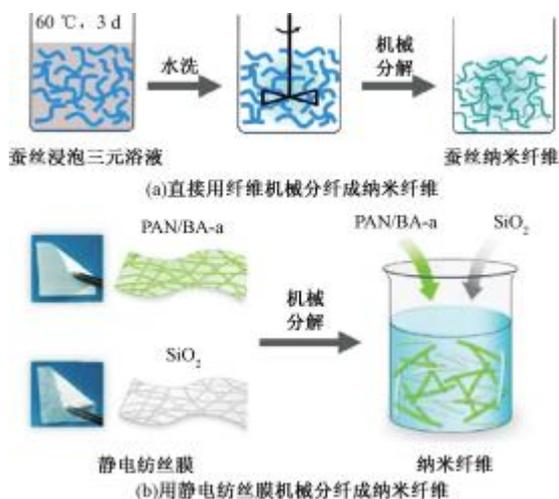


图 2 机械分纤法

3.3 相分离法

相分离技术以温度变化为基础，添加不相容的溶剂，使聚合物溶液体系发生相分离后，用萃取、蒸发或升华等方法除去溶剂，聚合物相凝聚成了纳米纤维基神经导管。

相分离技术不需要复杂的设备，技术操作简单，通过调整聚合物浓度等因素可制成不同特点和微观结构的纳米纤维。Sun 等采用注塑成型和热诱导相分离技术制备了单通道和多通道纳米纤维 PLLA 支架，该支架具有孔隙率高、比表面积大、力学性能可控等特点。

3.4 自组装法

自组装是指在无人为干预的情况下，通过基本结构单元自发组织或聚集从而形成一种具有特定排列顺序且相对稳定的系统和结构的方法。通过聚合物在溶液中进行自组装，单个大分子自发组织，可以制备具有有序稳定的纳米尺度的纳米纤维。通过自组装技术得到的纳米纤维直径比静电纺丝纳米纤维的直径要小得多，最小可获得直径 10nm 的纤维。丝素蛋白是一种典型的双亲性材料，可通过控制丝素溶液浓度、温度、盐离子浓度使丝素自组装形成纳米纤维水凝胶，水凝胶中纳米纤维细度最低可达 164nm。

4 纳米纤维基人工神经导管的结构

采用不同的制备方法可制备不同结构的纳米纤维基神经导管，如图 3 所示。初代神经导管大多是中空结构，近十年来，多通道结构以及管内填充型结构的神经导管因在长距离神经损伤修复中的优势而成为研究热点。



图 3 不同结构的神经导管

4.1 中空结构

中空结构的神经导管可由静电纺丝法制备成纳米纤维膜直接卷取在不锈钢棒上，

将小棒取出制备而成，也可通过模具制备而成。中空结构的缺陷在于管壁比表面积小，不利于细胞的黏附和增殖。

4.2 多通道结构

多通道结构的神经导管具有更大的表面积可更好地促进细胞的黏附，同时导管内纵向排列的通道可以减少轴突分支的分散，有利于促进轴突的定向生长。多通道结构神经导管可以使用静电纺丝法制成的纳米纤维膜卷曲制成中空小导管再组合而成，或使用机械分纤法制备成纳米纤维溶液倒入模具中制备而成，亦或将溶液注射进模具中使用相分离的方法制备而成。多通道导管结构的设计应关注通道数与通道内径的合理性，在追求尽可能多的通道时，还应确保通道大小可为细胞增殖、生长提供足够的空间。

4.3 管内填充型结构

为使神经导管具有良好的力学支撑，可将填充纤维、生物海绵、水凝胶等材料填充到中空的管腔内制备填充型神经导管，为迁移细胞的迁移和轴突的再生提供结构支持和引导。

4.3.1 填充纤维

管道内部填充纤维可以引导细胞和轴突的定向再生。Li 等利用静电纺丝法制备的纳米纤维通过卷取加捻等方式制成纳米纤维纱线作为导管内填充物，发现 SCs 在导管内沿着纳米纤维定向生长，如图 4 所示。Dong 等利用熔融纺丝和静电纺丝来设计由定向超细纤维束填充和随机纳米纤维外层导管组成的复合神经导管。文献指出纤维的数量越多，对轴突的再生就越有利，但纤维的数量过多，缩小了轴突的再生空间，从而会对神经再生产生抑制效果。

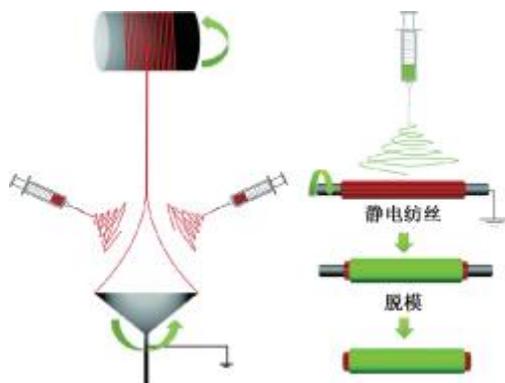


图 4 静电纺丝纳米纤维纱线填充型的神经导管

4.3.2 填充生物海绵

用生物海绵填充的纳米纤维神经导管,可以模拟自体神经移植物的神经内膜结构,为细胞黏附和增殖提供三维类细胞物基质微环境。纳米纤维海绵是利用静电纺丝纳米纤维膜,将其剪碎后再使用机械分纤的方法制成均匀溶液,而后冷冻干燥而成,其不仅具有高孔隙率,而且作为填充物填入导管内能增加神经导管的抗压力学性能。制备生物海绵时应注意其密度,过高的密度会导致导管堵塞,抑制神经再生。

4.3.3 填充水凝胶

水凝胶是由亲水性聚合物形成的一类高度交联的物质,具有良好的生物相容性,与许多人体组织相似的力学性能,且可以模仿 ECM 的高含水量,目前,常采用自组装法结合静电纺丝法等方式制备水凝胶神经导管。Jin 等在 PLCL 纳米纤维基神经导管中添加复合神经生长因子的胶原蛋白/透明质酸水凝胶填充物,结果表明水凝胶填充物显著增加了背根神经节外植体神经突的延伸。

5 结束语

随着纳米纤维技术的进步,纳米纤维基人工神经导管成为周围神经损伤修复的研究热点。纳米纤维的结构与特点可以更好引导细胞黏附和迁移,促进细胞生长;可采用静电纺丝、自组装、相分离等方法,将天然高分子材料、合成高分子材料以及复合材料制备成具有特殊结构、物理和生物特性的纳米纤维基神经导管。取向排列的纳米纤维基神经导管能引导神经轴突定向生长,为神经的生长提供宏观的引导作用,从而避免了轴突的分散和交错生长造成神经修复过程中的错配和多神经支配等问题。纳米纤维作为填充物的神经导管可以为细胞黏附和增殖提供三维类细胞物基质微环境,引导轴突再生。未来,纳米纤维在人工神经导管中的应用前景将更为广阔,可从以下几个方面进行进一步的拓展。

(1) 目前,纳米纤维在神经导管中的应用主要仍然集中在采用静电纺丝技术制成纳米纤维膜再制成导管,导管成形过程欠标准化,批与批间差异大。未来发展应考虑如何宏量化标准化进行纳米纤维基神经导管的制备。

(2) 从功能仿生与结构仿生的角度,构筑组织与材料相接触的仿生界面。例如:采用天然可降解材料如丝素蛋白、多糖类聚合物构筑纳米纤维表面,可模仿细胞外基质,更好地营造神经再生的微观生物条件;采用微图案技术从纳米尺度对材料界面进

行仿生界面的个性化调控；利用材料的亲疏水性、表面张力等自组装形成多尺度分级有序的微纳米纤维仿生表面。

(3)长距离神经损伤修复的研究中，可将多种修复机制结合，发挥协同增效作用。例如：定向排列纳米纤维填充导管内部引导轴突再生；赋予纳米纤维导电性配合电刺激促进轴突快速生长；以纳米纤维为载体，负载营养物质、促进神经生长因子、药物等。

来源：纺织学报 2025 年第 03 期

可吸收手术缝合线研究进展

杨智超 刘淑强 吴改红 贾潞 张曼 李甫 李慧敏

(太原理工大学轻纺工程学院)

可吸收缝合线是指在人体内外组织或器官出现破损或切口时用于将伤口进行结扎、止血并且缝合，并在一定周期内可以自行被机体组织吸收，而对人体组织和器官不产生有害影响的一种常见的医用纺织品。可吸收手术缝合线一般在 2~6 个月从植入点消失，无需拆线等操作，是当今国际上外科手术和临床应用中用量最大的医用纺织品之一，也是当今国际生物医用纺织领域的研究热点之一。

缝合线可根据是否具备生物降解能力分为 2 类：可吸收缝合线和不可吸收缝合线。不可吸收缝合线在使用过后，无法被机体组织自行吸收，在伤口痊愈时需要进行二次拆线的操作，这在一定程度上会对患者带来较大的痛苦，此外，拆线后很大可能会在皮肤表面形成瘢痕，对患者皮肤的美观程度会造成较大的影响。而可吸收手术缝合线由于其消除了患者二次拆线的痛苦，成为新一代缝合线中患者的福音，同时，对于情况各异的伤口环境，在实际手术操作中，可以选择降解时间不同的缝合线。另外，在实际手术过程中，用于闭合组织切口的材料还有许多，例如手术夹、手术胶、微孔手术带以及螺钉等，但这些材料存在操作时效过长、组织渗漏、增加感染、引发瘢痕等问题。

针对不可吸收缝合线与可吸收缝合线的应用，有众多学者进行研究。Lee 等通过对英国、爱尔兰、澳大利亚与新西兰的各大医院的临床医生做出大量调查评估发现，大部分的医生与患者均会选择使用可吸收缝合线，并提出可吸收缝合线会降低去除缝合线或供应相关的医疗保健成本。Egbunah 等研究了修复唇裂疾病所用到的几种材料：可吸收缝合线、不可吸收缝合线、组织黏结剂，对这三种伤口闭合材料进行评估发现，当使用不可吸收缝合线进行唇裂修复时，更有利于伤口愈合，但术后并发症的发生率明显较高，综合比较得出可吸收缝合线总体效果更有利，同时表明可吸收缝合线拥有

较好的闭合伤口能力，较少地发生伤口渗漏，在消除组织瘢痕，简化操作方面都有积极作用。

本文就可吸收缝合线的发展历程以及缝合线的相关性能要求，详细阐明了构成可吸收缝合线的不同材料和分类、国内外对于可吸收缝合线的研究进展，并对可吸收缝合线在发展中存在的问题以及未来的发展趋势进行了分析。

1 发展历程及性能要求

1.1 缝合线发展历程

人类使用缝合线用来闭合伤口已经有 4000 多年的历史，但可吸收缝合线的出现是在公元前 1800 年，就是诞生于亚历山大的肠线，它是当时唯一可以使用的可吸收缝合线。

随着合成纤维行业的逐渐发展，人工合成类可吸收缝合线登上舞台。20 世纪 60 年代初期，国外首次开发出聚乙醇酸（PGA）可吸收缝合线，商品名为 Dexon，在这个时期，一种通过化学交联处理，可控制体内吸收速率的胶原线也被开发；20 世纪 70 年代，聚对二氧环己酮（PDS）可吸收缝合线实现商业化，与此同时，国外首次研发出甲壳素及其衍生物类可吸收缝合线；90 年代以来，国外通过对聚乳酸进行物理、化学改性以及优化纺丝工艺来提高聚乳酸的各项性能，如 Schmack 等采用高速熔融纺丝和纺丝拉伸工艺制备出力学性能优异的聚乳酸纤维，从而提高聚乳酸缝合线的韧性和打结强度。制备可吸收手术缝合线材料的发展历程详见表 1。

表 1 可吸收缝合线材料的发展历程

时间	材料
公元前 1800 年~1500 年	肠线
19 世纪末	消毒的肠线
20 世纪 60 年代	可控制体内吸收速率的胶原线
20 世纪 70 年代	甲壳素可吸收缝合线
19 世纪 90 年代末	海藻酸盐纤维
20 世纪 60 年代	PGA 可吸收缝合线
20 世纪 60 年代末	PPDO 缝合线的开发
20 世纪 70 年代初	PLLA 纤维
20 世纪 70 年代末~80 年代	PDS 缝合线和 Maxon
20 世纪 90 年代	PLA 缝合线及相关改性处理
20 世纪 90 年代末	PDO 缝合线

目前市面上主流的可吸收手术缝合线仍以进口为主导，大多数国产可吸收缝合线90%以上是基于进口原线贴牌封装。各大品牌无自主生产原线能力，原线严重依赖进口。市场部分可吸收手术缝合线产品列于表2。

表2 部分市面可吸收手术缝合线产品

商品名称	年份	材质	功能	应用领域
Vicryl®缝合线(爱惜康)	1974年	聚糖乳酸910(乙交酯与丙交酯)	用于组织的闭合处理	眼科手术、软组织缝合或结扎
PDS® II缝合线	1982年	聚对二氧环己酮聚合物(PPDO)	用于软组织缝合	小儿心血管手术和眼科手术
Monocryl®缝合线古氏SA+抗菌线	1993年 2016年	聚卡普隆25(75%聚乙交酯和25%ε-己内酯)乙交酯-左旋丙交酯共	用于软组织缝合 用于各类组织缝合	软组织缝合和结扎,不能用于显微外科手术皮下组织缝合、胃肠道手术以及血管手术
Velosorb™快速编织缝合线(柯惠)	—	乙交酯和丙交酯组成	用于组织的闭合处理	皮肤和黏膜的软组织闭合
Biosyn™单丝缝合线(柯惠)	—	由乙交酯、二氧环己酮以及三亚甲基碳酸酯组成	用于软组织的闭合处理	适用于眼科以及皮肤黏膜的结扎处理
MONOCRYL□Plus抗菌缝合线(爱惜康)	—	乙交酯和25%ε-己内酯,外加三氯生涂层	用于软组织的闭合处理	适用于皮肤黏膜结扎处理,不适用眼科以及神经组织手术

1.2 可吸收缝合线性能要求

理想的可吸收缝合线应该具备优良的力学性能和生物学性质。在力学性能方面：缝合线的设计应该考虑在低应变时具有理想的弹性和弹性模量，还应当具有较高的抗张打结强度，在实际外科手术操作过程中，以此来适应打结后的缝合线其力学性能仍能保持在一定范围内的要求。另外，缝合线在被植入组织后，应当在相当长的一段时间内依旧保持其力学性能不受影响，对于可吸收缝合线，其断裂强度应保持的时间为1~4周。在生物学性质方面：首当其冲的是缝合线应当具有良好的生物相容性，并不与伤口部位发生组织反应，不对细胞产生毒性，不对伤口部位造成感染风险，更不应在伤口愈合后，组织部位出现血凝块、裂口以及细菌的黏附。另外，最终制备的缝合线应不易与外科手术所使用的橡胶手套过分纠缠，以免增加总耗时使手术变得繁琐，这就需要在选取制备缝合线材料时和在后整理上考虑，以增加缝合线的表面光滑度。王成芳选用硬脂酸钙为涂层剂，通过对未涂层的聚乙交酯可吸收编织缝合线与涂层后

的缝合线作对比,发现编织线表面涂层后,能够增加表面的润滑性,使缝合线表面光滑平整,从而使缝合线能够平滑地通过人体组织,以此保护整个手术顺利进行并减少病人痛苦。在开发可吸收手术缝合线时,应当牢牢把握缝合线的操作性能要求,通常在力学性能方面,学者应当侧重于缝合线原材料的选取,在保证断裂强力符合标准的同时,还要增加其断裂伸长率,以此来适配缝合线应有的柔韧性。聚乳酸长丝直接制备出的缝合线存在柔韧性不足的缺点,朱斐超等通过综述关于聚乳酸母粒改性的相关内容,总结出一系列能够纺制增强增韧性能的聚乳酸长丝,以此制备手术缝合线,另外,对纤维进行改性也可改变缝合线原材料的力学性能;在生物学性质方面,最重要的是要确定原材料的无毒害性,其次要考虑其生物相容性,以此来使缝合线穿入组织后拥有良好的细胞黏附性,以加快伤口的愈合。

2 可吸收缝合线分类及其应用

2.1 天然可吸收缝合线

2.1.1 羊肠线

羊肠线作为人类历史上诞生的第一类可吸收缝合线,已经有上千年的历史,在相当长一段时间内被用作闭合伤口的材料。

天然羊肠线的材料来源是绵羊、牛、袋鼠、马或骡等动物的肠绒毛膜,在去除脂肪和其他多余组织后,通过铬盐、甲醛、明矾等弱交联剂对羊肠线进行处理,然后将1~5根肠线并合拉伸加捻,最终制成不同数量的股线,它可被人体吸收,制作工艺简单,成本低廉,但同时,羊肠线也存在一些缺点,如打结强度较差,降解速率过快等,针对此类问题,可将加捻后的羊肠线经过打磨处理,并将其浸泡于碱性溶液中,可以适当增加其韧性,此外,羊肠线可以抵抗身体中酶的分解,从而具备有比普通肠线长约2倍降解时间的性能,并且还拥有较好的抗拉强度。另外,在外科手术操作过程中,羊肠线易引发组织反应,从而造成伤口部位的感染(SSI,surgicalsiteinfection),加碘肠线在一定程度上可以缓解继发感染的发生。

近五年来,肠线不单单被用于缝合伤口,有较多学者利用肠线的可吸收性来研究穴位埋羊肠线的方法,用于治疗诸多疾病,如 Xu 等利用填埋羊肠线的方法改善机体免疫能力,从而达到抑制肝癌细胞生长的目的;王鸣等研究了不同长度羊肠线通过穴位埋线的方法治疗肥胖症的效果对比,对于单纯性肥胖病患者进行穴位埋线治疗,可

有效降低体脂率，并且穴位埋线疗法具有疗程短、操作便捷、对患者的伤害较小等特点。

2.1.2 胶原线

胶原线是从一些哺乳动物体内提取出骨骼或筋腱，经过煮炼等工序处理提取出其中的胶原蛋白，之后通过纺纱工艺制成的一种可吸收缝合线。胶原线与羊肠线最大的区别在于胶原线与人体组织的相容性较好，不会产生较大的排斥反应，胶原线具有天然丝的优异力学性能，满足外科手术中的打结强度等力学指标，并具有手术缝合线应有的平滑度，和较好的弹性，又有利于人体吸收。

可吸收缝合线植入人体后，其降解速率是一个非常重要的指标。对于胶原线而言，可以采用化学交联的方式来调节分子的交联程度，从而达到控制胶原线降解速率的目的。温永堂等利用交联剂与胶原蛋白进行交联，进而制备胶原可吸收缝合线，并研究了缝合线的力学性能与交联剂浓度的关系。此外，胶原蛋白缝合线在骨科等 I、II 类手术切口缝合的应用都很广泛，并且缝合效果好，后期愈合效果和平整度好，伤口瘢痕少，术后切口的疼痛感轻。Zhang 等回顾性分析了 2021 年 1 月~2022 年 1 月在整形外科 632 例面创儿童患者的诊治痊愈情况，其中采用可吸收胶原线 458 例，不可吸收锦纶线 174 例。采用可吸收胶原线和美容缝合技术治疗面部紧急创伤患儿伤口，伤口愈合良好，疤痕扩张小，红斑和色素异常发生率低，无明显手术痕迹，无瘢痕肥大或萎缩。总体印象良好，避免了儿童患者拆线的痛苦，家属满意度高。尽管如此，胶原线还是存在一些缺点，如强度和降解速率不稳定，耐加工性差等。近年来，有学者扩大原料研究范围，从源头上解决了传统胶原蛋白强度不高等缺点的限制，发明出新型胶原蛋白类手术缝合线。Luan 等利用鱼鳔，通过择取鱼鳔中的纤维组织膜，并去除附着的脂肪黏膜和血管，之后再分离细胞内层膜制备出一种脱细胞交联的单链鱼鳔(DCSS)缝合线，鱼鳔作为鱼源性胶原蛋白，独具其本身的优势特点，即组织相容性极佳，强韧度较高，另外还具备传统哺乳动物胶原蛋白的优点，完全满足缝合应用的强度，无菌性，吸收性，组织相容性和多功能性等关键参数。

2.1.3 甲壳质

甲壳质又称甲壳素、几丁质，壳聚糖则是甲壳素脱除乙酰基的产物，被认为是比纤维素具有更大应用潜力的功能性生物材料。以甲壳质为原料制备的缝合线具有很好的生物相容性，化学惰性，极低的组织反应，此外，甲壳质本身具有良好的抗菌性能，能够对感染的伤口进行杀菌消炎，从而加快伤口愈合，甲壳质缝合线在体内的降解速

率为 25d 左右，可完全被组织吸收，在胆汁，尿液，胰腺炎中的抗拉强度高于 Dexon 和羊肠线，甲壳质中的乙酰基数量决定甲壳质缝合线降解速度，其数目越少，降解速度越快。在甲壳质可吸收缝合线的研究初期，普遍采用湿法纺丝工艺，东华大学实现了甲壳素纤维利用编织和加捻工艺制备甲壳质可吸收缝合线，性能较好，可应用于临床使用。

力学性能是评估手术缝合线极为重要的指标之一，因此海内外众多学者通过不同方法来加强缝合线的力学性能。Wu 等通过细菌纤维素纳米晶体 (BCNC) 强化再生甲壳素纤维 (RC)，开发出一种制备缝合线的新型材料，结果显示，制备的缝合线抗拉强度为 (9.8 ± 0.6) N，其降解速率也可通过对 BCNC 的浓度进行调节，表明细菌纤维素的加入有效地提高了产品的力学性能并对细胞增殖有促进作用。Tan 等通过碱性处理和超声降解，从鱿鱼软骨中制备了一系列具有不同脱乙酰化程度和黏均分子量的超高分子质量壳聚糖，并通过湿纺工艺制备了相应的壳聚糖单丝以作为缝合线的制备原料，结果显示脱乙酰化程度为 85%、黏均分子量为 1.16×10^6 时表现出最佳的力学性能，干 / 湿抗拉强度为 38.96N/23.24N，干 / 湿伸长率为 14.6%/16.2%。抗菌型可吸收缝合线因其靶向施药，可控释放等优点，近年来被广泛研究。而壳聚糖天然的抗菌性也成为许多开发新型缝合线首选的材料。Zhang 等开发出壳聚糖-明胶 / 单宁酸 / 聚吡咯复合涂层并修饰于缝合线表面，当皮肤产生伤口时，周围完好皮肤会产生电场并向伤口中心移动，而此时的电信号传输会有效调节细胞行为，包括黏附、增殖、迁移和分化，从而加速伤口愈合。聚吡咯是常见的导电聚合物，具有优异的导电性能以及生物相容性，壳聚糖充当抗菌剂，以此开发出具有电活性和抗菌性能的功能性可吸收缝合线。此研究为探索新一代生物活性缝合线提供了新思路。

2.1.4 海藻酸盐

海藻酸盐又称海藻酸胶，是一种由 β -D-甘露糖醛酸和 α -L-古罗糖醛酸 2 种结构单元组成的多聚糖。海藻酸盐为原料制成的可吸收手术缝合线具有极好的吸湿性、凝胶性，抗菌性和生物相容性，高透氧性以及可降解性。

Harpe 等制备了一种新型的生物可吸收缝合线并能进行局部药物输送。缝合线由海藻酸钠、果胶、和明胶组成，后整理工艺选择甘油作为塑化剂。由于海藻酸盐能够在各种多价阳离子存在下瞬时交联，而这种直接的交联过程避免了使用无机溶剂，也不会改变生物聚合物结构固有的生物相容性，体外分析显示，药物持续释放至第 28 天完成，表现出优异的缓释性能，另外，所制备的缝合线可安全地降解并被机体吸收；

Huang 等将阳离子聚电解质 ϵ -聚赖氨酸 (PL) 和阴离子天然多糖海藻酸钠 (SA) 混合制备成 SA/PL 混合液, 该混合液可自行通过静电组装的形式在接触界面形成 SA/PL 复合膜, 并可直接通过镊子即从溶液中拉取得到复合长丝, 在室温下干燥后便得到成品缝合线。力学性能表征显示, 随着 PL 含量的增加, SA/PL 纤维的断裂伸长率变低, 而抗拉强度变高并且该复合纤维的尺寸可控。

小鼠实验以及抗菌等实验结果显示, SA/PL 复合纤维可通过抵抗病原体感染、减少炎症、抗伤口的异物过敏来促进小鼠背部皮肤伤口的愈合和修复。该研究提供了一种全新制备可吸收缝合线的新方法新思路, 并且该研究的制备工艺过程安全绿色无污染。

海藻酸盐还多被用于功能涂层整理剂来改善缝合线的相关性能。Selvaraju 等利用海藻酸钠的高度水溶性充当固化剂, 并将其与乙醇蜂胶提取物合成的银纳米颗粒相结合, 通过上浆浸渍技术将蜂胶银纳米颗粒涂覆在手术缝合线上。体外抗菌分析表明, 蜂胶银纳米颗粒涂层缝合线对临床致病微生物具有显著的抗菌活性; Lauren 等通过制备一种纤维素纳米纤维与海藻酸盐复合的水凝胶涂层整理材料 (NFCA), 将其涂覆于 3-0 号可吸收手术缝合线, 以增强细胞黏附性和活性能够, 从而加快伤口的愈合。

2.2 合成类高分子可吸收缝合线

2.2.1 聚乳酸类缝合线

聚乳酸 (PLA) 作为新世纪最有潜力的生物医用材料之一, 已经被广泛开发为各种基聚乳酸材料的生物医用品, 尤其在手术缝合线方面, 因其优异的可降解性, 良好的生物相容性, 无毒性, 优良的力学性能, 聚乳酸被视为制备手术缝合线最为理想的材料之一。

聚乳酸虽然具备降解性能, 但是作为手术缝合线而言, 纯聚乳酸的降解速度过于缓慢且难以控制, 对于伤口的闭合恢复不是很灵活, 另外, 聚乳酸天然结晶困难而表现出脆性较大, 导致其作为缝合线的韧性无法满足要求。Wu 等制备了一种聚乳酸 (PLLA) 和聚己内酯 (PCL) 涂覆的聚二氧六环酮 (PDO) 缝合线, 扫描电子显微镜 (SEM) 观察发现, 涂层后的缝合线表面光滑, 体内研究表明缝合线涂层后, 其降解特性发生了明显变化。未涂层的缝合线在 12 周内表现出最快的降解, 显示出力学强度的明显下降。经涂层的缝合线在植入 12 周后能够保持 20% 以上的原始拉伸强度。张晓芳开发出一种释药可控聚乳酸手术缝合线, 采用 PCL 和 PGA2 种降解速率不同的生物

降解材料，通过调节组分配比，配制成载药涂层整理液，针对情况不同的伤口，可选择释药速率、释药周期不同的缝合线处理伤口。刘明芳等利用脂肪酶处理缝合线，使表面羟基数量增多，然后接枝壳聚糖，结果显示明显改善了聚乳酸手术缝合线的亲水性。刘淑强等开发了载药微球聚乳酸手术缝合线，首先采用乳化-溶剂挥发法成功制备了聚乳酸载药微球，然后通过黏合剂醋酸淀粉将微球牢固负载于缝合线上，释药期达到 8d，达到良好的药物缓释效果。并且处理后的缝合线也保持了优良的柔韧性和力学强度。

2.2.2 聚乙醇酸类缝合线

聚乙醇酸（PGA）具有优良的力学性能、生物相容性、生物可降解性，无毒性且组织反应小。PGA 的分子间氢键作用力强，分子链结构高度规整，结晶度较大，一般为 46%~52%。1970 年，美国公司发布商品名为 Dexon 的 PGA 可吸收缝合线，是在肠线之后最为普遍商业化的缝合线。

近五年关于 PGA 类缝合线国内外报道较少，PGA 天然降解速度过快，纯 PGA 制备的缝合线不足以在一定时间内为伤口提供相应的力学支撑，因此，已有的关于 PGA 缝合线的研究是利用 PGA 材料降解速度快这种特性改善现有缝合线的降解性能，多作为涂层剂和载药载体应用于缝合。载药缝合线的药物释放时间应与伤口愈合时间保持一致，因此对缝线释药速率的调整就显得尤为重要。Liu 等应用聚己内酯（PCL）和聚乙二醇（PGA）这 2 种具有不同降解率的可降解聚合物来负载茶多酚（TP）药物，主体缝合线选用聚乳酸（PLA）材料进行制备。通过调整 PCL/PGA 的组分配比，以此来调节药物的释放速率和释放时间且缝合线的药物释放率在早期较快，后期较慢。另外，随着药物载体中 PCL 的增加，缝合线的抗张强度逐渐增加。当 PCL/PGA 质量比为 70/30 时，缝合线的断裂伸长率达到最高。Marimallappa 等通过对 62 名患者使用 2 种不同类别的缝合线：丝绸缝合线和 PGA 缝合线，在缝合处理一段时间后对比，发现 PGA 类缝合线相对于丝绸类缝合线表现出较低的细菌黏附，而丝绸类缝合线表现出较高的好氧性细菌黏附，结果表明，较少的细菌黏附和可吸收的 PGA 缝合线是口腔内手术的更好选择。

2.2.3 聚己内酯类缝合线

聚己内酯（PCL），又称聚 ϵ -己内酯。PCL 具有优异的生物降解性和良好的生物相容性，并且具有优良的有机高聚物相容性，可作为细胞生长的载体，不会与组织发生不良反应，在自然环境下 6~12 个月即可完全降解。此外，PCL 具有较好的温控性质，

可以开发多种具有良好形状记忆的产品。PCL 已被广泛应用于生物医用方面，尤其在缝合线的开发制备，成为最热门的应用材料之一。

Jing 等通过双螺杆挤出机将热塑性聚氨酯 (TPU) 和聚 ϵ -己内酯 (PCL) 进行熔融复合，发现含有 25% 的 TPU 和 75% 的 PCL 的混合物具有最好的形状记忆特性，其形状固定率为 98%，形状恢复率为 90%。最终制备出具有形状记忆的手术缝合线，室温下保持临时形状，在热水浴中只需 2s 即可自行打结。余璠通过浸渍涂层法将聚己内酯负载盐酸川芎嗪作为药物缓释系统涂覆于 PGA 基编织缝合线上，制备出药理与物理双重刺激共存的载药埋植线，埋线随着 PCL 浓度的增大，涂层次数的增多，主体缝线的宏观编织结构趋于光滑。Hu 等通过静电纺制备聚己内酯 (PCL) 纤维，并与胶原蛋白 (COL) 和生长因子 (bFGF) 结合，以制备 bFGF-COL/PCL 缝合线，显微观察缝合线的纤维微观结构整齐度良好、并且具有较好的力学性能，bFGF-COL/PCL 缝合线通过加速肉芽组织形成、胶原蛋白沉积和再上皮化，显著促进不同阶段的伤口愈合。

2.2.4 聚乙烯醇类缝合线

近年来，聚乙烯醇 (PVA) 在生物医用材料领域十分热门，医用型聚乙烯醇的安全性极高，对人体无害无毒副作用，具有优异的生物可降解性和生物相容性，广泛被制备成人工肾膜等药用膜。

Lee 等开发了一种药物释放电子缝合系统 (DRESS) 以实时监测缝合的完整性及伤口情况，能够实现连续的应变监测和热通量控制并通过触发药物释放增强组织再生。该系统由“壳-芯”结构组成，芯层由银纳米粒子嵌入到聚氨酯多丝纤维中构成，银纳米粒子的高导电性赋予整个缝合系统的高导电性；壳层由柔性聚乙烯醇接枝到聚(N-异丙基丙烯酰胺)组成一种热膨胀涂层，该涂层在温度变化时显示出良好的膨胀和脱泡行为，从而使其适用于药物输送，以便按需释放。Ranjbar 等通过对静电纺技术制备聚乳酸 (PLA) /盐酸四环素 (T)-聚乙烯醇 (PVA) /壳聚糖 (CS) 纳米纤维。将 CS/PVA 纺丝液从一个注射器喷出，PLA/T 纺丝液从另一个注射器喷出，之后将收集好的复合纳米纤维进行加捻来制备缝合线，另外，盐酸四环素的加入可以改善缝线的亲水性，但其使用量超过 2g/d 时将会引起肝毒性。抗菌实验显示缝线对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌显示出理想的抗菌效果，并能有效防止细菌的附着。

2.3 抗菌免疫新型可吸收手术缝合线

尽管现代医疗保健水平取得了重大进展，但对外科手术部位的感染问题仍然对术

后伤口的护理和痊愈构成严重威胁。对于大部分伤口出现的感染问题，临床通用的做法是口服抗生素类药物施药全身，此行为会直接对体内部分脏器官造成影响，且间接治疗伤口炎症，长期服用不仅会使受损组织产生耐药性，还会极大地威胁人体安全健康，因此，对于伤口处的抗菌处理，应当对其进行靶向释药，此手段能够高效地缓解伤口的感染问题。Otto 等通过 29 项随机对照研究的 meta 分析发现，三氯生抗菌涂层的手术缝合线显著降低了术后感染率（24%）。另外，随着手术缝合线的更新换代，拥有越来越高附加值的抗菌型可吸收手术缝合线也相继问世，目前赋予手术缝合线抗菌性能也成为当今缝合线研究不可或缺的一部分。

纳米涂覆是当今制备抗菌型手术缝合线较为热门的方法之一，将选定的抗菌性物质加工成为纳米颗粒，随后通过涂层、沉积以及吸附等方法与缝合线相结合，赋予缝合线抗菌性能。Mehmet 等利用低温真空沉积的方法，将纳米银均匀涂覆在聚乙醇酸类可吸收手术缝合线上，抗菌实验结果显示，在温度为 200K 和 300K 环境下进行银涂层的缝合线周围可以看到明显的细菌生长抑制区，证明了此缝合线的灭菌效果良好，在预防手术感染和消除感染方面具有显著优势。该研究提出了一种银包覆抗菌生物材料在临床应用中的新方法，此外，也表明可通过低温下的真空沉积来制备量子效应的缝合线，但缝合线力学性能研究提出，在温度 300K 时涂覆银离子的手术缝合线抗张强度明显下降，发生了应变恶化的现象，力学性能不能很好地保持。Sunitha 等开发出一种盐酸环丙沙星（CPH）负载的金纳米颗粒（CPG-NPs），然后通过吸附的手段将其结合到手术缝合线上，最终使用海藻酸钠通过离子交联进行强化，作为缝线的刚性涂层。抗菌实验显示，CPG-NPs 缝合线的抑菌区为 CPH 包覆的缝合线抑菌区的 2 倍，此外，由于金纳米颗粒的存在，使得 CPH 的负载面积大幅增加，从而使 CPG-NPs 缝合线的抗菌活性更强，释药时间可持续 72h。该研究提出了一种新型手术缝合线的抗菌作用机制，能够增加药物的负载量并且可以在一定时间内持续释放药物，对于缝合伤口管理模式提供了新思路。

3 结束语

医用手术缝合线已成为当今医疗行业不可或缺的一部分，而可吸收类（可降解）手术缝合线依据其优异的性能也势必将取代非吸收手术缝合线成为外科医疗手术中的主角，虽然其发展日趋成熟，但仍存在一些问题，具体如下。

(1) 天然类可吸收手术缝合线的相关研究较少,初代的天然可降解缝线如羊肠线存在力学性能差,易引发组织细胞反应等不良机体反应;天然甲壳素纤维的生物相容性好,不易引发组织反应并且还有天然的广谱抗菌性能,成为当今研究手术缝合线的热点材料之一,但多数研究方向将壳聚糖作为功能性抗菌涂层涂覆于缝合线的表面,以增加抗菌性能,而在缝合线的制备方面,采用甲壳素纤维进行组装的研究甚少。

(2) 合成类可降解材料成为近二三十年来开发新型手术缝合线的热门材料,随着科技的进步与发展,越来越多的具备优异性能的合成高分子材料将用于手术缝合线的开发,但大多数的合成材料的降解速率及时间不可控,伤口的愈合程度应与缝合线的降解程度相互匹配,若缝合线的降解过快,会导致伤口愈合迟滞并继发感染,若缝合线的降解过慢,则会在皮肤表面留下瘢痕,因此,对于缝合线的降解可控显得尤为重要。

(3) 负有抗菌性的可吸收缝合线仍是当今乃至未来的研究主题,如何将抗菌性物质稳定均匀长效的负载到缝合线上仍是一大难题,虽有学者在不断创新开发各种抗菌缝合线,但市售的抗菌类可吸收缝合线仍以进口为主导。

目前为止,我国可吸收类缝合线的相关研究仍处于实验室阶段,在实际产业化中仍然存在瓶颈并亟待解决,比如质量稳定性不够导致的力学性能欠佳,高档次的可吸收缝合线没有自主知识产权等,因此在未来的研究中,应当在提高可吸收缝合线附加值的同时考虑缝合线的匀质化。

来源: 纺织学报 2024 年第 01 期

2024/2025

中国产业用纺织品技术发展报告

2024/2025 Technology Development Report of China Industrial Textiles

第七篇 交通运输

碳纤维铝蜂窝复合材料在汽车保险杠横梁中的应用与性能优化

随着国家节能减排政策的推进以及汽车行业的大力发展，汽车的轻量化逐渐受到重视。碳纤维材料密度通常为钢材的 1/5 左右，比强度却是钢材的 10 倍甚至更高，相对于传统金属，相同体积的碳纤维可以减重 30%~50%。

碳纤维复合材料是以碳纤维为增强材料，以树脂、金属及陶瓷为基体材料，经过复合成型制成的复合结构材料。碳纤维复合材料作为一种新型复合材料，因具有低密度、高比强度、高模量以及优异的能量吸收特性而被广泛用于汽车轻量化设计中。

目前，碳纤维复合材料已经应用到汽车的结构件中，比如横梁、车门以及转向架等。保险杠作为汽车车身的重要安全保护装置，是车身的重要组成部分，其主要功能是承载碰撞时的冲击载荷和吸收冲击能量，防止车身其他部分发生严重破坏，保护乘员及行人安全，对其结构和材料进行研究具有实用价值。碳纤维铝蜂窝复合材料是由高强度碳纤维面板和铝蜂窝芯组成的三明治结构，兼具低密度、高比强度、高模量以及优异的能量吸收特性。用碳纤维铝蜂窝复合材料替代汽车上传统金属材料的保险杠，可以达到轻量化以及增强汽车安全性的目的。

以汽车的保险杠为研究对象，采用碳纤维铝蜂窝复合材料替代传统金属材料，从保险杠的受力分析和性能要求入手，综合考虑碳纤维铝蜂窝复合材料成型工艺特点和装配要求，进行碳纤维铝蜂窝复合材料横梁的结构设计。结合 Abaqus CAE 工程软件对保险杠进行三维建模和工况分析，从而对碳纤维铝蜂窝复合材料的结构参数进行调整优化，最终达到轻量化效果。

1 汽车保险杠的结构

目前，汽车保险杠由面罩、缓冲材料（吸能泡沫）及横梁三部分组成，汽车保险杠结构如图 1 所示。



图 1 汽车保险杠结构

保险杠的主要作用是吸收和减缓外界冲击力，防护车身整个部分，保护乘车人的安全，是汽车设计中至关重要的一环。保险杠在碰撞中起抵抗作用的主要是横梁部分，除了要保证整个保险杠的刚度等安全性能外，还需要具备良好的抵抗外载荷能力。为了实现轻量化的效果，同时，保证保险杠横梁的刚度和强度要求，本文选用碳纤维铝蜂窝复合材料替代传统金属材料。

保险杠横梁结构如图 2 所示，传统保险杠横梁结构如图 2a 所示，构件的长度为 1000mm，宽度为 300mm，厚度为 48mm，采用一体化成型制得。本文选用 78 的横梁结构如图 2b 所示，其为碳纤维铝蜂窝复合材料保险杠横梁，尺寸与传统保险杠横梁一致。

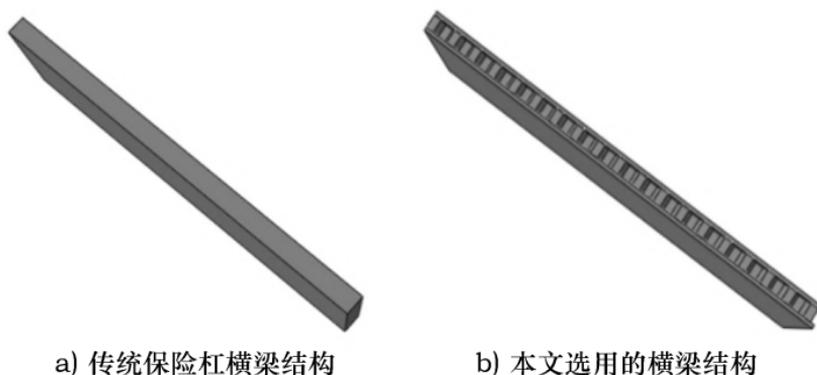


图 2 保险杠横梁结构

2 有限元建模与材料选用

2.1 有限元建模与网格划分

利用 Abaqus CAE 软件对保险杠横梁进行几何建模，根据碳纤维铝蜂窝复合材料的成型工艺，只对横梁的主要受力部分进行研究，并对模型的网格划分、属性赋予及载荷施加等过程进行分析。本文保险杠采用的是二维单元网格划分单元。网格划分是有限元分析中的关键一步，网格的大小以及质量的好坏会直接影响分析结果，网格大小受模型尺寸影响，太小的网格在复杂模型中容易造成质量不佳以及分析时间过长等，因此，综合考虑各方面原因，设定碳纤维材料网格尺寸为 1mm，刚性圆柱网格尺寸为 0.5mm，铝蜂窝采用的是 1mm 的网格。由于模型比较规整，所以网格质量好，划分好网格之后的碳纤维保险杠横梁共有 13453 个单元网格，铝蜂窝有 49287 个单元网格，刚性圆柱有 17056 个单元网格。

2.2 材料选择

由于碳纤维材料是一种层状材料，其铺层的形式对性能影响较大。当铺层角度为 0°时主要承受轴向力（面对保险杠），角度为±45°时主要承受剪切力，角度为 90°时主要承受横向力，设计过程中应根据碰撞类型（角度碰撞或正面碰撞）选择铺层角度。

通过实验发现，当选择±45°铺层占比为 50%的铺层形式时，±45°的铺层可以更好地分散和传递冲击能，将其设置在最外层能够迅速传递能量。因此，最终确定碳纤维复合材料的铺层为[45°/0°/90°/0°/45°] 的铺层方式。

传统的保险杠横梁通常选用铝合金（6082-T6），其材料性能参数如表 1 所示，本文所选用的横梁材料分为碳纤维和铝蜂窝两种。碳纤维材料的种类有很多，其中以 T300 系列和 T700 系列最为常用。

表 1 材料性能参数

材料	密度/ (g·cm ⁻³)	泊松比	经向拉伸模量 E1/GPa	纬向拉伸模量 E2/GPa	面内剪切模量 G12/GPa	面外 1-Z 剪切模量 G1Z/GPa	面外 2-Z 剪切模量 G2Z/GPa	失效强度 /MPa	厚度 /mm
6082-T6	2.71	0.30	70					190	4.8
T700	1.58	0.32	120	10.3	5.1	5.1	5.3	800	4.8
T300	1.58	0.08	73	73	5.7	5.7	5.7	800	4.8

为了保证成型质量、减小成型件变形和装配误差，兼顾性能和经济优势，选择浸润性好、固化收缩率低的环氧树脂作为碳纤维树脂基体。接着选择合适的铝蜂窝结构，对于蜂窝结构来说，蜂窝尺寸越小越好，所能承受的压力以及剪切力更大，但小尺寸的蜂窝加工难度大。综合考虑依据保险杠横梁的性能要求，初始选择了边长为 1.6mm 的蜂窝，铝蜂窝的性能参数如表 2 所示。

表 2 铝蜂窝的性能参数

材料	样式模量/MPa	泊松比	边长/mm	厚度/mm	碳纤维
铝蜂窝 (H1)	70000	0.3	1.6	0.06	T300-E602

为了对比碳纤维铝蜂窝复合材料与传统材料以及单独碳纤维材料的性能优劣，本文选用铝合金、T300 碳纤维、T700 碳纤维及 T300 碳纤维铝蜂窝复合材料这 4 种材料，对比相同结构下材料的重量及轻量化效果，不同材料轻量化程度如表 3 所示。

表 3 不同材料轻量化程度

材料	密度/(g·cm ⁻³)	相对重量	轻量化程度
6082-T6	2.71	1	1
T700	1.58	0.58	42%
T300	1.58	0.58	42%
T300 铝蜂窝	—	0.5	50%

由于碳纤维铝蜂窝复合材料密度低、重量轻及轻量化效果好，所以，用碳纤维铝蜂窝复合材料替换传统的铝合金来设计保险杠横梁具有实用价值。

2.3 不同材料的保险杠横梁性能仿真结果与分析

针对上述选用的 4 种材料，通过仿真模拟进行性能分析。在汽车碰撞过程中，保险杠横梁主要发生的是弯曲变形，所以，采取三点弯曲实验的准静态静压仿真进行性能分析。准静态压溃的过程属于低速大变形非线性问题，需要采用显示求解方法。碳纤维铝蜂窝三点弯曲仿真模型如图 3 所示，圆柱压头和底部支撑圆柱都采用刚性材料，圆柱压头只释放 Y 方向的自由度，约束其余方向自由度，支撑圆柱固定所有自由度，三点弯曲实验设定刚性圆柱对保险杠横梁模型压缩位移为 5mm。

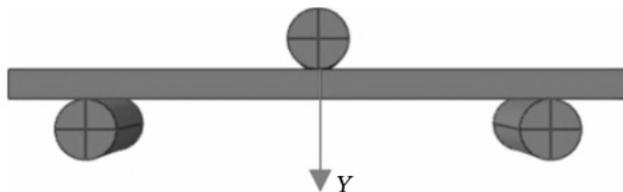


图3 碳纤维铝蜂窝三点弯曲仿真模型

图4所示为4种材料保险杠横梁在三点弯曲作用下的位移云图，可以看出在误差允许范围内，4种材料的保险杠横梁模型都能达到设定的要求。

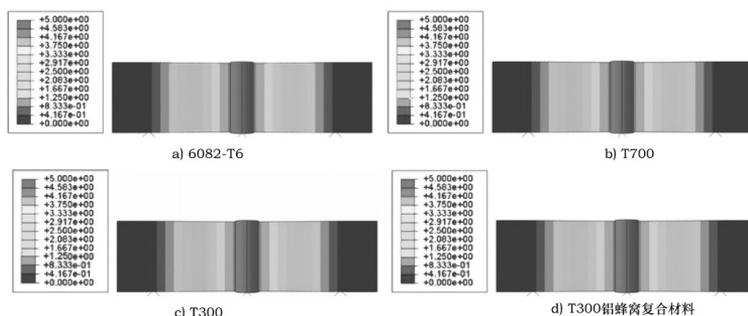


图4 保险杠横梁的位移云图

保险杠横梁的应力云图（俯视）如图5所示，其展示了在压缩位移都达到标准的情况下4种材料保险杠横梁的应力云图，其中6082-T6保险杠横梁的表面应力约为5.25MPa（图5a），T700的保险杠横梁表面应力约为0.65MPa（图5b），T300的保险杠横梁的表面应力约为0.39MPa（图5c），由图5d可知，T300铝蜂窝复合材料保险杠横梁的表面应力约为1.28MPa。带有碳纤维表面的3种材料比传统铝合金表面产生的应力小，在固定压缩位移的条件下，在保险杠横梁上产生的应力越小越好，更利于抵抗外部载荷。

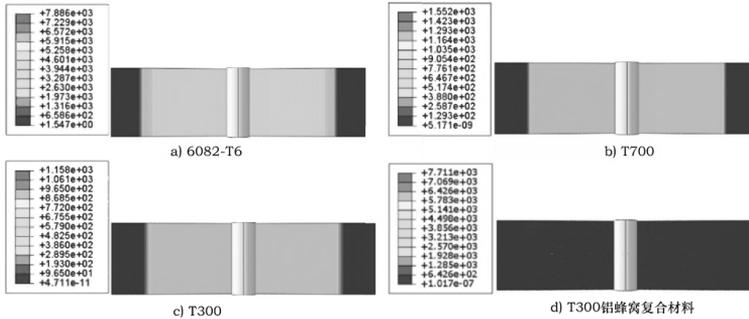


图 5 保险杠横梁的应力云图（俯视）

保险杠横梁的应力云图（正视）如图 6 所示，其展示了 4 种材料保险杠横梁应力，可以更加清楚地观察到保险杠横梁内部各个部分的受力情况。4 种材料压痕处的应力最大，应力从压痕处向底部扩散，压痕处会最先发生断裂，模拟结果与实际情况相符合。

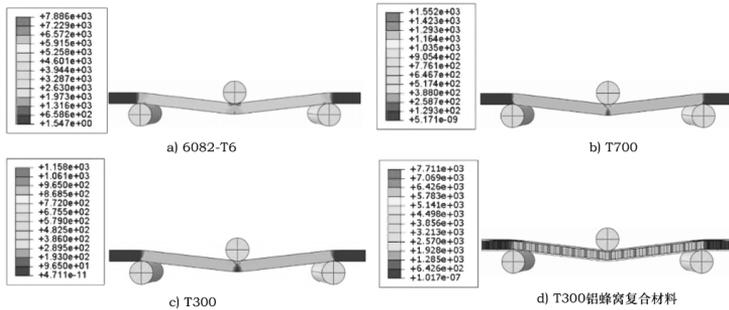


图 6 保险杠横梁的应力云图（正视）

如图 7 所示为 4 种材料保险杠横梁的冲击载荷位移，在相同位移下，载荷的大小体现为抵抗外力的能力，载荷越大说明抵抗外力的能力就越强。6082-T6 保险杠横梁、T300 保险杠横梁及 T700 保险杠横梁在相同压缩位移下的载荷基本相同，而 T300 铝蜂窝复合材料保险杠横梁载荷相对较低，说明 T300 铝蜂窝复合材料抵抗外部载荷的能力较弱。

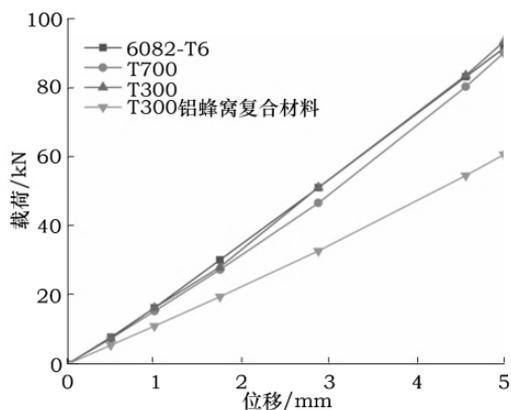


图 7 4 种材料保险杠横梁的冲击载荷位移

4 种材料保险杠横梁的能量吸收时间如图 8 所示，其展示了 4 种材料保险杠横梁的能量吸收曲线，反映了吸能效果。T300 铝蜂窝复合材料的吸能效果较差，这与载荷位移曲线结果相符合。

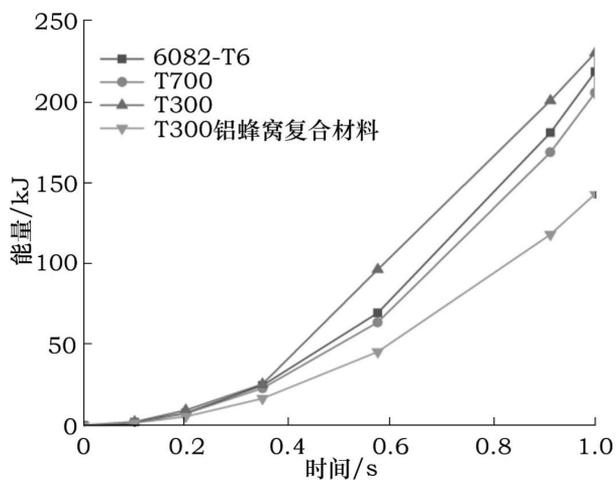


图 8 4 种材料保险杠横梁的能量吸收时间

3 碳纤维铝蜂窝复合材料结构设计及性能优化

由于碳纤维铝蜂窝复合材料结构方面的可设计性，不同结构参数碳纤维铝蜂窝复合材料的性能有很大的差异。

为了提高碳纤维铝蜂窝复合材料的吸能效果，本文通过改变碳纤维铝蜂窝复合材料面板的厚度、铝蜂窝的边长尺寸以及铝蜂窝的壁厚，设计了表 4 所示的 4 种结构参数的碳纤维铝蜂窝复合材料（H₁~H₄ 均为碳纤维铝蜂窝复合材料），对比研究其性能优劣，最终确定合适的结构参数。

表 4 4 种结构参数的 T300 铝蜂窝复合材料

代号	材料	面板厚度/mm	蜂窝边长尺寸/mm	蜂窝壁厚/mm
H1	T300 铝蜂窝	0.6	1.6	0.05
H2	T300 铝蜂窝	1.2	1.6	0.05
H3	T300 铝蜂窝	1.2	0.8	0.05
H4	T300 铝蜂窝	1.2	0.8	0.10

不同结构参数的 T300 铝蜂窝复合材料保险杠横梁的应力云图(俯视)如图 9 所示，不同结构参数的 T300 铝蜂窝保险杠面板的应力大小都是相似的。

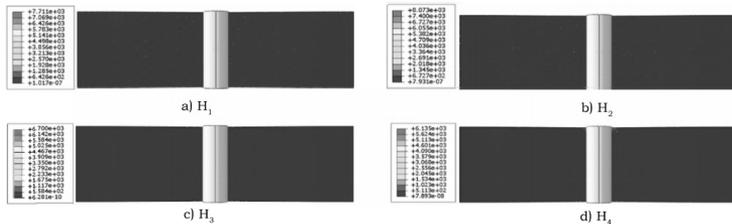


图 9 不同结构参数的 T300 铝蜂窝复合材料保险杠横梁的应力云图（俯视）

不同结构参数的 T300 铝蜂窝复合材料保险杠横梁的应力云图（正视）如图 10 所示，不同结构参数下 T300 铝蜂窝复合材料蜂窝芯部受力不同。当增加 T300 面板厚度（比），蜂窝芯部应力增大，可达 4.7MPa（图 10b）。

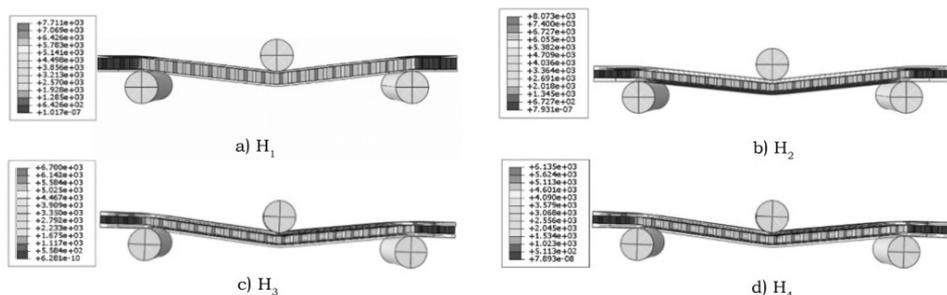


图 10 不同结构参数的 T300 铝蜂窝复合材料保险杠横梁的应力云图（正视）

当减小铝蜂窝的尺寸（比），应力分布情况发生了变化，从图 10c 可以看出相邻部分的蜂窝的应力相差较大，最小只有 3.3MPa，最大为 5.1MPa。当增加铝蜂窝壁厚（比），蜂窝的应力分布规律与 H_3 状态相似，但是，铝蜂窝所受应力比 H_3 小，最小为 3.0MPa，最大为 4.6MPa（图 10d），因此， H_4 比 H_3 可以更好地抵抗外部冲击。

不同结构参数的 T300 铝蜂窝复合材料和铝合金保险杠横梁的载荷位移如图 11 所示， H_2 、 H_3 及 H_4 在相同位移下载荷都比 H_1 大，说明改变结构参数（增加 T300 面板厚度、减小铝蜂窝边长尺寸及增加铝蜂窝壁厚）可以更好地抵抗外力冲击，而且 H_2 、 H_3 及 H_4 在相同位移下的载荷都要比铝合金大，说明优化参数后有更好的性能。

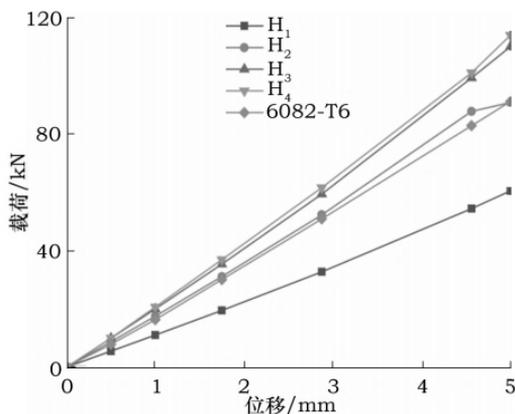


图 11 不同结构参数的 T300 铝蜂窝复合材料和铝合金保险杠横梁的载荷位移

不同结构参数的 T300 铝蜂窝复合材料和铝合金保险杠横梁的能量吸收时间如图 12 所示。改变结构参数后， H_2 、 H_3 及 H_4 能量吸收能力和铝合金对比有所提高，且 H_4 性能是最优的，能达到轻量化要求，可以用来设计保险杠的横梁。

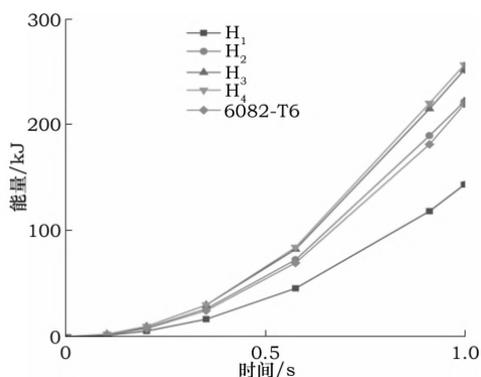


图 12 不同结构参数的 T300 铝蜂窝复合材料和铝合金保险杠横梁的能量吸收时间

结语

(1) 分析汽车保险杠的结构，当采用碳纤维铝蜂窝复合材料替换传统的铝合金材料，汽车保险杠横梁可减重 50%左右，轻量化效果显著。

(2) 通过调节碳纤维铝蜂窝复合材料的结构参数，最终获得抗冲击性能以及能量吸收性能优于传统铝合金的碳纤维铝蜂窝复合材料，因此，采用碳纤维铝蜂窝复合材料替换传统金属材料来设计汽车保险杠横梁是可行的，符合当代汽车的发展趋势。

来源：现代制造工程

国产大丝束碳纤维在轨道车辆部件中的应用研究

武娟娟 管全梅 郭金城

(中车唐山机车车辆有限公司)

为实现轨道车辆的轻量化目标,轻质高强的碳纤维复合材料被广泛应用于车辆部件。在碳纤维复合材料用于轨道车辆部件的探索研究方面,国外起步较早且已取得显著成果。如,韩国的摆式特快列车(TTX)、日本新干线E4系电力动车组与新干线N700系电力动车组及efWING转向架,以及法国高速铁路系统(TGV)的双层车体等,均不同程度采用了碳纤维复合材料。国内方面,中国中车集团有限公司携手相关科研院所与企业,开展了碳纤维复合材料在轨道车辆部件中的应用研究。在主承载部件领域,已成功研制出地铁车辆车体、磁悬浮复合材料车体、碳纤维转向架及悬浮架等;在次要承载部件方面,研究范围涵盖司机室外罩、设备舱、座椅及受电弓等组件。

碳纤维复合材料应用于轨道车辆部件的技术可行性已得以验证。然而,目前碳纤维复合材料在车辆部件中的应用仍处于研发及小规模示范应用阶段,尚未实现大规模的商业化应用。主要原因之一是其成本高昂,当前碳纤维复合材料轨道车辆部件的制作成本约为传统金属部件的3~15倍。作为新型材料,碳纤维复合材料的制备工艺复杂,加之技术封锁与市场垄断的影响,原材料成本居高不下。

碳纤维又分为小丝束和大丝束两类,其中24K(丝束中单丝数量为24000根)以下为小丝束,24K及以上为大丝束。小丝束碳纤维价格高昂,大丝束碳纤维的价格则相对较低。相比小丝束碳纤维,大丝束碳纤维不仅生产效率高,而且在复合材料制备过程中的铺层效率也较高,能够将复合材料生产成本降低30%以上。因此,探索大丝束碳纤维在轨道车辆部件中的应用,有利于降低成本,推动碳纤维复合材料在轨道交通车辆中的应用进程。

1 大丝束碳纤维的发展与应用现状

大丝束碳纤维的历史较长，但早期因性能局限，其大规模应用受限。20 世纪 90 年代中期制备的大丝束碳纤维，其抗拉强度仅约 2000MPa。之后，技术突破使得抗拉强度提升至 3600MPa 并持续得以提高。英国 Courtaulds 公司于 20 世纪 70 年代末率先展开对大丝束碳纤维的研究，并于 1985 年成功研制出性能与 T300 相当的 48K（丝束中单丝数量为 48000 根）大丝束碳纤维。作为目前世界上最大的碳纤维生产商，日本东丽公司自 2014 年收购了美国 ZOLTEK 公司后，加大了对大丝束碳纤维生产应用的研发力度。日本三菱公司、Solay 公司以及美国 Cytec 公司等亦在大丝束碳纤维制备和应用研究方面走在前列。

国内大丝束碳纤维的制备与应用研究起步较晚，但近年来发展态势迅猛。其中，吉林国兴碳纤维有限公司的大丝束碳纤维产能已达 2.5 万 t/a，新疆隆炬新材料有限公司的 2 条年产 6000t 碳纤维生产线现已投产。截至 2022 年年底，上海石化大丝束碳纤维项目一阶段 3 条生产线中已有 2 条投入运行，产品质量可与 T300 级碳纤维相媲美。近年来，受全球贸易环境影响及市场需求驱动，国产大丝束碳纤维的产能迅速增长，工业级碳纤维的发展潜力大、应用前景广。

目前，大丝束碳纤维已在建筑工程、休闲体育用品、风电叶片、航空航天及汽车零部件等多个领域广泛应用。随着国产大丝束碳纤维性能的持续优化与成本的逐步下降，其在轨道车辆部件领域的应用前景愈加广阔。该材料的应用不仅能够有效推动轨道交通领域的轻量化发展，还能够有效降低相关部件的生产成本，提升整体经济效益，为轨道交通行业的可持续发展提供技术支撑。

2 大丝束碳纤维复合材料的力学性能

为探索国产大丝束碳纤维 HFC20（50K）及其复合材料在轨道车辆上的应用可行性，对其进行力学性能测试，并与东丽 PANEX35（50K）及 T300（6K）碳纤维复合材料进行性能对比。其中：T300 碳纤维应用于轨道交通部件领域已有大量研究，积累了较完备的性能数据；东丽 PANEX35 碳纤维作为性价比高的 50K 大丝束碳纤维，其生产成本仅为 T300 碳纤维的 1/5，因此也将其纳入对比研究的范畴。

2.1 试样制备

先将阻燃环氧树脂膜平铺放置在含浸机上，再分别将展纤后的 3 种碳纤维平铺放置在 2 层树脂膜之间，通过含浸机使树脂膜附着在纤维表面，最后通过高温压合，使树脂浸润碳纤维，制得面密度为 $200\text{g}/\text{m}^2$ 、树脂质量分数为 35% 的碳纤维单向预浸料。将碳纤维单向预浸料按照预定铺层信息进行铺设后，使用压机对其进行模压成型处理，制得碳纤维复合材料层合板。对复合材料层合板进行切割即可制得碳纤维复合材料试样。试样尺寸及铺层信息如表 1 所示。其中， $[0^\circ]_6$ 表示沿 0° 方向铺 6 层， $[45^\circ/-45^\circ]_{2s}$ 表示先重复再对称铺层，即沿 45° 、 -45° 、 45° 、 -45° 、 -45° 、 45° 、 -45° 、 45° 方向铺层，共铺 8 层。

表 1 试样尺寸及铺层信息

测试项目	试样尺寸/mm		铺层信息
	长	宽	
拉伸强度/模量	250	25	$[0^\circ]_6$
压缩强度/模量	140	6	$[0^\circ]_6$
面内剪切强度/切变模量	250	25	$[45^\circ/-45^\circ]_{2s}$

2.2 测试方法

试验在 ISO291 规定的二级标准条件下进行，即试验温度为 $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ ，相对湿度为 $(50\pm 10)\%$ 。试验仪器为微机控制电子万能试验机。按照 GB/T3354—2014《定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法》对试样进行拉伸性能测试，试样加载速度为 $2\text{mm}/\text{min}$ 。按照 GB/T3856—2005《单向纤维增强塑料平板压缩性能试验方法》对试样进行压缩性能测试，试样加载速度为 $2\text{mm}/\text{min}$ 。按照 GB/T3355—2014《聚合物基复合材料纵横剪切试验方法》对试样进行剪切试验，试样加载速度为 $5\text{mm}/\text{min}$ 。

2.3 测试结果与分析

3 种碳纤维复合材料的力学性能测试结果如表 2 所示。可以看出，PANEX35 碳纤维复合材料的拉伸强度、拉伸模量与 0° 压缩强度、 0° 压缩模量，以及面内剪切性能均高于 T300 碳纤维复合材料，原因是 PANEX35 碳纤维的拉伸强度和拉伸模量与 T300 碳纤维相比略高。PANEX35 碳纤维复合材料的 90° 压缩强度及 90° 压缩模量均略低于 T300 碳纤维复合材料，表明树脂在 T300 碳纤维中的浸润效果优于在 PANEX35 碳纤

维中的浸润效果。整体而言，大丝束碳纤维复合材料的强度与模量均略高于 T300 小丝束碳纤维复合材料。

对比大丝束碳纤维 HFC20 与 PANEX35 复合材料的力学性能发现：HFC20 碳纤维复合材料的 0°拉伸强度更高，达 2387.3MPa，相较于 PANEX35 碳纤维复合材料的 2204.4MPa 提高了 8.3%；0°拉伸模量达 128.6GPa，相较于 PANEX35 碳纤维复合材料的 123.6GPa 提高了 4.0%；HFC20 碳纤维复合材料的 0°压缩强度与 0°压缩模量也高于 PANEX35 碳纤维复合材料；HFC20 碳纤维复合材料的 90°拉伸强度、90°拉伸模量、90°压缩强度、90°压缩模量，以及面内剪切强度与切变模量均低于 PANEX35 碳纤维复合材料，原因可能是树脂在 PANEX35 碳纤维中的浸润效果优于在 HFC20 碳纤维中的浸润效果。但 2 种材料的性能差异较小，均在 5%以内。

总体而言，国产 HFC20（50K）碳纤维复合材料的力学性能与 PANEX35（50K）碳纤维复合材料的基本相当，与 T300（6K）碳纤维复合材料相近，且国产 HFC20（50K）碳纤维的树脂浸润性良好，可替代具有一定研究基础的 T300（6K）碳纤维，通过进一步的研制应用于轨道车辆部件中。

表 2 碳纤维复合材料的力学性能测试结果

测试项目	T300 复合材料	PANEX35 复合材料	HFC20 复合材料
0° 拉伸强度/MPa	2074.4	2204.4	2387.3
90° 拉伸强度/MPa	38.2	41.2	40.9
0° 拉伸模量/GPa	117.9	123.6	128.6
90° 拉伸模量/GPa	10.6	10.8	10.3
0° 压缩强度/MPa	1222.2	1327.7	1431.2
90° 压缩强度/MPa	163.8	156.8	150.2
0° 压缩模量/GPa	125.6	133.7	135.2
90° 压缩模量/GPa	11.5	10.4	10.1
面内剪切强度/MPa	58.3	61.7	60.4
面内切变模量/GPa	4.1	4.2	4.0

3 国产大丝束碳纤维在车体上边梁部件中的应用

基于国产 HFC20（50K）碳纤维复合材料良好的力学性能，通过结构设计、仿真分析、疲劳试验验证该国产大丝束碳纤维在轨道车辆车体上边梁部件中的应用可行性。

上边梁是轨道车辆车体的一部分，为连接车顶与侧墙的过渡结构（图 1），在车辆承受纵向压缩或扭转时，承担纵向载荷传递的作用。

3.1 结构设计

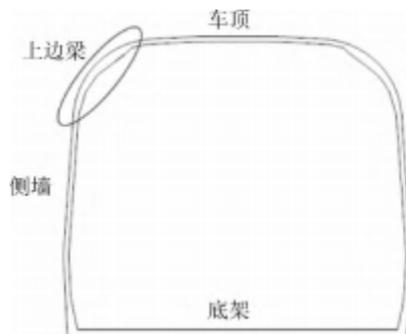


图 1 车体上边梁部位示意

基于轨道车辆车体的外形及受力分布特性，将该上边梁设计为等截面结构。以轻量化为目标，将铺层厚度、铺层角度作为优化变量，以结构刚度要求为约束条件，进行碳纤维复合材料上边梁设计。上边梁的截面结构如图 2 所示，其为多空腔结构。

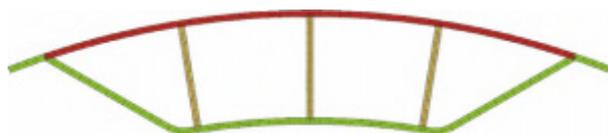


图 2 上边梁截面结构

以国产 HFC20（50K）碳纤维、阻燃环氧树脂为原材料，制备轨道车辆车体上边梁部件。为提高制备效率，采用多轴向织物铺层的形式制备上边梁用碳纤维复合材料。首先，采用 HFC20（50K）碳纤维和阻燃环氧树脂分别制备 0° 单轴向织物、 $0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$ 四轴向织物和 $0^\circ/\pm 45^\circ$ 三轴向织物；其次，根据表 3 所示的铺层设计方案，按照从上边梁的空腔侧向表面侧的方向，依次对各层织物（第 1 层～第 7 层）进行层合处理，制备上边梁用碳纤维复合材料；最后，采用碳纤维复合材料制备上边梁部件。

表 3 上边梁铺层设计方案

织物类型	层合顺序	面密度/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	厚度/mm
0° / 90° / ±45° 四轴向织物	第 1 层	550	0.55
0° / ±45° 三轴向织物	第 2 层	400	0.40
0° / 90° / ±45° 四轴向织物	第 3 层	800	0.80
0° / 90° / ±45° 四轴向织物	第 4 层	800	0.80
0° / ±45° 三轴向织物	第 5 层	400	0.40
0° / 90° / ±45° 四轴向织物	第 6 层	550	0.55
0° 单轴向织物	第 7 层 (表面层)	360	0.20

3.2 仿真分析

对上边梁及其连接结构进行模型构建，模拟该上边梁应用于车体部件中的承载工况。本文分别使用 HyperMesh 与 OptiStruct 仿真软件进行仿真模型的前处理和计算，并采用 Hyperview 软件进行后处理。建模过程中，采用壳单元模拟，单元类型为 CQUAD4，提取结构几何面进行网格划分。对于铆钉机械连接方式，采用 rbe3+cbush+rbe3 的组合模型进行模拟；对于结构胶的黏接部分，采用 rbe3+solid+rbe3 模式模拟胶接效果。

根据 TB/T3451—2016《动车组车体结构强度设计及试验》，提取整车受力工况时上边梁最大载荷（垂向 5000N）。在模型的两端支撑点处施加固定约束，中间位置加载集中载荷，有限元模型的约束与加载示意如图 3 所示。

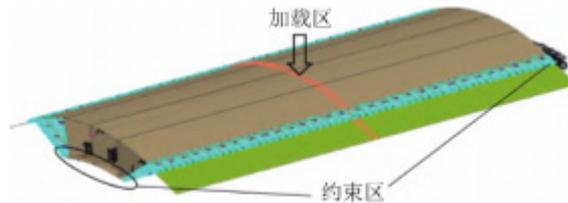


图 3 约束与加载示意

在垂向集中载荷条件下，提取上边梁用碳纤维复合材料在拉伸、压缩和剪切状态下的应变情况及部件的位移数据。采用基于基体拉伸最大 Hashin 值的判定方法进行上边梁结构强度评估。车体上边梁具体仿真结果见表 4。通常情况下，车辆

部件安全系数不小于 1.25，即基体拉伸最大 Hashin 值不大于 0.8 就满足强度要求。由表 4 可以看出，车体上边梁的最大压缩应变 Hashin 值为 0.405，小于 0.8，表明其满足强度要求。

表 4 车体上边梁仿真结果

项目	数值
位移/mm	0.286
基体拉伸最大 Hashin 值	0.405
拉伸应变/ $(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	459
压缩应变/ $(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	1011
剪切应变/ $(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	492

3.3 疲劳试验

为验证该国产大丝束碳纤维复合材料上边梁在长期受力下的耐久性，对其进行疲劳试验。根据高速动车组运行环境和工况要求，参照 TB/T3451—2016《动车组车体结构强度设计及试验》标准，对碳纤维复合材料上边梁试样进行弯曲疲劳性能测试。将试样安装于疲劳试验机两侧支架上并固定，然后对试样加载疲劳载荷。设定试验载荷为 0.685~6.850kN，加载频率为 1~2Hz，疲劳周期为 1000 万次。对试验前后的试样进行外观及内部质量无损检测。

试验结果表明，上边梁试样在经过 1000 万次疲劳试验后，部件完好，无外观及内部开裂等损伤，证实了国产大丝束碳纤维 HFC20 复合材料应用于轨道交通车辆上边梁部件，能够耐受 1000 万次的部件疲劳要求。

4 结语

本文介绍了大丝束碳纤维的发展、应用现状及其在轨道车辆领域的应用前景。重点针对国产大丝束碳纤维在轨道车辆部件中的应用展开探究，通过力学性能测试及车体上边梁部件的工程化验证，证实了国产大丝束碳纤维 HFC20（50K）基本满足轨道车辆车体上边梁部件的承载性能要求。

尽管国产大丝束碳纤维在轨道车辆部件中的应用可行性已得以验证，但针对其规

模化应用，未来仍需在整车结构应用评价、长期服役性能评估、标准体系构建等方面深入探究。随着材料性能的持续优化、工艺技术的日趋成熟及产业生态的逐步完善，大丝束碳纤维复合材料有望成为未来轨道车辆轻量化的主流材料，助力我国轨道交通行业实现“双碳”目标与高质量发展。

来源：产业用纺织品 2025 年第 04 期

2024/2025

中国产业用纺织品技术发展报告

2024/2025 Technology Development Report of China Industrial Textiles

第八篇 土工建筑

熔体直纺玻纤复合聚酯长丝胎基布的生产及应用

李思虹 潘全志 袁承豪

(江阴市华思诚无纺布有限公司)

本高性能玻纤复合聚酯长丝胎基布 (GRS) 是一种采用供应商直接输送 PET 熔体为原料, 通过设备计量、纺丝、冷却、气流牵伸、摆丝成网过程中加入玻璃纤维丝后再针刺、定型、热轧、上胶、烘干、分切收卷而成的一种高性能的聚酯长丝非织造材料, 作为胎基用于苯乙烯-丁二烯-苯乙烯共聚物 (SBS) 改性沥青防水卷材的生产加工。目前国内 SBS 改性沥青防水卷材中, 95% 采用聚酯长丝非织造布作为胎基, 但由于聚酯是热塑性高聚物, 做成胎基布主要缺点在于在防水卷材加工时的高温、张力作用下存在尺寸不稳定的现象; 同时在浸涂沥青生产过程加工速度不能太快而影响生产效率; 生产的卷材也会在施工后接缝处和立面墙的边沿因卷材的伸缩性导致卷材边缘滑脱而出现渗漏。本产品作为 SBS 改性沥青防水卷材中的胎基, 很好地解决了常规聚酯长丝胎基布生产的防水卷材因尺寸不稳定和施工中边缘易出现裂缝、滑脱等导致渗漏的问题; 亦可采用双排箱体纺丝增加不同材料的组合, 提供多样化的产品; 同时凭借产品玻纤复合有效降低收缩率的优势, 可提升 25% 防水卷材生产的速率。与此同时, 采用聚酯熔体直接纺丝技术 (熔体直纺), 及针刺后紧接着定型上胶烘干 (一步法) 工艺, 可缩短工艺流程, 降低生产成本。

1 高性能玻纤复合聚酯长丝胎基布 (GRS) 的生产

本文介绍的高性能玻纤复合聚酯长丝胎基布 (GRS) 的生产工艺以“熔体直纺”和“一步法”为基础再加入玻纤复合技术的聚酯长丝胎基布的生产方法, 其生产工艺、设备、性能指标均具有其独特之处, 简述如下:

1.1 生产方法与工艺

高性能玻纤复合聚酯长丝胎基布（GRS）的生产方法其关键技术与工艺研究侧重在玻璃纤维加筋高强聚酯长丝无纺布的整体结构设计、配方设计、设备工艺设计及复合性能设计分析。整体流程是通过针对远距离输送后保持 PET 熔体特性而设计的管道输送系统直接将聚酯熔体送到纺丝箱体，经纺丝冷却气流牵伸再分丝摆丝成网；在成网前进行玻璃纤维丝的加入，选定规格的玻璃纤维丝经过整经、调节张力，等距平行引入两层聚酯纤维棉网间，组成以聚酯纤维为基材、玻璃纤维丝为加强筋的三明治式复合棉网结构。经后道工序的针刺机定型加固成布，定型、浸胶、烘干等过程，获得胎基所需的各项物理性能。工艺流程详见图 1。

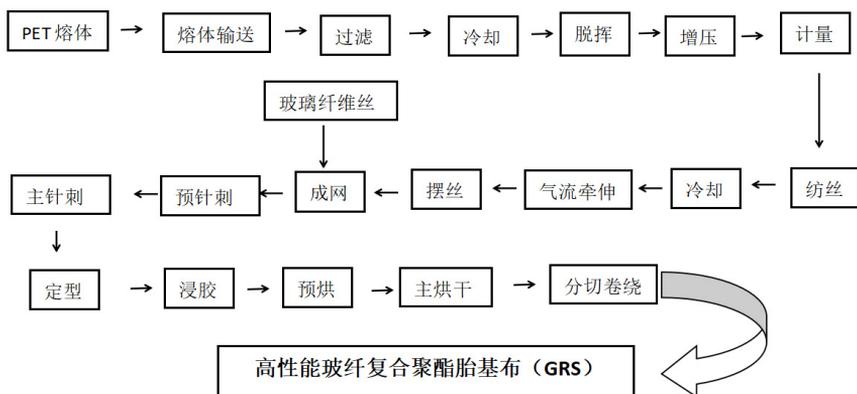


图 1 高性能玻纤复合聚酯长丝胎基布工艺流程图

1.2 技术难点与创新点

1.2.1“熔体直纺”的难点及关键技术

“熔体直纺”工艺路线既可省去熔体造粒、切片干燥和再熔融的工艺，更能通过调节熔体粘度改善其产品的力学性能。但由于相对于聚酯装置，每条非织造布生产线规模较小，一套聚酯装置供应较多的非织造布生产线，需要从聚酯装置通过熔体管道将聚酯熔体输送分配到各非织造布生产线。而聚酯熔体输送过程因距离长高温容易发生热降解，会产生低分子、易挥发的低聚物，对纺丝生产及产品性能指标的稳定性带来影响。关键技术主要体现在以下几个方面：

(1) 实现聚酯熔体粘度可控，根据非织造布不同品种规格的需要调节熔体粘度，提升成布性能指标；

(2) 实现熔体输送过程熔体温度可控，减少熔体热降解，提高均匀性；

(3) 优化熔体输送过程流动状态，改善因管壁对熔体的滞留导致的熔体停留时间差异造成的均匀性变差情况，保证熔体输送均匀、稳定；

(4) 在熔体输送后段设置脱挥装置，抽出熔体高温输送过程热降解产生的低分子挥发物，避免其对纺丝的影响。

1.2.2“玻纤复合”的难点及关键技术

玻纤长丝在胎基布里发挥骨架作用，需要让玻璃纤维丝均匀、定向并以伸直状态分布在胎基布里。要让其以理想状态引入棉网内部，再通过针刺作用，与聚酯长丝棉网紧密结合在一起，从而起到提升胎基物的物理机械性能及尺寸稳定性的效果。关键技术主要体现在以下几个方面：

(1) 实现控制玻璃纤维丝等距分布在铺丝机有效宽度范围内；

(2) 玻璃纤维丝张力可调；

(3) 通过导丝辊将导丝架上备好的玻璃纤维丝均匀牵引铺设在第一层聚酯丝棉网上，然后通过铺网机的负压吸风，使之均匀排列在第一层聚酯丝棉网上，再经过第二层聚酯丝棉网的覆盖，这样实现中间夹有玻璃纤维丝的三明治式结构的棉网直接进入针刺机。具体结构如图 2 所示。

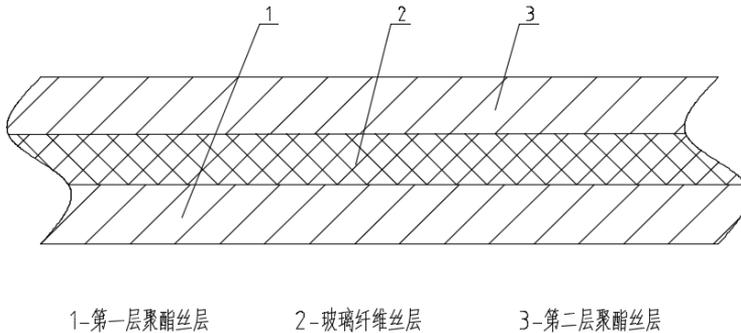


图 2 玻纤复合聚酯长丝胎基布结构示意图

1.2.3 主要的技术创新点

- (1) 创建熔体直纺聚酯长丝无纺布熔体输送系统；
- (2) 设计完成中间夹层复合玻纤的三明治式高性能聚酯长丝胎基布生产工艺；
- (3) 有效解决常规聚酯长丝胎基布防水卷材易出现接缝边缘滑脱等引起渗漏的问题；
- (4) 可采用双箱体四排纺丝位，中间加玻纤丝，相当于两条纺粘生产线的叠加，生产速度翻倍，提高生产率；两个箱体的原料，可以相同也可以不同，使原材料组合多样化，产品也可以多样化。

1.3 生产设备

1.3.1 熔体输送系统

主要设备包括：熔体过滤器、熔体冷却器、静态混合器、脱挥系统、熔体增压泵、熔体多路阀、热媒伴热系统等。

1.3.2 涤纶纺粘针刺非织造胎基布生产线

主要设备包括：纺丝箱体、熔体计量泵、纺丝组件、侧吹风装置、气流牵伸装置、摆丝装置、铺网机、针刺机、联苯蒸发器、侧吹风空调机组、吸风系统等。

1.3.3 玻璃纤维铺设系统

主要设备包括：退绕丝架、张力调节装置、牵引导丝装置、分丝定距装置、喂入辊等。

1.3.4 防水卷材基布后处理联合机组

主要设备包括：单圆网定型机、热轧机、上胶烘干定型装置、八圆网烘干机、储布机、分切卷绕机、缠绕包装机、配胶系统、热媒加热系统等。

1.4 生产技术指标

本产品均较高标准实现十项指标，其中纵横收缩率明显低于常规产品。例：面积克重 (g/m^2) ≥ 200 ，厚度 (mm) ≤ 1.2 ，纵向拉伸强度 (N/5cm) ≥ 450 ，横向拉伸强度 (N/5cm) ≥ 450 ，纵向撕裂强度 (N) ≥ 250 ，横向撕裂强度 (N) ≥ 250 ，纵向延伸率 (%) ≥ 27 ，横向延伸率 (%) ≥ 30 ，纵向热尺寸稳定性 (%) ≤ 1.0 ，横向热尺寸稳定性 (%) ≤ 1.0 。其强一伸性能比较如图 3 所示。

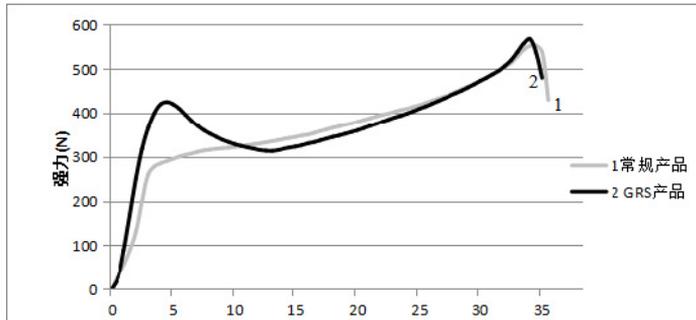


图 3 玻纤复合聚酯长丝胎基布强 - 伸性能示意图

聚酯长丝胎基布经玻璃纤维的复合加工，使其纵向横向收缩率均低于常规产品 0.3%~0.5%，达到国内先进水平。目前公司玻纤复合聚酯长丝胎基布产量产能约占国内四分之一，深受欧美市场追捧。

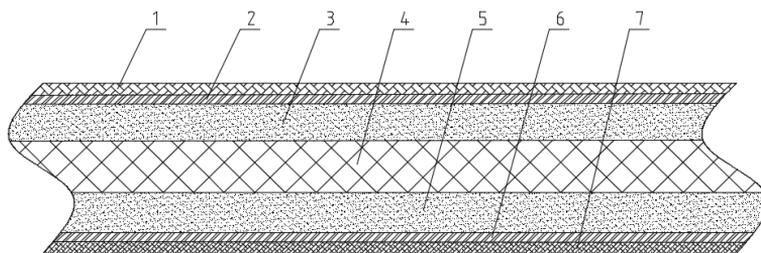
2 高性能玻纤复合聚酯长丝胎基布（GRS）在防水卷材中的应用

目前国内 SBS 改性沥青防水卷材中，约 95% 采用聚酯长丝胎作为胎基。高性能玻纤复合聚酯长丝胎基布（GRS）是聚酯长丝胎中的一种，相对于常规聚酯长丝胎其优良性能主要体现在：

（1）具有聚酯长丝胎特有的高强轻质、耐穿刺、耐候性和渗透性好等特点外，GRS 具有强度更高、尺寸更稳定的优势；

（2）GRS 可使其更为高效地在卷材生产线中进行运用，保证卷材物理性能，提高卷材生产效率，增强不同生产线适应性；

（3）GRS 可解决常规胎基所制成的卷材容易发生施工后幅宽收缩的现象，避免了接缝处和立面墙的边沿因卷材的伸缩性导致卷材边缘滑脱而出现渗漏等问题，很好地解决因胎基影响卷材的防水效果和使用寿命问题。GRS 主要作为胎基布用于 SBS 改性沥青防水卷材的生产加工。卷材内部结构如图 4 所示。



1-隔离膜 2-自沾油 3-SBS改性沥青 4-高性能玻纤复合聚酯胎基布
5-SBS改性沥青 6-胶合剂 7-强力交叉膜

图4 高性能玻纤复合聚酯长丝胎基布防水卷材结构示意图

3 高性能玻纤复合聚酯长丝胎基布（GRS）产品市场趋势分析

聚酯长丝纺粘针刺胎基布是迄今为止国际国内公认的性能最佳的改性沥青防水卷材胎基。2020年第七届“中国十大纺织科技”发布会上，“高强聚酯长丝胎基布产品及成套技术与装备”被列为“中国十大纺织科技”获奖项目。随着社会生活条件的不断改善，人们越来越重视自己的生活质量，在防水条件上要求也不断提高。去年，国家住房和城乡建设部与国家市场监督管理总局联合发布强制标准《建筑与市政工程防水通用规范》GB55030—2022，自2023年4月1日起实施，标准对防水工程设计工作年限提出了明确、具体的要求，以提高防水工程质量，缓解建筑渗漏通病，满足老百姓对高品质好房子的向往。聚酯长丝非织造布作为SBS改性沥青防水卷材所需要的重要生产原料，发展有了更大的依托。2022年，中国建筑防水材料产量约为48.76亿平方米，较上年增加7.84亿平方米，同比增长19.2%；预计2023年建筑防水材料产量将达到58.1亿平方米，继续以近20%的增长率增长（参见图5）。

改性沥青防水卷材是欧洲最先推出的防水材料，目前在欧洲建筑防水材料仍以沥青基防水卷材为主，同时欧洲的改性沥青防水卷材技术十分发达，走在世界的前面。SBS改性沥青卷材在北欧应用更多更广，又如在法国的SBS改性沥青防水卷材已约占平屋面市场的84%；在美国，SBS改性沥青卷材技术从欧洲引进，现已成为屋面及地下防水的主要材料。我国建筑防水材料以改性沥青防水卷材为主导产品，是国内用量最大的防水材料。而改性沥青防水卷材中95%采用聚酯长丝非织造布作为胎基。



图 5 2017—2023 年中国防水材料产量预测及增速

2022 年第九届“中国十大纺织科技”发布会上，“玻纤增强型聚酯纺粘长丝胎基布”（GRS）作为升级版的聚酯长丝胎基材料再获殊荣——荣登“中国十大纺织科技”榜。相信具备高强度、高延伸、热稳定、耐老化、抗蠕变、长寿命等特性优势的 GRS 将会迎来飞速发展。但目前我国玻纤复合聚酯长丝胎基布（GRS）的核心技术与国际水平仍有差距。国内目前的 GRS 还只实现了纵向加筋复合，但国际上已经出现纵、横双向加筋的 GRS 生产技术，产品性能及其稳定性进一步提升。技术进步无止境，随着一个个技术难题的突破，GRS 的发展前景不可限量。

聚丙烯长丝针刺土工布性能及在工程中的应用优势

刘效林

(天鼎丰控股有限公司)

1 摘要

非织造土工布具有良好的延伸性、力学性能和水平渗透过滤性能等，具有排水、过滤、反滤、加筋、防渗、防护六大功能。以及加工简单生产效率较高、成本较低等特点，因此被广泛应用于水利、电力、公路、铁路、机场、港口、围垦、环保抗洪以及各种地下、水下等各种土木工程领域，虽然起步较晚，但发展非常迅速。目前，世界非织造土工布占全部土工布的 70%左右，我国非织造土工布约占全部土工布的 60%。

在非织造土工布中，按所用原料的不同，可将其分成聚酯纤维非织造土工布、聚丙烯纤维非织造土工布、聚酰胺纤维非织造土工布、聚乙烯醇纤维非织造土工布，以及黄麻纤维、聚乙烯纤维、聚乳酸纤维非织造土工布等。其中，应用最普遍的是聚酯和聚丙烯纤维非织造土工布。

聚酯纤维非织造土工布强力高，熔点高，具有优良的韧度和蠕变特性，尤其在抗紫外线、抗老化性能上均能够满足工程要求，但缺点是耐碱性能较差；聚丙烯纤维非织造土工布强度较高，以 200 克重的样品为例，在相同的工艺参数下，聚丙烯纤维纺粘针刺土工布的抗拉强度和断裂伸长率均高于聚酯纤维纺粘针刺土工布，聚丙烯纺粘针刺土工布的纵横向撕破强力远大于聚酯纺粘针刺土工布，聚丙烯纺粘针刺土工布的 CBR 顶破强力也略大于聚酯纺粘针刺土工布。耐酸碱性好，尤其是耐碱性好，聚丙烯土工布在 60℃氢氧化钙溶液中浸泡三天后几乎可以保持 100%的强力，而聚酯土工布强力损失率可达到 10%~15%。常温试验环境下，聚酯土工布在碱性条件下 8 个月，

纤维直径可以由 20 μm 下降到 14 μm ，水解量超不再光滑，纤维强力基本损失殆尽。聚丙烯土工布耐磨性好，耐腐蚀、耐霉变，耐低温，具有较好的芯吸效应和渗水性能，且比重轻，价格便宜使得聚丙烯非织造土工布在土木工程领域获得广泛应用，尤其是在地下耐酸碱环境下和高寒等恶劣环境中具有不可替代的关键地位。

2 聚丙烯长丝土工布的特点

(1) 聚丙烯密度较小，仅为 0.91g/cm³（涤纶为 1.38g/cm³）。它是合成纤维里最轻的材料。由于其密度轻，所以在单位面积内，同样克重的条件下，纤维的数量就多，厚度比其他针刺土工布要厚，强力要高。在相同强力的条件下，覆盖面积大。

(2) 单丝纤维强度高，伸长率大，因此聚丙烯土工布也具有强度高、伸长高的特点，具有优良的抗变形稳定性。

(3) 聚丙烯的特殊结构使其具有优良的耐酸耐碱性能。聚丙烯土工布耐化学性能良好，在 pH 值 2~13 范围内不受影响。

(4) 聚丙烯纤维表面摩擦系数较小，纤维之间的摩擦力小，而且耐磨性好。因此聚丙烯土工布的抗磨损性能远高于其他材质的土工布。

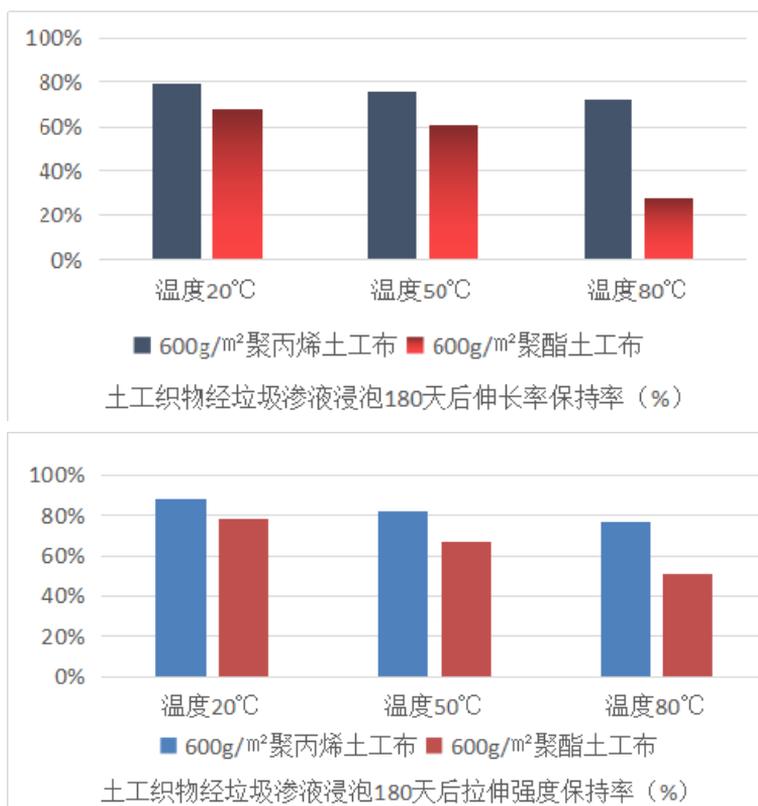
(5) 聚丙烯具有良好的疏水性，不吸水。因此聚丙烯土工布的排水性能远高于其他材质的土工布。

(6) 单丝纤维纤度范围广，可以实现不同纤维细度的复合。过滤效果更好。

3 聚丙烯土工布在各个工程中的应用优势

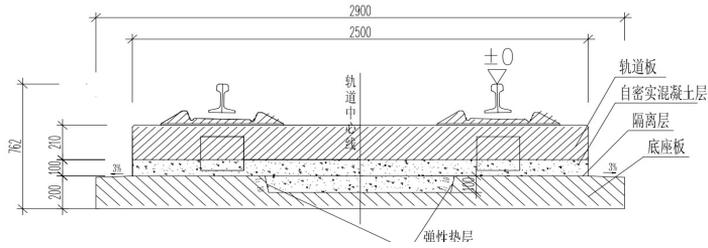
3.1 垃圾填埋场

聚丙烯针刺土工布在不同温度下（20℃、50℃和 80℃）经渗沥液浸泡 180 天后，拉伸强力和延伸率都保持在 80%以上，聚丙烯土工布完全符合垃圾填埋场的使用要求，聚酯土工布在 20℃和 50℃下强力的延伸率能达到 50%以上，但当温度为 80℃时，保持率低于 30%，不适用于垃圾填埋场的高温环境。



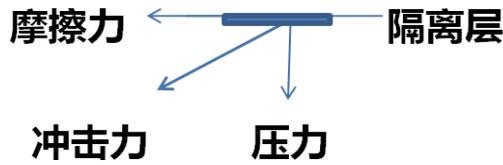
3.2 铁路和高速铁路

我们国家的高速铁路最高设计时速已经达到 350km/h，为了保证高铁建设质量，在高速铁路的路基，也就是在 CRTSIII型板与底座之间，设计了独特的隔离层，用于缓解高速飞驰的列车对路基的冲击，隔离层由一层 700 g/m² PP 土工布组成，由于路基的底座、CRTSIII型板、自密式钢筋混凝土都是由水泥构成的，所以必须使用耐酸耐碱的 PP 土工布。而 PP 纺粘长丝针刺土工布具有强力高、纵横向强力相等、厚度薄、耐蠕变性能好、摩擦系数小、耐磨性好、抗震性能好、弹性复好等特点，更适合高速铁路使用。



隔离层由 700 g/m² PP 针刺土工布构成，处于 CRTSIII 型板与底座之间，起到缓冲列车冲击力对路基地座的冲击作用。所以，PP 土工布的物理性能的好坏，对于保护路基起着至关重要的作用。

隔离层在列车飞驰而过的时候，将受到一个冲击力的作用，如图所示：



这个力的方向是向前下方的，由此产生两个分力，一个垂直向下，给隔离层压力；一个与隔离层平行，使隔离层与自密式钢筋混凝土、底座之间产生摩擦。

聚丙烯长丝针刺土工布与聚丙烯短丝针刺土工布的生产方法不同，决定着其力学性能有很大的不同，长丝的生产技术是纺粘法技术，是将化纤生产技术、造纸生产技术和无纺布生产技术有机地结合起来的新技术，是一步法的生产工艺；聚丙烯短丝针刺土工布的原料是聚丙烯短纤维（长度在 65mm 左右），然后，经过梳理铺网针刺固结而成。长丝针刺土工布针刺密度为 120 针/cm²左右，短丝针刺土工布 350 针/cm²左右。这就决定着短丝土工布厚度薄、强力小、土工布针刺密实、刚性强、弹性恢复略差、摩擦系数略大的特点；长丝土工布由于纤维是长丝的，且数粗，达到 8 旦，所以不需要太多的针刺密度就能成布，所以，纤维的损伤小，强力高、厚度略厚、刚性小、弹性恢复性能好、摩擦系数小的特点。但是，由于长丝生产在后加工方面增加了热压辊，所以，长丝土工布的厚度可以通过热压来调节土工布的厚度。长丝在拉伸时候，设置了定型装置，使之无论冬天还是夏天，温度无论高低，尺寸都能保持稳定。

3.3 防渗工程

防渗工程是指在水利、交通、石化、环保等工程中，对储存或输送的水或其他液体或气体进行严密的封闭性处理，防止液体或气体发生渗漏、渗透等现象，保障工程的安全和使用寿命。防渗工程包括堤防防渗、沉降池、人工湖、养殖池、工业污水塘等各类防渗处理工程，污水处理厂、垃圾填埋场、污染物储存池环保及水工结构防渗、建筑防渗领域以及农业领域。作为与防渗土工膜结合使用的垫衬，非织造土工布要求耐高温、抗冷冻、耐腐蚀、抗拉强度高、耐酸碱性能好、使用寿命长。

土工布作为防渗工程中的一种材料，可以发挥多重的防渗效果。聚丙烯土工布具有极强的抗拉强度和耐脆性，被广泛应用于防渗工程。其防渗原理在于：通过土工布材料紧密地贴合在防渗结构表面上，形成一层物理障碍，有效防止水分或其他物质渗透过来。

(1) 耐腐蚀性和寿命长：聚丙烯土工布具有良好的耐腐蚀性能和寿命长的特点，能够在恶劣的水环境和土壤环境下保持长期的性能稳定性。

(2) 透水性能良好：聚丙烯土工布具有良好的防渗功能，能够将含水体内部的压力平衡，防止渗透现象的发生，避免对基础土壤的破坏。

(3) 抗拉强度高：通过聚丙烯土工布的增强作用，增加基础土壤的抗拉强度和稳定性，土工布能够有效增强土体的稳定性和抗拉强度，形成良好的内聚力和抗剪强度，提高土体抗压和承载能力，更好地保护地基石块和减轻水流对土壤的侵蚀。

(4) 重量轻、体积小、施工方便：相对于传统材料，聚丙烯土工布的重量和体积小，能够降低物流成本，施工方便，提高工程效率。

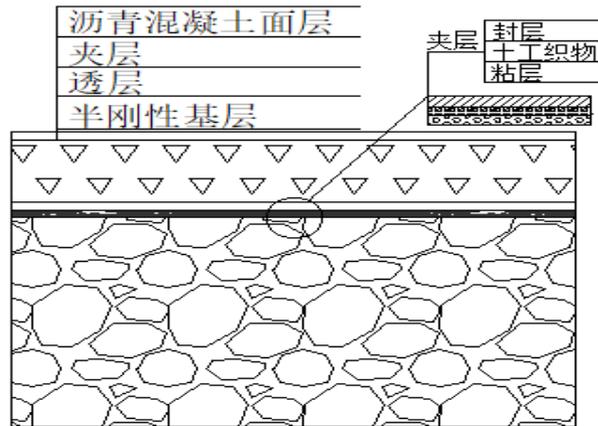
(5) 环保经济：聚丙烯土工布是一种再生资源，与传统防渗材料相比，具有高附加值、可循环使用的特点，在施工中减少了有害物质，更加环保经济。

3.4 公路工程

3.4.1 聚丙烯长丝纺粘针刺土工布在公路工程中应用

(1) 铺设在半刚性基层和沥青层之间，在面层下面建立防水层和应力分散层。

(2) 铺设在路基之上，起到加筋和防渗的作用。



3.4.2 聚丙烯长丝纺粘针刺土工布在公路工程中的作用

(1) 隔离阻断作用：防反土工织物的铺设将面层和基层隔开，以降低接缝或裂缝处应力集中对面层的影响，从而延缓反射裂缝的产生。

(2) 加筋作用：可承担一定的沥青层底拉应力，并且通过嵌锁作用提高结构层整体刚度，起到对结构层的加筋作用，减小裂缝张开变形。

(3) 防渗作用：防反土工织物浸润沥青后形成不透水层，防止水分渗入软化道路结构，起到保护基层作用。

(4) 消能缓冲作用：防反土工织物具有一定延展性和柔韧性，铺设在路面层之间，可将裂缝拉应力扩展至更宽的范围，从而消散、吸收裂缝处集中应力。

3.4.3 聚丙烯长丝纺粘针刺土工布在沥青路面中应用中的优势

(1) 土工布由连续聚丙烯长丝组成，强力高，抗撕破。相同条件下强力比国标 GB/T17639 长丝针刺土工布指标高 30%左右，抗撕裂性能高 50%以上，断裂强力高、初始模量高，能吸收更多的能量；

(2) 耐候性：高寒、富水等环境对其性能几乎无影响；

(3) 化学稳定性：pH2~13 范围内无影响，与水泥、粉煤灰、石灰等常见公路基层材料接触不会被水解，聚酯土工布会水解消失；

(4) 延伸率大：具有优异的变形适应性，高伸长率在基层变形、沉降方面的优势明显

(5) 聚丙烯热缩性：与热沥青接触后产生收缩应力，减少裂缝产生；抗撕裂性能比传统土工布高 50%左右，有效抵抗铺设损伤；

(6) 亲油性：聚丙烯材料与沥青结合性优于其他材料。聚丙烯土工材料的自身吸油率为 411.3%，单位面积吸油量为 778.3g/m²。

3.5 水利工程

200~600g/m²聚丙烯土工布产品，其优点是防水和防渗，因此可以在防洪、河道、水库和水利设施等水利工程应用中更为常见。主要原因包括以下几个方面：

(1) 比重小：聚丙烯土工布比聚酯土工布的密度小，可以形成一个轻巧而坚定的防水屏障。例如，聚丙烯土工布的比重为 0.91g/cm³，而聚酯土工布的比重为 1.38g/cm³。

(2) 较高的耐化学性：聚丙烯土工布具有良好的耐化学稳定性，能够防止化学物质从水中渗透进入土壤，从而达到防水和防渗的效果。聚酯土工布的化学稳定性较差。

(3) 超强的抗拉强度：聚丙烯土工布具有良好的抗拉强度，可以有效地防止土壤流失，从而达到防水和防渗的效果。举例而言，在 100 度的温度下，聚丙烯土工布的强度仍可保持原有的 60%以上，而聚酯土工布的强度则不足。

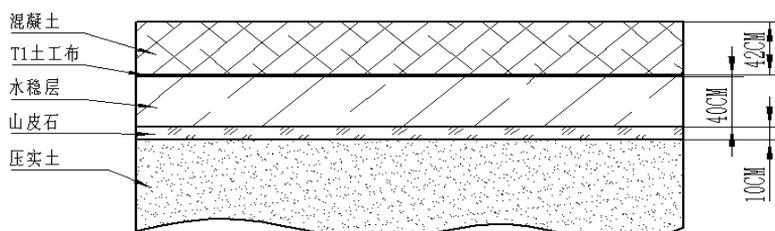
3.6 机场跑道隔离层

3.6.1 聚丙烯长丝纺粘针刺土工布在机场工程中的应用

(1) 铺设在新机场跑道的基层和面层之间，作为隔离层。

(2) 用于旧机场跑道的维修加铺。

聚丙烯土工布铺设在机场跑道的基层和面层之间，起到加筋、隔离的作用。单位面积质量为 100~160g。



3.6.2 聚丙烯长丝纺粘针刺土工布在机场工程中的作用

(1) 加筋作用：可承担一定的水泥层底拉应力，并且通过嵌锁作用提高结构层整体刚度，起到对结构层的加筋作用。

(2) 隔离作用：机场产品采用热轧方式生产，表面形成一层保护膜，几乎不透水。

防止积水侵入地基，减少对地基的损害。

(3) 消能缓冲作用：机场产品具有一定延展性和柔韧性，可以平均分配应力，减少应力集中，避免反射裂纹的产生。

3.6.3 聚丙烯长丝纺粘针刺土工布在机场工程中的优势

(1) 强力高，抗撕破。相同条件下比聚酯长丝土工布强力高 30%，抗撕裂性能比短纤土工布高 50%左右。

(2) 单丝最粗可以做到 11D（普通产品通常 3~4D），初始模量高，延伸率大。相比短纤土工布能抵抗更多的冲击载荷，是理想的应力吸收材料，能有效降低道面反射裂缝。

(3) 更强的化学稳定性。在 pH 2~13 范围内，对聚丙烯土工布的性能几乎没有影响。特别是在水泥、石灰、粉煤灰等碱性环境下，聚丙烯长丝针刺土工布是最好的选择。可以提高工程的寿命。

(4) 更广泛的气候适应性。在高寒、大温差地区仍能保持良好性能。

(5) 不易水解，不产生有毒有害物质，通过欧盟 CE 认证，安全无害。

3.7 生态工程

生态护坡、河道护岸护底中应用聚丙烯土工布具有以下优势：

(1) 较高的物理机械性能：聚丙烯土工布具有良好的拉伸强度和抗剪性能，能够承受外部力的作用和改善和增强地基土的稳定性。

(2) 良好的化学稳定性：聚丙烯土工布具有良好的耐酸碱性和抗腐蚀性能，能够长期暴露在不同的水质和土壤中，保持材料性能的稳定。

(3) 透水性能好：聚丙烯土工布具有较好的透水性能，能够促进水土保持和大气环境治理。

(4) 轻质化：与传统材料相比，聚丙烯土工布轻便易于搬运、铺设、连接，提高了施工效率，降低了人力成本。

(5) 环保性好：聚丙烯土工布材料可回收利用，回收的材料可再加工处理为其他产品，因此减少了资源浪费，且不会对环境产生污染。

4 结语

综上所述，聚丙烯长丝针刺土工布具有优越的物理性能和良好的化学稳定性，因

此能适用于各种复杂的地形，尤其是具有酸碱性的环境。如公路、铁路（高铁）、机场、海港、垃圾填埋场、尾矿场、粉煤灰填埋场、人造湿地、江河湖海治理、水库、水渠、海绵城市、围海造地等工程。

针刺机针刺效果对聚酯长丝胎基布性能的影响

王守正

(天鼎丰非织造布有限公司)

非织造布作为一种新型的纺织材料，具有工艺流程短、生产效率高、成本低等优点，在医疗卫生、过滤材料、土工布等领域得到了广泛的应用。针刺法是非织造布生产中的一种重要加固方法，其通过带刺的针在纤维网上反复穿刺，使纤维之间相互缠结，从而提高非织造布的强度和稳定性。针刺机的针深和针密是影响针刺效果的两个重要参数，它们直接决定了非织造布的性能和质量。因此，研究针深和针密对非织造布性能的影响具有重要的理论意义和实际应用价值。

聚酯胎基布是非织造布的一种，分为长丝聚酯胎基和短纤聚酯胎基，主要用在防水行业。我公司的一步法长丝纺粘针刺聚酯胎是一种制作改性沥青防水卷材的新型胎基布，采用聚酯切片为原料，经过结晶干燥、熔融挤出、纺丝计量、冷却牵伸、分丝铺网、针刺固结、浸轧上胶、烘干热定型制成。产品具有强度高、延伸性好、尺寸稳定性高、抗老化性强与改性沥青配伍性好等优点。

1 针刺机的工作原理

针刺机主要由送网机构、针刺机构、牵拉机构和传动机构等组成。纤维网经过送网机构输送到针刺区域，针刺机构中的刺针在动力驱动下作上下往复运动，对纤维网进行反复穿刺。在穿刺过程中，刺针上的钩刺带动纤维网中的纤维产生位移和缠结，从而使纤维网得到加固。牵拉机构将加固后的非织造布牵拉输出，完成整个针刺过程。因此针刺机的针刺深度以及密度对于产品指标的影响是很大的。

本文主要探究针刺机针刺程度对聚酯长丝胎基布性能的影响，并得到最佳针刺工艺。

2 实验部分

2.1 生产工艺流程

长丝纺粘针刺聚酯防水材料胎基的生产工艺流程如图 1 所示。

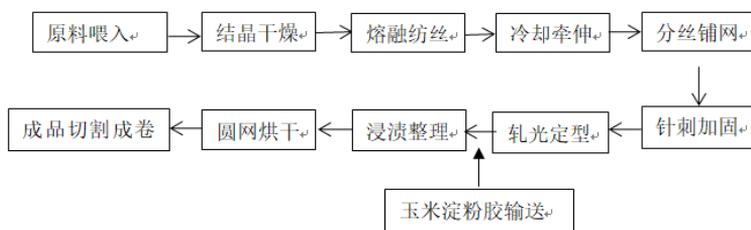


图 1 长丝纺粘针刺聚酯胎基生产流程图

针刺机示意图如图 2 所示

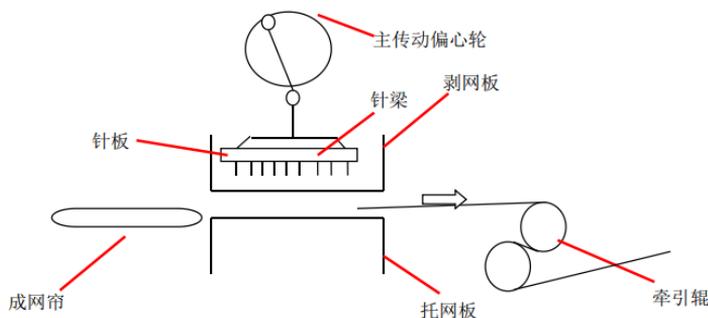


图 2 针刺机示意图

2.2 原材料

- (1) 实验材料：选用万杰厂家生产的聚酯（PET）切片
- (2) 生产设备：Dilo 针刺机，刺针型号为 15 * 18 * 38 * 3-C222
- (3) 针刺工艺：设置不同的植针密度和针刺深度，对产品进行加工生产，针刺深度分别为 7mm、8mm、9mm、10mm

实验使用切片为万杰切片，具体参数如表 1 所示。

表 1 实验切片主要参数

切片种类	熔点 (°C)	特性粘度
万杰切片	258.5	0.7024

2.3 产品的性能测试

2.3.1 针刺密度

分别按公式 (1) 计算生产样品的针刺密度 (单位 1/cm²)。

$$Dn = N \times n / (100000 \times V) \dots\dots\dots (1)$$

式中: Dn—针刺密度 (1/cm²)

N—植针密度 (支/m);

n—针刺频率 (1/min);

V—车速 (m/min)。

2.3.2 断裂强力

分别取试样测试纵向及横向拉伸断裂拉力, (单位 N / 5cm) 按公式 (2) 分别计算其纵向或横向断裂延伸率。

$$e = (L_1 - L_0) / 200 \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

式中: e—最大拉力时延伸率 (%);

L₁—试样拉断时的长度 (mm);

L₀—试样初始长度 (mm);

200—夹具间的距离 (mm)。

2.4 样品的制备

在我公司山东德州工厂 2 号实验线制作胎基布样品, 以不同植针密度和针刺深度为梯度制成的胎基布进行实验编号, 如表 2 所示, 测试样品性能。

表 2 胎基样品的参数

样品编号	胎基克重 (g/m ²)	植针密度 (支/m)	针刺深度 (mm)
①	251.2	3780	8.0
②	250.9	3996	8.0
③	251.3	4320	8.0
④	250.5	4644	8.0
⑤	251.0	4320	7.0
⑥	250.9	4320	8.0
⑦	251.3	4320	9.0
⑧	250.8	4320	10.0

3 结果与讨论

对生产出来的产品进行显微成像，结构如图 3、图 4 所示，发现植针密度增加即增加针刺密度会使纤维排列更加紧密，但过高的针刺密度会导致纤维损伤，造成质量下滑。



图 3 样品①的微观结构



图 4 样品③的微观结构

3.1 对胎基强力的影响

表 3 样品的拉伸断裂强力

样品编号	纵向断裂强力 (N/5cm)	横向断裂强力 (N/5cm)
①	810	781
②	833	806
③	860	820
④	864	815
⑤	836	800
⑥	860	816
⑦	854	820
⑧	846	811

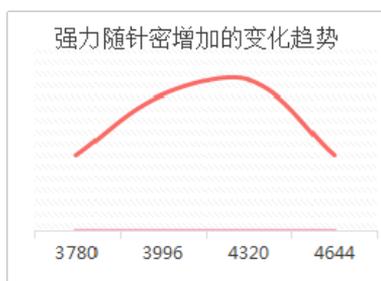


图 5 强力随针密增加的变化趋势图

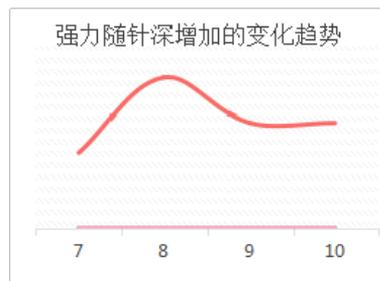


图 6 强力随针深增加的变化趋势图

从表 3 样品①②③④对比中可以看出，随着植针密度的增加，产品的强力也随之呈现上升趋势。植针密度增加，单位面积的针刺密度增加，针刺加固的作用提升，纤维之间的作用力得到了明显加强，表现出胎基的强力逐渐提高。且样品中植针密度为 4320 支/m 时强力较高，整体呈现出随着植针密度增加，产品强力不断提高的趋势，这是因为针密增加，纤维之间的缠结点增多，非织造布的结构更加紧密，从而提高了非织造布的强力。而当植针密度超过 4320 支/m 时，即④样品的强力有所降低，这是因为当植针密度过大，针刺密度过大，使纤维损伤，造成产品整体强力有所下滑。通过样品③⑤⑥⑦⑧强力随着针刺深度增加而增加，在针刺深度 8mm 左右达到了一个波峰，后面强力随着针刺深度的增加而降低。

3.2 对伸长率的影响

表 4 样品的伸长率

样品编号	纵向伸长率	横向伸长率
①	46.3	52.5
②	45.1	51.3
③	43.5	47.3
④	42.7	45.9
⑤	44.7	51.3
⑥	43.8	47.5
⑦	43.2	46.8
⑧	42.1	45.7

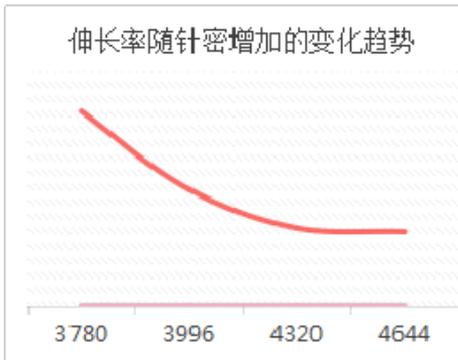


图 7 伸长率随针密增加的变化趋势图

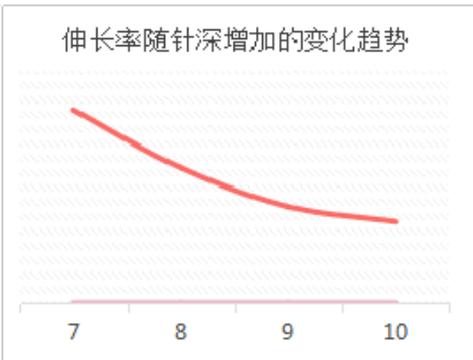


图 8 伸长率随针深增加的变化趋势图

从表 4 样品①②③④中可以看出,随着针刺密度的增加,样品①到样品④的伸长率呈现下降趋势,这是因为增加针深可能会使织物的结构更加紧密,从而提高织物的强力。这是因为更深的针迹可以更好地将纱线交织在一起,增加纱线之间的摩擦力和抱合力,使得织物在受到外力时能够更好地抵抗拉伸和破裂。较高的针密可以增加织物的紧密度和均匀性,从而提高强力。但同样地,过高的针密可能会导致织物的延伸率降低,因为纱线之间的空隙减小,限制了纱线的伸展空间。通过样品③⑤⑥⑦⑧伸长率随着针刺深度增加而减少,过度增加针深可能会导致织物的延伸率下降。这是因为过紧的结构限制了纱线的伸展能力,使得织物在受到拉伸时难以产生较大的变形。

4 结语:

本文通过使用不同植针密度的针板和针刺深度的工艺来对聚酯长丝胎基布生产产品进行探究,分析了不同的针刺密度和针刺深度对于胎基布产品指标的影响程度,得出以下结论。

(1) 针深和针密对非织造布的强力和伸长等性能均有明显影响,在实际生产中,应根据用途或者所需性能要求,来选择合适的针深针密,避免因针刺不足或过度导致产品质量不达标。

(2) 增加针深可能会使织物的结构更加紧密,从而提高织物的强力。这是因为更深的针迹可以更好地将纱线交织在一起,增加纱线之间的摩擦力和抱合力,使得织物在受到外力时能够更好地抵抗拉伸和破裂。然而,过度增加针深可能会导致织物的延伸率下降。这是因为过紧的结构限制了纱线的伸展能力,使得织物在受到拉伸时难以产生较大的变形。

(3) 针密的增加也会对强力和延伸率产生影响。较高的针密可以增加织物的紧密度和均匀性,从而提高强力。但同样地,过高的针密可能会导致织物的延伸率降低,因为纱线之间的空隙减小,限制了纱线的伸展空间。

新型三维土工格栅的设计、制备及其加筋性能

贺秋森¹ 邵光伟^{1,2} 张鑫¹ 黄文龙¹ 李志豪¹ 张廉登¹ 陈南梁^{1,2}

(1. 东华大学纺织学院; 2. 产业用纺织品教育部工程研究中心)

土工格栅作为一种高性能土工合成材料,能显著提高地基承载能力、增强边坡稳定性、减少差异沉降、限制侧向变形,在公路与铁路路基、堤坝、挡土墙等土木工程领域应用广泛。

与传统二维土工格栅相比,三维土工格栅作为一种新型的加筋材料,除了能提供 x 轴和 y 轴方向的加固外,还能提供 z 轴方向的加固,且在提高承载能力和减少表面变形方面表现优异。这引起了越来越多研究者的关注,他们设计出多种类型的三维土工格栅结构。例如, Lawton 等设计出一种多向加固体结构; Hataf 等将带有立方体单元的网锚绑扎在二维土工格栅上,设计出一种网锚加筋的三维加筋结构; Zhang 等设计出多种不同形式的三维加筋结构; Dash 等将土工格栅组合叠加,得到了一种复合三维加筋结构; Makkar 等通过对二维土工格栅进行折叠与捆绑,得到了三角形与矩形结构的三维土工格栅。研究者们还分别通过拉拔试验、三轴试验、直剪试验等,验证了三维土工格栅在提高承载力、降低土体沉降、提高剪切强度等方面能发挥更好的作用。

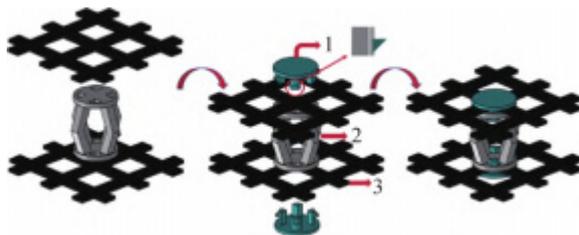
尽管目前三维土工格栅技术已取得一定程度的进展,但仍面临制造工艺复杂、大规模生产难度较大等问题。此外,与二维土工格栅相比,三维土工格栅还因无法卷绕而存在运输不便等问题。因此,开发一种易于制造、施工可行且具备可扩展性的新型三维土工格栅显得尤为重要。

本研究设计了一款新型三维土工格栅,其由模块化的辅助件和二维土工格栅组成。其中,辅助件采用 3D 打印技术制造,此举不仅提高了三维土工格栅设计的灵活性,而且便于实现标准化的批量生产。随后,利用拉拔试验验证了新型三维土工格栅设计的可行性,研究了辅助件密度和加载压力对新型三维土工格栅加筋性能的影响。

1 新型三维土工格栅的设计与制备

1.1 新型三维土工格栅的设计

新型三维土工格栅由固定件、支撑件和二维土工格栅 3 部分组成。其中，每 2 个固定件与 1 个支撑件共同组成 1 个辅助件。支撑件主要在受力时提供支撑并传递力的功能，是提升新型三维土工格栅加筋性能的关键；固定件基于特定的倾斜倒角设计，通过与支撑件牢固结合，实现二维土工格栅与辅助件的连接，获得统一的整体结构。图 1 示意了新型三维土工格栅的安装过程，即先铺设下层二维土工格栅，随后将支撑件放置于下层二维土工格栅的纵横筋交叉处，接着铺设上层二维土工格栅，最后利用固定件固定，得到三维立体结构。



1—固定件；2—支撑件；3—二维土工格栅。

图 1 新型三维土工格栅安装示意

1.2 新型三维土工格栅的制备

本研究使用的二维土工格栅为山东路德新材料股份有限公司生产的经编土工格栅，其原料为玻璃纤维。二维土工格栅几何参数与力学性能见表 1。

表 1 二维土工格栅几何参数与力学性能

项目	参数
厚度/mm	1.5
单位面积质量/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	504
孔尺寸/mm	18 (长), 18 (宽)
纵/横筋宽度/mm	8
孔隙率/%	48
轴向拉伸强度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	120
断裂伸长率/%	≤ 4

3D 打印技术能够适配二维土工格栅的参数变化，快速且可重复地生产辅助件。本研究首先采用柔性 TPU3D 打印线材作为原料，利用 SolidWorks 软件建立辅助件几何模型（图 2），并基于二维土工格栅几何参数设计辅助件的结构参数（表 2），其中 S1 表示支撑柱的截面积。其次，将建立的模型导入切片软件 S3D 中进行切片处理，利用 SermoonD3 打印机进行辅助件的打印。再次，设置打印参数为打印填充率 100%、层高 0.1mm、打印温度 215℃。最后，根据图 1 将打印得到的辅助件与二维土工格栅进行组合安装，得到本研究设计的新型三维土工格栅（图 3）。

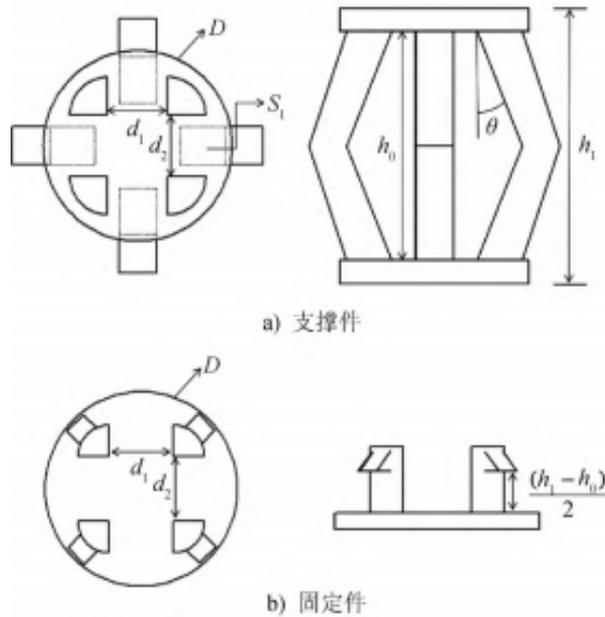


图 2 辅助件几何模型

表 2 辅助件的结构参数

项目	参数
d1/mm	8
d2/mm	8
D/mm	25
S1/mm ²	6×6
h0/mm	46
h1/mm	52
θ/ (°)	30



图3 新型三维土工格栅实物照片

2 新型三维土工格栅的加筋性能

现有试验方法中,拉拔试验被认为是研究土工格栅—土界面行为的最佳方法之一。众多研究者已对各种类型的土工格栅进行了大量的拉拔试验,为土工格栅的设计、安装和应用提供了有价值的理论支撑。本研究采用拉拔试验探究新型三维土工格栅的加筋性能,研究辅助件密度和加载压力对新型三维土工格栅加筋性能的影响。

2.1 砂土原料

拉拔试验用砂土采用市售河砂。参照统一土壤分类系统(USCS),该河砂归属SP级(sandpoorlygraded)。参照GB/T50123—2019《土工试验方法标准》测得的河砂基本物理力学参数如表3所示。其中:砂土粒度分布通过筛分法测得,D10、D30、D60分别指砂土体系中粒径累积分布占比达到10%、30%、60%时所对应的粒度,用直径表示;相对密度采用击实试验测得;砂土的内摩擦角和黏聚力采用直剪试验在50、100、150及200kPa的法向压力下测定,以表征剪切强度。

表3 河砂基本物理力学参数

项目	D10/ mm	D30/ mm	D60/ mm	最大干密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	最小干密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	粒径 不均匀系数	曲率系数	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	相对密度/ %
参数	0.265	0.330	0.428	1726	1228	1.61	0.96	39	6.98	66

2.2 试验仪器

图4为拉拔试验装置实物照片及其结构示意。拉拔试验装置主要由带夹持系统的试验箱、常压系统、牵引装置以及仪表和数据采集系统等4个部分组成。

试验箱内部尺寸为长 800mm、宽 400mm、高 320mm。试验箱前后两端面由 8mm 厚的钢板制成，左右两侧面由 20mm 厚的有机玻璃片制成。测试时，土工格栅固定在前端面的夹具上。夹具与由伺服机构控制的水平作动器相连，旨在以恒定的速率拉动土工格栅。常压系统采用柔性气囊加压，确保砂土表面载荷分布均匀，气囊内压力由气压计实时监测。拉拔试验参照 ASTM D6706-01 标准进行。

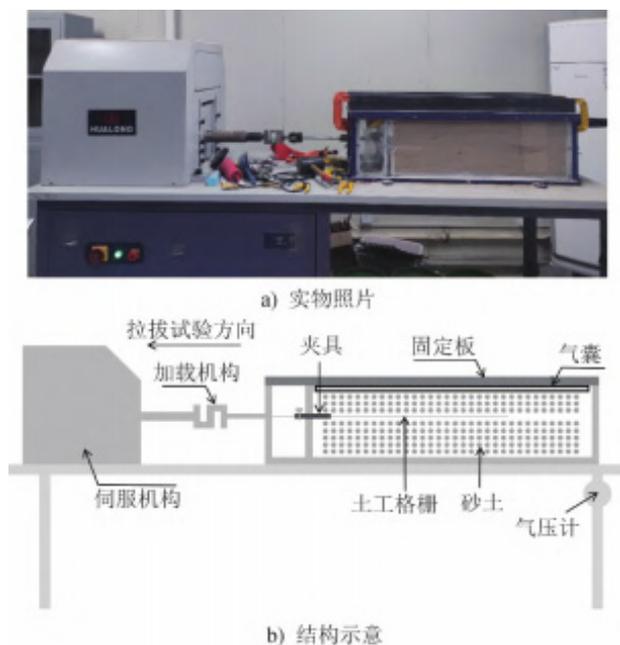


图 4 拉拔试验装置

2.3 拉拔试验方案

拉拔试验过程中，上层土工格栅试样由夹具夹持。为证实三维土工格栅加筋性能的提升与辅助件的加入形成了三维结构有关，二维土工格栅拉拔测试时选择放置 2 层二维土工格栅，试样名称简记为 2DG。且为了保证变量的唯一性，测试过程中土工格栅尺寸保持一致，即上层土工格栅尺寸取 250mm×450mm，下层土工格栅尺寸取 250mm×250mm，夹具夹持尺寸为 250mm×200mm，这样拉拔试验过程中上下层土工格栅与砂土的接触面积均为 250mm×250mm。此外，为避免土工格栅从夹具中滑脱，使

用环氧树脂将上层土工格栅固定于夹具中。

为探究辅助件密度对新型三维土工格栅横向加筋性能的影响，针对 $250\text{mm}\times 250\text{mm}$ 的新型三维土工格栅分别设计了1、2和4个辅助件的配置方案，试样名称分别简记为3DG-1、3DG-2和3DG-4。辅助件放置示意如图5所示，其中每个交点表示土工格栅纵筋与横筋的交叉点，红色为辅助件放置位置。

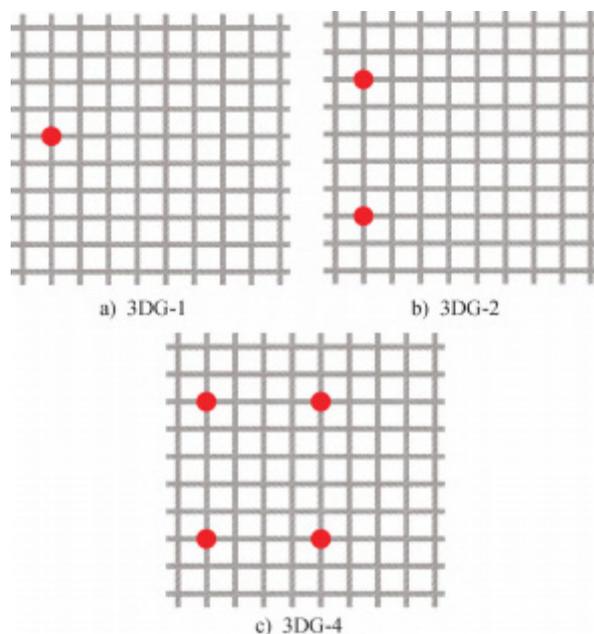


图5 新型三维土工格栅中辅助件放置示意

2.4 拉拔试验测试过程

试验箱内部总高度为 320mm ，夹具位置距试验箱底面 145mm 。根据每层压实土层的厚度，向试验箱中倒入砂土，并使用钢锤锤击，均匀压实砂土并确保压实度为 95% 。

新型三维土工格栅的拉拔试验准备流程如下：首先，往试验箱中倒入 26kg 砂土，锤击压实至 50mm 高度；其次，重复1次上述操作，得到总高 100mm 的砂土；再次，铺设新型三维土工格栅，倒入 23.6kg 砂土，将砂土与三维土工格栅共同压实到总高度为 145mm ，此时上层土工格栅处于夹具高度；最后，以锤击压实 50mm 高度的砂土为

1 个周期，重复第 1 个步骤，铺设砂土直至总高度达 320mm。

二维土工格栅的拉拔试验准备流程与新型三维土工格栅的相似：首先，以锤击压实 50mm 高度的砂土为 1 个周期，重复 2 个周期得到 100mm 高度的砂土；其次，铺设尺寸为 250mm×250mm 的二维土工格栅，随后倒入 23.6kg 砂土，锤击压实得到 45mm 高度的砂土；再次，铺设尺寸为 250mm×450mm 的二维土工格栅，该层土工格栅为夹具夹持；最后，继续以锤击压实 50mm 高度的砂土为 1 个周期，铺设砂土直至总高度达 320mm。

砂土铺设完成后，在试验箱上方放置柔性气囊并盖上盖板。填充气囊并施压，控制加载压力分别为 10kPa 与 20kPa。参照 ASTM D5321 标准，以 1mm/min 的恒定速率施加水平拉力，最终得到土工格栅的拉拔力-位移曲线。

3 试验结果与分析

图 6 展示了不同加载压力下，二维土工格栅和不同辅助件密度的新型三维土工格栅的拉拔力-位移曲线。

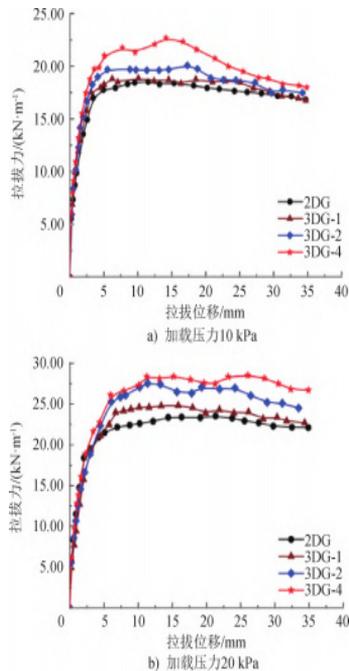


图 6 不同土工格栅的拉拔力-位移曲线

从图 6 可以看出：新型三维土工格栅的拉拔力明显高于二维土工格栅。在相同的测试条件下，当加载压力分别为 10kPa 与 20kPa 时，二维土工格栅的最大拉拔力只有 18.54kN/m 和 23.54kN/m，而新型三维土工格栅的最大拉拔力分别达 23.42kN/m 和 28.52kN/m。且随着辅助件密度的增大，新型三维土工格栅的最大拉拔力增加。

后文从土工格栅加筋机制的角度分析拉拔力的表现。Wilson-Fahmy 等基于砂土与二维土工格栅相互作用机制的研究，提出二维土工格栅的拉拔力由 3 部分组成，即所有纵筋和横筋的极限摩擦阻力、承载阻力和土工格栅空隙内摩擦力。对于新型三维土工格栅，除涉及上述二维土工格栅的 3 种力之外，辅助件与砂土接触同样会产生相互作用，并产生额外的约束。且辅助件将上下层二维土工格栅连接成一个整体，下层土工格栅也参与了应力的分散，共同承受施加的载荷。此外，拉拔试验过程中，砂土会因剪切作用而膨胀，促使土工格栅周围砂土颗粒产生额外应力，从而增加后续的拔出力。故相较于二维土工格栅，新型三维土工格栅可调动的砂土颗粒更多，所需的拉拔力更大。

此外，从图 6 还可以看出：拉拔试验初始阶段，拉拔力快速增大，表明初始阶段抗拉拔能力响应快速。当拉拔位移达 5mm 时，二维土工格栅的拉拔力趋于稳定，这与 Bergado 等的研究结果一致；而新型三维土工格栅的拉拔力后续会呈现波动变化，甚至出现了下降的情况，这在添加了 2 个和 4 个辅助件的新型三维土工格栅拉拔力-位移曲线中表现尤为明显。造成新型三维土工格栅这一表现的主要原因是：初始阶段，新型三维土工格栅在外力作用下发生变形，并在固定辅助件的位置，尤其是在承受大部分拉拔力的上层土工格栅固定辅助件的位置出现应力集中，如图 7a 所示；随着拉拔力的不断增大，三维土工格栅的前端会因应力集中而先遭到破坏，辅助件加固作用失效，导致拉拔力呈波动式下降。图 7b 以 3DG-4 为例，展示了新型三维土工格栅上层前端受拉拔的影响更大，这与 Hussein 等的研究结果一致。虽然新型三维土工格栅上层中部在初始阶段受力影响较小，但随着拉拔位移的增加以及前端被破坏，中部逐渐成为应力的集中点，最终被破坏。

图 8 对比了不同加载压力条件下，二维土工格栅和不同辅助件密度的新型三维土工格栅的拉拔力峰值。从图 8 可以看出，与二维土工格栅相比，在 10kPa 和 20kPa 的加载压力条件下，添加 1 个辅助件可使拉拔力分别提高 1.8%和 5.5%；添加 2 个辅助件可使拉拔力分别提高 8.4%和 17.0%；添加 4 个辅助件可使拉拔力分别提高 22.4%和 21.2%。由此可见，辅助件对新型三维土工格栅加筋性能的影响不是线性的，这可从以

下方面加以解释：

一是辅助件的数量。只添加 1 个辅助件时，辅助件对于巨大的拉拔力很难产生有效的分散作用，其强化作用较小，且易遭破坏。随着辅助件数量的增加，辅助件之间相互作用，共同分散受力，强化作用增大。

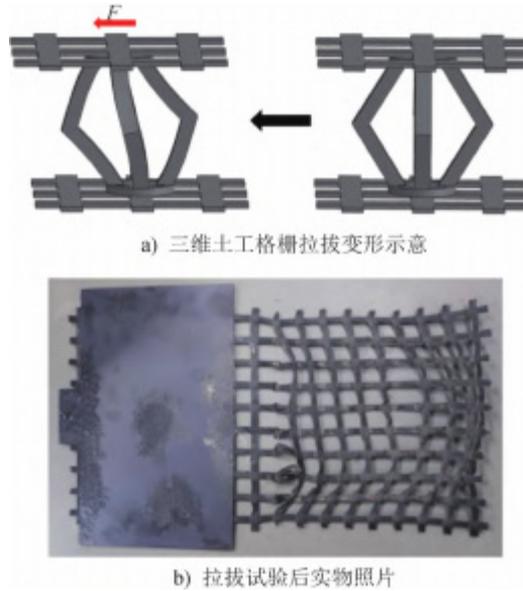


图 7 新型三维土工格栅拉拔试验

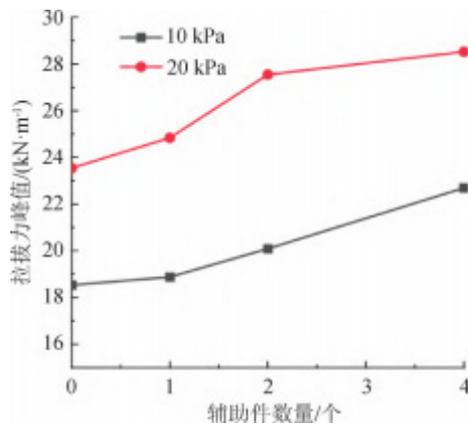


图 8 不同土工格栅拉拔力峰值

二是辅助件的排列方式。添加 1 个或 2 个辅助件时，它们均位于新型三维土工格栅的前端，而添加 4 个辅助件时，新增的辅助件位于新型三维土工格栅的中部，即使位置与受力点有一定距离，辅助件依然可以分散受力。因此，实际应用时，合理规划辅助件的数量与排列可增强新型三维土工格栅的抗拉拔能力。

三是加载压力的影响。加载压力较小时，砂土松散，若此时辅助件密度较小，则加筋性能提升不显著。辅助件密度不变，加载压力较大时，砂土致密，新型三维土工格栅表现出更优的加筋性能。

4 结论

本研究提出了一种结合 3D 打印技术制备新型三维土工格栅的方法，辅助件可实现快速与可重复生产。通过对新型三维土工格栅和二维土工格栅进行拉拔试验，研究了辅助件密度和加载压力对新型三维土工格栅加筋性能的影响。研究表明：3D 打印技术为新型三维土工格栅的设计与制备提供了很高的设计灵活性和生产便利性。可根据实际应用场景和需求，灵活调整新型三维土工格栅结构参数。与二维土工格栅相比，新型三维土工格栅的抗拉拔能力增强，且辅助件密度越大，拉拔力增幅越大。本研究为提高土工格栅加筋性能提供了一种新思路，后续可对辅助件进行优化设计，并探究更佳的加筋性能表征方法。

来源：产业用纺织品 2025 年第 5 期

2024/2025

中国产业用纺织品技术发展报告

2024/2025 Technology Development Report of China Industrial Textiles

第九篇 过滤分离

自吸过滤式防颗粒物呼吸器过滤效率的测定 能力验证结果分析

王杰 姜进平 赵云霞 吕敏

(北京亚分科技有限公司)

自2020年初全球疫情暴发以来,中国已经向多个国家和地区出口了包括呼吸防护用品在内的大量医疗物资,为全球应对疫情做出了重要贡献,但同时我国各级管理部门和各进口国的管理部门也对我国出口呼吸防护用品的产品质量提出了更高的要求。为了有效保障我国呼吸防护用品产品质量,提升相关检验检测机构技术能力,切实发挥检验检测对高质量发展的技术支撑作用,特开展本次能力验证,为我国相关机构呼吸防护用品检测整体水平的提高提供助力。

能力验证是指利用实验室间比对,按照预先制定的准则评价参加者的能力。参加能力验证是检验检测机构进行外部质量控制,保证检测结果准确可靠的有效手段之一。

本次能力验证旨在了解检验检测机构自吸过滤式防颗粒物呼吸器过滤效率的测定分析能力的整体水平,识别实验室间在该项目检测方面的差异,为检验检测机构检测质量控制提供有效的外部手段,提高我国相关检验检测机构自吸过滤式防颗粒物呼吸器过滤效率检测的整体水平。本项目的实施客观地反映了我国相关领域检验检测机构自吸过滤式防颗粒物呼吸器过滤效率检测能力的实际状况,可帮助各检验检测机构发现管理和技术中存在的问题,促进相关机构提高检测水平。

1 方案设计

1.1 样品设计

本次能力验证的样品计划选择日常使用和出口较多,在检测过程中较为常见的KN95型自吸过滤式防颗粒物呼吸器样品作为本次能力验证的样品。样品为白色无呼

吸阀的立体型随弃式半面罩，佩戴方式为耳挂式。样品的分装规格为 22 个/份（单个样品规格为 160mm*105mm），密封包装后作为最终的实验室样品。

1.2 样品均匀性检验和稳定性检验

样品的均匀性检验和稳定性检验均按照 GB/T 28043—2019《利用实验室间比对进行能力验证的统计方法》和 CNAS-GL003: 2018《能力验证样品均匀性和稳定性评价指南》的要求进行。

1.2.1 样品均匀性检验

样品的均匀性检验采用按照随机数表从分装好的样品中抽取 10 份样品，从每份样品中随机抽取 15 个口罩成品，均按照 GB 2626—2019《呼吸防护 自吸过滤式防颗粒物呼吸器》进行过滤效率的测试，合计 15 次；均匀性检验测试结果以单因子方差分析法进行统计，若统计结果满足 $F < F_{0.05}(9,140)$ ，则样品间无显著性差异。

参加机构的结果反馈数据回收之后，对参加者的能力验证结果进行稳健统计处理，依据 CNAS-GL003: 2018《能力验证样品均匀性和稳定性评价指南》中 $S_s \leq 0.3\sigma$ 准则对样品的均匀性进行核验。

均匀性检验结果：样品过滤效率的均匀性检验 F 值为 1.92，小于 $F_{0.05}(9|140) = 1.95$ ，且满足 $S_s \leq 0.3\sigma$ ，说明本次能力验证的样品是均匀的。本次能力验证样品的均匀性分析结果见表 1。

表 1 样品均匀性检验分析结果表

方差来源	自由度 (<i>f</i>)	平方和 (SS)	均方 (MS)	F 值	不均匀性标准偏差 (S _s)	0.3σ
样品间	9	0.66	0.073	1.92	0.05	0.41
样品内	140	5.37	0.038			

1.2.2 样品稳定性检验

样品稳定性检验主要考察储存条件对样品过滤效率的影响，计划将均匀性检验所得结果作为稳定性检验的第一次测定数据，在结果反馈后进行稳定性检验，将稳定性检验结果与均匀性检验结果进行双样本 t 检验。按照随机数表从分装好的剩余样品中抽取 3 份样品进行测试，测试过程中所依据的标准方法、所用试剂、测试条件等与均匀性测试时相同。稳定性检验采用 t 检验法评定样品的稳定性，若 $t < t_{0.05}(n_1+n_2-2)$ ，

则表明在检测周期内样品是稳定的。

参加机构的结果反馈数据回收之后,对参加者的能力验证结果进行稳健统计处理,依据 CNAS-GL003:2018《能力验证样品均匀性和稳定性评价指南》中 $|\bar{x} - \bar{y}| \leq 0.3\sigma$ 准则进行稳定性核验。

稳定性检验结果:样品的稳定性检验结果满足 $t < t_{\text{临界值}}$,且满足 $|\bar{x} - \bar{y}| \leq 0.3\sigma$,说明本次能力验证的样品在整个检测周期内是稳定的。本次能力验证样品的稳定性分析结果见表 2。

表 2 样品稳定性检验分析结果表

考察时间(周)	平均值(%)	数据个数	t 值	$t_{\text{临界值}}$	$\bar{x} - \bar{y}$	0.3σ
0	96.05	150	0.02	1.97	0.05	0.41
8	96.10	45				

2 统计设计及评价方法

本次能力验证计划按照 GB/T 28043—2019《利用实验室间比对进行能力验证的统计方法》和 CNAS-GL002:2018《能力验证结果的统计处理和评价指南》^[6]的要求,采用 Z 比分值评价各参加机构的检测能力。

将各检验检测机构反馈的检测结果,按下式计算 Z 值:

$$Z = (x - X) / \sigma$$

式中:

x——检验检测机构检测结果;

X——指定值(稳健平均值);

σ ——变动性度量值(能力评定标准差)。

本次能力验证计划以未预处理和预处理的 Z 比分值,综合评价各参加机构的检测结果,即:

当机构反馈的预处理和未预处理结果均满足 $|Z| \leq 2$ 时,结果满意;

当机构反馈的预处理和/或未预处理结果满足 $2 < |Z| < 3$ 时,结果有问题;

当机构反馈的预处理和/或未预处理结果 $|Z| \geq 3$ 时,结果不满意。

3 检测结果统计分析和评价

3.1 检测结果正态分布

将各检验检测机构的检测结果进行汇总、统计，经专业判断剔除粗大误差后，对检测结果数据进行正态分布检验，结果显示本次能力验证的检测结果呈单峰，近似正态分布（正态分布图见图 1 和图 2），适宜采用稳健统计技术进行数据处理工作。

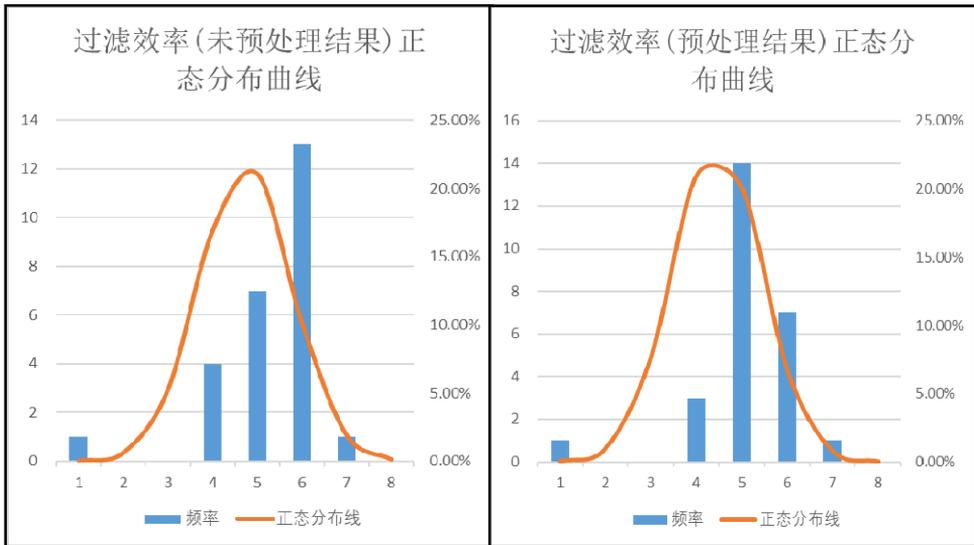


图 1 过滤效率（未预处理）结果正态分布图 图 2 过滤效率（预处理）结果正态分布图

3.2 结果统计量汇总

本次能力验证采用稳健统计技术进行统计，以稳健平均值作为指定值，以稳健标准差作为能力评定标准差，主要稳健统计量汇总表见表 3。

表 3 统计量汇总表

序号	项目	过滤效率	
		未预处理	预处理
1	反馈结果数(家)	26	26
2	统计结果数(家)	26	26
3	稳健平均值(%)	96.9	96.4
4	稳健标准差(%)	1.37	1.17
5	指定值标准不确定度 u_x (%)	0.4	0.3
6	稳健 CV (%)	1.2	1.2
7	最小值(%)	90.0	90.2
8	最大值(%)	99.1	99.1
9	极差(%)	9.1	8.9

3.3 检测结果统计分析和评价

参加本次能力验证的检验检测机构共计 26 家。其中，“未预处理”测试条件下，结果满意的有 25 家，占参加机构总数的 96.2%；不满意的有 1 家，占参加机构总数的 3.8%。“预处理”测试条件下，结果满意的有 22 家，占参加机构总数的 84.6%；有问题的有 3 家，占参加机构总数的 11.5%；不满意的有 1 家，占参加机构总数的 3.9%。

综合评价，参加本次能力验证的机构中，结果满意的有 22 家，占参加机构总数的 84.6%；有问题的有 3 家，占参加机构总数的 11.5%；不满意的有 1 家，占参加机构总数的 3.9%。检测结果统计分析汇总表见表 4，结果评价满意、有问题和不满意的机构汇总表见表 5。

表 4 结果统计分析汇总表

检测项目	测试条件	机构数量	满意机构数量	满意率(%)	有问题机构数量	占比(%)	不满意机构数量	占比(%)
过滤效率	未预处理	26	25	96.2	0	0.0	1	3.8
	预处理	26	22	84.6	3	11.5	1	3.9
	总体情况	26	22	84.6	3	11.5	1	3.9

表 5 结果评价满意、有问题和不满意的机构汇总表

检测项目	评价结果	机构代码	数量	占比 (%)
过滤效率	满意结果 ($ Z \leq 2$)	Lab3001、Lab3002、Lab3003、Lab3004、 Lab3005、Lab3006、Lab3007、Lab3011、 Lab3014、Lab3016、Lab3017、Lab3018、 Lab3020、Lab3021、Lab3022、Lab3023、 Lab3024、Lab3026、Lab3028、Lab3029、 Lab3031、Lab3034	22	84.6
	有问题结果 ($2 < Z < 3$)	Lab3019、Lab3025、Lab3027	3	11.5
	不满意结果 ($ Z \geq 3$)	Lab3030	1	3.9

本次能力验证计划也分别给出了参加机构测试结果的 Z 比分值分布图（见图 3 和图 4），以便各参加机构更直观地了解机构的评价结果。

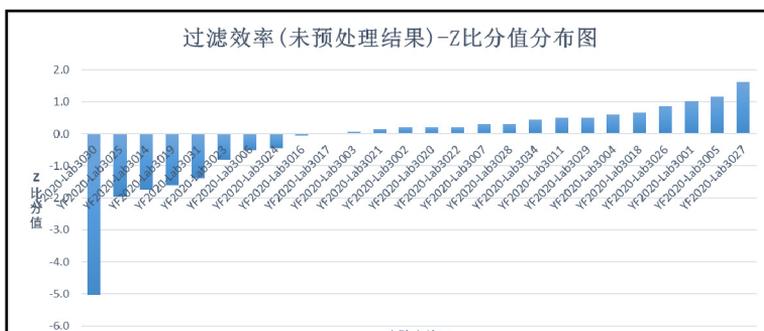


图 3 过滤效率（未预处理）结果 Z 比分值分布图



图 4 过滤效率（预处理）结果 Z 比分值图

4 技术分析

4.1 主要仪器设备

根据本次反馈的结果数据，本次能力验证参加机构所使用的仪器设备主要有过滤效率测试仪及高低温箱，其中高低温箱用于样品预处理，过滤效率测试仪用于样品测试。其中，参加机构使用的过滤效率测试仪设备的生产厂家共计 13 家，来源于国内外多个不同的生产制造商，各种不同测试设备间的差异，也是本次能力验证参加机构出现问题或不满意结果的重要影响因素之一。

4.2 设备校准情况

此次能力验证所使用的主要测试设备为过滤效率测试仪，该设备目前无检定校准规范，国内也没有校准机构可以对过滤效率的测试设备进行校准。检验检测机构普遍采取对设备内部的关键部件流量计进行期间核查的方式来校准设备，但此校准方法并不能对其他关键参数比如氯化钠气溶胶颗粒的粒径和气溶胶的浓度等进行校准，使得检验检测机构的测试结果无法满足溯源要求，这也可能是造成部分机构结果有问题或不满意的主要原因之一。

4.3 人员对标准的理解

关于过滤效率的测试，在 GB 2626-2019 标准中规定“用适当的夹具将过滤元件以气密的方式连接在检测装置上”，但是标准中并没有规定如何保证气密的具体连接方式，不同的人员不同的操作方式可能会导致检测结果出现一定的差异。

5 结论

本次能力验证制备了均匀、稳定的自吸过滤式防颗粒物呼吸器样品，参加检验检测机构按照推荐的 GB 2626—2019《呼吸防护 自吸过滤式防颗粒物呼吸器》标准方法进行了检测，大部分机构的检测结果为满意结果，满意率为 84.6%。结果有问题或不满意的机构应对照技术分析认真进行原因分析，并实施针对性纠正改进措施，以持续提升本项目检测技术水平和能力。

静电纺空气过滤纳米纤维材料研究进展

刘嘉炜 季东晓 覃小红

(东华大学纺织科技创新中心 纺织学院)

随着城市化和工业化的加速发展，空气污染已成为日益严重的环境问题，对人类健康构成了巨大威胁。除了常见的悬浮颗粒物外，新型冠状病毒、甲型流感、支原体肺炎等传染性疾病也对公共卫生安全带来了巨大挑战。传统的空气过滤技术在应对如PM1.0 或更小颗粒物时往往过滤效率低并且空气阻力大。纳米纤维非织造材料具有高孔隙率、良好的孔隙连通性和大比表面积等特性，在解决这些问题方面具有独特优势。此类材料的生产基于静电纺丝技术，能够精确控制纳米纤维的尺寸、结构和形态，所制成的纤维膜可以针对特定污染物颗粒尺寸进行有效过滤，已应用于个人防护、灰尘与有毒物质过滤、室内空气净化以及医疗环境中病毒与细菌的过滤等领域。然而，随着对于此类材料的需求不断增加，其规模化生产成为亟待解决的关键问题。本文综述了静电纺纳米纤维空气过滤材料的近期研究进展，并对规模化静电纺丝技术的理论研究进行了总结。

1 静电纺纳米纤维过滤材料制备研究

目前用于过滤领域的静电纺丝加工方式有两种，包括熔融静电纺丝法和溶液静电纺丝法。

1.1 熔融静电纺丝法

PP（聚丙烯）、PET（涤纶）等热塑性聚合物由于其容易获得并且价格低廉，在熔融静电纺方面大量运用。熔融静电纺纺丝过程中不用溶剂，使其更安全更环保。由于电压不稳定，而且聚合物熔体具有一定粘度，其产品纤维直径较溶液静电纺更大，一般为微米级。通过调整生产工艺参数，如降低熔体流量、改变熔体温度和加热周围

空气等,可以获得更细的纳米纤维。穆晓绮研究了熔融静电纺 PP 纤维的细化与成型机理,纺丝电压的增大和辅助加热温度的升高可以大幅降低纤维直径。白洋通过在 PET 中加入聚乙二醇降粘剂,调控工艺参数,增强了纤维的力学性能,并将纤维直径由初始的 11 μm 降至 4.3 μm ,膜结构孔径减小,分布变窄,在过滤领域有良好的应用前景。

1.2 溶液静电纺丝法

溶液静电纺在空气过滤领域常用的聚合物原料、特点及其应用如表 1 所示。

表 1 常用的溶液静电纺丝原料、特点及应用

聚合物原料	特点	应用
聚丙烯酸丁酯 (PAN)	良好的拉伸性能和耐热性。	制备纳米纤维膜和过滤材料。
聚乳酸 (PLA)	具有良好的生物降解性和生物相容性。	制备医用纳米纤维材料和口罩等。
聚酰胺 (PA)	具有优异的机械性能和耐磨性。	制备耐磨、高强度的静电纺纤维材料。
聚醚酮 (PEEK)	耐化学腐蚀、耐高温性能良好。	制备高温环境下的静电纺纤维材料,如空气过滤材料等。
聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)	具有良好的耐候性和光学性能。	制备透明、光学性能优异的静电纺纤维材料。
聚醚砜 (PES)	具有良好的化学稳定性和热稳定性。	制备高温、耐化学腐蚀的静电纺纤维材料,如滤网、膜材料等。
聚偏氟乙烯 (PVDF)	具有良好的耐磨性、耐化学性和耐候性,同时具有优异的电气性能和耐高温性	制备高性能的空气过滤材料,如高效过滤器和膜材料等
聚乙烯醇 (PVA)	具有良好的机械性能、耐磨性和耐化学性,同时易溶于水	适用于空气过滤领域中对湿性能要求较高的场景,如湿式过滤器等

王灵晓等将 DMAC/LiCl 作为纺丝溶液,通过工艺调节,制得了纤维平均直径 44.54nm 的形貌规整纳米纤维膜,对 0.26 μm 气凝胶颗粒的过滤效率达到 99.5%,阻力仅为 123.8Pa,并表现出较好的耐高温性和热稳定性。Cunmin Wang 等提出了一种自我增强的电话活性策略,通过超高压静电场和高倍牵伸相结合的技术方法,使静电纺 PLA 纳米纤维细化和取向,显著促进电话活性组分的形成。它使 PLA 纳米纤维膜 (NFMs) 的表面电位和过滤性能大大提高,即使在最高气流容量为 85 L/min 时,也能有效去除 PM0.3 (90.68%) 和 PM2.5 (99.82%) (图 1)。

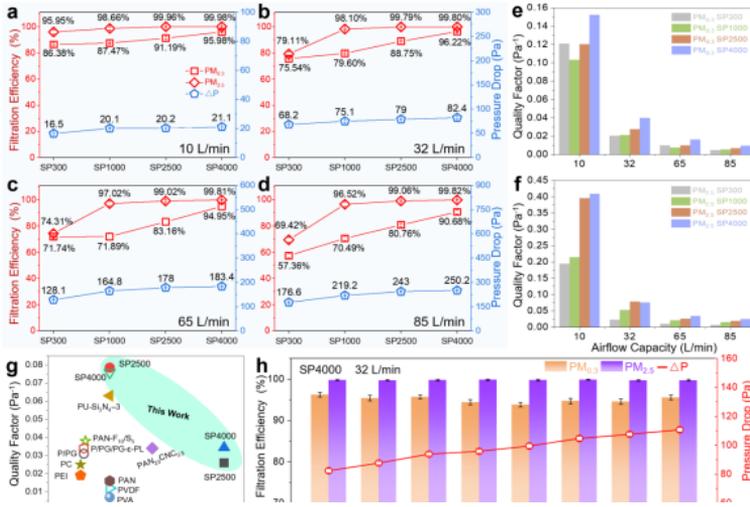


图 1 自供能 PLA 纳米纤维膜的过滤性能

对于熔融静电纺丝法，目前制备的纤维直径较大，如何进一步将纤维做得更细以提高率效是其中的关键难题。而溶液静电纺丝法制备的材料更加多样，功能调控容易，且直径更加可控，因此较多用来进行纳米纤维滤材的制备研究。开发绿色溶剂体系、进一步提高生产效率是溶剂静电纺丝面临的挑战。

2 静电纺纳米纤维滤材结构研究

一般而言，由单组分制得的纳米纤维直径分布集中，纤维膜的孔径分布较窄，这对于小于孔径的微小颗粒，纳米纤维膜无法有效过滤。研究发现，构建具有粗细混杂的两相结构或者引入大孔隙的纤维膜形成梯度结构，有利于降低最易穿透粒径，同时保持较低的过滤阻力。

2.1 粗糙表面结构研究

提升纤维的比表面积对于颗粒物的拦截至关重要，而通过掺杂特定物质，纳米纤维的表面可形成粗糙纹理，这显著增强了纳米纤维膜的颗粒物过滤效率。在这一过程中，无机驻极体的加入起到了双重作用：它们不仅增大了纤维膜的比表面积，还通过静电效应主动吸附颗粒物，从而提高了过滤性能。通常用于静电纺的颗粒包括聚四氟乙烯 (PTFE)、二氧化硅 (SiO_2)、钛酸钡 (BaTiO_3)、四氧化三铁 (Fe_3O_4)、二氧

化钛 (TiO_2)、氮化硅 (Si_3N_4)、金属有机骨架材料 (Zif-8)、勃姆石 (Boehmite)、羟基磷氟石 (HAP)、石墨烯 (GO)、碳纳米管 (CNT)、凹凸棒石 (attapulgite) 等。

万东阳将氧化还原石墨烯 (rGO) 镶嵌在聚丙烯腈纳米纤维表面和内部, 制备了高效低阻纳米膜, 滤效达 99.9%, 品质因数 0.094Pa^{-1} , 压降 70Pa, 拉伸强度 0.48~1.25MPa。同时, 将静电纺丝和热处理相结合, 制备了 TiO_2 复合碳纳米纤维膜, 实验证明, 在紫外光照射下, 该膜具有优秀的 PM 吸附能力, 远高于纯碳纳米纤维膜, 如图 2a 所示。

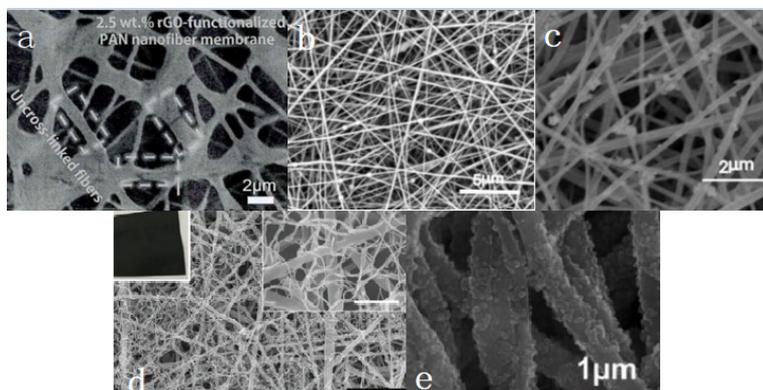


图 2 a.rGO/PAN 吸附 PM 后 SEM 图 b. PI/SiO₂ 纳米纤维膜 SEM 图 c. PI/SiO₂@ZIF-8 纳米纤维膜 SEM 图 d. NF/CNT 纳米纤维膜 SEM 图 e. F1-SAPAN 纤维膜 SEM 图

李珂将 PAA 和 SiO_2 微球共混静电纺丝, 制备出了表面有凸起结构的 PI/ SiO_2 纳米纤维膜, 如图 2b 所示, 减小了纤维直径, 增大了纤维膜的比表面积, 从而减小了空气阻力, 膜的滤效达 99.669%, 压降为 171.3Pa, 质量因子为 0.033Pa^{-1} 。随后, 在膜表面接枝开环聚合组装了金属有机骨架材料 ZIF-8, 如图 2c 所示, 4h 内对甲醛吸附量高达 41.58mg/g, 是活性炭的 34 倍, 表现出对甲醛的优秀吸附性能。

熊健等采用无针静电纺丝和喷涂策略, 生成直径 25nm 的分散良好的纳米管网络, 并将其逐层焊接到带电的纳米纤维支架上, 形成多尺度纳米结构的纳米纤维/碳纳米管 (NF/CNT) 网络, 如图 2d 所示, 制成的无纺布 PM0.3 过滤效率高达 99.994%, 阻力低至 0.05%大气压。

张浩在静电纺丝纳米纤维表面负载 SiO_2 纳米粒子, 再对纳米纤维膜进行表面改性,

构筑了一种新型的自清洁纳米纤维过滤膜。0.03mm 厚度的 F1-SAPAN 纤维膜，在 2 L/min 的气流下，对 PM1.0 的过滤效率达 99.9% 以上，压降为 366.4 Pa，并表现出良好的机械性能和热稳定性。

2.2 蜘蛛网结构研究

Zhang 等在二甲酰间苯二胺（PMIA）纺丝液中加入十二烷基三甲基溴化铵（DTAB），制得了 PMIA 纳米蜘蛛网/纳米纤维复合膜（图 3a、b）。结果表明，DTAB 的加入改变了纺丝液的表面张力和导电性，导致了纳米蜘蛛网状结构的形成，该膜在 0.365g/m² 的低克重下，对 0.3~0.5 μ m 颗粒物的过滤效率达 99.999%，滤阻为 92Pa。

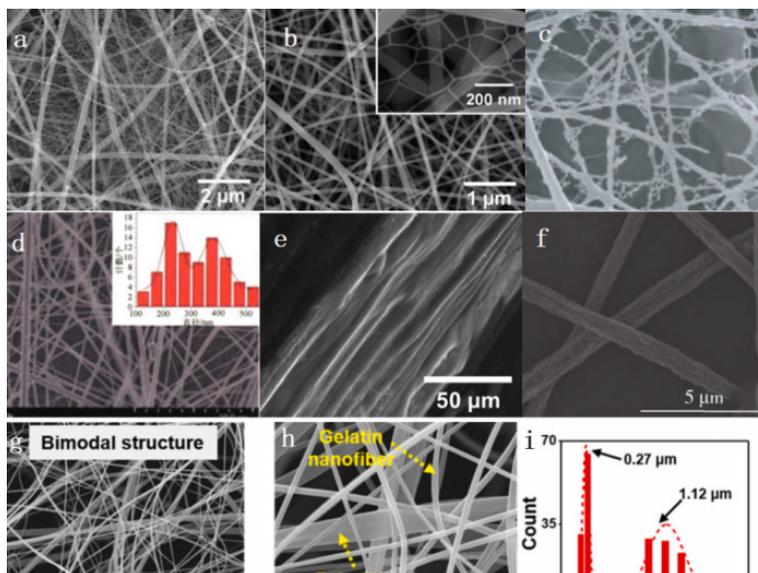


图 3 a、b. PMIA 纳米蜘蛛网/纳米纤维复合膜 SEM 图 c. 树枝状 PLA 纳米纤维膜 SEM 图 d. 纺丝时间比为 1:1 时的纤维膜 SEM 图及直径分布 e. PAI 沟槽结构纤维 SEM f. 平均直径为 1.292 μ m 的多孔 PLA 纤维 SEM 图 g、h、i. 双峰蛋白质混合物（玉米醇溶蛋白/明胶）纤维膜 SEM 图及纤维直径分布图

2.3 树枝、沟槽结构研究

程博闻等研究了不同溶剂、四丁基氯化铵（TBAC）含量以及纺丝电压对纤维结构形貌和性能的影响，通过一步法制备出树枝状 PLA 纳米纤维膜（图 3c）。在最优工

艺下, 拉伸强度可达 23MPa, 当膜厚度达到 20 μm 时, 过滤效率达 99.89%, 滤阻为 96.08Pa。

Yuezhen Hua 等受马尾松和丝瓜海绵的启发, 构建了具有仿生沟槽结构的聚酰胺酰亚胺 (PAI) 纤维 (图 3e), 并组装了半互穿聚合物网络结构。制备的超细 PAI 基纤维过滤器孔隙率高达 90.44%, 堆积密度低至 0.14 g/m³, 对 PM0.3 的去除效率为 84.24%, 空气压降 46.35Pa, 在 220 $^{\circ}\text{C}$ 下能使用较长时间。孙少阳等以 PLA、三氯甲烷 (CF) 和 N,N-二甲基甲酰胺 (DMF) 为原料, 调控混合比例、环境湿度等参数, 获得了椭圆形多孔 PLA 纳米纤维 (图 3f)。制得的膜比表面积为 24.0m²/g, 比表面光滑的 PLA 纤维制得的膜大 10 倍 (2.4m²/g), 在吸附性能方面表现优异。

2.4 多尺度粗细纤维混杂结构研究

Xiong 等制备了多尺度结构 PVDF 纤维膜, 通过优化超细纳米纤维 (SNs) 与粗纤维 (CNs) 的比例, 从而提高纤维膜空气过滤性能。宋岩等采用两种不同浓度的聚丙烯腈 (PAN) 复合纺丝, 通过调整质量分数比和纺丝时间比, 实现了不同纤维直径的精细调控, 图 3d, 制得的三维复合纳米纤维膜滤效高达 99.71%, 滤阻为 133.28Pa。Fu 等人构建了由润湿性差异驱动的双峰蛋白空气过滤材料制造策略, 通过玉米醇溶蛋白混合明胶共同纺丝, 制得的电纺纳米纤维膜, 图 3g.h.i, 在 38 Pa 的极低压降下, 对 PM0.3 的去除效率为 98.8%, 对 PM2.5 去除效率为 99.67%。

刘允璞等利用新型无针式三喷头组合 (图 4a) 制备了聚丙烯腈 (PAN)/聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 双峰直径纳米纤维膜, 图 4d, 利用梯度结构, 增加膜的过滤效率, 该膜的平均孔径 1.2 μm , 滤效达 99.93%, 滤阻仅为 124.46Pa, 品质因数为 0.0585, 一定程度上达到了高效低阻。

2.5 串珠结构研究

Jing Ge 等以 N,N-二甲基乙酰胺和碳酸二甲酯为绿色混合溶剂, 制备出带有串珠 (图 4b) 和裂纹 (图 4c) 的聚乳酸 (PLA) 纤维膜, 并通过结构设计制备了双层过滤器。裂纹纤维增加了膜的表面积, 提高了颗粒拦截效率; 串珠增加了相邻纤维之间的距离, 减少了压降, 并通过为膜内颗粒创造更曲折的运动路径来提高过滤效率。在此基础上, 设计并制备了具有孔径梯度的双层过滤膜, 在 32 L/min 的测试流速下实现了大于 98% 的过滤效率和低至 31Pa 的气流阻力。

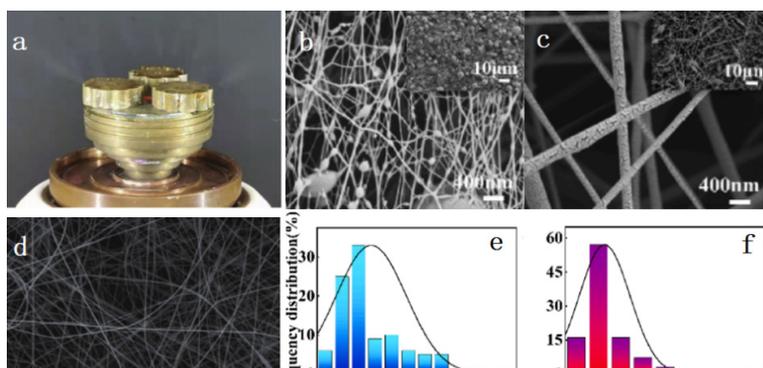


图 4 a. 新型无针式三喷头组合 d.PAN/PMMA 纳米纤维膜 SEM 图 b.e. 串珠结构纤维膜 SEM 图及纤维细度分布 c.f. 裂纹结构纤维膜 SEM 图及纤维细度分布

总的来说，通过构建不同复杂结构的纳米纤维膜，来增加比表面积，延长纤维膜内部的气流流动通道，可以有效增加颗粒物被捕捉的几率，提高过滤效率；大孔径的存在可以保证较低的滤阻。目前复杂结构纳米纤维膜的加工过程较为复杂，如何保证生产过程中的稳定高效，以及多级结构在长期或者循环使用过程中不被破坏，仍是需要研究的方向。

3 功能性静电纺纳米纤维滤材制备研究

3.1 抗菌抗病毒滤材制备研究

由于颗粒物中存在各种有机物、无机物及水分，这些给微生物的繁殖创造了有利条件，当其被纳米纤维膜拦截在表面和内部时，不及时清理会造成不良后果，纤维膜的使用寿命和效果会大幅降低，同时会造成二次污染。因此，开发具有抗菌性能的纳米纤维膜有很大研究前景。

聚芳硫醚砜 (PASS) 是由聚苯硫醚 (PPS) 进行结构改性所得，与 PPS 相比，其 T_g 可达 220°C ，热变形温度达 190°C ，具有更好的热稳定性和机械强度，Su 等研究制备了 PASS/Ag/ZnO 复合膜，该复合膜表现出出色的力学性、疏水性和抗菌性能。在风速分别为 50cm/s 和 200cm/s 时，该复合膜对 $\text{PM}_{2.5}$ 的过滤效率分别达到 99.41% 和 99.89% ，同时仅产生 42Pa 和 79Pa 的过滤压降。Victor 等将 PVDF 与钛纳米管 (TNT) 进行混合静电纺丝，制得的 PVDF/15% TNT 纳米纤维膜的细菌过滤效率达 99.88% ，

可作为用于口罩的除菌高效过滤材料。为了制备具有高效低阻空气过滤膜，Ding 等采用了静电纺丝技术结合冷冻干燥的方法，将细菌纤维素纳米纤维、 SiO_2 纳米纤维和疏水性 Si-O-Si 弹性粘合剂构建成交状结构的超柔性纳米纤维气凝胶 (CSA)。随后，通过 N-卤胺化合物二羟甲基-5,5-二甲基乙内酰胺修饰，赋予了其病原体灭活功能。Jang 等人采用静电纺丝技术在 PVDF 纤维中引入金属有机框架 (MOFs) 和 Cu_2O 纳米颗粒。MOF 是一种具有三维网络结构的微孔材料，具有良好的分散性、高比表面积和易于功能化的特点。与 CuO 以及诸如 TiO_2 、 ZnO 、 NiO 等大多数金属氧化物相比， Cu_2O 纳米颗粒具有更强的抗菌能力。将 MOFs 和 Cu_2O 引入 PVDF 纳米纤维膜中，能够高效去除空气中的颗粒物和细菌。

Ruimin Shen 等提出了小分子牵引聚合物链，阳离子促进增强射流分裂机理，首次采用一步绿色静电纺丝法制备了具有双峰结构的玉米醇溶蛋白 (zein)/壳聚糖盐酸盐 (CS)/根皮素 (PL) 全生物基纳米纤维膜。在溶液中，PL 小分子分散并与聚合物链相互作用。研究结果显示，zein/1CS/3PL 膜具有出色的空气过滤性能，其空气过滤效率达到 99.65%，压降仅为 57.7Pa，QF 达到 0.098 Pa^{-1} ，比 N95 高出 63.3%。同时，基于 PL 和 CS 的协同抗菌机制，zein/3PL/1CS 膜表现出高效的抗菌性能，对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制率均达到 99.9%。经过 30 天测试，其抑菌性能仍然较高，对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制率分别为 99.9% 和 98.1%。

Ruimin Shen 等使用了一种延迟挥发的绿色溶液体系，通过一步静电纺丝技术制备了优化结构的玉米醇溶蛋白/肉桂醛 (CMA) 复合纳米纤维膜。CMA 的添加延迟了喷嘴堵塞时间，改善了纤维形态，并提高了纤维的疏水性和抗菌性能，从而增强了膜的空气过滤稳定性。此方法一定程度上缓解了喷嘴堵塞时间，提高了制备效率，值得借鉴。

3.2 耐高温滤材制备研究

工业化的发展使得工业废气成了空气污染的主要源头之一，耐高温的高效低阻过滤器成为重要发展方向。郭朝阳等通过添加表面活性剂，制备了新型聚醚酰胺纳米纤维膜，该膜平均孔径 $2.8 \mu\text{m}$ ， $\text{PM}_{0.3}$ 过滤效率为 98.37%，并具有良好的耐高低温、耐酸碱性能，在化工厂和燃煤电厂等高温、酸性条件下具有性能优势。芳纶同样在高温防护、工业过滤等方面应用广泛，Yu 等制备了 PMIA (聚间苯二甲酰间苯二胺，间位芳纶) 过滤膜，其过滤效率均在 99.9% 左右，但其压降高达 466.6Pa。Litao 等利用静

电纺丝成功制备聚醚砜 (PES) /MOF 膜, 其直径为 $1.22\pm 0.55\mu\text{m}$, 具有优异的机械性能和高过滤效率, 所得膜 PES/MOF-0.075 表现出优异的过滤效率, 对 $\text{PM}_{0.225}\sim 0.4\mu\text{m}$ 颗粒的过滤效率超过 99.3%, 对 NaCl 颗粒的过滤压降为 57 Pa。Yutang Kang 等在 350°C 的空气中进行 PAN/PVP/ SnO_2 纳米纤维膜的热诱导环化和氧化反应。在热氧化过程中, Sn^{2+} 充当催化剂和活化剂, 有效地阻止了 PAN 纳米纤维的熔融和融合。PVP 的加入显著提升了 OPAN/ SnO_2 纳米纤维膜的力学性能。该纳米纤维膜在室温下表现出卓越的 PM 过滤性能, 对 $\text{PM}_{0.3}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的过滤效率分别达到了 99.53% 和 99.98%。

4 静电纺纳米纤维滤材规模化制备研究

随着对于此类材料的需求不断增加, 其规模化生产成为亟待解决的关键问题。Liu 等定义了描述液滴-射流形状的三个参数 (L-R 曲率、初始射流直径和过渡斜率), 并探究了这些形状参数与纤维直径之间的关系。随着形状参数的增大, 纤维直径也随之增大了, 此外, 初始射流直径与纤维直径之间的关系以及过渡斜率与纤维直径之间的关系不受施加电压和聚合物溶液浓度的影响, 但液滴-射流形状必须保持稳定。周智勇等通过有限元模拟及实验验证, 推导出了高压电场环境中喷头曲率与电场强度、边缘电荷密度的关系, 并设计出高曲率圆边碟形喷头, 增强边缘电场强度, 获得了更细的纳米纤维。Jian Xiong 等通过构建一种蘑菇状静电纺装置, 获得了高曲率的稳定环形预泰勒锥, 这些预泰勒锥可以将表面电荷均匀地控制在射流激发的位置, 通过控制 PTFE 覆盖表面的尺寸来控制泰勒锥曲率的大小。覆盖表面的纺丝液表面电荷分布均匀, 电荷密度较高, 相比于未覆盖表面的同样装置, 在同等纺丝条件下, 蘑菇状纺丝头表现出优异的浓缩电荷能力, 有效地降低了形成泰勒锥射流的临界电压, 在相同电压下, 射流数明显增多。最终制得的膜直径分布变异系数 10%, 产能为 13.7g/h, 表现优异。

SaiLing 等研究了射流拉伸控制成形纤维直径机理, 建立了通过控制摆动射流速度控制纤维直径的模型, 表达为式 (1) :

$$d_f \sim \left[\frac{Q\psi_p \left(\frac{z_f}{z_{wj}} \right)^b}{v_{wj}} \right]^{1/2} \quad (1)$$

其中, Q 为初始体积流速, v_{wj} 为纤维沿 Z 轴的速度, ψ_p 为聚合物相对于聚合物溶液总体积的体积百分比, z_f 为临界点与集热器之间的距离, 指数 b 为正, 变量 z_{wj}

为临界点以下的轴向高度。在溶液中加入 LiCl，增加了纺丝液的电导率，在纺丝过程中，大量的自由电荷转移到旋转射流的表面，导致射流在电场中的速度增加，纤维细度得以降低。制得的 0.521g/m^2 的纳米过滤膜，对小于 $0.26\mu\text{m}$ 的 NaCl 气溶胶颗粒过滤效率达 99.93%，压降低值 105.2Pa。

在此基础上权震震等建立了多曲面喷头静电纺丝理论，证明了多曲面正电极在临界电压下可以同时产生多股射流，纺丝效率大幅提升，产量是传统单针头的 10^3 倍，大幅提高了生产效率，为批量产业化制造纳米纤维提供了理论基础。

然而，面对目前极大的需求，静电纺纳米纤维的宏量制备虽已有实质性提高，但仍需进一步开发大规模制备的先进技术，明晰多射流制备过程中射流间的相互作用、控制多射流的鞭动状态对于高质量的规模化纳米纤维生产具有重要意义并极具挑战。

5 结束语

静电纺可制得高效、低阻、高强的纳米纤维过滤膜，同时可以赋予其抗菌、耐高温等特性。近年来，纤维膜特殊结构的构建与新型材料的研究为多功能空气滤材提供了新方法，但也同样有许多不足。

(1) 目前，静电纺纳米纤维膜的再生和重复使用能力有限，这可能导致较高的长期运营成本。

(2) 静电纺纳米纤维膜的机械强度通常较低，容易受到物理损伤，目前还都是与其他材料进行复合使用，限制了其在某些应用中的耐用性。

(3) 静电纺过程的规模化生产仍面临挑战，为进一步提高产量，需要对宏量制备过程中多射流间的协同控制机理进行进一步研究。

因此，需要进一步深入研究静电纺丝机理，探究电场、溶液、纤维成形之间的影响机制与构效关系，以及对纤维形态和膜结构的成型精确控制，从而开发新技术，来实现高效稳定的规模化生产。同时研发具备自清洁、抗菌和传感等功能的纳米纤维膜，以提高其在空气过滤领域的应用价值。此外，结合新型纳米材料和纤维功能改性技术，可以进一步拓展静电纺纳米纤维膜的应用领域。随着技术的不断创新和研究的深入，静电纺纳米纤维膜在空气过滤领域的潜力将得到更充分地发挥和应用。

来源：纺织学报 2024 年第 08 期

袋式除尘用聚苯硫醚纤维的研究进展与展望

何雨静^{1,2} 康建平^{1,2} 赵坤伟¹ 何勇¹ 李佳逸¹ 谭昕^{1,2}

(1. 四川省纺织科学研究院有限公司; 2. 高技术有机纤维四川省重点实验室)

袋式除尘作为高温烟气粉尘排放的有效控制技术,在工业烟气治理领域得到广泛应用。滤袋是袋式除尘器的关键核心材料,其性能好坏与设备的除尘精度、效率及使用寿命长短密切相关。就应用环境而言,滤袋通常应具备耐高温、耐化学腐蚀、阻燃等特性。聚苯硫醚(PPS)是一种分子链由苯环与硫原子对位相互交替排列而成的高分子化合物,属于特种工程材料。由 PPS 树脂加工而成的纤维材料不仅保留了原料优异的耐高温性、耐化学试剂、阻燃性、绝缘性,还具有良好的力学强度、纺织加工性,可在 190℃左右的温度下连续使用,是新型高性能纤维之一。鉴于此,由 PPS 纤维制作的织物已成为高温烟气袋式除尘的首选滤袋滤材,广泛用于燃煤锅炉厂、城市垃圾焚烧厂、火力发电厂等工业烟道气除尘。本文在总结 PPS 纤维发展历程、生产现状的基础上,重点对袋式除尘领域用 PPS 纤维的发展现状进行了归纳,并对该领域的研究前景进行展望,旨在为 PPS 纤维的研发应用提供指导性参考。

1 PPS 纤维的发展概况

1.1 国外发展概况

国外针对 PPS 纤维的研究具有较长的历史。

从 1975 年开始, Bartlesville 等就已着手开展 PPS 树脂的纺丝研究,但由于当时生产的树脂聚合度过低,并未成功纺出 PPS 纤维。1979 年,美国 Phillips 公司通过改进优化 PPS 树脂的合成方案后,率先研制出纺丝级的 PPS 树脂,并实现了其短纤维的产业化生产,商品名为 Ryton®,且在之后一段时间内一直垄断着 PPS 纤维的国际市场。直到 1985 年 Phillips 公司对 PPS 树脂生产的专利失效后,日本东丽株式会社(Toray)、

东洋纺株式会社 (Toyobo)、株式会社吴羽 (Kureha) 等企业才相继开展 PPS 纤维研发工作, 生产出名为 Procon®、Torcon® 的产品, 并逐渐建立生产厂。1993 年, Toray 株式会社在成功并购 Phillips 公司 PPS 纤维事业部后, 变成全球 PPS 纤维的主要市场来源。目前, 在全球 PPS 纤维总产量中, 日本厂商的产量占比达 80% 以上, 几乎垄断了全球市场。

1.2 国内发展概况

在我国, “十一五” 规划期间将 PPS 纤维的制备及其应用技术研究作为重点发展方向, 之后 “十二五” “十三五” 规划中亦将其作为新型特种高性能纤维进行重点研发。20 世纪 90 年代初, 四川省纺织工业研究所 (现四川省纺织科学研究院有限公司) 联合四川大学等单位率先开展 PPS 纤维研制工作。之后, 清华大学、天津纺织工业学院 (现天津工业大学) 相继开展了 PPS 纤维的研究工作。四川省纺织工业研究所于 1993 年成功纺制出单丝线密度为 6~7dtex、断裂强度为 2.8~3.5cN/dtex 的 PPS 纤维; 2005 年成功合成了单丝线密度为 2.7dtex、断裂强度为 3.4cN/dtex 的 PPS 纤维; 2006 年将生产技术转让给江苏瑞泰科技有限公司, 并依此建立生产线, 成功实现我国 PPS 纤维的量产。

尽管近年来我国 PPS 树脂产能扩大, 且价格较进口便宜, 但因国产 PPS 树脂存在批次稳定性差、粒度不均等问题, 与进口产品相比在品质上依然存在一定差距, 因此用于生产 PPS 纤维的国产 PPS 树脂不足总产量的 1/3。当前, 我国仍多采用进口 Torcon®、Procon®、Fortron® 等 PPS 树脂来制备 PPS 纤维, 产能约为 22000t/a, 供应商以四川安费尔高分子材料科技有限公司、浙江新和成股份有限公司、苏州金泉新材料股份有限公司等企业为主。表 1 示出国内外 PPS 纤维的主要生产厂家和生产规模。

表 1 国内外 PPS 纤维主要生产厂家及生产规模

生产厂家	生产规模/ (t·a ⁻¹)	纤维种类
日本东丽株式会社	4000	PPS 短纤、长丝
日本东洋纺株式会社	3000	PPS 短纤、长丝、 异形纤维
美国纤维创新技术公司	1000	PPS 短纤
四川安费尔高分子材料科技有限公司	7500	PPS 短纤
苏州金泉新材料股份有限公司	3000	纳米复合 PPS 短纤
浙江新和成股份有限公司	5000	PPS 短纤
敦煌西域特种新材股份有限公司	1500	PPS 短纤

2 袋式除尘用 PPS 纤维发展现状

2012 年,我国提高了燃煤烟尘排放标准,将其从 2003 年 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 限值下调至现行 $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。重点地区或行业要求为 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$,在某些区域甚至需达到更低的超低排放或超净排放标准,间接对袋式除尘用 PPS 纤维的综合性能提出了更高要求。值得一提的是,在化纤工业“十三五”发展指导意见中亦明确指出,提高制品抗氧化功能,加快细旦高强纤维的量产技术研究,提升滤料产品使用寿命、抗阻力、除尘精度和易清灰处理等,是高性能纤维的重要发展方向。为更好地适用于除尘的实际应用需求,目前 PPS 纤维产品主要朝差别化、功能化方向发展,如细化/超细化、异形化、抗氧化、催化等特性研究开发及应用方面。

2.1 细化/超细 PPS 纤维

PPS 纤维量产的主流工艺为熔体纺丝法,其制得的纤维主要有长丝和短纤两种。市场上的 PPS 纤维产品以线密度为 2.2dtex 左右的短纤为主,以该产品制备的过滤毡仅对烟尘中 PM_{10} 以上的颗粒物具有优异的拦截性能,无法满足对更细颗粒物的过滤需求,更无法达到超净排放标准。为提升滤料/织物的除尘精度和效率,PPS 纤维正逐渐向细化、超细化方向发展。PPS 超细纤维是指单丝纤维直径小于 $5\mu\text{m}$ (单纤维线密度为 $0.55\sim 0.90\text{dtex}$) 的纤维。相较于常规 PPS 纤维,PPS 超细纤维具有优异的柔韧性、更高的比表面积、强吸附性和特殊的毛细作用。更为重要的是,PPS 超细纤维制备的滤材其纤维间排列更为紧密,因而可捕获更多的粉尘颗粒,从而有效提升滤料的除尘精度和效率。

据有关报道,TORAY 株式会社已公开销售线密度为 1.0dtex 的细旦 PPS 纤维产品。在我国,四川安费尔高分子材料科技有限公司生产的 PPS 纤维的线密度可达 1.33dtex ,苏州金泉新材料股份有限公司可达 1.19dtex ,但目前均处于小试阶段,并未进行产业化生产。我国针对 PPS 超细纤维制备技术和产品的研究报道较少,其研究机构主要有四川省纺织科学研究院有限公司、武汉纺织大学、天津工业大学、东华大学等,制备方法以熔喷法(见图 1a)、海岛熔体纺丝法、熔体静电纺丝法(见图 1b)为主。

PPS 树脂熔喷纺丝原理如图 1a 所示。首先,PPS 树脂在螺杆剪切应力和加热作用下熔融成熔体,熔体通过计量泵到达熔喷模头从而被挤压喷出形成细流,然后细流被喷丝板两侧高压热空气牵伸成超细纤维,继而被收集在接收网帘上,形成熔喷布。国

内外对熔喷纺丝技术制备 PPS 超细纤维均有研究，但产业化生产尚属空白。Auerbach 等的研究表明亚磷酸盐、亚磷酸化合物的加入可提高 PPS 树脂的可熔喷纺丝性。柯勤飞等研究了不同品牌 PPS 树脂的熔喷纺丝可行性，发现单一 PPS 树脂可熔喷性差，而适量加入聚丙烯（PP）可有效改善 PPS 的熔体流动性和可熔喷性。余艳等和胡宝继等均采用熔喷纺丝法制得了纤维直径为 2~6 μm 的超细 PPS 纤维。熊思维等研究了熔喷工艺对超细纤维形成的影响，结果表明在最适工艺下制得的 PPS 纤维具有良好的蓬松感，其单丝纤维直径主要集中在 2 μm 左右，为后续熔喷生产超细 PPS 纤维提供了技术指导。

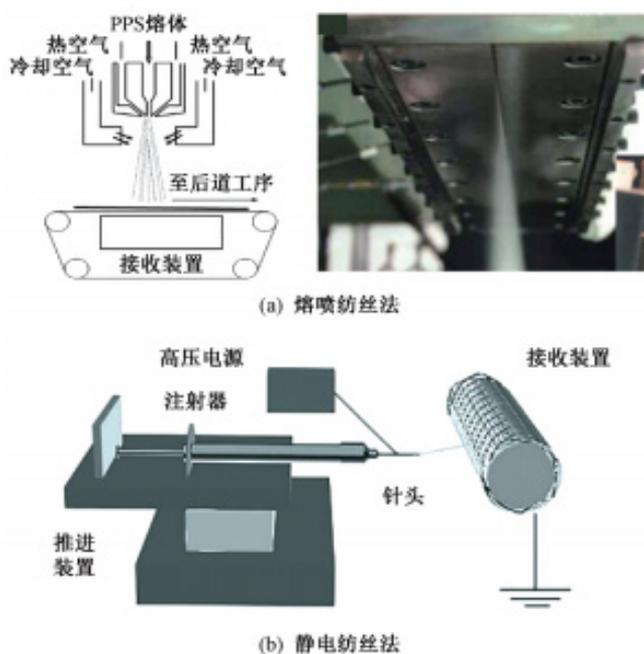


图 1 PPS 超细纤维制备工艺流程

熔体静电纺丝法是将 PPS 树脂先进行高温熔融，然后熔体被高压静电力极度拉伸，并于拉伸过程中固化成微纳米纤维，如图 1b 所示。Fan 等通过自制静电纺丝装置进行纺丝，成功制备出了平均直径低于 8 μm 的 PPS 超细纤维（见图 2）。

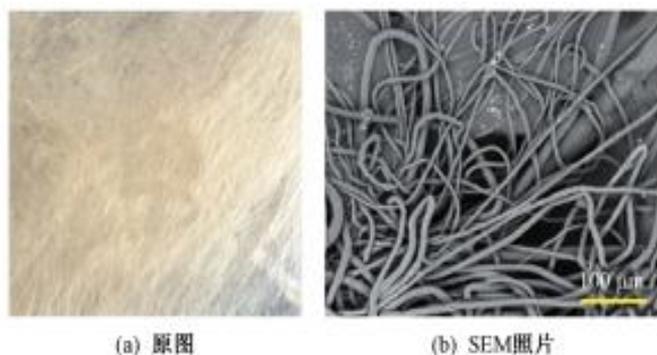


图2 静电纺丝 PPS 超细纤维样品原图与 SEM 照片

An 等通过加入 PP 改善 PPS 树脂流动性后静电纺丝得到单丝直径约为 $4.0\mu\text{m}$ 的超细纤维。熔体静电纺丝法虽是一种新兴的 PPS 超细纤维制备技术，但目前市场上对其成套生产工艺、应用技术等的研究还不够深入与成熟，距离实际应用有较大差距，且该方法的产率很低，难以进行批量生产。

海岛熔体纺丝法是将 PPS 树脂与另一种热力不相容的树脂按一定比例混合后纺丝成双组分纤维，然后再溶解去除海相，保留 PPS 岛成分来制备超细纤维的方法。马文娟等和万艳霞等分别以聚酰胺 6 (PA6)、PP 为海相，PPS 为岛相，通过共混熔融纺丝后去除海相得到了纳米尺度的 PPS 超细纤维（见图 3）。海岛熔体纺丝制备 PPS 超细纤维时需要关注的是，为制得超细 PPS 纤维，必须采用大量化学溶剂去除“海”相，由此带来溶剂回收问题，增加了生产成本。此外，该工艺流程较长，对设备要求高，导致其在市场上缺乏竞争力。

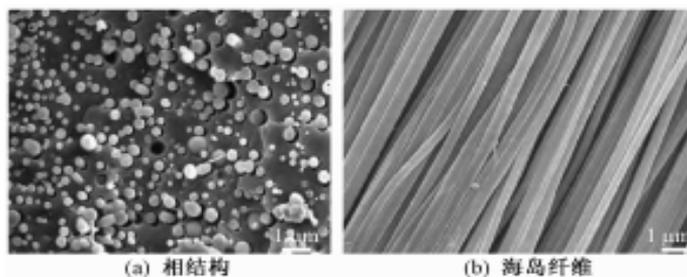


图3 PPS/PP 共混纤维相结构和海岛纤维扫描电镜照片

对比 3 种 PPS 超细纤维制备方法，熔喷法因具有比熔融静电纺丝和海岛熔体纺丝法更大的产量、更短的工艺流程、更低的成本等优势而受到广泛关注，成为目前超细 PPS 纤维产业化生产的主要方式；但 PPS 熔体黏度较高、流动性较差，导致熔喷难度较大，且熔喷过程中 PPS 可能会因长时间高温加热产生氧化交联和炭化，并在喷丝板处形成柱头丝，进而堵塞孔道，造成纤维产量降低、质量变差，因此，用此法生产 PPS 超细纤维时需不断优化改进工艺设备和严格控制各项工艺参数。

2.2 异形 PPS 纤维

纤维形状亦是其用作高效滤材的重点考虑因素。异形 PPS 纤维作为差别化纤维发展的一种，近年来已成为国内外的主要研究方向之一。与常规圆形 PPS 纤维相比，相同线密度下的异形纤维具有更高的比表面积，且纤维间堆砌密度更低，形成的孔结构更多、更小，对烟尘气流流线的改变程度更为剧烈。异形 PPS 纤维滤材通常表现出比圆形纤维滤材更高的过滤效率。郭婷婷等通过滤料动、静态过滤试验发现，相比常规 PPS 纤维，当采用三叶形 PPS 纤维作为滤料内层时，可以有效增大滤料对细颗粒物的过滤效率。Popovici 对三叶形 PPS 纤维滤袋在炸药公司燃煤锅炉除尘的实际应用研究中也证明了这一点。

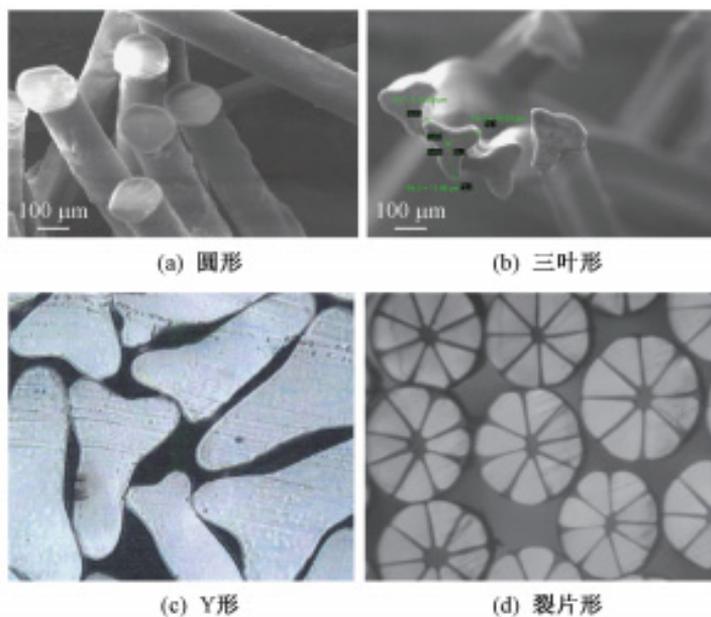


图 4 不同异形 PPS 纤维截面的扫描电镜照片

现阶段研发出的异形化 PPS 纤维虽有中空形、三叶形（图 4b）、Y 形（图 4c）、裂片形（见图 4d）等 4 种，但仅有三叶形 PPS 纤维被生产销售和应用，且其供应厂家只有日本 Toyobo 株式会社，产品名为 Procon®。近年来，中国纺织科学研究院有限公司联合四川省纺织科学研究院有限公司、武汉纺织大学等深入开展对异形截面喷丝板的开发利用及纺丝工艺对异性 PPS 纤维成形影响的研究，但我国对异形 PPS 纤维的生产技术依然尚不成熟。目前，我国市场上销售的 PPS 滤料所用纤维也主要以圆形为主，这种形状决定了该产品在清灰、捕尘效果、使用寿命等方面具有一定的局限性。

2.3 功能化 PPS 纤维

2.3.1 抗氧化 PPS 纤维

PPS 纤维虽是当前高温烟气除尘领域的主导过滤材料，但抗氧化性差的缺点限制了其实际应用。PPS 的苯环、硫原子以交替的方式排列，其分子主链上的 C—S 键在高温强氧化条件下易断裂并发生交联，从而使纤维强度下降、颜色和脆性加深（见图 5a），严重时还会使针刺毡出现纤维断骨、纤维网破碎而脱离基布（见图 5b），导致使用寿命缩短。据文献报道，PPS 纤维及其制品在高温条件下仅适用于在含氧量低于 15% 的工况下。然而 PPS 纤维过滤材料实际应用的燃煤锅炉、垃圾焚烧、火力发电等场所，其烟气具有工作温度高、含氧量高、富含氧化性物质（氮氧化物 NO_x 、硫氧化物 SO_x 、碳氧化物 CO_x 等）的特征，易引起其氧化损坏。因此，抗氧化改性是当前 PPS 纤维发展的一个重要方向。

针对 PPS 纤维抗氧化改性的方式可归为 2 类。第 1 类是表面涂覆法，即将有机抗氧化剂（受阻酚类、三级胺、三级磷、亚磷酸酯型等）、纳米粒子（石墨烯、炭黑、蒙脱土、 TiO_2 、 SiO_2 等）或高性能树脂中的一种或多种配制成表面整理液，通过浸渍或喷涂方式在 PPS 纤维或其过滤制品表面形成保护膜以提升抗氧化性。白明琪等通过浸渍方式在 PPS 非织造布表面形成聚苯并噁嗪保护膜，发现形成的保护层不仅可提升产品的抗氧化能力，还可赋予其良好疏水性，减少烟气处理过程中水汽和酸性气体对 PPS 纤维的损害。陈新拓等的研究表明，利用抗氧化剂、成膜剂、无机粒子组成的整理剂涂覆 PPS 纤维非织造布后，其在富含强氧化气体条件下的使用时长可得到有效延长。

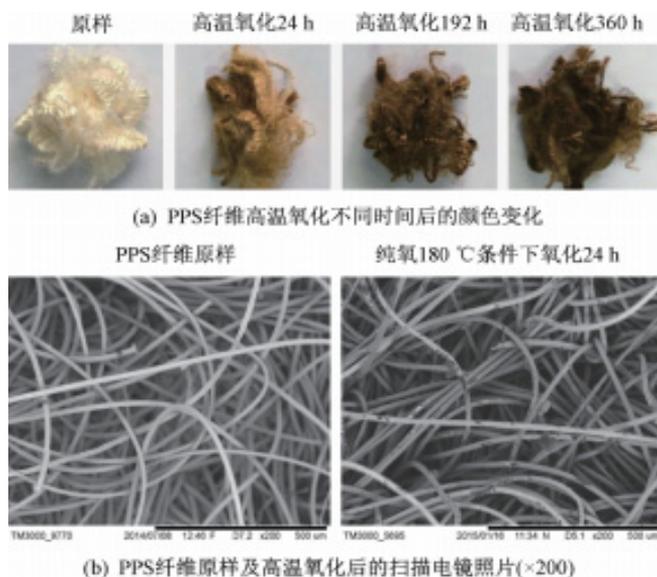


图5 PPS纤维高温氧化不同时间后的颜色变化与结构变化

第2类是直接添加法，即将有机抗氧化剂或纳米粒子或二者混合物直接与PPS树脂熔融共混后再纺丝，以实现PPS纤维抗氧化能力提升的方法。朱杰等、侯庆华等均研究了有机抗氧化剂对PPS纤维耐氧化性的影响。结果表明，由亚磷酸酯类、受阻酚类和硫代丙酸酯类组成的复合抗氧化剂明显增强了PPS纤维的高温断裂强度保持率；相比于未改性PPS纤维，抗氧剂AO1179或AO110的加入使PPS单丝纤维的抗氧化性增强。连丹丹等将纳米 TiO_2 - SiO_2 颗粒与PPS树脂熔融共混后纺丝制备PPS/ TiO_2 - SiO_2 纤维，研究结果表明PPS/ TiO_2 - SiO_2 纤维的氧化诱导温度比纯PPS纤维的升高了 $10.7\sim 13.1^\circ\text{C}$ ，抗氧化性能得到一定的改善。

2种抗氧化改性法虽均可提高PPS纤维的抗氧化能力，但改性过程中仍存在的问题。采用表面涂覆时，易出现涂层在PPS纤维表面成膜不均匀、涂层破损剥离的问题。直接添加法存在小分子抗氧化剂在熔融纺丝高温加工过程和高温烟气除尘中易分解和迁移析出、纳米颗粒的团聚倾向导致的分散不均问题，会在一定程度上影响PPS的可纺性和纤维制品的综合性能。将抗氧化剂和纳米粒子仅通过物理结合的方式加入到PPS树脂中，依然会存在单独添加时所产生的问题。通过分子组装方式将抗氧化剂接枝到纳米粒子上，再对PPS纤维进行改性制备抗氧化过滤材料，不仅可避免抗氧化剂在高温条件下过早解析析出，还可提高纳米粒子的分散性，同时更好发挥二者在抗

氧化性增强上的协同效应，这将成为当前抗氧化 PPS 纤维研究的一个重要发展方向，具备一定的现实意义。

2.3.2 具有催化特性的 PPS 纤维

燃煤锅炉、火力发电、垃圾焚烧等烟气中除有大量粉尘颗粒外，还含有 NO_x 、 SO_x 、 CO_x 有害气体，除尘后直接排放依然会引起严重的空气污染，需除尘后再处理才能排放。目前，市场上运用的烟气净化系统对除尘、 NO_x 、 SO_x 等都有独立的处理工序。这种情况下的烟气净化系统设备投资较大、工艺运行成本较高，导致多数企业无法承担。在袋式除尘过滤织物上负载催化剂实现除尘与有害气体一体化处理，是解决上述问题的有效途径，亦是过滤材料发展的新方向，催生了具备催化特性的 PPS 纤维及其制品的诞生。

目前，将锰氧化物 (MnO_2 、 Mn_2O_3)、铈氧化物 (CeO_2) 等材料负载在 PPS 纤维及其制品上是制备催化特性 PPS 纤维的最常用方法。Ju 等将 MnO_2 负载在 PPS 针刺织物上，制得了具有催化脱硝性能的过滤材料。周蓉课题组将 $\text{MnO}_2/\text{CeO}_2$ 催化剂负载在 PPS 针刺布上制得的滤材表现出更高过滤效率（高于 80%）的同时，还表现出良好的催化脱硝性能（高达 92.99%）。近年来，刘禹豪等公布了具有催化特性的 PPS 纤维的一种新制备方法，其将 PPS 树脂与金属有机框架（MOFs）基催化剂熔融混合后再熔喷成纤，催化剂可充分分散在纤维表面，进一步增大了其与烟气的接触面积，提高了催化性能。

具有催化特性的 PPS 纤维制备及其应用过程中需要关注以下 2 点：第一，催化剂的活性与使用环境密切相关。燃煤锅炉烟气具备高温、高灰尘、高硫等特征，易引起 PPS 纤维表面的催化剂中毒失活和磨损；第二，负载催化剂在提升 PPS 针刺毡过滤效率和脱硝效率的同时，会导致针刺毡透气性下降，过滤阻力提升，不利于实际应用，因此，厘清不同特征的燃煤锅炉烟气对催化特性 PPS 纤维应用效能的影响，以及找到催化剂负载量和过滤阻力的平衡点对实际应用具有重要的意义。目前催化特性 PPS 纤维的研究还处在实验室研究阶段，并未形成产业化生产进行推广应用。

3 结束语

聚苯硫醚（PPS）纤维作为特种功能型纤维材料，其性价比较高，是目前最主要的适用于高温烟气袋式除尘的过滤材料，其发展和应用潜力巨大。超低/净大气排放标

准的实施与 PM2.5 环保政策的强制推出，高性能、长使用寿命，以及差别化、多功能化的应用需求，对 PPS 纤维滤材提出了更高要求。加快我国细化/超细旦化、异形化、抗氧化、催化等差别化功能的 PPS 纤维产品研发及产业化生产，不仅是市场应用的迫切需要，更符合“十四五”时期高性能纤维高质量发展的要求。针对差别化功能 PPS 纤维的成套生产技术的研究，我国起步较晚，基础研究跟进不足、生产工艺还不够完善、产品稳定性欠佳，因此，要实现该类 PPS 纤维产品的自主生产，亟需企业、高校、科研院所对基础原料、关键设备、生产工艺等方面进行联合攻关。

来源：纺织学报 2024 年第 10 期

一种耐腐蚀耐冲刷高精度复合滤料的性能探究及应用

徐彪

(江苏奥凯环境技术有限公司)

近年来，一系列超低排放标准的实施与行业升级改造，使得我国大气污染治理取得突破性进展，尤其是燃煤电厂和钢铁行业，已建成世界规模最大的清洁煤电供应体系和全球最大的钢铁清洁生产体系。

当前，钢铁行业超低排放改造主要工程已接近尾声，但部分重点工序的超低排放改造仍然面临巨大的挑战。如涉及烧结机和焦炉等设备的脱硫脱硝除尘技术、排放治理、清洁运输改造等，仍然存在一系列问题，其治理效果直接影响整个行业成效。根据国务院印发的《空气质量持续改善行动计划》设定的目标，至2025年，全国需有八成钢铁产能完成超低排放改造，而在重点区域，钢铁行业需全面实现超低排放。2024年1月，生态环境部等部委进一步发布《关于推进实施焦化行业超低排放的意见》，明确了焦化行业的超低排放改造新目标。

为达成超低排放新目标，除了要实施产业结构优化、精细化管理等措施外，还要做好协同减污降碳的技术储备工作。作为焦化减污的重要利器，常规的过滤材料如玻纤复合毡、聚四氟乙烯（PTFE）针刺毡覆膜等，大多存在使用寿命短、不耐粉尘冲刷、环保排放不达标等问题。尤其是玻纤复合毡产品，虽强度高，耐高温性能良好，但其易脆断，耐折性能差，因而应用受限。加之玻纤复合毡产品质量良莠不齐，而工况中大多含有磨琢性粉尘及腐蚀性烟气，导致玻纤复合毡的应用效果差；为提升玻纤复合毡的产品质量和使用寿命，T/CAEPI21—2019《袋式除尘用滤料技术要求》对玻纤复合毡提出耐折次数 ≥ 15000 次，且滤料经向和纬向迎尘侧毡层与基布间的剥离强度 $\geq 25N$ 的要求。PTFE针刺毡覆膜产品虽耐腐蚀性好，但在频繁喷吹、磨琢性粉尘、高风速和含有油性黏附性粉尘的工况下，很容易破损或因堵塞而失效，导致滤料过滤效率下降，使用寿命缩短，故其适合无磨琢性粉尘、过滤风速较低的工况。故亟需开发一种耐高

温、耐冲刷、耐腐蚀且使用寿命长的过滤材料，满足焦化行业超低排放发展需求。

1 滤料关键性能探究

优选性能稳定、过滤精度高的 PTFE 纤维作为滤料主体材料，辅以高温氧化改性得到的聚苯硫醚（PPS）纤维，即 PPSO 纤维（线密度为 1.11dtex），采用精细预混梯度复合成毡技术，制备能够有效去除 PM_{2.5} 等微细粉尘的、具有高过滤精度和高效拦截能力的耐腐蚀耐冲刷高精度复合滤料（后文简称“高精度复合滤料”）。其中，耐高温 PPSO 纤维主要是通过对 PPS 纤维进行氧化改性处理得到的，目的是提高纤维的耐温性及耐氧化性能，同时保持耐化学腐蚀性。氧化改性处理可以将传统 PPS 纤维的耐温性提高至 300℃，抗氧化、耐腐蚀强度保持率由 79.8%提升至 138.1%。预期将 PTFE 与 PPSO 纤维共混后，能够提高复合滤料的整体强力和耐磨性，实现无需通过表面覆膜处理，即可达到超低排放的过滤效果，打破覆膜产品目前存在的局限性。

1.1 PPSO 纤维长期耐温性评估

连丹丹测试了抗氧增强 PPS 纤维高温氧化改性处理后所得 PPSO 纤维的强力保持率，结果发现，PPSO 纤维在 230℃下经 96h 高温氧化后，其强力保持率仍大于 90%。实际使用工况下，需确保纤维具有长期耐高温性能，故本文对 PPSO 耐高温纤维进行长期耐温性测试。

将 PPSO 纤维放入烘箱内，设置温度为 230℃，测试纤维在高温下分别放置 0、1、7、30、60 和 90d 后的单纤强度及强度保持率，结果见表 1。从表 1 可以看出，在 230℃高温下放置 90d 后，PPSO 纤维的单纤强度保持率仍大于 90%，表明其长期耐温性稳定，可以在约 230℃的高温环境中长期使用。

1.2 物理性能

按照 GB/T6719—2009《袋式除尘器技术要求》，对制备的高精度复合滤料与常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料进行物理性能测试与对比，结果见表 2。由表 2 可以看出，与常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料相比，高精度复合滤料的面密度相对较低，制备成本相应下降，与此同时，滤料整体断裂强力有所提高，透气量相比常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料增大了约 4.8 倍，满足国标中对其物理性能的要求。通常情况下，材料的透气量越大，表明其对空气的通透能力越强，对空气的过滤阻力越低。据此可推测，高精度复合滤

料的过滤阻力低于常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料。

表 1 PPSO 纤维长期耐温性评估

指标	时间/d					
	0	1	7	30	60	90
单纤强度/(cN·dtex ⁻¹)	2.81	2.74	2.70	2.67	2.53	2.55
强度保持率/%	—	98.93	97.51	96.09	93.59	94.31

表 2 2 种滤料的物理性能对比

测试指标		高精度复合滤料	常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料
面密度/(g·m ⁻²)		650	800
厚度/mm		2.2	1.2
透气量/(m ³ ·m ⁻² ·min ⁻¹)		16.8	3.5
断裂强力/N	经向	935	877
	纬向	1180	968
断裂伸长率/%	经向	<10	<10
	纬向	<20	<20

1.3 耐温性能

GB/T6719—2009 中第 9.7 节对滤料耐温要求为极限瞬间温度下加热处理 100min 后, 滤料的强力保持率≥95%。本文为测试高精度复合滤料的耐极端高温(260℃)性能, 将耐温处理时间延长至 7d, 对制备的高精度复合滤料与常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料进行耐温性能测试与对比, 结果如图 1 所示。由图 1 可以看出, 在 260℃高温下处理 7d 后, 两种滤料的耐温性能均满足国标要求, 其中, 高精度复合滤料的纬向强力保持率更高, 其强力甚至超过高温处理前的试样。这主要是因为滤料纬向强力主要表现为纤维间的抱合, 高温条件下的热交联效应能够促使滤料的强力上升, 但当温度超出一定值时, 滤料的强力则会下降。温度是烟气过滤的重要影响参数之一。若长期高温工作环境下纤维的耐温性不足, 则滤料的强力会逐渐下降, 甚至会变硬、不耐折, 导致滤料耐磨性下降, 使用寿命缩短。

同时, 根据前期对 PPSO 耐高温纤维的耐温性评估可知, 其能够在约 230℃的高温环境中长期使用。结合 PTFE 纤维能够长期耐受 240℃的高温可知, 本文制备的高精度复合滤料能够长期耐受 230℃及以上高温, 其瞬间耐温值达 260℃。

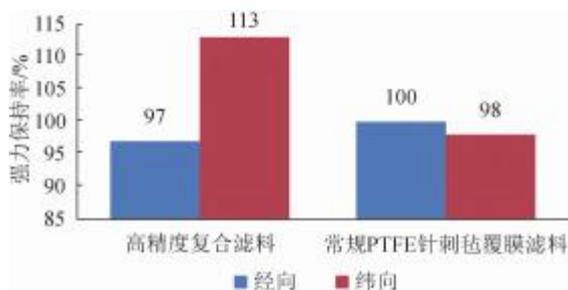


图 1 2 种滤料高温热处理 7d 后的强力保持率对比

1.4 耐磨性

经多次现场勘查发现，滤袋失效的主要原因之一为含尘气流的过度冲刷或异常碰撞磨损。PTFE 覆膜滤料难以承受磨琢性及高速含尘气流的冲刷。在此类工况下使用时，PTFE 覆膜滤料表面覆膜层易因冲刷破损而失效，导致除尘器粉尘排放量超标。

膜材料不耐磨损，故本文将高精度复合滤料与 PTFE 针刺毡不覆膜滤料进行耐磨性能测试与对比，以验证高精度复合滤料的耐磨性能是否有所提高。采用马丁代尔耐磨仪，参照 GB/T21196.2—2007《纺织品马丁代尔法织物耐磨性测定第 2 部分：试样破损的测定》测试 2 种滤料的耐磨性能。在名义压力为 12kPa、羊毛标准磨料的试验条件下进行测试，观察试样的破损情况。试验结果显示，在相同试验条件下摩擦 3.6 万次后，PTFE 针刺毡不覆膜滤料基布已基本磨烂，而高精度复合滤料在摩擦 5.5 万次后才裸露出基布，即高精度复合滤料的耐磨性相比 PTFE 针刺毡不覆膜滤料提升 50%以上。且相对于耐磨性，高精度复合滤料的耐粉尘冲刷性能更优。而对于常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料，在相同试验条件下仅摩擦 10 次，膜已发生破损，工况应用时需合理选择。

1.5 耐化学腐蚀性

根据 GB/T6719—2009 中第 9.8.2 节的考核要求及附录 D 滤料耐腐蚀性检测方法，将高精度复合滤料与常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料分别浸泡在酸性溶液（85℃，质量分数为 60%的 H₂SO₄溶液）及碱性溶液（常温，质量分数为 40%的 NaOH 溶液）中，浸泡时间由标准要求的 24h 提高至 7d，以检验两者的长期耐化学腐蚀性能。测试酸碱溶液浸泡前后 2 种滤料试样的强力，计算其强力保持率，以表征试样的耐化学腐蚀性，测试结果见表 3。从表 3 可以看出，高精度复合滤料在酸碱溶液中浸泡 7d 后的经纬向

强力保持率均 $\geq 95\%$ ，其耐化学腐蚀性与常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料相比差异不大，2 种滤料均能够应对高腐蚀性的工况。纤维浸泡在一定程度的酸碱性溶液中会发生损伤、分子链断裂及取代反应等状况。PTFE 纤维优良的耐化学性已被证实，改性 PPS 纤维的耐酸性与 PTFE 纤维类似，但耐碱性相对较差，这也是高精度复合滤料在碱性溶液中浸泡 7d 后耐碱性略差的原因。将 2 种纤维混合使用，能够提升复合滤料的整体耐化学腐蚀性能。若滤料用纤维的耐化学腐蚀性差，则在含酸碱性液体或气体工况下，滤料会出现强力衰减甚至失效的情况。

表 3 2 种滤料的耐化学腐蚀性对比

测试指标		酸处理		碱处理	
		高精度复合滤料	常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料	高精度复合滤料	常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料
强力保持率%	经向	106	103	101	103
	纬向	102	101	97	100

1.6 动态过滤性能

为分析高精度复合滤料的过滤性能，对常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料与高精度复合滤料进行滤料动态过滤性能测试。采用 VDI3926-1：2004 测试标准，选用中位粒径为 $4.5\mu\text{m}$ 的氧化铝粉尘，在 1 个标准大气压下进行测试。设定入口粉尘质量浓度为 $5\text{g}/\text{m}^3$ 、过滤风速为 $2.0\text{m}/\text{min}$ 、喷吹压力为 0.5MPa 、清灰阻力为 1000Pa 、脉冲喷吹时间为 50ms 。在滤料的清灰阻力达 1000Pa 时进行初期清灰，清灰次数为 30，记为 F30；然后，对滤料进行 5000 次喷吹老化处理，经老化处理后滤料的清灰阻力达 1000Pa 时，再进行 30 次清灰，记为 L30。2 种滤料的动态过滤性能测试结果如表 4 所示。其中，循环时间是指重复 30 次清灰累计所用时间，循环时间越长，滤阻越低，达到 1000Pa 清灰阻力的时间越长；出口粉尘质量浓度是指滤料稳定后粉尘穿透滤料的质量浓度，该值越低，滤料的过滤效率越高。

由表 4 可以看出，常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料的压差（过滤阻力）整体高于高精度复合滤料，其出口粉尘质量浓度低，但经老化后，常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料的出口粉尘质量浓度相对初期大幅增加，推测是由于膜老化后发生轻微破损导致的。而高精度复合滤料老化后表面形成过滤粉尘层，确保了出口粉尘质量浓度的稳定，其压差低。在实际工况下，滤料运行压差低，有利于降低风机能耗。

表 4 2 种滤料动态过滤性能对比 (过滤风速为 2.0m/min)

指标		高精度复合滤料	常规 PTFE 针刺毡 覆膜滤料
初期初始压差/Pa		23	194
循环时间/s		12195	10513
F30	压差/Pa	48	238
	出口粉尘质量浓度/ (mg·m ⁻³)	0.90	0.01
过滤效率/%		99.9820	99.9999
循环时间/s			
		5380	8423
L30	压差/Pa	243	365
	出口粉尘质量浓度/ (mg·m ⁻³)	0.15	0.11
过滤效率/%		99.9970	99.9979

同时由表 4 还可以看出,无论是高精度复合滤料还是常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料,其 L30 出口粉尘质量浓度均 $<0.2\text{mg}/\text{m}^3$,根据 VDI3926-1:2004 的评判标准,同时结合大量的应用案例可得出,在 1.0m/min 的表现过滤风速条件下,2 种滤料均可实现出口粉尘质量浓度为 $5\sim 10\text{mg}/\text{m}^3$ 的超低排放效果。

为论证常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料经 VDI 过滤性能测试后发生轻微破损,导致出口粉尘质量浓度上升的问题,同时验证高精度复合滤料及 PTFE 不覆膜滤料的耐高风速变化情况,将 VDI 设备的过滤风速由原来的 2.0m/min 调整为 2.4m/min,即将过滤风速调整为原测试值的 1.2 倍,在其他测试参数不变的情况下,测试 3 种滤料的动态过滤性能,结果见表 5 所示。VDI 过滤性能测试后常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料的扫描电子显微镜 (SEM) 图如图 2 所示。

表 5 3 种滤料动态过滤性能对比 (过滤风速为 2.4m/min)

	指标	高精度复合滤料	常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料	PTFE 不覆膜滤料
初期	初始压差/Pa	40	237	49
F30	循环时间/s	6129	2733	5326
	压差/Pa	93	389	139
	出口粉尘质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	0.92	0.06	1.90
	过滤效率/%	99.9884	99.9988	99.9620
L30	循环时间/s	2330	2597	605
	压差/Pa	410	494	678
	出口粉尘质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	0.40	0.70	3.47
	过滤效率/%	99.9920	99.9869	99.9206

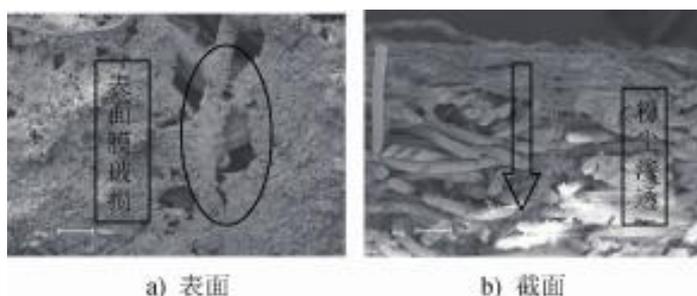


图 2 VDI 测试后常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料的 SEM 图

由表 5 可以看出, 高精度复合滤料在 L30 阶段的压差及出口粉尘质量浓度最低, 常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料的出口粉尘质量浓度相比过滤风速为 2.0m/min 下的数据大幅增加并高于高精度复合滤料, 表明常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料难以应对高速粉尘冲刷, 容易出现粉尘排放超标的问题。然而, 若不对常规 PTFE 针刺毡进行覆膜处理, 则更难保证粉尘排放质量浓度, 且滤袋运行压差更高, 易给用户带来停机甚至关停的风险。

由图 2 可以看出, 在 1.2 倍过滤风速条件下经 VDI 处理后, 常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料的膜发生破损, 粉尘通过破损的膜孔渗透进入滤料深层, 这进一步论证了覆膜滤料难以应对高速及磨琢性粉尘冲刷这一观点。

2 现场应用

前期,某焦炉配套除尘器滤袋在使用约3个月后即存在滤袋破损,粉尘排放质量浓度超标的情况。经现场勘查发现,部分滤袋样品呈褐色,手撕发现几乎无强力;对脱硫灰进行pH检测,测得pH值为12,表明粉尘呈强碱性。

将本文制备的高精度复合滤袋安装在该焦炉配套袋式除尘器中,观察其实际使用效果。该除尘器为低压脉冲型除尘器,其处理介质为焦炉烟气与脱硫粉尘,清灰方式为在线清灰。处理流程为焦炉→干法脱硫→布袋除尘器→选择性催化还原(SCR)脱硝→烟囱。现场除尘器工况数据见表6。

在使用高精度复合滤料3个月后,采用HJ836—2017《固定污染源废气低浓度颗粒物的测定重量法》,对除尘器出口进行粉尘排放质量浓度检测,抽样频次为3,检测点位为1#除尘器出口。经检验,颗粒物检测平均质量浓度为 $2.3\text{mg}/\text{m}^3$,满足出口粉尘排放质量浓度 $<10\text{mg}/\text{m}^3$ 要求。具体检测数据见表7。

表6 除尘器工况数据表

参数取值	
最大烟气流/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	6×10^5
运行压差/Pa	1500
工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	230~250
瞬间工作温度/ $^{\circ}\text{C}$ 含湿量/%	280
O ₂ 体积分数/%	12
原烟气中SO ₂ 质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	12
原烟气中NO _x 质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 滤袋尺寸/mm	500
滤袋数量/条	1800
要求粉尘排放质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	160 (直径), 8000 (长度)
	2880
	<5

表7 第三方颗粒物检测数据

测试指标	频次一	频次二	频次三
实测质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 排放速率/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	2.2	2.4	2.3
烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	0.517	0.600	0.499
烟气流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 标况流量/ ($\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	247	249	248
	3.71	3.98	3.44
	234856.7	250188.2	217061.3

使用 3 个月的高精度复合滤袋与原失效滤袋的强力对比如表 8 所示，其横截面电子显微镜图如图 3 所示。由表 8 和图 3 可以看出，高精度复合滤料的强力在使用 3 个月未明显下降，而原失效滤袋的强力则大幅降低；高精度复合滤料未发生粉尘渗透情况，其过滤面较平整，而原失效滤袋出现粉尘渗透情况，其过滤面较粗糙，原因是原失效滤袋的纤维强力大幅下降，纤维间抱合力降低，在粉尘的冲刷下，过滤面纤维起毛且变得粗糙，导致粉尘渗透过滤袋。这进一步表明，高精度复合滤料的过滤效果和耐磨性更好，过滤性能更稳定。进一步的实践应用发现，该高精度复合滤料在此工况下持续使用超过 2 年，其仍能保持良好的性能，能够实现超低排放且运行稳定。

表 8 使用 3 个月的高精度复合滤袋与原失效滤袋强力对比

项目		新型高精度复合滤袋	原失效滤袋
强力/N	经向	1053	379
	纬向	1178	286



a) 高精度复合滤袋使用3个月后 b) 原失效滤袋

图 3 使用 3 个月的高精度复合滤袋与原失效滤袋截面的电子显微镜图

3 结论

本文通过将耐高温 PPSO 纤维与性能稳定的 PTFE 纤维混合，制备高精度复合滤料。对制备的高精度复合滤料进行物理性能，以及耐温、耐磨、耐化学腐蚀和动态过滤性能评估。研究结果显示，制备的高精度复合滤料能够长期耐受 230℃ 及以上高温，其瞬间耐温值达 260℃，具有与常规 PTFE 针刺毡覆膜滤料类似的耐温、耐化学腐蚀性。此外，该高精度复合滤料的耐磨性及高风速条件下的 VDI 过滤性能均优于常规

PTFE 针刺毡覆膜滤料，相同工况下，其使用寿命更长，应用范围更广。现场应用实践表明，该高精度复合滤料在钢铁焦化行业袋式除尘器上持续使用超过 2 年，仍能够实现超低排放和稳定运行，具有高效低阻、耐高风速及磨琢性粉尘等特性。

来源：产业用纺织品 2024 年第 10 期

功能性空气过滤材料研究进展

张明洋^{1,2} 陈芳芳^{1,2} 濮从政^{1,2} 吴红^{1,2} 翁晓焯^{1,2} 赵鹏鑫^{1,2} 李龙鑫^{1,2}
马力^{1,2} 魏伟程^{1,2} 刘呈坤^{1,2}

(1. 西安工程大学纺织科学与工程学院; 2. 西安工程大学功能纺织材料及制品教育部重点实验室)

随着社会的发展与进步，空气污染成为人们日益关注的问题。据统计，全球约有数十亿人口呼吸的空气质量未能达到健康标准。近年来，大气污染防治措施已初见成效，但以PM_{2.5}为代表的大气污染物防控形势依然严峻。人的生存离不开空气，而目前世界上许多地区的空气质量仍在持续恶化，污染空气直接威胁着人们的身体健康。此外，世界范围内的恐怖袭击事件，以及冠状病毒、禽流感等突发公共卫生事件，也促使各国加强对包括气溶胶在内的各类污染物的防护研究，新型宽谱防护过滤材料的研发因此成为各国关注的重点。基于此，空气过滤材料成为当前的一大研究热点。

如今，空气过滤材料的应用不再局限于工业废气处理，还广泛涉及汽车制造、制药、食品、精密制造、医疗、高科技电子等多个领域，这些行业对空气质量的高要求促使空气过滤材料不断发展，并成为工业发展中举足轻重的角色。鉴于不同行业对空气质量的差异化需求，本文按功能性对空气过滤材料进行分类探讨。

1 抗菌

抗菌空气过滤材料主要应用于医疗场所、家具环境、公共空间、电子制造车间、制药工厂、食品加工空间、生物实验室及无菌室等。实际应用过程中，空气过滤材料可能会被微生物污染。微生物随着颗粒污染物吸附到过滤材料上且当环境条件适宜时，其会在过滤材料上繁殖，这不仅会加重对人体生命健康的威胁，而且会导致过滤材料的过滤效率大幅度下降，同时影响空气过滤材料的使用寿命。随着研究人员对空气过

滤材料抗菌性的日益重视, 各种抗菌改性过滤材料不断涌现, 如引入银纳米颗粒、氧化锌、氧化钛等制备的抗菌过滤材料。

银纳米颗粒是最常见的抗菌改性材料。添加银纳米颗粒可以使生物细胞中的蛋白质和磷脂发生变性, 从而有效杀死细菌、病毒等。Wang 等利用静电纺丝法制备了纯丝素蛋白 (SF) 纳米纤维膜和添加银纳米颗粒 (AgNPs) 的 SF 纳米纤维膜材料, 并探讨其对空气动力学当量直径小于等于 $2.5\mu\text{m}$ 的颗粒物 (PM_{2.5}) 和亚微米级颗粒的过滤性能。研究结果显示: 纯 SF 纳米纤维膜空气过滤材料对 PM_{2.5} 的过滤效率为 98.8%, 对粒径为 300nm 的颗粒的过滤效率为 96.2%; 纯 SF 纳米纤维膜无明显的抗菌活性, 而添加银纳米颗粒的 SF 纳米纤维膜对大肠埃希菌 (E.coli) 和金黄色葡萄球菌 (S.aureus) 均表现出明显的抗菌活性。Yakovleva 等在针织物上引入银纳米颗粒和铜纳米颗粒, 赋予织物良好的抗真菌性能, 并探究将其应用于空气过滤领域。试验结果表明: 含未添加纳米颗粒的空气过滤材料的烧瓶室温培育 1d 后, 酵母溶液光密度增加了 1.8 倍, 表明烧瓶中的真菌数量有所增加。含添加纳米颗粒的空气过滤材料的烧瓶室温培育 1d 后, 酵母溶液的光密度大幅下降, 表现出良好的抗菌效果, 并且在压降为 200Pa 时, 过滤材料的空气渗透率达 $1270\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。除银纳米颗粒外, 氧化锌颗粒、二氧化钛颗粒等也常作为抗菌材料引入空气过滤薄膜中。Geetha 等利用静电纺丝技术制备氧化锌/聚乙烯醇/聚乙烯吡咯烷酮 (ZnO/PVA/PVP) 纳米纤维复合膜, 并对其进行抗菌活性试验, 结果发现, 氧化锌的引入使得纳米纤维复合膜表现出良好的抗菌效果。Zhai 等将氧化锌/石墨烯基光催化复合颗粒紧密涂覆在超细玻璃纤维膜表面, 制得过滤效率高达 99.9% 的复合空气过滤膜。此外, 过滤过程中氧化锌/石墨烯基光催化复合颗粒的形态由花状转变为棒状, 这使得空气过滤膜的灭菌率高达 99%, 表现出优异的抗菌性能。原因是氧化锌形态发生改变后, 其活性位点数增加, 促进了氧化锌光生电子-空穴对的分离, 进而提升了空气过滤器的快速灭菌能力。

另有研究人员对添加不同颗粒的空气过滤材料的抗菌性能进行对比试验。Chen 等在聚丙烯腈 (PAN) 纳米纤维中嵌入纳米级二氧化钛—商业 P25 和介孔 TiO_2 微球, 通过静电纺丝法合成了双填料复合空气过滤纳米纤维膜, 测试其过滤性能, 并探讨单独添加 P25 和介孔 TiO_2 微球对空气过滤纳米纤维膜抗菌性能的影响。结果表明, 仅添加 P25 制备的 P25/PAN 复合空气过滤纳米纤维膜相比纯 PAN 空气过滤纳米纤维膜, 抗菌性能显著提高, 抗菌活性高达 5.5, 是纯 PAN 空气过滤纳米纤维膜的 9 倍; 仅添加介孔 TiO_2 微球后, 复合空气过滤纳米纤维膜的抑菌性能较纯 PAN 空气过滤纳米纤维膜

变化不明显；双填料复合空气过滤纳米纤维膜的比表面积较大，过滤效率达 96.75%，压降低至 88Pa。

2 抗静电

抗静电空气过滤材料主要应用在航空航天、实验室、制药等领域。在这些行业的生产加工过程中，气体排放通道内配置有袋式过滤器，其织物材料因沉积带电粉尘颗粒而易产生静电累积，进而易引发火灾。过滤材料若使用传统导电材料如炭黑或碳纳米管等解决抗静电问题，可能会引发潜在的健康问题，而采用金属填料的纺织品应用有限，其存在刚度大、成本高，与其他材料的相容性较差等问题。因此，需寻找新的方案以解决空气过滤材料的抗静电问题。目前，最常用的方法是引入聚四氟乙烯（PTFE）颗粒。Shim 等在传统袋式过滤材料基础上将碳材料与 PTFE 混合制成涂层，并测试了所得抗静电过滤器的表面形貌和电导率。其中，电导率测试结果表明，在传统袋式过滤材料表面涂覆质量比为 1:1 的碳材料和 PTFE 得到的抗静电过滤器的电阻值最大。Chen 等将 PTFE 乳液、PVA 溶液与发泡增稠剂混合，得到富含气泡的 PTFE/PVA 溶液，再使用泡沫涂覆的方法将其涂覆至玻璃纤维毡上，经 2 个阶段的干燥后，在玻璃纤维毡上形成多孔结构的 PTFE 乳液泡沫涂层膜，进而制备 PTFE 乳液泡沫涂层膜过滤器。研究结果显示，PTFE 与 PVA 质量比为 5:1 时，所得过滤器表现出良好的抗静电性能，半衰期为 0.15s，且过滤性能优异，其压降为 319Pa，过滤效率可达 91.09%。

3 有害气体吸附

有害气体吸附空气过滤材料主要应用于室内空气净化、工业、汽车、医疗等领域。空气污染直接影响人们的健康。目前，人们对空气污染的关注不再局限于传统的 PM2.5 等颗粒物，开始更多地关注二氧化硫、氨气、一氧化氮等无机挥发性空气污染气体及气溶胶，如挥发性有机污染物（VOCs）综合污染体系。空气过滤材料对有害气体吸附的相关研究越来越受到研究人员的重视。

无机挥发性气体不仅会造成酸雨等自然灾害，还会对人类健康造成巨大威胁。因此，有研究人员提出采用空气过滤材料捕获这些无机挥发性气体。Wang 等将多孔普鲁士蓝类似物/聚乙烯醇缩丁醛（CuHCF/PVB）聚合物与纤维复合，通过非溶剂诱导相分

离机制,利用二元溶剂系统在纤维中引入孔隙和韧窝结构,成功制备出复合微纤维。这种复合微纤维突破了传统空气过滤材料用纤维的局限性,能够同时高效捕获 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 NH₃。因为 PVB 聚合物表面存在各种极性官能团如羟基、酯基等,故 PVB 纤维对细颗粒物具有很强的偶极作用。此外,因为氨气上氨的孤电子对能够通过 PVB 的空轨道与酯基形成化合键,故 PVB 对氨气具有一定的捕获能力。但该研究中 PVB 对于氨气的捕获能力有限,采用该复合微纤维制成的空气过滤材料,除氨能力为 1.8mmol/g,未实现对氨气的完全去除。

污染空气的 VOCs 的去除可通过多种不同的方法实现,主要方法有材料吸附和光催化降解(PCO)。Dai 等通过原子沉积(ALD)在聚丙烯(PP)非织造材料上沉积 Al₂O₃、TiO₂ 和 ZnO 等氧化物,再将 MnO₂ 晶体结合到 PP 非织造材料上,试验结果表明,沉积了 ZnO 的薄膜上生长了 MnO₂ 晶体,其能使甲醛在 60min 内的催化氧化率达 99.5%,且对 PM 的去除率优异,对 PM_{2.5} 的去除率达 90%,对 PM₁₀ 的去除率达 98%。但 MnO₂ 非织造复合材料普遍存在的问题是 MnO₂ 晶体的黏附力弱。基于此,Dai 等开发出一种低成本制备无黏结剂 MnO₂-非织造复合空气过滤器技术。该无黏结剂 MnO₂ 非织造复合空气过滤器在室温下表现出优异的甲醛去除能力,去除率高达 (94.5±0.4)%,其反应速率常数为 0.040min⁻¹,与含有机黏结剂的 MnO₂ 非织造复合材料相比,无黏结剂 MnO₂ 非织造复合空气过滤器对甲醛的去除率提高了 4%。此外,随着越来越多的金属氧化物被用于吸附有害气体,有研究人员尝试通过在材料中添加金属氧化物制备有害气体吸附空气过滤材料。Orlando 等以醋酸纤维素(CA)为原料,采用静电纺丝技术制备纳米纤维膜,并分别掺杂活性炭(AC)和 TiO₂,探究所得过滤材料的甲苯去除能力及吸附性能,并探讨了其与 PCO 的协同作用。试验结果表明,掺杂 TiO₂ 和 AC 的醋酸纤维素过滤材料,其甲苯吸附性能均较好,在起始质量浓度为 2.25×10⁻⁴mg/L 情况下实现了 45.5%的甲苯去除。这是由于掺杂了 AC 和 TiO₂ 的过滤材料具有粗糙的纤维形态,与纯 CA 膜相比,其纤维膜厚度增加,因此吸附性能提升。探究 2 种添加剂对甲苯的去除作用发现,掺杂 AC 的滤料不仅能有效吸附污染物,阻止 PCO 初始反应的发生,还能进一步重新吸附降解产物。

4 阻燃

阻燃空气过滤材料主要应用于工业生产车间、火力发电站、石油化工炼油厂、飞

机发动舱、航天器舱室等领域。鉴于 PM 过滤系统可能面临火灾或极端高温环境的威胁，这不仅威胁生命安全，还可能损害过滤效能，因此，适用于燃烧环境的空气过滤器必须具备良好的阻燃性。过滤材料的阻燃性指材料本身具有阻止燃烧或延缓燃烧的能力。当材料遭遇火源时，阻燃过滤材料能有效遏制火焰扩散，显著降低火灾风险。制备阻燃过滤材料的主要方法有直接在滤材中添加阻燃剂，或利用化学反应实现阻燃效果。阻燃剂添加方法主要有浆料混合、浸渍处理、表面涂层等。此外，科研人员还在探索采用复合材料技术或气凝胶制备工艺实现更好的阻燃效果。

Wang 等通过表面涂层方法对聚磷酸铵 (APP) 进行表面改性，他们以苯乙烯丙烯酸乳液 (AAS) 为增强树脂，采用溶胶—凝胶法在 APP 表面涂覆纳米 SiO_2 ，并通过微胶囊化将六甲基二硅胺 (HMDS) 接枝到外层，制备涂覆了改性颗粒的 APP。锥形量热试验结果表明，改性后的 APP/AAS 浸渍空气滤纸表现出良好的阻燃性能，热释放率降至 5.63kW/m^2 ，峰值热释放率降至 19.44kW/m^2 ，热释放总量降至 1.28MJ/m^2 。该空气滤纸阻燃性能的提升归因于 P—N—Si 的协同效应，它在产生了稀惰性气体的同时，增强了滤纸表面碳层的稳定性，能够有效阻止热量的传递。

然而，APP 改性的空气过滤材料也面临一些问题，包括易吸水、与聚合物材料相容性差，以及长期使用后颗粒易分离等。此外，空气过滤材料阻燃性能的提升常常以牺牲其力学性能为代价。为解决这些问题，Yan 等以 APP 为核心材料，采用微胶囊涂层技术制备多层包覆的 APP。他们在 APP 表面涂覆一层纳米 SiO_2 ，并引入烯丙基聚氧丙烯醚侧链和含硼 (B) 的有机硅氧烷结构。试验结果显示，改性后的 APP 上形成了核壳结构的纳米颗粒，显著提升了空气过滤材料的阻燃性能。具体表现为相比于未改性的 APP，改性后 APP 的热释放总量、热释放率、峰值热释放率、质量损失率和有效燃烧热分别下降了 30.8%、30.7%、42.0%、16.7% 和 14.4%，同时点火时间延长了 1 倍，能够有效抑制火灾的蔓延。改性后 APP 能够有效抑制火势是因为，纳米 SiO_2 和硅油涂层能够提高链端运动的电阻，导致过滤材料的热分解速率显著降低，热稳定性提高。此外，引入硼元素后，APP 最大分解速率低于 $6\%/min$ ，最大质量损失率与改性前 APP 的 60.71% 相比，降低至 23.19%。这是由于 P 和 B 之间配位键的形成及 B 和 Si 的协同作用，使得碳燃烧过程形成的保护层在高温下更稳定，从而显著提高了空气过滤材料的阻燃性能。

除引入 APP 阻燃剂外，还有研究人员采用空气过滤材料与阻燃材料复合的形式，如有研究人员探究了通过复合预氧化聚丙烯腈 (OPAN) 来提高空气过滤材料的阻燃性

能。Kang 等通过在 350℃空气中进行 PAN/PVP/SnCl₂ 纳米纤维膜的热诱导环化和氧化反应, 制备了预氧化聚丙烯腈/聚乙烯吡咯烷酮/二氧化锡 (OPAN/PVP/SnO₂) 纳米纤维膜。热氧化过程中, Sn²⁺作为催化剂, 用于防止 PAN 纳米纤维的熔化和融合, PVP 的加入则大幅提高了纳米纤维膜的力学性能。制备的 OPAN/PVP/SnO₂ 纳米纤维膜在室温下对 PM 具有较好的过滤性能, 其对 PM0.3 和 PM2.5 的过滤效率分别达 99.53% 和 99.98%。此外, 未复合阻燃材料的 PAN 纳米纤维膜一旦接触火源即迅速点燃, 并在短时间内完全燃烧。而 OPAN/PVP/SnO₂ 纳米纤维膜在火焰中会发生收缩, 移除火源后, 它能在无火焰状态下于 6.9s 的时间内实现自我延伸。试样燃烧后的傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 图显示, OPAN/PVP/SnO₂ 纳米纤维膜在波数为 1592cm⁻¹ 和 1390cm⁻¹ 处的特征峰减弱, 表明其在自熄前未完全燃烧, 具有良好的阻燃性能。

Zhao 等设计的过滤器则引入了一个额外的力-空间电荷即电晕效应。过滤过程中, 空气过滤器通过放电施加静电力, PM 受静电力的推动作用被石墨烯气凝胶过滤器捕集。试验结果显示, 这种含电石墨烯气凝胶的过滤器 (CGAF) 性能非常稳定, 可以承受 10 次洗涤和 5min 的点火而不燃烧。点火 3min 后, 试样没有出现任何的机械损伤, 点火 5min 后仅出现了形态上的变化, 对 PM2.5 和 PM10 的去除效率略有下降, 但仍高于 90%, 表现出较高的 PM 去除率和较低的压降。Chen 等以壳聚糖 (CS) 作为框架矩阵、竹活性炭 (BAC) 作为功能颗粒、甲基三甲氧基硅烷 (MTMS) 作为疏水改性剂, 制备出高孔隙率、高阻燃、疏水的壳聚糖掺杂竹活性炭 (CS@BAC) 复合气凝胶。该复合气凝胶的 PM2.5 过滤效率为 94.2%, 同时具有优异的阻燃性能, 热释放总量和峰值热释放率分别为 5.30kJ/g 和 28.2W/g, 极限氧指数 (LOI) 达 33.8%。

5 耐高温

耐高温空气过滤材料主要应用于水泥生产、玻璃制造、垃圾焚烧发电、太阳能光伏制造、汽车尾气处理等领域。当前, 大气环境面临严峻挑战, 工业高温气体除尘技术越来越受到人们的重视。工业废气排放温度通常在 50~300℃, 对过滤材料而言, 高温除尘相比常温除尘在技术上更为复杂和困难。

无机材料因良好的耐高温性和稳定性而在工业耐高温过滤材料领域备受瞩目。其中, 多孔陶瓷膜 (PMCs) 因良好的热稳定性而备受关注, 并广泛应用于复杂环境的工业生产中。尽管喷涂 α -Al₂O₃ 能够增强多孔陶瓷膜的热稳定性, 但同时也会带来材料

变脆的问题。因此，人们逐渐将研究焦点转向无机材料耐热性能的提高方面。如 Yang 等将聚苯砜对苯二甲酰胺（PSA）与 PAN 复合，并引入勃姆石提高其过滤效率。试验结果显示，PSA/PAN 复合纤维膜（添加质量分数为 0.5% 的勃姆石）在 300℃ 下热处理 1h 后，过滤效率仍高达 99.52%，压降低至 45.16Pa。尽管热处理后 PSA/PAN 复合纤维膜会轻微变黄，但纤维形态的保持状况良好。基于上述研究，Yang 等还利用 PSA 与聚氨酯（PU）共混纺丝制备复合纤维膜过滤材料，并通过热重分析（TGA）表征材料的热稳定性。研究发现，纯 PU 在 290℃ 时即开始出现质量损失，而 PU/PSA 复合纤维膜过滤材料在温度高达 375℃ 时仍表现出优异的热稳定性，且对 PM2.5 的去除率超过 95%。这得益于 PSA 中—SO₂—基团的作用及聚合物分子链的缠结作用，使得复合纤维膜过滤材料的热稳定性得以提升。

另有研究者成功研制出低阻耐高温空气过滤器。如，Xu 等利用聚醚醚酮（PEEK）与膨体聚四氟乙烯（ePTFE）复合制得空气过滤材料。在 250℃ 高温工作条件下，这种复合空气过滤材料的过滤效率仍达 94.535%，且压降仅为 154.5Pa，同时质量因子为市面上商用静电纺空气过滤膜的 10 倍。然而，纳米纤维层状过滤器面临诸多挑战，如空气阻力大、能耗高，并且层间易剥离。基于此，Li 等以 3 种聚合物—聚酰亚胺（PI）、PTFE 和聚酰胺酰亚胺（PAI）为基材，结合静电纺丝与溶胶—凝胶技术，制备高蓬松度的气凝胶高温过滤材料，制备流程如图 1 所示。TGA 发现，该气凝胶高温过滤材料在 505℃ 下烧结后的质量损失率仅为 5%。进一步的试验证实，该气凝胶过滤材料能够在 500℃ 高温下表现出良好的热稳定性，且对颗粒物的过滤效率高达 99%。

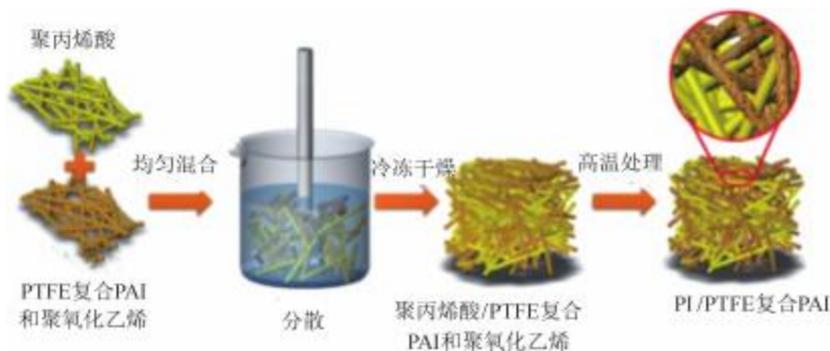


图 1 气凝胶高温过滤材料制备流程

在高温过滤领域，材料本身的热稳定性与不同材料间的复合形式，是影响高温过滤材料性能的关键。目前市面上大多数高温过滤材料仍然是复合材料，但这一领域仍面临诸多挑战，如材料间的黏合性、高温下的层间剥落问题，以及因使用黏合剂带来的阻力增大问题，这些均是该领域需持续关注并努力解决的关键问题。

6 耐腐蚀

耐腐蚀空气过滤材料广泛应用于化工仓储、海洋环境、电子制造、污水处理及实验室等领域。随着工业的快速发展，对空气过滤材料的耐腐蚀性要求日益提高。目前，提升空气过滤材料耐腐蚀性的方法主要有 2 种：一是选用本身就具有良好耐酸碱性的材料；二是通过煅烧氧化等工艺使材料碳化，赋予其耐酸碱特性。

Cuo 等开发出一种三维结构的纤维状多孔陶瓷膜 (PCMs)，并在其表面喷涂一层球形 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。研究显示，当黏结剂质量分数达 50% 时，所得材料表现出优异的耐酸碱腐蚀性能。为验证其耐腐蚀性能，将试样分别置于强 H_2SO_4 溶液 ($\text{pH}=1$) 和 NaOH 溶液 ($\text{pH}=13$) 中，于 100°C 下浸泡 24h。浸泡结束后，用去离子水对试样进行冲洗并烘干，再测量其质量变化，并采用能量色散谱仪 (EDS) 对其进行分析。结果显示，试样酸碱腐蚀后的质量损失率分别为 4.53% 和 3.21%，表明酸溶液对试样的腐蚀性略强于碱溶液，原因与黏结剂中含有少量碱金属氧化物有关。尽管如此，试样的酸碱腐蚀率仍低于 5%，表现出良好的耐酸碱腐蚀性能。Chen 等采用静电纺丝和煅烧工艺制备出 SiO_2 纳米纤维膜。所得纤维膜不仅柔韧性强，而且具备出色的耐腐蚀性。试验证实，采用该 SiO_2 纳米纤维膜制备的过滤器过滤性能优异，对 Te、Pb 和 Bi 的过滤效率分别达 99%、99% 和 98%。

除采用煅烧工艺提高过滤材料的耐腐蚀性外，有研究者尝试通过煅烧氧化来提高滤材的耐腐蚀性。如，Wei 等通过静电纺丝技术将聚芳硫醚砜 (PASS) 纺制成纳米纤维膜，再对其进行简单的氧化处理，成功制备出一种新型氧化聚芳硫醚砜 (O-PASS) 纳米纤维膜过滤器。与 PASS 纳米纤维膜相比，O-PASS 纳米纤维膜的微观结构和形态变化不大，但耐酸、碱及有机溶剂性能优异。另有研究人员采用本身具有良好耐腐蚀性的材料制备滤料。如 Xu 等以高性能 PEEK 纤维为原料，制备出在酸、碱及 250°C 高温下均具有优异稳定性的 PEEK 非织造布滤料。此外，为提高滤料对微细颗粒的捕获能力，他们还构建了 PTFE 乳液浸渍 PEEK 非织造布 (PEEK/PTFE) 和 ePTFE 包覆 PEEK

(PEEK/ePTFE)的夹心结构过滤器。所得过滤器表现出极低的过滤阻力,并且质量因子较高,经质量分数为40%的NaOH室温处理及连续24h的250℃高温处理后,力学性能均无明显下降,对粒径为0.3 μm 的细颗粒的过滤效率仍达94.535%。

7 高力学性能

高力学性能空气过滤材料主要应用于赛车空气过滤、新能源汽车电池包防护、大型设备进气过滤、高层建筑通风系统等。在空气过滤领域,滤料的力学性能是较重要的参考指标之一。滤料力学性能的提高通常通过引入其他材料、创新的结构设计,以及开发新材料等方式实现。

Zhang等利用静电纺丝法制备出新型聚间苯二甲酰间苯二胺(PMIA)纳米纤维空气过滤膜,并通过添加表面活性剂十二烷基三甲基溴化铵(DTAB)提高空气过滤膜的力学性能。研究显示,当DTAB添加量(质量分数)分别为0.05%、0.10%和0.15%时,该膜的韧性相对于未添加DTAB的纤维膜分别增加了9.49、10.93和1.49MJ/m³,弹性模量分别达0.631、0.742和0.935GPa。采用该纳米纤维空气过滤膜制备的空气过滤器具有轻质(面密度为0.365g/m²)、超薄(厚约0.5 μm)和抗拉强度高(72.8MPa)等优良的综合性能,能够实现粒径为300~500nm颗粒99.999%的过滤效率,且压降低至92Pa。Sun等在纤维素基空气过滤膜基础上引入多壁碳纳米管(MWCNTs),并通过苯酚甲醛(PF)浸渍法制备出一种具有三维网络结构的、力学性能良好的滤纸。研究显示,MWCNTs分布于纤维表面及孔隙中,增大了纤维的比表面积,进而提高了过滤材料对颗粒物的有效拦截。Wang等通过静电纺丝法,利用掺杂压电的LiNbO₃(LN)纳米颗粒和石墨相氮化碳(g-C₃N₄)制备出柔性多功能SF基纤维膜。其中,LN增强了SF基纤维膜的力学性能,g-C₃N₄则被集成到LN/SF纳米纤维中,使复合膜的力学性能大幅度提升。

Malloy等则选择力学性能较好的材料制备高力学性能滤料,其基于低密度金属纳米线泡沫和亚微米颗粒制备空气过滤器。这种低密度金属纳米线泡沫由随机分布的Cu纳米线组成,其密度低、表面积非常大,机械稳定性好。泡沫的大表面积使得滤料在广泛的粒径范围内表现出优异的过滤性能,其对PM_{0.3}的过滤效率大于96.6%,并且这些轻质泡沫具有出色的力学性能。Mirkovic'等采用静电纺PAN聚合物作为微孔碳纳米纤维(MCF)的前体,制备的PAN/MCF空气过滤器对PM_{2.5}的去除效率高达99%,

相比纯 PAN 空气过滤器，具有更好的过滤性能和 PM2.5 吸附能力。此外，微孔碳纳米纤维的加入还提升了过滤材料的热性能和力学性能。

8 结束语

在当前社会对空气质量高度重视及国家积极倡导使用绿色能源的背景下，空气过滤技术的多功能化与高性能化已成为研究热点。空气过滤材料的未来发展前景广阔，研究重心将聚焦于进一步提升材料的性能，如更高的过滤效率、更低的空气阻力、更好的耐久性和稳定性。基于此，本文围绕这一主题，分析了功能性空气过滤材料的最新研究进展，概述了空气过滤领域过滤材料的功能化应用，归纳总结了各类空气过滤材料在复杂应用环境下的优势与不足。研究旨在为进一步推动空气过滤技术的发展提供参考。

来源：产业用纺织品 2024 年第 12 期

水刺法非织造材料及工艺在过滤领域的应用

马腾飞 宋东鹏 刘双营 张沛凯 马振武

(济南永信新材料科技有限公司)

随着我国工业的快速发展，工业废气、废水和废物的处理问题日益突出，过滤环境也日益复杂及恶劣。传统的机织过滤布已无法满足现有的过滤需求，纱线间的孔隙容易被颗粒堵塞。而针刺加工工艺会不同程度地损伤纤维及基布，降低过滤产品的过滤精度。近年来，许多研究者转向关注水刺法非织造工艺。水刺法非织造工艺采用高压产生的微细水流对纤网进行连续喷射，使纤网中的纤维运动、重新排列和相互缠结，纤网得以加固并获得一定的物理力学性能。水刺法非织造产品具有手感柔软、透气性好、强度高和纤维损伤小等特性。因此，对过滤材料进行水刺处理，成为过滤材料制备领域一个重要的研究方向。也有研究者将水刺法非织造产品与针刺法非织造产品复合，制备复合过滤材料，或将水刺工艺与其他非织造工艺组合制备非织造过滤材料。

1 水刺法非织造材料及工艺在液体过滤领域的应用

工业生产中会排放大量的废水，工业废水中含有大量的氮氧化物、重金属离子，直接排放容易造成河流、湖泊及地下水源的污染。目前，工业废水的主要处理方法有物理吸附法、化学处理法和生物处理法等。其中，物理吸附法主要原理是利用吸附剂与污染物之间的分子力，将污染物富集到吸附材料上，从而将污染物从水中析出的。目前常用的废水处理物是聚苯胺高分子及其衍生物，这类物质具有特殊的氨基基团及亚氨基基团，能与金属离子发生氧化还原反应，同时能与有机染料发生静电吸附作用，从而去除废水中的重金属和有机污染物。然而，聚苯胺高分子及其衍生物的吸附效率低，回收难度大，容易产生二次污染。

为克服上述不足，刘锁等采用原位生长法将聚苯胺附着于水刺黏胶纤维膜上，制

得水刺黏胶 / 聚苯胺复合纤维膜, 探究其对印染废水中常见的活性红、甲基橙染料及 Cr^{6+} 的吸附性能。结果表明, 水刺黏胶 / 聚苯胺复合纤维膜具备良好的吸附性能, 且这种结构的膜材料容易从废水中分离出来, 进行聚苯胺高分子及其衍生物的脱附和再生, 从而避免了膜材料回收难度大, 易造成二次污染的弊端。刘锁等采用原子转移自由基聚合 (ATRP) 技术对工业化生产的水刺黏胶纤维膜进行改性处理, 然后采用改性后的水刺黏胶纤维膜进行 Fe^{3+} 吸附, 最后将吸附 Fe^{3+} 后的水刺黏胶纤维膜用作配位法固定漆酶的载体, 用于去除废水中的氮氧有机物, 同时降低外部环境对酶的影响, 从而实现生物酶的回收和重复利用。汤丰丞等将多孔碳纳米纤维 (CNF) 与超高相对分子质量聚乙烯 (UHMWPE) 纤维混合, 再将其与纯棉水刺织物复合成膜, 制得兼具过滤和吸附功能的纳滤膜, 并探究了纳滤膜对离子染料的吸附能力。结果表明: 纳滤膜对阳离子染料亚甲基蓝的吸附效果更好。郑洋通过将金属有机框架材料 (MOFs) 负载到水刺非织造基底材料上, 制备出可处理染料废水的复合材料, 有效解决了 MOFs 回收困难和难以重复利用的问题。赵继松等通过非织造工艺将废弃皮革制成废鞣革胶原纤维水刺非织造布, 再通过戊二醛交联将单宁固化到废鞣革胶原纤维水刺非织造布上。研究发现, 单宁固化后的废鞣革胶原纤维水刺非织造布呈立体多孔结构, 其对 Cu^{2+} 的吸附性能优于未交联处理的废鞣革胶原纤维水刺非织造布。

张芸以不同线密度的涤纶为原料, 经水刺工艺加固、聚丙烯酸酯黏合剂后整理, 制备出 KD-100 液体过滤材料。分析了不同线密度涤纶的配比对液体过滤材料结构与性能的影响。结果表明, 使用线密度小的纤维可降低材料的平均孔径与过滤阻力; 使用线密度大的纤维有利于提高材料的过滤稳定性并改善其力学性能。余向琪等以黏胶 / PET 水刺非织造布为基体材料, 使用亲水剂 GL 与丙烯酸树脂的混合溶液对其进行后整理, 制得加湿器滤材, 探究了亲水剂 GL 和丙烯酸酯用量对过滤材料芯吸高度、表观吸水率等主要指标的影响。结果表明: 在亲水剂 GL 质量分数为 0.6%、烘干温度为 90°C 、烘干时间为 18min 的情况下, 加湿器滤材的加湿性能最佳, 过滤及耐用性能优良。

水刺法非织造材料在工业废水处理中的应用主要依赖于水刺材料 (如黏胶纤维) 较高的性价比, 良好的耐酸、耐碱、耐腐蚀性能, 高回潮率, 以及水刺生产工艺对纤维的损伤小等特点。水刺法非织造材料多用作净水材料的载体, 实现了废水处理材料的回收和重复使用。

2 水刺法非织造材料及工艺在空气过滤领域的应用

近年来,随着我国工业的快速发展,大气污染问题日益严重,雾霾天气日益增多,可吸入颗粒物是主要的大气污染物之一。理论和实践表明,袋式过滤是控制工业烟尘、减少雾霾的一种有效手段。滤袋是袋式除尘器的核心,主要起过滤粉尘、排出清洁气体的作用。使用过程中发现,滤袋常因机械、化学等原因破损而影响过滤效率,进而限制了袋式除尘器的大面积推广。随着国家对工业烟气排放浓度要求的日趋严苛,传统滤料已无法满足过滤要求。基于此,研究人员尝试对滤料进行覆膜处理,改变过滤机制,通过表面过滤方式(传统过滤方式为渗透过滤)有效降低工业烟气的排放浓度。

2.1 水刺法非织造材料特性对空气过滤效率的影响

刘璐以涤纶为原料,采用水刺工艺制备非织造空气过滤材料,探究了纤维形态对非织造过滤材料性能的影响。结果表明:异形截面纤维材料的过滤性能明显优于圆形截面纤维的;随着异形截面纤维添加比例的增加,过滤材料的过滤性能逐渐提高,但其断裂强力逐渐下降。史柳鉴等研究了滤料种类、规格、过滤风速、透风量对滤料过滤性能的影响。结果表明:相比针刺滤料,水刺滤料具有更好的缠结效果和更高的过滤效率。水刺滤料过滤效率随着滤料面密度的增大而增大,随着过滤风速的增大而减小。蔡伟龙研究了针刺滤料、水刺滤料、覆膜滤料的孔径尺寸及分布对滤料过滤性能的影响。结果表明,针刺滤料、水刺滤料、覆膜滤料3种试样的平均孔径依次减小,孔径分布依次变窄,而较小的孔径尺寸及均匀的孔径分布能够有效提高滤料的过滤效率。杨晓平研究分析了水刺滤料的透气率、过滤效率、过滤阻力三者之间的相互关系。结果表明,透气率越大,滤料的过滤阻力越小,过滤效率越低,反之亦反之。

2.2 水刺法非织造材料加工工艺参数对空气过滤用滤料性能的影响

张恒等通过设置不同的水针压力,研究了水针能量对非织造材料过滤性能的影响。结果表明,在其他条件相同的状态下,材料过滤效率和过滤阻力随着水针能量的增大而增大。王耀村等采用水刺技术对滤料用单面再生涤纶毡坯进行处理,分析了不同水刺工艺下单面再生涤纶毡坯的过滤性能、断裂强力及缠结情况等。结果表明,当水针压力为5.0MPa,输送速度为0.4m/min时,水刺单面再生涤纶毡坯的过滤性能、力学性能及缠结性能最佳。蔡伟龙等以聚苯硫醚(PPS)预针刺毡为研究对象,探究了不同水刺工艺参数对水刺PPS滤料产品性能的影响。何丽芬等以间位芳纶为原料,研究

不同水刺压力、水刺速度对芳纶水刺滤料性能的影响。结果均表明，水刺压力越高，滤料的断裂强度和过滤效率越高，但透气量有所下降。

2.3 空气过滤用水刺、针刺及覆膜滤料的性能对比

蔡伟龙等采用水刺工艺，制备了水刺聚酰亚胺滤料，并对针刺聚酰亚胺滤料与水刺聚酰亚胺滤料的孔径、过滤性能、过滤阻力等进行对比分析。结果表明，水刺聚酰亚胺滤料具有更小的微孔直径、更低的过滤阻力、更长的清灰周期以及更高的粉尘过滤精度。杨东等采用水刺工艺，制备了 PPS 滤料，并对水刺 PPS 滤料与针刺 PPS 滤料的性能指标进行对比分析。结果表明，水刺 PPS 滤料在强力、清灰性能及过滤精度方面相比针刺 PPS 滤料更具优势。田新娇等制备了水刺毡类过滤材料，并对水刺滤料、针刺滤料和覆膜滤料的性能进行了对比，结果表明，水刺滤料对微细粒子的捕集效率优于针刺滤料，但不及覆膜滤料，其过滤阻力低于覆膜滤料，高于针刺滤料。

2.4 水刺复合滤料在空气过滤领域的研究进展

2.4.1 常规水刺复合滤料

张楠采用针刺+水刺复合工艺对聚四氟乙烯(PTFE)纤维/PPS 纤维滤料进行处理，并与针刺滤料进行对比。结果表明，经复合工艺制备的滤料，对粒径为 0.1~5.0 μm 的颗粒的过滤效率高达 99.0%，对粒径为 10~700nm 的超细颗粒的过滤效率高达 86.5%，相比针刺滤料，过滤效率同比都提高了 10%以上。刘嘉炜等分别使用针刺和预针刺+水刺复合工艺，将三聚氰胺熔喷材料与芳纶 / 芳砜纶混合针刺布复合，制得耐高温的复合滤料，用于高温气体过滤，并对比分析了两种工艺下复合产品的基本物理性能、力学性能和过滤效率。试验结果表明，预针刺+水刺工艺制得的复合产品过滤效率略高于针刺工艺制得的复合产品。王文鑫以聚酰亚胺(P84)纤维和 PPS 纤维为原料，采用针刺+水刺复合工艺，开发出一款耐高温的环保型复合过滤材料，并与针刺滤料、针刺覆膜滤料进行对比。结果表明：采用针刺+水刺复合工艺制得的复合过滤材料对微细粉尘的过滤更加高效、可靠，且过滤材料的耐温性能得到显著改善。张楠等以 PTFE 膜裂长丝为基布，采用预针刺+水刺复合工艺对 PPS 纤维/PTFE 纤维制成的纤网进行固结，探讨工艺参数及面层组分对 PPS/PTFE 复合滤料过滤性能的影响。结果表明，经水刺后，材料平均孔径小于预针刺试样，且 PTFE 纤维含量越高，复合滤料的透气率、强力及孔径尺寸下降越明显。陈康采用针刺+水刺工艺制备 PPS 滤料，然后采用 PTFE 乳液对滤料进行后整理以改进其性能，探讨水刺工艺和 PTFE 乳液添加量对 PPS

滤料过滤性能的影响。结果表明，随着水刺压力的逐渐增加，PM2.5 分级过滤效率增大；在整理液（PTFE 乳液）质量浓度为 70g/L、预烘温度为 60℃、预烘时间为 15min、焙烘温度为 180℃、焙烘时间为 5min 的情况下，制得的 PPS 滤料对 PM2.5 的分级过滤效率最佳。

2.4.2 静电纺 / 水刺复合滤料

李曼等采用静电纺丝技术制备聚丙烯腈（PAN）-聚乙烯吡咯烷酮（PVP）纳米纤维，再将其包覆在水刺黏胶非织造布表面，制备 PAN-PVP 纳米纤维 / 水刺黏胶非织造复合材料，并探究了复合材料的过滤性能。研究表明，复合材料对空气中粒径大于 2 μm 的颗粒物的过滤效率达 99.93%，其透气率与普通口罩的透气率相当；与水刺黏胶非织造布相比，过滤性能明显提高。刘永胜将静电纺丝技术分别与针刺、水刺固结技术相结合，制备微 / 纳米纤维混合材料，研究了针刺或水刺工艺对微 / 纳米纤维混合材料性能的影响，对比分析了微 / 纳米纤维混合材料与市售过滤材料的循环过滤性能。研究表明，所得微 / 纳米纤维混合材料的过滤效率高，与市售覆膜滤料的过滤效率相当。

2.4.3 超细纤维 / 水刺滤料

Zhang 等以聚酯-聚酰胺 6（PET-PA6）颗粒为介质，研究了纺黏水刺超细纤维非织造材料的空气过滤性能，发现超细纤维非织造材料的过滤效率和过滤阻力随其面密度的增加而增大。王敏等探究了纤网面密度对橘瓣型纺黏水刺非织造材料孔径与过滤性能的影响。研究表明，橘瓣型纺黏水刺非织造材料表面的纤维大量开裂为超细纤维，材料平均孔径随着纤网面密度的增大而逐渐减小，过滤效率逐渐提高。左文君等研究了分裂型超细纤维水刺非织造材料的力学性能，发现在外界机械力作用下，分裂型超细纤维水刺非织造材料中的纤维会进一步开裂，其各项力学性能则变化不大。费建信等利用高压水刺工艺对纤维进行开纤处理，使纤维原纤化，同时增加滤料的抱合度，使产品具有立体三维容尘梯次结构，从而有效解决了过滤效率与阻力相矛盾的问题。张恒等通过水刺工艺对 PET-PA6 橘瓣型双组分纺黏非织造材料进行开纤处理，获得超细纤维非织造材料，并对滤料的过滤性能进行研究。结果表明，水刺技术可以将橘瓣型双组分纤维开裂成超细纤维，所得滤料对粒径为 0.37~2.74 μm 的气溶胶颗粒有较好的过滤效果。

钱么等采用针刺工艺制备多层 PET-PA6 橘瓣双组分纺黏水刺非织造布，并测试针刺加工前后纺黏水刺非织造布的过滤效率和过滤阻力。研究表明，针刺加工后，

橘瓣原纤大量开裂，所得非织造布的过滤效率有所提高，过滤阻力明显降低。

3 结语与展望

(1) 相较于针刺滤料，水刺滤料中的纤维损伤小，孔径更细小、均匀，滤料易清灰、过滤阻力大、过滤效率高，且水刺滤料为表面过滤，可重复使用性强；相较于覆膜滤料，水刺滤料的过滤阻力低、强力高。

(2) 水刺复合滤料可将多种材料的性能结合在一起，满足更复杂的应用环境。

(3) 静电纺丝、双组分纺丝等新技术的应用，可有效解决滤料过滤阻力和过滤效率相矛盾的问题。

随着技术的革新和新材料的应用，过滤产品在超细纤维、材料复合、工艺结合、后整理，以及原料的多样化、绿色化等方面具有巨大的发展空间，这也将成为未来过滤行业发展的重要方向。今后可从原料选择、工艺条件优化及复合方式改进等方面着手，开发满足各种应用需求的水刺法非织造复合过滤材料。

来源：产业用纺织品 2023 年第 12 期

2024/2025

中国产业用纺织品技术发展报告

2024/2025 Technology Development Report of China Industrial Textiles

第十篇 其他

纤维增强复合材料拉挤成型工艺研究进展

赵烁¹ 居浙海² 姜亚明¹

(1. 天津工业大学纺织科学与工程学院; 2. 浙江原田碳纤维有限公司)

复合材料在现代工程和制造业中占据着重要地位。其性能优异,已在航空航天、汽车、建筑、船舶、体育器材和可再生能源等领域得到广泛应用。其中,拉挤成型复合材料(也称拉挤型材)是一种性能优异且应用广泛(表1)的复合材料。其生产过程涉及将浸渍树脂的纤维在牵引设备的作用下单向通过模具,待树脂固化后即制得具有任意长度且等截面的复合材料。

相较于其他复合材料,拉挤型材可以实现大规模的连续生产,且生产过程即实现了增强纤维的高度取向,制品具有优异的轴向力学性能。此外,拉挤型材的截面可被加工成各种形状和尺寸,制品包括棒材、管材和梁材等,且生产过程对原材料的利用率高。

表1 拉挤型材的典型应用

应用领域	典型使用场景	对拉挤型材的要求
建筑	地板和墙壁系统、围栏、桥梁	质轻,强度高,防火性能好,抗疲劳,易于安装和维护
电气	电缆桥架支撑构件、梯子、输电杆、塔架	绝缘
海洋	污水处理	耐腐蚀
运输	铁路、车身面板	质轻,耐腐蚀
运动	曲棍球杆、滑雪杖、高尔夫球杆、箭、风筝、帆垫	质轻,耐腐蚀,易于安装

本文综述了纤维增强复合材料拉挤成型工艺研究进展。根据树脂基体的不同,将拉挤成型工艺分为热固性树脂复合材料拉挤成型工艺和热塑性树脂复合材料拉挤成型工艺。首先,详细介绍不同的纤维浸渍方法,阐述每种浸渍方法的特点和发展现状。

其次，介绍拉挤成型工艺中温度和拉挤速度对拉挤型材的影响，以及目前的研究现状。最后，总结目前拉挤成型工艺面临的问题，并对拉挤成型工艺发展方向提出展望，以期对未来拉挤型材的开拓创新提供一定的理论支撑。

1 拉挤成型工艺

1.1 热固性树脂复合材料拉挤成型工艺

热固性树脂目前应用广泛。其在室温下通常为液态，使用时需在特定的温度和固化剂作用下固化；其黏度低，能有效浸渍纤维。一般来说，热固性树脂强度相比热塑性树脂更高，抗蠕变性更好，适用于采用短纤维、长纤维或织物增强的大型零件。

热固性树脂复合材料拉挤成型工艺主要有 2 种：开放树脂浴拉挤成型工艺和注射拉挤成型工艺（图 1）。

传统的开放树脂浴拉挤成型工艺中，热固性树脂对纤维的浸渍主要是在开放的浸胶槽中进行的。该工艺技术门槛相对不高，设备和运营成本较低，可根据需求加工多种类型的纤维和树脂，制造出多样化的产品，适合大规模生产。但开放的树脂浴可能会导致挥发性有机化合物（VOCs）的释放，这不仅对操作工人的健康构成了威胁，还对周边的环境造成了污染。此外，该工艺通常需持续加热树脂浴和模具，以促进树脂的浸渍和固化，且加热开放的树脂浴需消耗更多的热量，故树脂的固化时间和纤维的拉挤速度将受到影响。若树脂固化不完全，则拉挤型材的结构完整性和力学性能将受到影响。为了解决这一问题，注射拉挤成型工艺逐渐被推广并应用。

注射拉挤成型工艺中，纤维束被输送至模具中，同时液态热固性树脂通过注射槽（口）注入注射室，然后在压力的作用下实现树脂对纤维的浸渍。该工艺减少了空气泡和树脂富集区域的出现，提高了型材的品质和力学性能。此外，封闭的注射系统减少了 VOCs 的释放，环保性更佳。

当然，新的拉挤成型工艺也在不断探索中。Irfan 等对现行的拉挤成型工艺进行了改进，其通过设计纤维铺展装置和树脂浸渍单元，实现了更高效的纤维浸渍，并减少了生产过程中树脂的浪费。Barkanov 等利用有限元软件推导出新的电磁-热化学有限元模型和算法，用于开发和控制微波辅助拉挤成型工艺，以及设计模具。试验对比发现，微波辅助拉挤成型工艺大幅提高了拉挤效率，改善了产品性能。

1.2 热塑性树脂复合材料拉挤成型工艺

热塑性树脂具有线性分子链结构，这使得热塑性树脂受热会熔融，且这一过程可逆。因此，热塑性树脂复合材料可重复使用，还可通过加热的方式进行焊接，加工时间短，且更经济、环保。此外，热塑性树脂典型失效应变大于 50%，远大于热固性树脂典型失效应变（8%）。因此，由纤维增强的热塑性树脂复合材料具有更高的韧性、损伤容限和极限失效应变。热塑性树脂复合材料拉挤成型工艺开发于 20 世纪 90 年代，近年得到了普及。由于熔融态热塑性树脂黏度大，相较于热固性树脂，其对纤维的浸渍性较差，因而拉挤成型时需将加热模具中的热塑性树脂和纤维增强材料共同加热至一定的温度，以更好地实现对纤维增强材料的浸渍。目前，根据浸渍方式的不同，热塑性树脂复合材料拉挤成型工艺又可分为反应型拉挤成型工艺和非反应型拉挤成型工艺。

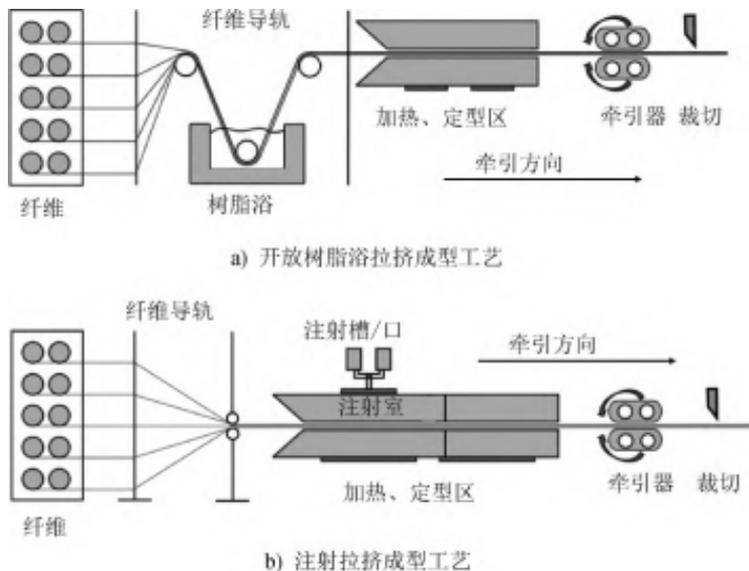


图 1 热固性树脂复合材料拉挤成型工艺

1.2.1 反应型拉挤成型工艺

反应型拉挤成型工艺中，热塑性树脂的不同组分经由注射室注入浸渍区。这些组分通过实时的化学聚合反应形成大分子聚合物，然后浸渍纤维，最后经加热、冷却、定型得到复合材料。

反应型拉挤成型工艺使用连续纤维作为增强材料，理论上可生产出无限长度的拉挤型材，生产效率高；但实际上，受限于热塑性树脂的聚合反应，拉挤成型工艺的生产速率取决于聚合速率，具体与树脂类型、加热温度及单体/引发剂配比等因素有关。Luisier 等基于反应型拉挤成型工艺，成功制备出玻璃纤维（GF）增强聚酰胺 12（PA12）复合材料，并开发出不同形状的模具（图 2），最大限度地提高了生产效率。Chen 等基于反应型拉挤成型工艺，通过优化引发剂和活化剂配比，成功制备出连续 GF 增强聚酰胺 6（PA6）复合材料，其中 GF 体积分数占 50%。测试发现，该复合材料具有较好的界面黏附性和较高的模量。vanRijswijk 等基于真空导流工艺，制备出 GF 增强阴离子 PA6 复合材料。其使用含长诱导时间的引发剂—活化剂组合，控制聚合时间，进而优化复合材料的制备。

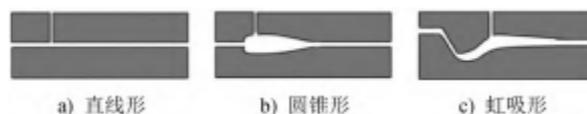


图 2 反应型拉挤成型工艺模具

在反应型拉挤成型工艺中，为提高生产效率，热塑性树脂被注入模具，并在拉挤过程中边原位聚合边浸渍纤维，故被称为原位拉挤成型工艺（图 3）。Zoller 等基于热塑性丙烯酸树脂，通过添加引发剂和设置多个加热区的方法，使树脂在模具中原位聚合，制得力学性能与传统热固性树脂拉挤型材相当的新型复合材料。Epple 等为防止水分影响活化的阴离子聚合，对模具进行分段控温。其将 GF 预热后送入模具，并将己内酰胺单体、催化剂和引发剂注入模具中，最终成功制备出连续 GF 增强 PA6 复合材料（图 4）。Kaczmarek 等对熔融热塑性树脂原位浸渍干纤维丝束展开了探究。其先推导出—维流条件下的 Darcy 定律，并使用 Gebart 方程估算树脂对纤维丝束的浸渍性和渗透性；其次，根据估算的结果改进原位浸渍工艺；最后，通过试验成功制备出与理论预测相符合的热塑性树脂复合材料试样。

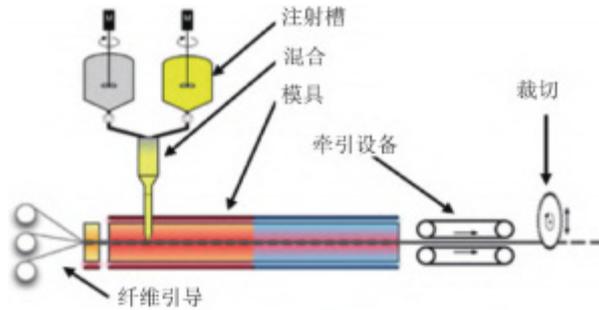


图3 原位拉挤成型工艺流程示意

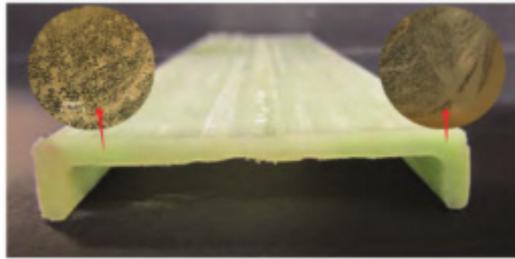


图4 反应型注射拉挤成型工艺制备的GF增强PA6复合材料

1.2.2 非反应型拉挤成型工艺

与反应型拉挤成型工艺不同，在非反应型拉挤成型工艺中，热塑性树脂在浸渍纤维前就已完成聚合。但热塑性树脂黏度大，拉挤过程中不易浸渍纤维，因此纤维在被引入模具前需进行预浸、预加热等预处理。其工艺流程如图5所示。

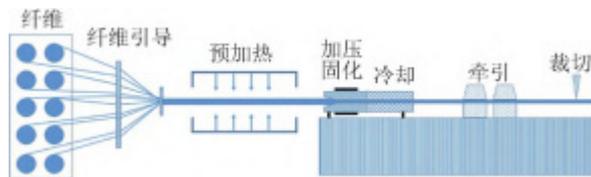


图5 非反应型拉挤成型工艺流程示意

在非反应型拉挤成型工艺中，热塑性树脂对纤维的浸渍方式主要有溶液浸渍、熔体浸渍、纤维混杂（图6a）、粉末浸渍（图6b）以及预固浸渍（图6c）等。

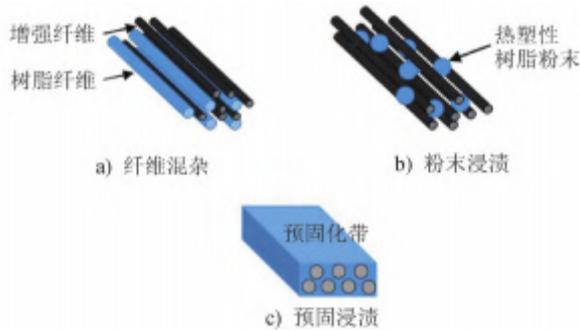


图6 热塑性树脂对纤维的浸渍方式

溶液浸渍法将热塑性树脂溶解于合适的溶剂中，得到低黏度的溶液，并用其浸渍纤维。随后，通过去除溶剂得到预浸料。该方法的优势是，得到的溶液能更快、更充分地浸渍纤维，生产效率高。但是，大部分热塑性树脂很难找到合适的溶剂，这在一定程度上限制了该方法的使用。另外，即便有了合适的溶剂，后续处理也很难彻底将溶剂去除。残留的溶剂会在复合材料成型过程中形成气泡和孔隙，对产品性能造成不利影响。

熔体浸渍法与热固性树脂拉挤成型工艺类似，都是在一定的温度和压力下利用熔融的热塑性树脂浸渍纤维的。Wang 等使用自行设计的熔融拉挤设备，以聚甲醛(POM)浸渍表面经偶联剂处理的玄武岩纤维束，制备玄武岩纤维增强 POM 复合材料(图7)。熔体浸渍法经济方便，适用于绝大部分热塑性树脂。但熔融态热塑性树脂黏度大，对纤维的浸渍效果较差，需先对纤维进行预处理。此外，拉挤成型过程中热塑性树脂长时间处于熔融状态，可能会出现热降解。

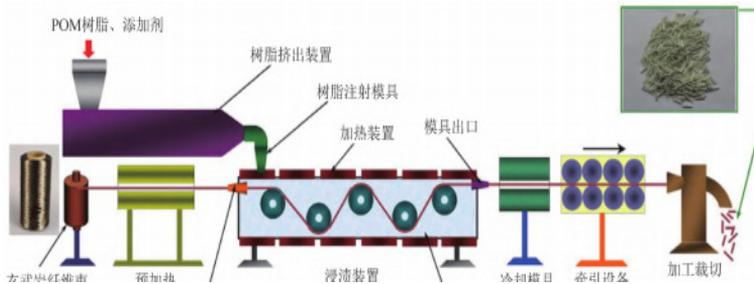


图7 熔体浸渍法制备玄武岩纤维增强 POM 复合材料流程示意

纤维混杂法先将热塑性树脂纤维与增强纤维混合均匀,然后在高温密闭的拉挤环境中熔融热塑性树脂纤维,实现对增强纤维的浸渍,最终拉挤成型。相较于粉末浸渍法,该方法能明显减小拉挤过程中纤维之间、纤维与拉挤模具之间的摩擦力,有效降低拉挤成型过程中纤维受损的概率,提高生产效率和制品品质。相较于其他方法,纤维混杂法能够更好地浸渍纤维。Volk 等基于设计的批量拉挤系统,使用玻璃纤维/聚对苯二甲酸乙二醇酯(GF/PET)混纺纱,拉挤制备直径为 40mm、孔隙率小于 2%的棒材。

粉末浸渍法先将粉末状的热塑性树脂均匀地分散于纤维表面,然后在拉挤过程中将其熔融,实现树脂对纤维的浸渍。此法的优点在于,树脂粉末能均匀分布于每根纤维之间,故能实现更充分的浸渍,并极大程度地缩短浸渍时间,提高生产效率。Goud 等基于干式静电喷涂技术向纤维束喷涂热塑性聚酯粉末,发现静电喷涂技术可以有效解决热塑性聚酯难以均匀浸渍的问题,提高复合材料的整体性能。Nunes 等基于设计的干法粉末涂层设备向 GF 丝束喷涂聚丙烯(PP)粉末,然后通过拉挤成型工艺将其加工成型材。研究发现,在粉末涂层工艺中,拉挤速度越高,型材中聚合物质量分数越低,且当温度在 400~450℃时,聚合物对纤维的浸渍效果最佳。

预固浸渍法即针对已被树脂浸润的预固化带(PCT)进行拉挤以制备型材。Novo 等分别对 GF/PPPCT、PP 粉末包覆的 GF 丝束及 GF/PP 混杂丝束进行拉挤成型,发现:相较于另 2 种材料,使用 GF/PPPCT 拉挤成型的复合材料中树脂对纤维的浸渍效果最好,且复合材料的弯曲强度和层间剪切强度更高。Vedernikov 等将自制的 GF/PPPCT 加工成拉挤型材,并与利用工业生产的 PCT 拉挤制成的型材进行对比,发现:利用自制的 GF/PPPCT 制成的拉挤型材实现了更均匀的浸渍,减少了未浸渍区和裂纹,且其弯曲强度、拉伸强度及层间剪切强度分别提高了 106.0%、6.4%、27.6%。Minchenkov 等研究了不同拉挤速度(2、5、8m/min)制造的 GF/PPPCT 对最终所生产的拉挤型材性能的影响,发现:所得拉挤型材在力学性能上差异显著,其中利用拉挤速度为 8m/min 制造的 GF/PPPCT,得到的拉挤型材弯曲强度最大(554.8MPa)。还有研究表明,使用预固化板(PCS)拉挤的型材比使用 PCT 拉挤的型材性能更好。

2 拉挤成型工艺影响因素

拉挤成型工艺中,树脂的类型和黏度,增强纤维的类型和体积分数,以及加工制

造参数等都会影响拉挤型材的品质。后文简要介绍温度和拉挤速度对拉挤型材品质的影响。

2.1 温度

温度对拉挤型材品质至关重要。对于热固性树脂，合适的温度可以促进树脂的交联。在热固性树脂复合材料拉挤成型工艺中，温度的控制主要集中在对模具的精确调控上。Chaparala 等研究了模具温度对恒定拉挤速度下乙烯基酯树脂体系固化反应的影响。结果表明，随着模具温度的升高，树脂固化速率加快，固化程度增加。其还发现，120℃条件下制备的型材力学性能最佳；但当温度达到 140℃时，树脂内部会产生残余热应力，导致型材力学性能下降。Sandberg 等通过数值模拟技术，成功展示了拉挤过程中温度对树脂固化程度、黏度及压力的影响。

对于热塑性树脂，由于其在常温下黏度大，因而浸渍纤维时需较高的温度以提高其流动性，但过高的温度会导致树脂热解，故热塑性树脂复合材料拉挤成型时需严格控制模具的温度。Chen 等针对 GF 增强 PA6 复合材料开发了一种新型热塑性反应注射拉挤成型工艺，并评估了模具加热区温度对树脂结晶度、熔点和拉挤型材力学性能的影响。结果表明：当模具加热区温度为 150℃时，PA6 基体的结晶度(X_c)最高(43.3%)，拉挤型材的弯曲强度和弯曲模量分别达到最大值(1061MPa 和 38384MPa)；当模具加热区温度为 180℃时，拉挤型材层间剪切强度最高(71.5MPa)(图 8)。此外，热塑性树脂被加热到玻璃化转变温度(T_g)以上时，会从玻璃态转变为黏流态，此时聚合物的黏附性发生改变，进而拉挤成型工艺中树脂与模具之间的微观黏附行为和摩擦行为受到影响。当热塑性树脂和模具之间具有较高的黏附力，甚至超过拉挤型材的强度时，拉挤成型可能会引起树脂脱落，甚至导致纤维受损。为解决这一问题，可通过设置模具的温度呈一定的梯度分布，即在模具加热区后设置冷却区，缩短聚合物凝胶态时间。此外，设置冷却区还可以使热塑性树脂复合材料在拉挤过程中产生一定的收缩，减小拉挤成型工艺的拉力。

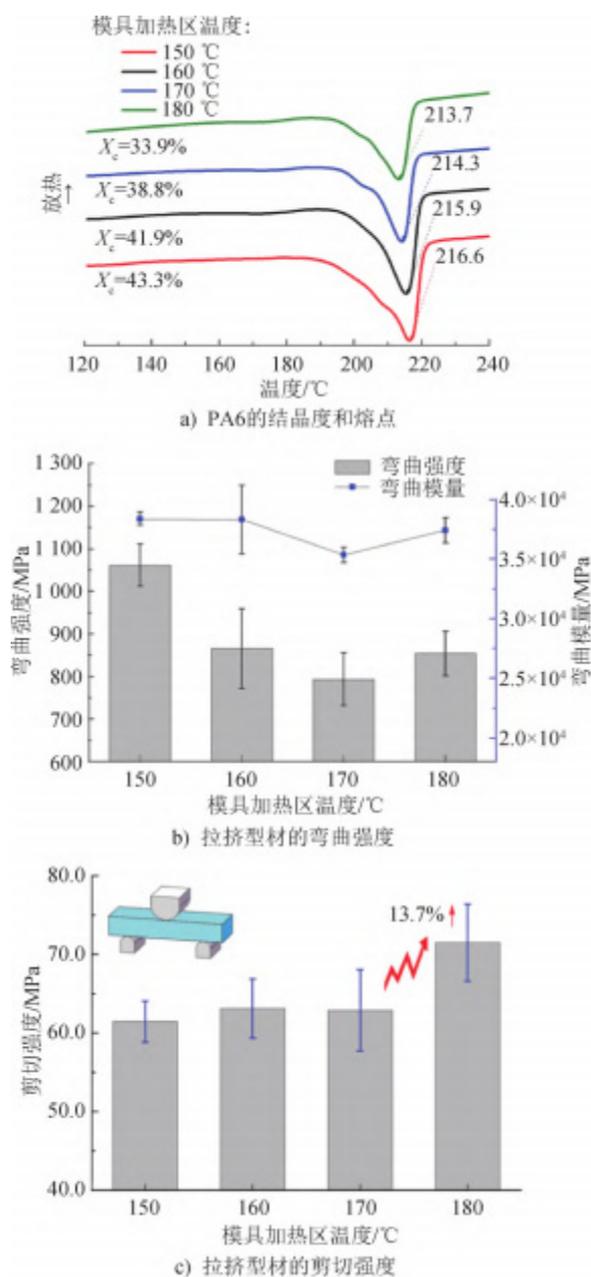


图8 模具加热区温度对树脂结晶度及拉挤型材力学性能的影响

2.2 拉挤速度

决定拉挤成型工艺成本的一个关键因素是拉挤速度。因此，在保证增强材料得到良好浸渍、树脂充分聚合且具有可控结晶度的同时，需要平衡考量拉挤速度。提高拉挤速度可以加快生产，但拉挤速度过大，对于热固性树脂会导致固化度过低，对于热塑性树脂会导致对纤维的浸渍较差，所得拉挤型材孔隙率高，力学性能降低。若拉挤速度过小，对于热固性树脂则固化时间过长，生产效率低，对于热塑性树脂则会因加热区停留时间过长而导致树脂分解，拉挤型材力学性能受影响。Lapointe 等研究发现，当热塑性树脂复合材料拉挤成型工艺的拉挤速度从 100mm/min 降至 50mm/min 时，型材的孔隙率降低 1.7%。路振华等研究拉挤速度对工字形复合材料芯体温度和固化度的影响，发现：随着拉挤速度的增加，芯体最高温度出现位置后移，且处于高温状态的时间缩短，树脂固化不完全（图 9）。

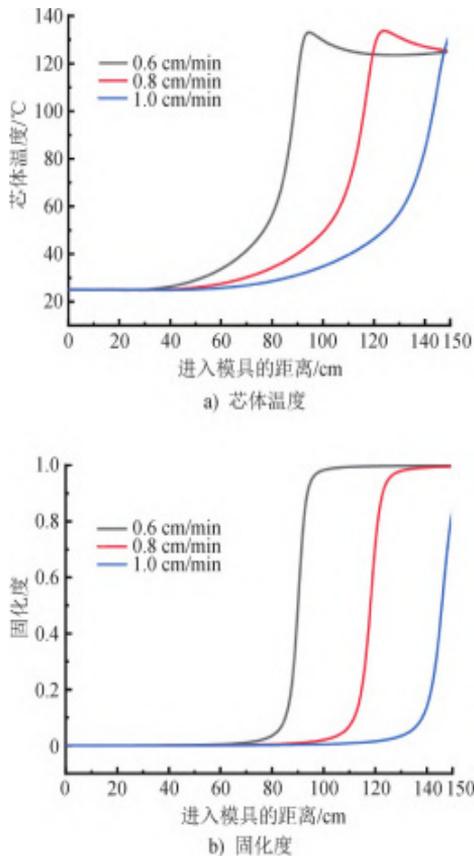


图 9 不同拉挤速度下芯体温度和固化度曲线

3 结束语与展望

拉挤成型工艺作为一种高效且自动化程度高的复合材料生产技术，其产品性能卓越，在多个领域展现出巨大的应用潜力。从风电叶片到轻量化汽车，从轨道交通到建筑结构，拉挤成型复合材料的应用范围在不断拓展，并为现代工业带来了革命性的变化。且随着拉挤成型技术的不断进步和创新，拉挤成型工艺在提高生产效率、降低成本、增强产品性能等方面发挥着越来越重要的作用。但基于当前的研究现状和工业实际需求，拉挤成型工艺也面临诸多问题有待解决，未来应注重以下几个方向：

(1) 拉挤成型工艺虽能生产简单的弯曲状型材，但面对异形结构复合材料仍无能为力。未来，可探究复杂结构拉挤成型复合材料的生产工艺，包括复合材料的拼接、组装等，拓展此类复合材料的应用。

(2) 热固性树脂复合材料回收难度大，对环境污染较大；热塑性树脂虽具有可塑性和可焊接性，在可回收性方面具有许多优势，但其黏度大，对纤维的浸渍性差，加工时拉伸模具需达到很高的温度，同时需配备冷却系统处理型材，加工工艺繁琐，能耗高。针对这些不足，未来可开发天然纤维增强材料和天然树脂基复合材料。

(3) 随着科技的发展，借助先进计算机控制系统和自动化生产线，可实现更高精度的材料控制和更快速地生产，同时降低生产成本。此外，通过构建数值模型，可以全面了解拉挤成型过程中发生的物理变化和化学反应，最大限度地减少型材的残余应力和形状扭曲，防止过早开裂和分层。利用流体仿真和固化动力学模拟技术，可以使树脂更充分地浸渍纤维，进而更精准地控制拉挤过程中的峰值温度和聚合反应，最大限度地减少孔隙率，提高生产效率，降低能耗，指导生产，使拉挤成型复合材料在应用领域更具竞争力。

来源：产业用纺织品 2025 年第 05 期

碳纤维及其树脂基复合材料成型工艺 与应用研究进展

张娜

(中国纺织信息中心)

碳纤维作为一种高性能纤维材料，具有低密度、高强度、高刚度、耐疲劳等多种特性，在现代工业如航空航天、汽车制造、体育器材以及建筑结构等多个领域占据着举足轻重的地位。其不仅显著提升了产品的力学性能和耐用性，而且实现了产品轻量化，有效提高了能源效率并降低了对环境的负面影响。随着科技的进步和应用领域的拓展，碳纤维的战略价值和经济价值不断提升，成为推动工业发展和技术创新的重要力量。

1 碳纤维生产过程

根据原丝种类，碳纤维主要分为聚丙烯腈（PAN）基碳纤维、沥青基碳纤维和粘胶基碳纤维。其中，PAN 基碳纤维由于生产工艺相对简单，产品力学性能优异，迅速成为市场主流，占据碳纤维总市场份额的 90% 以上。

碳纤维（以 PAN 基碳纤维为例）完整的产业链如图 1 所示，先通过原油制备丙烯，丙烯经氨氧化后得到丙烯腈，丙烯腈聚合和纺丝之后得到 PAN 原丝，再经过预氧化、低温和高温碳化后得到碳纤维，也可制成碳纤维织物和碳纤维预浸料，作为生产碳纤维复合材料的原材碳纤维复合材料应用料；碳纤维可与树脂、陶瓷等材料结合，形成碳纤维复合材料，最后通过各种成型工艺得到下游应用所需要的产品。

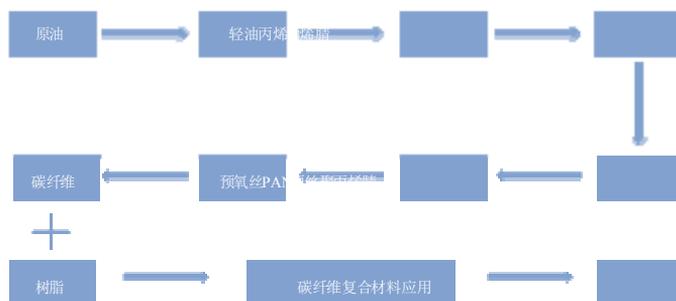


图 1 PAN 基碳纤维及其复合材料生产流程

2 碳纤维复合材料的主要成型工艺

2.1 热压罐（AC）成型工艺

热压罐成型工艺主要用于高性能航空航天复合材料层压结构的成型，比如飞机舱门、隔板、机翼等。其基本成型过程是将增强材料和树脂（含预浸料）按设计的铺层方式逐层铺放到模具上，并采用真空袋密封后放入热压罐中，经加热、加压、固化、降温、脱模、修整后获得制品。其中，铺层工序可以通过手工铺叠、机械辅助铺叠、全自动铺叠等多种方式完成。

手工铺叠预浸料的过程通常较为缓慢且成本较高，因此自动化技术如自动铺带（ATL）和自动丝束铺放（AFP）技术应运而生。ATL 技术通过自动铺带机实现，该机器的铺带头能够根据结构件的边界轮廓自动完成预浸带的铺设和特定形状位置的切割。相对于手工铺叠，该技术可以显著降低制造成本，大幅提高生产效率。而 AFP 技术则是采用多丝束铺放头，可以根据构件形状自动调整纱束根数，实现局部加厚、混杂、加筋、铺层递减和开口铺层补强等多种设计要求，还可铺放宽度可变的预浸带，能够实现连续变角度铺放（Fiber-Steer 技术），满足复杂构件的制造需求。

热压罐成型是目前应用最为广泛的工艺，由于纤维和树脂含量可控，制品表面孔隙率低，经高压固化后可以获得高质量的复合材料，所以被大量用来制造高技术要求的航空航天和尖端设备用树脂基复合材料。但热压罐设备昂贵，运行和维护成本较高；生产周期长，固化过程需要较长时间，生产效率相对较低；此外还需要严格控制热压罐内的温度和压力，对操作环境有较高要求。这些都限制了其更广泛的应用。

2.2 树脂传递模塑（RTM）成型工艺

树脂传递模塑成型工艺是制造复合材料最常用的技术。此技术的基本过程是在闭合模具的模腔内预先铺设纤维增强材料，再通过压力作用把树脂液注入模腔，使树脂充分浸透纤维增强材料，并在一定的条件下固化，最终脱模成型。此成型技术能够制造出质量较高、尺寸精确、性能优异的复合材料制品。

2.3 缠绕成型工艺

缠绕成型工艺是将浸渍液态树脂的纤维丝束均匀且规律地缠绕在芯模上之后，进行加热固化的成型方法。

该工艺可以一边将碳纤维浸渍在树脂槽（浴槽）中一边进行卷绕，也可以将预先浸渍在树脂中的丝束材料进行卷绕。缠绕成型工艺具有良好的可设计性，适用于制造具有圆筒形或类似旋转对称形状的部件。该技术能够根据器材受力状况，遵循既定规律对纤维进行均匀分布，以此将纤维的强度全面发挥出来，从而获得轻质且强度较高的器材。在工艺上其可以进行连续化与自动化生产，生产周期比较短，生产效率与水平较高。但该技术需要在加工件固化后去除芯模，不适合制造带有凹曲表层的器材。

2.4 拉挤成型工艺

拉挤成型工艺的流程是将碳纤维通过树脂胶液浸渍、固化成型后，再经牵引机构牵拉并切割，其是一种能够连续生产固定界面、长宽不受限制的复合材料型材的方法。该工艺简单、高效，材料利用率高，设计灵活，适用于高性能纤维增强树脂基复合材料的大规模生产。

2.5 手糊成型工艺

手糊成型工艺是一种传统的热固性树脂基复合材料成型工艺，通过手工逐层交替铺贴织物和涂刷树脂胶液至所需要的厚度，再经过固化、脱模等工序，最终得到复合材料制品。手糊成型工艺操作简单，具有形状和尺寸灵活性，尤其适合生产单件或小批量产品及现场生产不方便运输的大型制品，如大型舰船的船体和甲板等部件。但该工艺依赖手工操作，生产效率低，且其生产的产品质量受操作者技能和经验影响较大，不适合生产高性能及大批量产品。

2.6 3D 打印成型工艺

3D 打印技术是一种通过数字化控制，逐层构建三维物体的先进制造技术。该技术

以工艺的简便性、能够制造复杂形状的构件以及无需模具等优势，有效降低了复合材料的生产成本。目前，碳纤维增强热塑性塑料的 3D 打印工艺主要包括选区激光烧结（Selective Laser Sintering, SLS）工艺和熔融沉积成型（Fused Deposition Modeling, FDM）工艺。美国宇航局格伦研究中心（NASA Glenn Research Center）与路易斯维尔大学和美国空军合作，开发了一种增材制造技术，使用热固性聚酰亚胺树脂生产具有耐高温性能的复合材料零件。该工艺使用 SLS 来熔融加工混有研磨碳纤维的 RTM370 聚酰亚胺树脂粉末，随后对所得复合材料零件进行后固化。该技术对需要在 300℃ 以上条件下服役的复杂结构发动机零部件的生产具有重大意义。

2.7 4D 打印成型工艺

4D 打印是纤维增强复合材料 3D 打印的前沿研究方向，其在传统 3D 打印基础上增加了时间维度，通过引入形状记忆材料、智能水凝胶等功能材料，实现 3D 打印构件的形状、性能和功能能够在外界预定的刺激（热能、水、光、pH 值等）下随时间发生变化。

目前，碳纤维 4D 打印技术已取得一些研究成果。如南方科技大学的 WANG 等提出了一种连续纤维增强复合材料 4D 打印折纸的精确部署控制策略，通过结构设计巧妙地利用连续碳纤维高强度、能导电、传热好的特性，实现了承载能力强、状态可重构、时空可调控、形性可调制的电热折纸。该电热折纸在航空航天领域具有广泛的应用潜力，如可变形机翼、空间可展开结构等（图 2）。西安交通大学的 WANG 等提出了一种基于连续纤维增强液晶弹性体的直写 4D 打印方法。该方法结合了液晶弹性体的可逆热致伸缩变形能力和连续纤维材料的优异力学性能，制备了具有承载能力以及变形能力的复合材料桁架结构，为创建软机器人、机械超材料和人造肌肉开辟了新途径（图 3）。

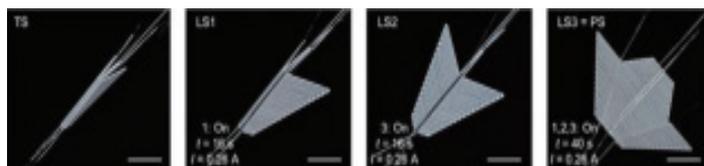


图 2 连续碳纤维 4D 打印折纸

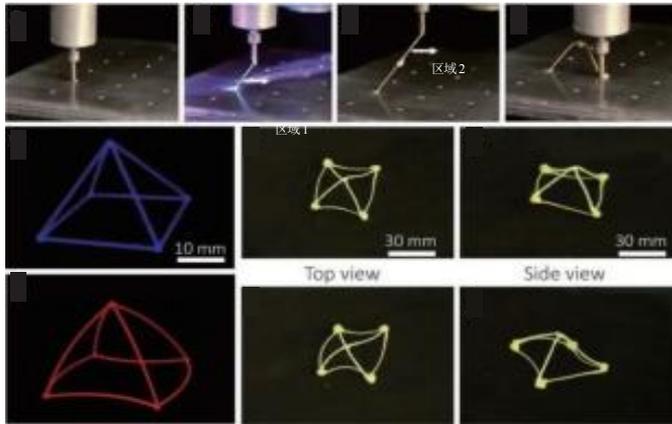
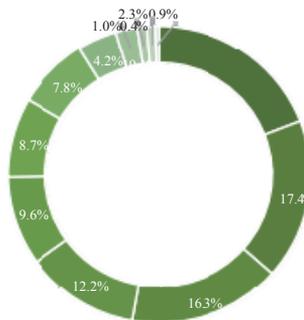


图 3 4D 打印的三角形桁架单元

3 碳纤维及其复合材料市场规模及应用

3.1 碳纤维市场规模

《2023 全球碳纤维复合材料市场报告》显示，2023 年全球碳纤维需求量为 11.5 万 t，应用领域集中在航空航天军工、风电叶片及体育休闲等领域（图 4）。其中，风电叶片对碳纤维的需求疲软；航空航天军工市场在新冠疫情后迅速回暖，是碳纤维需求量最大的市场；体育休闲市场在疫情前后出现了过山车式变化，2023 年市场逐步恢复至正常状态。



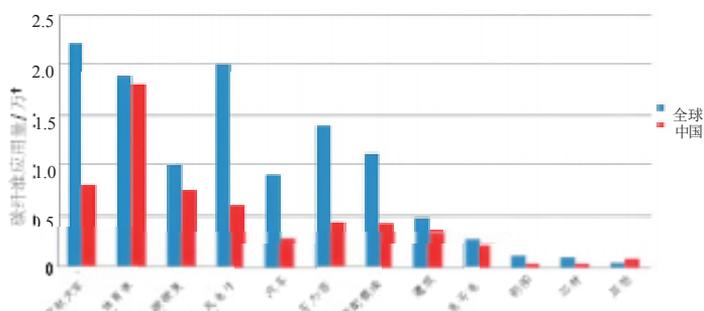
数据来源：广州赛奥碳纤维技术股份有限公司（以下简称“奥赛碳纤维技术”），

《2023 全球碳纤维复合材料市场报告》。

图 4 2023 年全球碳纤维市场应用需求占比

2023 年我国碳纤维的总需求量为 6.91 万 t，相比 2022 年降低了 7.2%，其中，国产占比 76.7%，为 5.30 万 t，同比增长 17.8%，但相比 2022 年高达 53.8% 的增速，2023 年国产纤维供应量增长速度严重放缓；进口量为 1.61 万 t，同比减少 45.4%。

与全球碳纤维的应用领域相比，我国碳纤维的优势应用聚焦在体育休闲、碳碳复材、建筑等领域；航空航天军工及压力容器迅猛发展，大幅度缩小了与国际的差距，但主力需求的商用航空应用刚起步；风电行业与国际市场依然有巨大差距；随着中国新能源汽车产业继续高速发展，汽车及混配模成型市场应用潜力巨大（图 5）。



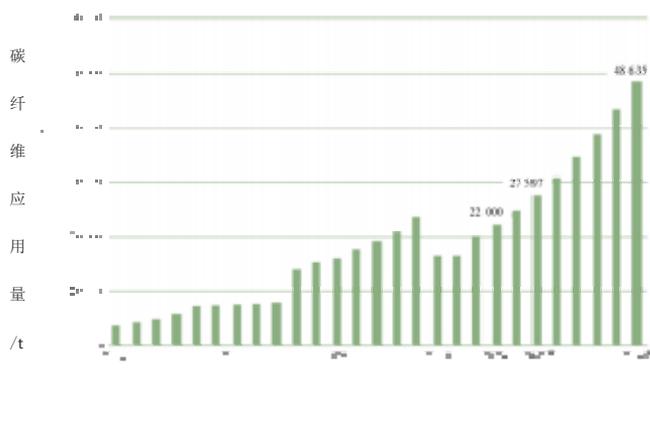
数据来源：奥赛碳纤维技术，《2023 全球碳纤维复合材料市场报告》。

图 5 2023 年全球和我国碳纤维应用对比

3.2 碳纤维及其复合材料的应用

3.2.1 航空航天

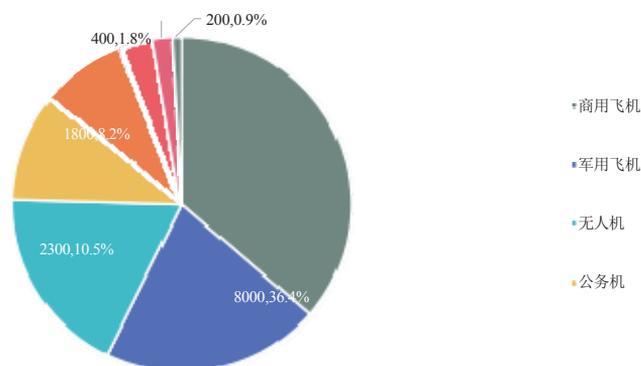
据赛奥碳纤维技术统计（图 6、图 7），2023 年全球航空航天市场对碳纤维的需求量为 2.20 万 t，其中，商用飞机需求量 8000t，占比达 36.4%，是目前航空工业中对碳纤维需求最大的市场；军用飞机需求量为 4600t，占比达 20.9%，无人机需求量 4000t，占比为 18.2%。预计到 2030 年，航空航天领域碳纤维需求量将达到 4.86 万 t。



注：*表示预测数据，下同。

数据来源：奥赛碳纤维技术，《2023 全球碳纤维复合材料市场报告》。

图 6 航空航天市场碳纤维需求量



数据来源：奥赛碳纤维技术，《2023 全球碳纤维复合材料市场报告》。

图 7 2023 年全球航空航天用碳纤维分市场需求量 (t) 及占比

在航空领域，波音公司的 B787 “梦想飞机”，在机身、机翼、尾翼、地板梁、座椅框架等部件中应用了碳纤维复合材料，应用率达到 50%，是首架同时采用高性能碳纤维复合材料机翼和机身的大型商用客机；欧洲空中客车公司推出的中型宽体客机 A350XWB（图 8）在机翼、机身、尾翼等部位均使用了碳纤维增强复合材料，使用比

例达到整体结构重量的 53%左右，显著减轻了客机重量，提高了燃油效率，降低了运营成本，是现代商用飞机中碳纤维复合材料使用比例最高的机型之一；美国 F-35 闪电 II 战斗机在机身结构件、机翼、尾翼等关键部件中应用了大约 35%的碳纤维复合材料，显著减轻了飞机重量，增加了载油量和武器挂载量，从而提升作战半径和持续作战能力；此外，碳纤维复合材料具有良好的吸波性能，可以降低雷达反射面积，提高了战斗机的隐身性能。我国国产大型客机 C919 的机尾和侧翼也采用了碳纤维复合材料，占整机重量的 12%。



图 8 空中客车 A350XWB

在航天领域，SpaceX 猎鹰 9 号火箭、阿丽亚娜 5 号火箭、火星探测器好奇号的部分结构件均采用了碳纤维复合材料。我国自主研发的载人航天飞船神舟系列中也大量使用了碳纤维复合材料，如飞船的返回舱采用了碳纤维复合材料，提高了比强度和比刚度，同时降低了重量和油耗。其他关键部件如推进系统也使用了碳纤维复合材料，确保了飞船的整体性能和安全性。目前国内最大的商业航天复合材料火箭整流罩也是采用全碳纤维复合材料高精度成型。

近年来，包括我国在内的多个国家将目光转向低空经济，认为低空经济将为碳纤维复合材料带来增量市场。2024 年两会期间，“低空经济”首次被写入政府工作报告。2024 年 3 月，工业和信息化部、科学技术部、财政部、中国民用航空局印发《通用航空装备创新应用实施方案（2024~2030 年）》，提出到 2030 年，推动低空经济形成万亿级市场规模。中国民航局积极落实相关规划，修订了 30 余部民航法规，初步建立通用航空标准法规体系，推进建设低空飞行服务保障体系。各地政府纷纷响应国家政策，据相关数据统计，截至 2024 年 5 月底，北京、广东、安徽等 29 个省区市已将“低

空经济”有关内容写入 2024 年政府工作报告，并有 8 个省市已明确制定了相关产业规模目标。

电动垂直起降飞行器（eVTOL）作为低空经济的重要载体之一，其主流的设计方案均采用碳纤维作为主要机身结构材料。其中，约有 75%~80%用于结构部件和推进系统，12%~14%用于横梁、座椅结构等内部应用，电池系统、航空电子设备和其他小型应用占比为 8%~12%。根据德邦证券的测算，单台 eVTOL 对碳纤维的需求量为 100~400kg。

当应用于 eVTOL 时，碳纤维强度与模量的最佳比值至关重要。2023 年 7 月，位于美国加利福尼亚州的 Overair 公司和日本东丽（Toray）公司宣布了一项战略合作，前者将东丽的 T1100/3960 先进预浸料系统用于其 Butterfly 型 eVTOL。东丽 3960 是一种高度增韧的 177℃ 固化环氧树脂，玻璃化转变温度（ T_g ）为 204℃，并可用于高压釜和高压釜外（OOA）固化。该树脂与 ToraycaTMT1100 中间模量+（IM+）碳纤维具有协同作用，东丽称该纤维是目前可用的拉伸强度最高的纤维。T1100/3960 单向（UD）平纹预浸料用于蝴蝶的机身结构和推进装置。除应用于 eVTOL 之外，东丽多样化的产品组合还为一级和二级航空结构、旋翼机、雷达罩、天线系统、大型有效载荷整流罩、起落架组件等提供了量身定制的解决方案。

3.2.2 汽车工业

在当前环保法规日益严格和公众对低碳生活方式广泛认可的背景下，汽车产业已将节能减排作为其核心议题。鉴于能源技术革新的局限性，车辆轻量化成为实现汽车节能减排目标的关键途径之一。研究显示，汽车整车重量降低 10%时，燃油效率可提高 6%~8%。碳纤维因比模量和比强度高、减重潜力大、安全性好等突出优点，被认为是汽车轻量化的理想材料。据统计，2023 年全球汽车市场对碳纤维的需求量为 9500t，预计到 2030 年，需求量将达到 2.91 万 t。

在碳纤维汽车轻量化应用领域，德国宝马（BMW）公司一直致力于开展汽车行业轻量化结构的研究。宝马 i3（图 9）全碳纤维车身电动车量产，使得宝马成为第一家大批量使用碳纤维复合材料作为车身材料的整车厂商。宝马第 6 代 BMW7 系汽车是宝马核心产品中第一款实现将工业制造的碳纤维材料、高强度钢材和铝材完美组合应用到车身的车型。目前，在宝马各系列车型中的车身、底盘、车顶、车门、头盖、引擎盖、尾翼、压尾翼等 30 多种零部件均使用了碳纤维复合材料。



图 9 宝马 i3 的碳纤维空间架构

除宝马外，各大知名汽车厂商也纷纷将碳纤维复合材料应用于其车型上，如柯尼塞格旗下的 Regera（图 10）为第一款用裸碳纤维制成的跑车，全车版件均采用 KNC（柯尼塞格裸露碳纤维）材质，相较于同样采用全碳纤维版件却搭配喷漆涂装的 Regera，车重减轻 20kg。兰博基尼 AventadorSVJ 的车身、底盘大量采用碳纤维，以减轻重量并提升性能；SianFKP37 采用了碳纤维单体壳、全碳纤维车身，并在空气动力学部件以及内饰中使用了碳纤维及其复合材料，减轻了车身重量，提升了车辆的刚性和安全性能，并使其拥有更低的油耗和更长的续航里程。迈凯伦 Speedtail 基于精细编织的碳纤维结构，采用钛层熔合于织物上，既保持了碳纤维的高强度和低重量，又为打造各色的饰面创造了可能。



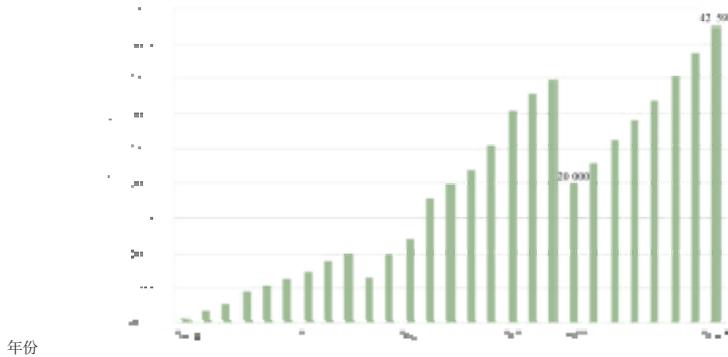
图 10 Regera 裸碳表面

碳纤维复合材料在国产汽车领域的应用也在逐渐起步，比亚迪、奇瑞、北汽、长安、蔚来等量产车型已开始应用碳纤维复合材料（CFRP）零部件，如比亚迪仰望 U9 采用一体式碳纤维单体座舱，并在空气动力学部件上大量使用碳纤维，如大尺寸碳纤

维固定式尾翼等；奇瑞公司和中国科学院合作推出了插电式混合动力车艾瑞泽 7，车身采用碳纤维复合材料，外壳重量减轻 10%，油耗降低 7%，车身总体减重达 40%~60%。同时国内还涌现出一批 CFRP 零部件生产供应企业，如江苏澳盛复合材料科技有限公司、江苏亨睿碳纤维科技有限公司、上海卡涑复合材料科技有限公司、上海华渔传动科技有限公司等，都已建立了低成本自动化量产零部件应用示范生产线。

3.2.3 风力发电

随着风机大型化、轻量化趋势的加剧以及海上风电的快速发展，碳纤维在风电叶片上的应用范围和规模均逐渐增加。出于经济性考虑，当前主流的叶片为玻璃纤维，但在满足刚度和强度要求的条件下，碳纤维风机叶片与现在主流的玻璃纤维叶片相比，重量会减轻 30%以上，能够显著降低叶片的重量，满足大型叶片轻量化的需求。根据全球风能协会（GWEC）的资料，当风机叶片长度超过 40m 时，综合材料用量、劳动力、运输和安装等方面成本的降低，采用碳纤维制造叶片相较于玻璃纤维更具经济性。2023 年全球风电叶片领域碳纤维需求量为 2 万 t，预计到 2030 年将达到 4.26 万 t（图 11）。



数据来源：奥赛碳纤维技术，《2023 全球碳纤维复合材料市场报告》。

图 11 风力发电市场碳纤维需求量

VESTAS（维斯塔斯）、GEMESA-SIEMENS（西门子歌美飒）、NORTEX、GE（美国通用集团）和 LM 等国外叶片制造商，均已采用碳纤维材料制造叶片。如丹麦 LM 风能公司的 LM88.4P 风电叶片（图 12）采用混杂增强技术，将碳玻混杂增强复合材料主梁沿着长度方向嵌入标准玻璃纤维复合材料基壳层压板中，该叶片能够承受的参考风速设定为 50m/s，符合 I 级风况的使用要求；维斯塔斯更是于 2002 年申请了碳纤维主梁风电叶片挤拉工艺的相关专利。

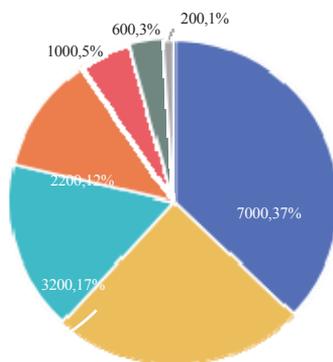


图 12 LM88.4P 风电叶片

国内主要的叶片制造厂家包括中材科技、时代新材、中复连众、三一重能等，2023年中材科技碳纤维主梁风电叶片 SI122 型号产品成功下线，该叶片长 122m，额定功率 13.6MW，设计年平均风速为 9.5m/s，叶片主梁采用全新的碳纤维拉挤工艺，是目前碳纤维拉挤梁应用的最大尺寸型号，相较于传统的玻璃纤维主梁，其可以显著降低叶片重量超 12%，且具有更高的刚性和耐疲劳性；三一重能公司利用干喷湿纺 48K 大丝束碳纤维成功制造出 131m 全球最长的陆上风电叶片，首批风电叶片已成功下线，并即将挂机试验。

3.2.4 体育休闲

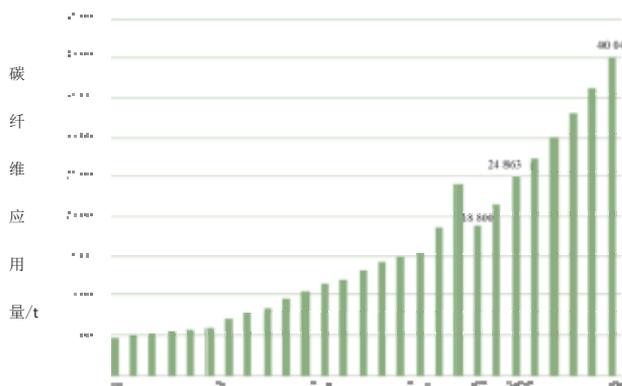
如图 13 所示，碳纤维复合材料在钓鱼竿、高尔夫球杆、自行车、网球/羽毛球等球拍、曲棍球棒、滑雪杆等体育休闲产品中广泛应用。据统计，2023 年体育休闲市场对碳纤维的需求量为 1.88 万 t，预计未来将以 3% 的年均复合增长率平稳增长，至 2030 年将达到 4.00 万 t（图 14）。



u 钓鱼竿 a 高尔夫 a 自行车 a 球拍 a 曲棍球杆 u 滑雪杆 u 其他

数据来源：奥赛碳纤维技术，《2023 全球碳纤维复合材料市场报告》。

图 13 2023 年全球体育休闲用碳纤维分布市场需求量 (t) 及占比



数据来源：奥赛碳纤维技术，《2023 全球碳纤维复合材料市场报告》。

图 14 2004—2030 年全球体育休闲市场碳纤维需求量

钓鱼竿和高尔夫球杆是最早应用碳纤维的体育休闲用品之一。现代钓鱼竿利用碳纤维的高强度和轻量化特性，提升了钓鱼竿的性能和使用体验。如 Shimano 的 EX-SENC 系列钓鱼竿采用碳纤维一体成型握把（图 15）和碳纤维圆型握把、中空薄壁构造实现轻量化和高感度化。



图片来源：Shimano 官网。

图 15 Shimano 全碳纤维一体成型握把

同样地，碳纤维的轻质和高强特性使得高尔夫球杆在挥杆时更加稳定，精准控制击球的方向和力度。TaylorMade 作为高尔夫球杆领域的知名品牌，其 M 系列及 Qi10 系列高尔夫球杆广泛采用了碳纤维复合材料。如 Qi10LS 高尔夫球杆（图 16）应用了“InfinityCarbonCrown”设计，60 层碳纤维双曲杆面，碳纤维覆盖杆冠总面积的 97%，实现了良好的重量分布和容错性，同时实现了更高效的能量传输，提高了球速，是

TommyFleet-wood 等选手的比赛首选用杆。



图片来源：TaylorMade 官网。

图 16 Qi10LS 高尔夫球杆

碳纤维自行车的研发始于 1974 年，在洛杉矶奥运会（1984 年）上，美国自行车队使用碳纤维自行车获得多枚金牌，推动了碳纤维自行车的普及。美国 TREK 的公路自行车系列如 Madone、Domane 和 Emonda 等以及 SPECIALIZED 的 TarmacSL 系列和 Roubaix 系列均为碳纤维自行车。目前，中国台湾拓凯、捷安特和大陆的喜德盛、富士达、瑞豹等公司在碳纤维自行车生产中都占有重要地位。在巴黎奥运会山地自行车女子越野赛中，我国选手的比赛用车即采用喜德盛品牌自主研发的全避震 XC 车（图 17），该自行车选用 T1100 碳纤维材料，整车采用了 380 片碳布，车架仅有 1100g，整车重量 9.4kg，是全球同级产品中最轻的产品。



图片来源：喜德盛。

图 17 喜德盛全避震 XC 车

4 结语

碳纤维复合材料因轻质、高强度、耐腐蚀等特性在现代工业中扮演着越来越重要的角色。但目前碳纤维在生产和应用中面临着诸多问题，如碳纤维原材料生产成本较高，生产过程复杂，造成其整体生产成本较高，限制了其在大规模的汽车制造和航空航天领域等领域的应用；碳纤维加工难度大，质量控制难度大，对生产过程中的温度、压力、化学反应时间等参数要求严格；由于碳纤维复合材料应用领域的特殊性，国外对高性能碳纤维技术与高端工艺装备实施市场垄断和技术封锁，导致国内企业在竞争中处于不利地位。

随着科技的不断进步和全球对轻量化、高强度材料需求的增加，碳纤维及其复合材料作为新一代高性能材料，将会呈现出高端化、轻量化、成本降低和新型应用领域的拓展等特点，这些趋势将进一步推动碳纤维在航空航天、汽车制造、风电叶片及体育休闲等多个领域的发展，促使市场规模继续保持增长态势。

来源：纺织导报 2025 年第 01 期

大型真菌及菌丝体复合材料的应用研究进展

袁久刚¹ 王应雪¹ 周爱晖² 徐进¹ 唐颖¹ 范雪荣¹

[1. 江南大学生态纺织教育部重点实验室; 2. 福建省纤维检验中心]

真菌是地球上最早出现的生命之一，也是自然界不可缺少的组成部分。人类餐桌上鲜美的蘑菇，如金针菇、香菇、平菇，或药店里贵重的药材如桑黄、灵芝等，在生物学分类中属于大型真菌。目前全球真菌种类约 380 万种，其中 14 万种是高等大型真菌。根据中国食用菌协会统计，食用菌是我国农业产业的第五大栽培产业，2022 年我国食用菌总产量已达到 4222.54 万 t，市场总产值约 3887.22 亿元，中国食用菌产量占全球食用菌总产量的 70%左右，已成为世界第一食用菌生产国和出口国。

自古以来，大型真菌因富含蛋白质、多糖等各类营养物质以及多种生物活性成分，主要作为食用和药用材料，因此习惯上按照用途将其分为食用菌、药用菌和毒蕈。近年来，随着人们环保意识的提升以及栽培技术的进步，大型真菌的应用范围也在不断扩大，其功能性、环保性和可持续性越来越受到研究者关注，与真菌有关的复合材料报道不断涌现。基于大型真菌的复合材料在建筑、包装、纺织、医疗等领域都表现出其独特的优点。本文对目前大型真菌的主要结构、组成成分、活性物质等进行介绍，对菌丝体材料研发以及所面临的问题等进行综述，以期为真菌复合材料的发展提供参考。

1 大型真菌结构及成分

1.1 大型真菌的结构

大型真菌在生长过程中，首先萌发出菌丝，随后菌丝相互纠缠生长为网络状菌丝体，最后菌丝体聚集扭结发育为成熟的子实体，产出孢子。

菌丝是大多数真菌的结构单位，由孢子萌发成芽管，再由芽管不断生长成丝状或

管状的菌体，可以不断地延伸和分枝。无数根菌丝的集合体构成菌丝体，其形态各异，具有吸收营养、运输代谢物质、储藏代谢产物等功能，是大型真菌的营养器官。而子实体是高等真菌的产孢结构，也是食用菌和药用菌的主要部分，属于组织化的菌丝体，形状因真菌种类不同而异。

1.2 真菌组成及活性成分

真菌种类各异，其成分主要含有多糖、蛋白质和脂肪等。此外，真菌还含有萜类、生物碱、抗生素和金属螯合剂等生物活性成分，这赋予其抗炎、抗菌、抗氧化、免疫调节等功效。

细胞壁占真菌干物质的 30%左右，是材料加工的主要利用部分。高等真菌的细胞壁多由几丁质组成，其中 80%为碳水化合物，10%为蛋白质及糖蛋白。低等真菌如卵菌的细胞壁成分以纤维素为主，酵母菌则以葡聚糖为主，各类真菌的细胞壁详细成分占比如表 1 所示。

表 1 真菌细胞壁化学成分分析

类别	占比/%						
	葡聚糖	纤维素	几丁聚氨基甘露质葡糖聚糖			蛋白质	脂类
壶菌纲	16	—	58	—	—	10	—
卵菌纲	54	36	0	10	<1	5	3
接合菌纲	0	0	9	33	2	6	8
子囊/半知菌门	43	0	19	—	2	11	5
酵母(子囊菌)	29	0	1	0	31	13	9
担子菌门	61	0	10	—	<3	7	3

此外，大型真菌子实体和菌丝体的组成也有一定差异（见表 2）。同类大型真菌的活性成分，其化学组成和比例也不同，这也决定了真菌的应用多样性。例如，香菇子实体含有多种抗肿瘤、抗氧化多糖，抗癌作用显著高于其它蘑菇多糖。平菇含有的多酚与氨基酸等活性物质具有良好的抗氧化作用。金针菇多糖可抑菌消炎，抗氧化，提高免疫力。桑黄含有相当多的黄酮类化合物与多糖类物质。灵芝主要含有三萜类、核苷类、生物碱类等多种药理活性物质。详情列于表 3。

表 2 子实体与菌丝体干物质比例分析

种类	组成结构	占比/%				
		灰分	总糖	粗蛋白	粗脂肪粗纤维	
平菇	菌丝体	2.58	0.87	18.07	3.25	15.83
	子实体	5.79	2.10	25.46	2.13	13.58
金针菇	菌丝体	10.99	40.40	14.80	2.83	22.13
	子实体	6.40	28.50	20.74	0.71	13.54
桑黄	菌丝体	7.00	33.08	36.46	13.35	—
	子实体	6.40	17.47	5.48	9.52	—

表 3 几种典型大型真菌及其活性成分与作用

种类	活性成分	作用
香菇	多糖、氨基酸、维生素 (B1、B2、C、D)、膳食纤维	抗肿瘤、抗衰老、抗氧化、抗肝炎、免疫增强
平菇	多糖、多肽、氨基酸、酚类、萜类、甾醇、脂肪酸酯	抗炎、免疫调节、抗高胆固醇、抗高血压、抗糖尿病、抗肥胖、抗衰老、抗菌、抗氧化、保肝
金针菇	多糖、多肽、甾醇、麦角硫醚、铜芳炔倍半萜、地尔松、半胱氨酸	免疫调节、抑菌消炎、抗肿瘤、抗氧化、肝保护、抗高脂血症
桑黄	多糖、脂肪酸、氨基酸、黄酮、萜类化合物	免疫调节、抗肿瘤、消炎抗菌、降血糖、抗氧化
灵芝	多糖、三萜 (主要是灵芝酸)、蛋白质、类固醇、甾醇、核苷酸、脂肪酸、维生素	免疫调节、抗癌、降糖、抗氧化、抗动脉粥样硬化、抗纤维化、镇痛、抗炎、抗菌、降血脂、保肝、抗性激素过剩、抗疱疹、抗关节炎、抗骨质疏松、抗衰老、抗溃疡

1.3 发酵方式对真菌材料加工的影响

自然生长的大型真菌尽管数量可观，但质量参差不齐，无法满足商业需求。在实际应用中，为保证真菌材料质量稳定，通过人工发酵手段获得真菌及其产物是目前的有效方法。其发酵方式主要分为液态发酵与固态发酵 2 种。通过控制真菌发酵方式、发酵底物、发酵时间、菌丝种类等条件，可直接影响真菌材料的药理性能和产出效率。

利用发酵液进行液态发酵，真菌的生长较为均匀，生产效率高且占地面积小，但发酵过程易受污染，对卫生条件要求高。利用木屑、麦麸、谷粒等基质，在潮湿状态下进行固态发酵，具有工艺简便、污染风险小等特点。但是较难控制真菌的均匀性，因此，需针对具体产品需求，选择不同的发酵方式。例如，生产用于印刷或医疗等方面的类纸状纯菌丝体材料，可使用液态发酵，其培养基含水量高，收获的真菌产物薄而均匀。固态发酵既可收获菌丝体，又可收获子实体，用固态发酵制备的菌丝体材料较厚，常用于生产纯素皮革、隔音泡沫、菌丝体复合砖型材料以及板型材料等。2 种

发酵方式的具体差异如表 4 所示。

表 4 大型真菌发酵方式

项目	液态发酵法	固态发酵法
生产优势	生长速度快、成品厚度均匀、产物易与营养液分离	生长速度快、污染风险较低、成本较低、设施技术含量较低
生产劣势	污染风险高、成本较高	厚度不均匀、不易与底物分离
产物种类	菌丝体	菌丝体、子实体
成品形态	类纸状、类皮革状	类皮革状、泡沫状、砖板状
加工方向	类纸状材料、服装材料、医用材料	真菌皮革、隔音泡沫、缓冲包装、菌丝体复合生物基材料

2 真菌材料的特点与应用

目前，基于真菌的复合材料研发正处于快速上升阶段。市面上的真菌材料大体可分为两种，分别是纯菌丝体材料和菌丝体复合材料，前者多指几丁质纳米纸、菌丝体皮革等材料，后者多指菌丝体生物基复合材料等。真菌材料的性能与其培养方式和加工方法密不可分。相较于其他物质，利用真菌制作复合材料具有以下三个突出特点：

（1）生产污染小，转化利用率高。作为一种生物有机体，真菌能以木料等有机废物为基质，高效降解木质素，将其转化为几丁质多糖等有用物质，因此可有效促进自然资源的合理利用。（2）真菌材料制备工艺简单，材料性能优良。在菌丝体生长过程中，利用菌丝体特有的黏性，将其它物质直接进行生物黏合即可得到菌丝体复合材料，且菌丝体具有厚而复杂的纤维网络构造，这使其表现出木质纤维素材料（如木材和软木）的典型力学性能。（3）真菌材料可完全降解，其废弃物不会对生态系统造成损害，因此，真菌复合材料对于改善材料可持续性、推进材料行业的转型与发展，具有巨大潜力。

2.1 隔音材料

一些菌丝体材料的泡沫状结构，具备较强的吸声性，是很好的隔音材料。经过进一步的改性，可使其更加绝缘且耐用，甚至可达到阻燃效果。基于这些特点，还可将菌丝体材料应用到建筑业。

真菌的菌丝体富含壳聚糖物质，黏性突出，在制作菌丝体复合材料时，菌丝可作为一种天然的生物胶水，将木屑等有机物基质颗粒黏合在一起，形成基本的砖型材料（见图 1），后续经去活、压制、固化、加工改性即可得到菌丝体生物复合材料。一

些研究显示,大型真菌培养基质越难被真菌消化,获取的真菌材料便会含有越多的几丁质,可表现出更高的弹性模量和更低的伸长率,力学强度也会更高。



图 1 菌丝体生物复合材料

Jiang 等使用织物、菌丝体、大豆基树脂,经培养、去活、固化等流程,开发了一种三明治结构的生物质复合材料。该材料具备较高的蒙皮极限应力与抗弯强度,可取代目前广泛使用的大部分硬性塑料制品,也可作为地板材料。He 等以农业废料为基质,制备了菌丝体复合板绿色建筑材料。为提高菌丝体复合板的力学强度和综合性能,通过使用硅烷偶联剂对菌丝体的接触界面进行改性,使菌丝体能够通过协同作用形成牢固的双网络结构。也有研究者采用高温压缩处理方式来提升材料的性能,例如 Pelletier 等将生长在农副产品上的轻质菌丝板变成了压缩板,通过吸声、反射和透射等声学特性测试表明,该新型压缩菌丝体基板在生物基防噪音复合板有巨大潜力。

2.2 包装材料

随着电子商务经济的发展,产品过度包装带来的资源消耗与环境污染等问题引发人们对包装材料的思考。真菌复合材料可将低成本的农业副产品,如甘蔗糖蜜,转化为几丁质生物聚合物。这些聚合物可用于生产薄膜等材料,其力学性能明显优于包含使用纤维菌丝基质结合的农业废物填料的菌丝复合材料。这种材料废弃后更易处置,能在几周内完成分解回归自然。

例如:张凯利用食用菌副产物——香菇菌柄制备了一种富含膳食纤维的可食用膜,并阐述了其作为食品包装的可行性,并优化了制备工艺。Abhijith 等认为菌丝体泡沫在安全、成本以及环境保护等方面具有显著优势,菌丝体泡沫材料可作为聚苯乙烯

的可持续替代品，在隔热包装材料的应用方面前景广阔。Holt 等利用灵芝对棉花生物质材料混合物接种，在模具中使灵芝菌丝定殖混合物，开发了一款可降解包装材料（见图 2），经灭活、干燥后测试其性能，结果证明了该菌丝体材料作为新型绿色环保包装材料的可行性。

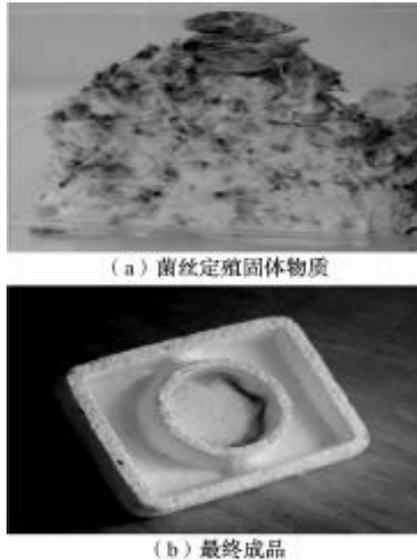


图 2 菌丝体泡沫

2.3 纺织材料

以真菌为材质的纺织品自古以来便与人类生活关系密切，很早以前欧洲人便使用火种真菌的子实体生产一种名为阿玛杜的毡状物（见图 3a），用来制作帽子、钱包等纺织品。随着可持续时尚环保主义的发展，抵制使用动物皮革的呼声也越来越高，以真菌衍生皮革材料为代表的新型纯素皮革（见图 3b）以其独特的材质，逼真的纹理，环保的本质倍受消费者好评，已成为当前时尚界的一大热点。

菌丝体皮革的制备流程通常是先通过固态发酵来获得非织造真菌垫，然后对其进行物理和化学处理，以模拟动物皮革的力学性能、质地和外观。其处理加工包括：脱乙酰化、交联加工、材料致密化加工、表面纹理压印等。例如，Bustillos 等制备了由桑黄担子菌子实体制备的真菌基皮革。该皮革制造工艺环保无害，具备较好的力学、耐热和化学特性，具有完全可持续和环境友好的纺织替代品的潜力。Raman 等培养并制备了菌丝垫，通过塑化、交联、干燥、热压等后处理获得了一种菌丝皮革，其物理

化学和力学性能具备完全可替代皮革的功效以及工业应用的可行性。



图 3 真菌皮革材料

2.4 医用材料

真菌富含几丁质和 β -1, 3-D-葡聚糖, 以及大量的生物活性物质, 这些物质具有良好的生物相容性, 在消炎、止血、促进伤口愈合等方面具有独特的作用。例如: 几丁质和 β -1, 3-D-葡聚糖能促进伤口的愈合, 在用作伤口处理剂时, 可互为增效。

除传统利用真菌提取几丁质与脱乙酰几丁质外, 越来越多的研究者开始研究直接或稍加处理后使用菌丝体与子实体作为伤口包扎的医用材料。一些研究证实, 真菌几丁质脱乙酰化可有效改善真菌甲壳素的止血和抗菌性能, 并促进细胞增殖和附着, 使得脱乙酰化真菌衍生的纸质材料更适合用作具有活性伤口愈合特性的敷料。例如, Jones 等使用液体发酵的手段获得了丛枝菌菌丝体材料, 经过水洗、碱处理、抽滤等流程获得了其薄膜制品, 并采用热压方式增加其力学性能, 该薄膜富含壳聚糖与葡聚糖, 可替代传统纸张用于医疗包扎等方面。Mei 等从液体静态培养中获得了根霉菌丝垫, 用浓碱处理可获得其海绵状材料, 该材料具备生物相容性、生物可降解性和促进伤口愈合等有益特性, 可用于伤口敷料和生物医学领域。

3 结束语

尽管真菌材料在取代不可持续材料方面拥有巨大潜力，但是仍存在一些问题。首先，生产方面需要专业的人才与设备，并且培养材料过程中需要警惕污染等问题，这在一定程度上提高了成本。其次，关于真菌材料的具体使用寿命以及是否存在潜在隐患等问题仍缺乏相关研究，若要在日常中大规模使用菌丝复合材料，还需考虑真菌物种的选择是否潜在致病性、是否会形成真菌毒素、吸引昆虫以及是否会成为入侵物种等问题。不可否认的是，新型真菌材料的研发仍有着巨大的诱惑力，可降解性、生物相容性、耐用性、隔音性等吸引着人们去探索研发，真菌材料的应用研究有利于推进环保事业的发展，有利于丰富材料的多样性。

来源：纺织学报 2024 年第 07 期

柔性抗冲击纺织材料及其结构的研究进展

楚艳艳^{1,2} 李施辰^{1,2} 陈超^{1,2} 刘莹莹^{1,2} 黄伟韩³ 张越⁴ 陈晓钢^{1,2,5}

(1. 中原工学院纺织服装产业研究院; 2. 中原工学院河南省新型纺织材料与纺织品国际联合实验室; 3. 中原工学院纺织学院; 4. 京都工艺纤维大学; 5. 曼彻斯特大学材料学院)

目前, 世界局势风云突变, 地区冲突不断加剧, 局部战争不可避免, 恐怖主义时有发生。前瞻产业研究院提供的《2022~2025 年中国防弹衣行业市场前瞻与投资战略规划分析报告》显示, 作为保护生命安全的防弹衣, 2019 年全球产量约为 2400 万件, 国内需求量约为 900 万件; 2019 年北美地区防弹衣市场规模约 8.85 亿美元, 比 2018 年增加 2.91%。《产业用纺织品行业“十四五”发展指导意见》指出, 要加快发展纺织基反恐防暴装备、生化防护装备、软质防弹防刺装备等产品的开发应用。

由高性能纤维制成的纺织品, 由于抗冲击能力强、柔性好、吸能高、密度低, 被广泛应用于抗冲击防弹防刺防护层中。防护层一般是由高性能纤维长丝通过一定方法制成织物, 再将这些织物叠层起来, 形成抗冲击防弹防刺防护层。软体抗冲击防弹防刺层吸能机制不仅与其所构成织物的纤维有关, 还与所使用纺织结构有关。本文主要对抗冲击新型纤维及薄膜材料、纤维表面改性方法及织物结构设计方法等方面研究进行总结, 为抗冲击纺织品新材料及结构设计发展提供新思路。

1 新型纤维及薄膜材料

1.1 石墨烯纤维及薄膜

自从 2004 年英国物理学家通过机械剥离法提取出单质石墨烯, 全世界开启了石墨烯研究热潮。石墨烯因其优异的物理力学性能, 被冠以“黑金”及“新材料之王”的称号。石墨烯理论强度为 130GPa, 其弹性模量高达 1TPa。Wetzel 等通过理论计算指出, 纯石墨烯多层膜防弹材料将比现用防弹材料质量轻 100 倍, 因其具有非常优异的

纵波传递速度和应变吸能特性。Dewapriya 等采用分子动力学模型从原子角度模拟了单层石墨烯膜与聚乙烯聚合物复合结构的弹道冲击性能，单层石墨烯约可提高聚乙烯抗冲击性能 8 倍；Balogun 等从宏观尺寸角度模拟了十几层石墨烯的弹道冲击性能，结果显示可抵御 3000m/s 的冲击速度；Vignesh 等采用有限元模拟研究石墨烯增强芳纶复合防弹层防弹性能发现，石墨烯增强芳纶织物防弹层能显著增强其能量吸收性能。

基于石墨烯优异的性能，若将其作为防弹材料，相比于目前的纤维材料，将显示出前所未有的优势，但将石墨烯的理论性能转化为纤维材料的实际性能，仍十分困难。庞雅莉等采用湿法纺丝工艺技术制备了石墨烯纤维，拉伸强度达到 179MPa。林珂璠等采用界面聚电解质络合 (IPC) 纺丝方法，通过氧化石墨烯纺丝液与壳聚糖之间的离子络合作用构筑了石墨烯纤维，抗拉强度达到 585MPa。与目前芳纶 (3~4GPa) 和超高性能聚乙烯纤维 (3.5~5.0GPa) 拉伸强度相比，差距仍较大。此外，将石墨烯与其他材料进行共混制膜或沉积铺层或掺杂到其他基体中，防弹性能也有提高。相关文献分别对石墨烯增强铝基 SiC 复合材料抗侵彻性能进行了研究。O'Masta 等将石墨分散到了聚乙烯醇 (PVA) 中而后采用液体剥离法得到厚度为 10 μ m、长与宽分别为 85mm、85mm 的多层石墨烯/PVA 膜，在冲击速度为 0~30m/s 下，多层石墨烯/PVA 膜的耐冲击极限速度高于铝膜。程群峰等受鲍鱼壳结构与反鲍鱼壳结构的启发，提出仿生构筑类似“砖—泥”的有机—无机层层交替的有序石墨烯纳米复合材料，克服石墨烯片层团聚的问题，然而，材料被局限在较小的尺寸范围内，且耗时费力。

基于模拟和理论分析可知，石墨烯材料展示出优良的抗弹道冲击性，但是，石墨烯应用还存在许多问题：一是石墨烯诸多特性都是基于单层结构。一般认为，超过 10 层便不具备石墨烯材料的优异特性。然而，批量获得一个原子厚度的单层石墨烯目前难以实现。二是如何突破材料尺寸限制，缩短制备时间，是需要解决的一个瓶颈。虽然单层石墨烯的力学性能非常好，但是宏观组装力学性能如何发挥其高强度，仍是世界之难题。

1.2 碳纳米管纤维及薄膜

碳纳米管，是一种管状的一维纳米材料，自 1991 年被日本 NEC 公司的电子显微镜专家饭岛发现以来，得到各行各业的研究与重视。碳纳米管有单壁型和多壁型，对于有理想结构的单层壁碳纳米管，其抗拉强度约为 800GPa，多壁纳米管的平均弹性模量高达 1.8TPa。Xiao 等采用粗粒化分子动力学模拟研究交联型 CNT 薄膜的微观冲击

实验,随着交联密度的增加,CNT薄膜的消释能量的机制从弯曲为主转变为拉伸—弯曲模式,在交联密度达到20时,能量吸收显著增加,提高约45%。徐志平等采用分子动力学模拟了垂直铺层(CPL)与非织造铺层(NW)碳纳米管的弹道冲击过程,碳纳米管铺层材料仅在50ps左右,子弹的冲击速度从1km/s降低至0.45~0.7km/s。

梁琳俐等采用冻胶纺丝方法制备了碳纳米管含量为0.05%、0.1%、0.2%的UHMWPE/CNTs复合纤维,其添加3%CNTs的UHMWPE抗拉强度可增加63.18%。曹文鑫等采用同轴纤维纺丝思路,以芳纶纳米纤维为鞘,单壁碳纳米管为芯层,获得了芳纶纳米纤维/单壁碳纳米管同轴复合纤维,其抗拉强度可到达818.4MPa,模量为43.4GPa。白云祥等通过原位气流导向的方法制备了直径达数十纳米、水平长度达毫米级的超长碳纳米管束。胡东梅等提出将连续碳纳米管薄膜(CNTF)与超高分子量聚乙烯(UHMWPE)为原料,设计了4种不同结构CNTF/UHMWPE靶片,当CNTF/UHMWPE靶片面密度为2.89kg/m²时,靶板材料的穿透概率为50%的速度可达到520m/s,凹陷深度较UHMWPE材料靶片可降低21%。

碳纳米管纤维目前已实现产业化,纯度可达到99.9%,力学抗拉强度可达1500MPa;断裂伸长率为2.5%~25%,但价格极其昂贵,高达600~3500元/m。碳纳米管薄膜规模化连续制备需要采用浮动催化技术,但该方法在碳纳米管生长过程中,炉管内有大量氢气、醇类气体,在高温条件下,安全隐患多,工业化还需要漫长的时间研究。另外,昂贵的成本也限制了该技术在防弹方面的广泛应用。碳纳米管薄膜的基本力学性能差,与单根碳纳米管的力学性能仍具有数量级的差距,如何将微观结构的碳纳米管优越的性能体现在纳米管薄膜宏观组装体上是巨大的挑战。

2 纤维表面改性材料

2.1 剪切增稠剂

剪切增稠剂(STF)是一种非牛顿流体,由分散相和分散介质组成,当剪切应变率达到一定阈值时,该流体的黏稠度会瞬间增高数百倍甚至上千倍,实现由流液向准固态的转变;当剪切应力小时,材料形态再由准固态返回液态。子弹高速撞击这种材料时,剪切增稠液防弹衣就会迅速变得极其坚硬,吸引撞击能量。2003年由Lee等提出在抗冲击方面应用后,即液体防弹衣,得到了国外学者的广泛关注。然而,Asija等研究发现将STF置于超高性能聚乙烯织物之间的方法降低了防弹性能,而通过浸轧—

烘干方法得到的 STF 织物的抗冲击韧性增强了许多。将剪切增稠液通过浸轧—烘干的方法整理得到的织物，此时溶剂聚乙烯醇已经蒸发，在织物表面形成 SiO_2 粒子。Majumdar 等的研究表明，在 (430 ± 15) m/s 的冲击条件下，浸渍轧压法 STF 处理的芳纶织物在面密度基本接近的情况下，可将背凹深度降低 2.5~2.8mm。付倩倩等研究了剪切增稠胶 (STG) 与超高分子量聚乙烯复合材料的抗低速冲击性能，加入 STG 后，STG/UHMWPE 复合材料的剩余冲击载荷可减少 50%。

一些学者研究了浸渍—轧压—焙烘中粒子浓度、粒子大小、轧压压力、温度等工艺参数对冲击效果的影响。Thakur 等研究了剪切增稠剂中不同二氧化硅粒子浓度及粒子大小在冲击速度为 180m/s 左右的冲击性能，研究指出二氧化硅粒子质量增加超过一定的值会降低抗冲击性能；剪切增稠剂增加能量吸收的主要原因是增加了织物中纱线间的摩擦力，而并非剪切增稠剂的剪切增稠作用。Liaghat 等分别采用 SiO_2 粒子含量为 15%、25%、35%和 45%的 STF 整理织物，其单位密度能量吸收值在 35%时最好，是未处理织物的 2.3 倍；同时指出，随着 SiO_2 粒子浓度的增加，其剪切增稠的效应在减弱。Srivastava 等研究指出，通过浸渍轧压将 STF 整理到织物表面的方法，在冲击速度为 6m/s 和 165m/s 时，可使芳纶织物能量吸收增加 125%；但未给出质量增加量；另指出通过 2 次轧压可提高能量吸收性能。STF 处理后织物在 $-50\sim 50^\circ\text{C}$ 的温度区间里，温度越低，STF 处理织物的抗穿刺性能越好。

此外，一些学者在剪切增稠剂中加入了其他物质，如 Avila 等制备了不同比例的 $\text{SiO}_2/\text{CaCO}_3$ 两相剪切增稠剂分别对 18 层、24 层和 32 层芳纶织物进行处理，对比其弹道冲击性能 ($350\sim 450\text{m/s}$)，处理后的织物背凸体积显著降低，但是与未处理的相应多层织物相比，其质量增加在 30%~60%。Gürgen 等对比分析了芳纶未经处理织物、STF 处理芳纶织物及不同比例添加量的 STF/SiC 处理织物在 330m/s 冲击速度下的能量吸收及背凸凹陷性能，指出处理后织物纱线间摩擦力的增加是其能量吸收增加和凹陷深度减小的主要原因，其次粒子浓度增加使得载荷可通过粒子网络进行传递。Santos 等对比了未经处理芳纶织物、STF、添加耦合剂的 STF 防刺性能，发现穿透深度依次降低，分别约为 50mm、46mm 和 25mm，且随着背衬纸张数量增加到 4 层，STF、添加耦合剂的 STF 芳纶织物未刺穿，未经处理的芳纶织物的刺穿深度仍较高，约为 40mm，但处理后的质量增加分别约为 40%和 90%。Wang 等应用聚氨酯 (PU)、STF 混合处理芳纶 1~3 层织物，STF 与 PU 混合比分别为 5:4 和 5:2，添加量低于 40%，相比于纯 STF、纯 PU 显示出较好的能量吸收量。Cao 等对比分析了 STF、STF/CNT

处理后芳纶织物的弹道冲击性能。STF/CNT 处理的芳纶织物的弹道极限速度从 84.6m/s 变化到 96.5m/s。Liu 等对比分析了氧化石墨烯、碳纳米管、剪切增稠液 3 种材料混合处理后芳纶织物的弹道冲击性能, 设计了 SFT、STF/GO、STF/CNTs、STF/GO/CNTs 4 种整理液, 结果表明: STF/GO、STF/CNTs 处理后织物防弹性能有所增加, 能量吸收提高 78.3%左右, 但 STF/GO/CNTs 并没有显示出更优的性能。

除此之外, 还有一些学者通过准各向同性设计、缝合法、等离子体处理、变化织物结构与 STF 相结合, 增强其防弹抗冲击性能。印度理工学院的 Arora 等将转角法与 STF 剪切增稠液界面处理法结合在一起, 分别对比分析了 3 层、4 层芳纶与超高性能聚乙烯织物在有无 STF 剪切增稠液界面处理时, 不同转角设计下的弹道冲击性能, 结果发现转角对 STF 芳纶织物的能量吸收提高十分显著, 提高率在 19%~68%。刘星等对比了等离子体处理 STF 和未处理 STF 的防刺性能, 经等离子体处理后锥刺载荷由 23.34N 增加到 41.13N, 提高了 76%。李聘阳等研究了 STF 对不同结构芳纶织物防刺性能的影响, 发现 STF 浸渍后各种织物的防刺性能都有明显提升, 经纬密度较大的平纹织物表现出较优的钝锥和抗刀刺性能, 而斜纹织物提升最为明显, 提升 387%。

STF 处理后的织物其防刺性能或低速弹道冲击性能有所增强, 但在较高速度冲击 (300~500m/s) 下无明显防弹优势, 且随着层数增多, 能量吸收低于未处理的芳纶织物。Kim 等研究了浸渍 STF 与未浸渍 STF 的芳纶织物在更高冲击速度 1000~1800m/s 下的能量吸收性能, 研究指出浸渍 STF 的 5 层芳纶织物 (面密度为 $0.133\text{g}/\text{cm}^2$) 与未浸渍 STF 的 8 层织物 ($0.125\text{g}/\text{cm}^2$) 的能量吸收相接近, 但是, 剪切增稠剂添加量增大, Liaghat 等的研究表明, 剪切增稠剂添加量达到 45%之后, 在相同冲击速度 (160m/s) 下才不穿透。

2.2 纳米无机材料

以往有限元研究表明, 长丝间的摩擦力越大, 织物弹道冲击过程中吸收的能量越多。为此, 许多研究者对长丝表面进行改性, 增加长丝间的摩擦力, 以提高织物抗弹道冲击性能。纳米无机材料有零维材料纳米颗粒、一维材料如纳米线、二维纳米材料如石墨烯、三维纳米材料如碳纳米管等。

Sun 等和 Chu 等分别尝试了采用等离子体和等离子体增强化学气相沉积 (PCVD) 处理芳纶及超高性能聚乙烯长丝及织物, 在其表面形成了 SiO_2 纳米颗粒, 纱线间摩擦力可提高 50%~200%, 纱线力学性能基本不变。Hwang 在芳纶平纹织物表面引入 ZnO

纳米线增加纱线间摩擦力 5~8 倍,对织物质量和力学性能影响较小。美国密歇根大学的 Sodano 等采用水热合成法在芳纶平纹织物表面生长 ZnO 纳米线以增强其长丝间的摩擦力,通过处理之后,采用 4130 合金钢、质量为 29g、直径为 11.40mm 的钝头射弹,在 22~40m/s 冲击速度范围内测试了其抗冲击性能,最大冲击抵抗力提高了 66%。Chu 等采用纳米溶胶—凝胶技术对芳纶长丝进行表面处理,长丝力学性能基本不变,质量仅增加 5%,但摩擦力提高有限,增加 50%~100%。同时,采用溶胶—凝胶法对整理织物进行了抗冲击性能测试,对于整理后 8 层织物的能量吸收可提高 35%。

石墨烯及碳纳米管还应用于纤维表面改性。Silva 等通过真空过滤方法及热处理将氧化石墨烯薄片沉积在芳纶织物表面,依据 NIJ 01.06《防弹衣的防弹性能》标准中的 II 级进行测试,结果表明,沉积氧化石墨烯薄片的芳纶织物比原织物吸能提高了 50%,主要是因为石墨烯增强了织物间摩擦力。程凡等申请的专利技术中,将石墨烯掺杂到液态或熔融热塑性树脂基体中,再复合芳纶或碳纤维等形成复合材料,作为防弹层中第 3 层使用。Dasgupta 将自制的碳纳米管分散到 UHMWPE UD 织物中,对比分析了有无添加碳纳米管的 CNT-UHMWPE 和 UHMWPE UD 织物在步枪与 AK47 冲击条件下的背凹深度,降低值达到 60%以上。Domun 等对比分析了玻璃纤维复合材料环氧树脂中添加一维/二维混合纳米材料如碳纳米管(CNTs)、石墨烯片(GNPs)、杂化六方氮化硼纳米片复合碳纳米管(BNNTS/CNT)、杂化六方氮化硼纳米片复合碳纳米管(BNNS)/CNT 的复合材料的弹道冲击性能,经 BNNT/GNP 改性后的能量吸收最高,相比于未改性树脂增加了 16.8%。

3 抗冲击织物结构研究动态

3.1 单层织物结构

抗冲击单层织物组织结构有二维织物组织和三维织物组织。相比二维织物,一些学者认为三维织物具有从厚度方向进行增强叠层织物的优势,但是,吴镇宇等通过对超高性能聚乙烯长丝 UD(单向)织物、平纹织物及三维正交织物柔性复合材料的弹道冲击性能对比以及 Abteu 等对二维平纹织物与三维角联锁织物的弹道冲击性能分析对比,发现三维正交织物结构和角联锁结构并未显示出较高能量吸收性能。二维织物用于防弹防刺层,主要为机织物和 UD 织物、针织物、非织造布和编织布也有一定的研究,但因针织物变形较大、非织造布力学性能较低、编织物柔性较差而实际应

用较少。

Bajya 等对比分析了多层芳纶平纹织物与芳纶 UD 织物在直径为 9mm 铅心子弹冲击速度为 430m/s 下的弹道冲击性能,指出 UD 结构优于平纹织物结构。原因是:UD 织物的结构优势是纱线处于伸直平行状态,对冲击波产生的纵波传递速度是屈曲纱线约 2.8 倍,对纵波传递速度越快,越有利于子弹能量快速消释;然而,另一些学者指出,机织平纹织物中纱线与纱线因上下交错屈曲产生的摩擦力,可将子弹能量分散到更大的区域,带动更多纱线参与能量吸收。机织物结构对其弹道冲击也有重要的影响。杨艳菲等采用有限元方法,模拟了 2 种织物屈曲平纹多层织物的弹道冲击性能,结果表明,使用低屈曲的长丝可以增加能量吸收。周熠等对比分析了单层平纹、不同斜纹及缎纹的弹道冲击能量吸收性能,发现在相同面密度下,平纹能量吸收最优,缎纹最差,其原因是平纹结构紧密,缎纹结构疏松。Ngo 等采用有限元方法,对比分析了平纹、二上二下斜纹、三上一下斜纹和二上二下方平纹物单层抗冲击性能,单层平纹织物的能量吸收高于其他几种织物,当层数为 5 层时,二上二下方平纹织物的能量吸收性能最好,而平纹仅与二上二下斜纹吸能能力持平,三上一下斜纹最差。单层织物弹道冲击过程中,因平纹织物结构紧密,其能量吸收最多,但当层数增加时,平纹并非最优结构,因为多层织物中若单层织物结构过紧,会使得多层织物整体偏硬,减弱多层织物整体变形能力,从而减少多层织物变形吸能能力。此外,采用三向织物也有研究,但三向织物间的孔洞较大,子弹易从孔隙中穿过。

3.2 叠层结构

层间叠层结构主要包括缝合法、层间杂化混合设计法和准各向同性设计。缝合法是将软体防弹层采用一定的缝合方法在厚度方向上进行增强。缝合方法多种多样,包括菱形缝合、方形缝合、特殊缝合等。通过缝合,织物层间作用力增强,抗冲击性能有一定提高,但是,缝合法带来的最大问题是缝合后防弹织物层的柔度会急剧下降。文献发现在冲击速度为 180m/s 时,同等质量下缝合织物能量吸收虽增加 146%,但柔度下降 50%以上。杂化混合设计是在厚度方向上,将不同织物、不同结构或不同纤维根据不同平面织物的吸能特点进行组合排列放置,主要由 UD 织物与平纹织物混杂设计、UD 织物或平纹织物与气凝胶混杂、UD 织物与连续碳纳米管薄膜混合。UD 织物与机织物的混合,虽提高了能量吸收量,但织物的透气透湿性仍不能得到很好的改善,且柔性较差。连续碳纳米管薄膜混合需要采用浮动催化法,其工艺复杂、工业化较难。

准各向同性设计是将每一层的织物旋转一定角度，使织物在厚度方向实现整体各向同性，该方法对能量吸收提高有限，仅约为 20%，而且耗费材料。

3.3 夹层结构

夹层结构主要是织物与气凝胶形成的夹层结构。气凝胶是一种固体物质形态，是目前已知的世界上密度最小的固体，一般常见的气凝胶为硅气凝胶，随着科技的发展，其他材料的气凝胶如石墨烯气凝胶、聚合物基气凝胶相继出现。由于气凝胶空气含量高，因此，其隔热性能好，常用于防弹衣隔热材料。另外，气凝胶拥有极高孔隙率、极低密度，其密度在 $3\sim 5\text{kg/m}^3$ ，具有高抗压性和弹性回复性。因此，气凝胶是一种良好的吸能材料。Patil 等采用分子动力学数值模拟的方法研究了不同密度石墨烯气凝胶及二氧化硅气凝胶微观抗冲击性能，并指出石墨烯气凝胶在抗冲击及高吸能材料方面有较强的应用。杨杰等研究了以气凝胶为夹层的复合结构抗弹性能。当防弹纤维后面加上气凝胶夹层后，强度较低的气凝胶夹层使防弹纤维面板的变形有了很大的扩展空间，复合靶板吸收弹头动能的能力大幅提高，同时，可以有效防止弹头的非贯穿伤害，但气凝胶放置在 SiC/AL 复合材料、陶瓷面板后，防弹性能无显著性提高。Aytena 等尝试将交联型二氧化硅气凝胶与 36 层芳纶织物放置在一起，研究 NIJ IIIA 级冲击条件下的凹陷深度变化情况，15mm 厚的气凝胶仅使抗凹陷深度减少了 7.3%。周庆等的研究指出气凝胶在爆炸过程中会产生很多粉尘颗粒，会对人体呼吸道造成严重影响，另外，气凝胶厚度一般较厚，会增加软体防弹衣的臃肿，造成活动不变。

3.4 硬软复合仿生结构

受自然界生物结构启发，仿生结构在能量吸收方面展示出良好的应用潜力，但目前研究较少，相比于其他结构，研究发表的相关论文近 3.59% 左右。Ha 等和 Isaac 等总结了近年来仿生结构在能量吸收方面的应用研究，主要有仿生薄壁结构、仿生板结构、仿生蜂窝多孔结构、仿生土木结构等。软体防弹防刺方面的应用主要是仿生鱼鳞状结构。朱德举等总结了鱼鳞状仿生结构在软体防弹衣的应用，鱼鳞状仿生结构最大优势是将硬质材料与软质材料结合在一起，为防弹盔甲提供了最大的灵活性和柔韧性。Barthelat 等以长嘴硬鱼鳞片为灵感开发了硬质陶瓷板和 Kevlar 手套结合的复合结构，该结构具有很好的灵活性。

Martini 等采用数值模拟和实验方法对比分析了多种不同结构鳞片抗穿刺性能，研究指出，硬骨鱼及硬鳞片抗穿刺性能最好，符合自然进化规则。基于硬质防弹材料如

陶瓷和软质防弹材料芳纶、超高性能聚乙烯，朱德举等设计了一种鱼鳞状柔性叠层防护装具，分别以 SiC-UHMWPE 复合结构和 Al₂O₃-UHMWPE 复合结构作为鳞片层，将其采用胶接的方式固定，形成硬软结合的防弹材料，使用 51 式 7.62mm 手枪铅心弹，在 420~450m/s 的冲击条件下，背凹深度为 6.5~18mm。虽然仿鳞片结构能够提供较好的柔韧性，但这要求硬质材料的厚度不能超过一定的厚度，然而，硬质材料的防弹性能一般与其厚度成正比，因此，仿生结构使用条件受限，此外，这类鳞片仿生结构沿鳞片排列方向柔性较好，但在其他方向柔性仍然较差，穿着舒适感差。仿生结构目前在防刺服方面应用较多。如若提高硬质与软质层的防弹性能，硬软仿生结构将是开发防弹防刺双防服的一个重要方向。

4 结束语

软体防弹衣发展至今，在达到防护要求的前提下质量下降了许多，但是，作为个人防护穿着装备，穿着舒适性仍有较大的改进空间。在满足其防弹防刺性能的前提下，如何更薄、更轻、更舒适是未来软体防弹衣的发展新方向。从纤维表面改性研究方面，通过剪切增稠剂、纳米无机材料对高性能纤维表面改性，可以达到质量减轻的目的；从防弹层织物结构设计方面，可围绕单层织物组织结构、层间结构和硬软结构进行优化设计，达到防弹与舒适的协同。如若要求更高，则具有高强高模的高纯度石墨烯纤维、碳纳米管纤维、石墨烯薄膜、碳纳米管薄膜的宏量化无缺陷制备将是材料界需要突破的瓶颈。

废旧纺织品循环利用产业发展空间及促进机制

姜涛 段先月 彭过房 蔡宇凌

(工业和信息化部电子第五研究所环境与绿色发展中心)

再生资源是指在社会生产和生活消费过程中产生的,已失去原有全部或部分使用价值,经过回收、加工处理,能够使其重新获得使用价值的各种废弃物。废旧纺织品是一种典型的再生资源,属于我国十大再生资源之一。我国是全球第一纺织大国,2020年纺织纤维加工总量达5800万t,占全球纤维加工总量的50%以上,化学纤维产量占全球产量70%以上。同时,我国也是纺织品消费大国,每年纤维消费总量约3000万t。随着社会经济的发展和人民生活水平的提高,人均纤维消费量不断增加,2020年废旧纺织品产生量约为2200万t,目前累计量已达到1.4亿t,且绝大多数没有得到有效利用,同时预计未来每年还会以2000万t以上的数量增加。废旧纺织品可分为废纺和旧纺,工厂生产环节产生的废丝、边角料等废纺约为10%,其成分明确且分类清晰,杂物少,目前基本都可回收利用,但经过社会流通和消费使用后的旧衣物等旧纺约占废旧纺织品总量的90%,其中只有不到1%被回收利用,所以我国的废旧纺织品的回收利用率不到10%,其他则作为垃圾被填埋或者焚烧处理,回收利用率远落后于发达国家水平。一些发达国家在20世纪80年代末就意识到废旧纺织品可作为资源利用,90年代起,废旧纺织品回收利用已成为其新兴产业。据统计,德国每年产生约200万t废旧纺织品,回收利用率达到42%;日本每年产生约100万t废旧纺织品,回收利用率超过20%;英国、法国和美国的废旧纺织品回收利用率也分别达到了27%、35%和20%。

废旧纺织品的循环利用不仅对应对气候变化、减污降碳具有重要意义,同时也是有效节约资源、补充我国工业原材料供应、缓解资源环境约束的重要措施,因此,该项工作是生态文明建设的重要内容,是实现绿色低碳发展的重要领域。

本文根据废旧纺织品回收利用产品的现状,总结了目前存在的问题,分析了产业

未来发展的空间和潜力，提出相应的产业发展对策建议，并构想了协同促进产业发展的政策机制，以期为废旧纺织品回收利用产业的健康可持续发展拓宽思路，提供多样的、前瞻的宏观措施建议。

1 废旧纺织品产业现状及问题分析

我国已自然形成了一些废旧纺织品回收利用的聚集区，浙江苍南县每年处理的纺织废料达上百万吨，再加工纤维及制品企业 8000 余家，涉及从业人员 20 多万人。江苏江阴、无锡等地形成了废旧毛纺织品的综合利用集聚区，约有 200 家废旧毛纺织品综合利用企业，每年可利用废旧纺织品约 15 万 t。其次广东、上海、福建、北京等地废旧纺织品专利技术申请较为活跃，这也反映出这些地区相应产业的发展水平。但是，我国废旧纺织品从回收、交易流通、精细分拣到综合利用等环节，目前还存在着诸多堵点、痛点，距离构建废旧纺织品循环利用体系、推动我国经济社会绿色低碳发展的要求还有不小的差距。

(1) 产业定位低、形象差，没有形成良好的产业环境。我国社会对于废旧纺织品循环利用的认识不够，往往将废旧纺织品等同于固体废物甚至垃圾，回收环节多为废品回收站和走街窜巷的小贩，产业主体主要是个体户和小企业，从业人员也多是缺乏管理培训和技术经验的临时工，利用废旧纺织品开发的再生产品市场接受度不高。整个产业缺乏大企业、社会资本乃至社会公众的认可和关注。

(2) 缺乏长远发展意识和动力，产业发展恶性循环。产业缺少龙头企业参与和资本投资，同时缺乏政府宣传引导和政策扶持，行业主体看不到发展前景，只注重眼前利益，忽略长远发展规划，从而导致行业人才吸引力不足，终端再生产品开发设计和技术创新力度不够，高质量品牌意识缺乏，经营理念、设备设施以及工艺水平都比较落后，致使整个行业利润微薄，长此陷入恶性循环。

(3) 产业组织化程度低，没有形成产业链和价值链。我国废旧纺织品回收利用总产能不足与落后产能过剩现象并存，有一定规模的企业仅几百家，家庭作坊却有上万家，污染大、损耗多的落后产能泛滥。同时回收环节和后端资源再生环节发展不均衡，回收到的废旧纺织品难以进入资源再生及再制造领域，即使进入也因设计、技术、营销、品牌和供应链管理等环节缺失，以致再生产品加工深度不足而居于价值链的中低端，在产业结构上高附加值延伸乏力、产业链条短、产品单一、同质化竞争明显。

(4) 产业缺乏引导管理, 存在诸多不规范。废旧纺织品回收利用产业链条长, 行政职能交叉点多, 协同管理障碍多, 对废旧纺织品的认定统计归类、回收处置决策、利用跟踪管理等方面缺乏可信的数据支撑。同时标准体系尚未形成, 缺乏明确具体的行业规范要求, 监督机制、检验方法不健全, 对行业生产工艺、技术方法、配套设施和再生产品缺乏引导规范, 存有违反国家政策《纤维制品质量监督管理办法》和强制性标准 GB 18383—2007《絮用纤维制品通用技术要求》的风险。另外行业准入门槛低, 产品质量、职业健康、安全生产、清洁生产以及环保等各方面难以满足法律法规要求。

2 废旧纺织品产业发展空间及潜力

我国已进入高质量发展的新阶段, 需要构建以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新格局, 新一轮科技革命和产业变革将深入发展, 因此无论是政策趋势、社会环境、公众意识, 还是技术水平, 都为废旧纺织品回收利用产业发展提供了明显的空间。

2.1 政策空间

“碳达峰碳中和”目标为废旧纺织品回收利用产业发展带来了新机遇。2020年10月, 党的十九届五中全会在《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》中提出要全面提高资源利用效率, 推行垃圾分类和减量化、资源化, 加快构建废旧物资循环利用体系。2022年1、2月, 国家发展改革委、工业和信息化部等部委发布了《关于加快废旧物资循环利用体系建设的指导意见》和《关于加快推动工业资源综合利用的实施方案》, 这些文件的陆续出台, 表明我国对再生资源回收利用的高度重视。为进一步加快推进废旧纺织品循环利用, 2022年3月, 国家发展改革委会同商务部、工业和信息化部等部委印发了《关于加快推进废旧纺织品循环利用的实施意见》, 明确到2025年废旧纺织品循环利用体系初步建立, 废旧纺织品循环利用率达到25%, 废旧纺织品再生纤维产量达到200万t, 到2030年建成较为完善的废旧纺织品循环利用体系, 高值化利用途径不断扩展, 产业发展水平显著提升, 废旧纺织品循环利用率达到30%, 废旧纺织品再生纤维产量达到300万t。这些政策为我国废旧纺织品循环利用产业的发展指明了前进方向, 奠定了政策基础。

2.2 市场及社会环境空间

2017年，国务院厅转发了《生活垃圾分类制度实施方案》，随后上海、北京、广州、郑州、沈阳等更多地方性生活垃圾分类管理条例和方案相继出台，细化了城市生活垃圾分类的具体规定。同时，根据住房和城乡建设部要求，2019年起全国地级及以上城市全面启动生活垃圾分类工作，到2025年底前，全国地级及以上城市要基本建成垃圾分类处理系统。虽然乡村层面还未能普及垃圾分类，对废旧纺织品的回收利用意识也比较薄弱，但城市的生活垃圾分类系统已经能够为废旧纺织品循环利用产业提供足够多的原料供应。2020年11月，生态环境部、商务部、发展改革委和海关总署联合发布了《关于全面禁止进口固体废物有关事项的公告》，明确我国自2021年1月1日起全面禁止含废旧纺织品在内的固体废弃物入境，要求全国各地垃圾分类工作稳中提质。这些工作为废旧纺织品循环利用提供了良好的市场及社会环境，加上相关政策引导，有利于促进废旧纺织品回收利用产业打破传统的开环格局，形成“纺织原料—纺织制品—可利用的纺织资源”的循环架构。另外，废旧纺织品作为资源的市场需求日渐旺盛，近年来浙江企业利用纺织边角料制作的棉绳宠物玩具远销国际市场，占据了全球棉绳宠物玩具市场的主要份额。随着能源成本的提高和环保要求的加强，垃圾衍生燃料（Refuse-derived fuel, RDF）作为化石燃料的替代品很受市场欢迎，废旧纺织品作为RDF的主要原料之一，在广东等区域出现供不应求的状况。

2.3 回收渠道及模式空间

目前，国内成熟稳定的专业性回收渠道仍然比较空缺，回收基础设施覆盖不全面、不均衡问题明显，回收模式仍有明显的创新及实践空间，如打通回收箱进社区、进机关、进商场、进校园的壁垒，提高回收箱体覆盖率，鼓励引导回收企业向三、四级及以下城市下沉布局，探索推进农村废旧纺织品回收等。同时，品牌服装企业、酒店也有牵头开展废旧纺织品回收的积极性，可探索出新的回收模式和方法，如通过生产者责任延伸政策等。另外，无废城市、再生资源循环利用重点城市创建等工作要求地方政府以当地经济为基础，构建最优回收模型，实现高效的资源转化，这有助于发展具有地域特色的回收流水线，集中产业优势，形成专业回收基地。在此基础上借助物联网、大数据、云计算等技术手段，搭建回收信息网络，可进一步拓宽和丰富废旧纺织品回收渠道及模式的空间。

2.4 产业技术空间

将废旧纺织品视为工业原材料，实现其高值化利用的技术空间还很大，如保留纤维长度的开松、低环境污染的脱色、考虑下游资源化利用的分离等技术及相应的工艺装备。另外，从废旧纺织品的资源属性来看，未来废旧纺织品的回收利用应该是高新技术与跨学科融合，充分利用高分子、材料加工成型、化学工程及界面物理化学知识，开发具有新功能、新用途和高附加值产品的领域。从应用环节看，废旧纺织品再生产品的开发在未来将聚焦在战略新材料、环境保护、医疗健康、应急公共安全以及重点基础设施等领域。

3 对策建议及促进机制构想

促进产业发展的具体方法路径很多，但根本之道在于营造出健康良好的产业环境和足够广阔的发展前景，保证企业主体的盈利空间，吸引人才、技术和资本流入，同时建立规范的行业秩序，避免恶性竞争。

3.1 充分利用政策机制协同推进产业发展

根据不同城市的产业特点和实际情况，充分利用无废城市创建、废旧物资循环利用体系建设、绿色制造体系建设和工业领域“碳达峰”实施方案等政策要求，研究制定推动废旧纺织品回收利用产业发展的方法路径，从城市建设、产业发展、企业培育、绿色低碳发展、数字化转型等不同维度出发，研究多元政策机制。具体思路如图1所示。

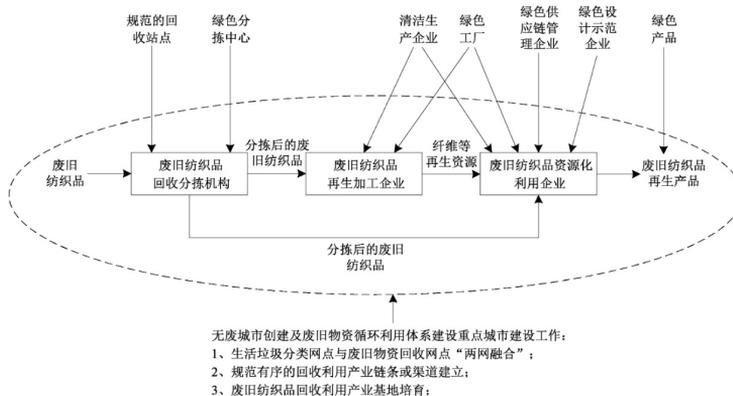


图1 多元政策机制协同推进废旧纺织品回收利用产业发展示意图

废旧纺织品回收利用产业包括回收分拣、再生加工和资源化利用等环节的企业。其中资源化利用企业是产业核心，其经营理念、产品开发能力及工艺技术很大程度上决定了产业水平；再生加工企业是产业链的枢纽，起到承前启后的作用；而回收分拣机构是产业链的起点和基础。对于资源化利用企业，应对其引入绿色设计和绿色供应链管理理念，利用现有绿色制造体系建设工作，针对性地制定评价标准，推动该类企业获得“绿色设计示范企业”“绿色供应链管理企业”等称号，同时使废旧纺织品再生产品获得“绿色产品”称号。另外，资源化利用企业和再生加工企业都有明显的加工制造特点，有必要进行清洁生产审核、绿色工厂创建和智能化、数字化转型，以此提高其运行管理水平，塑造良好社会形象。对于回收分拣机构，在规范化建设的基础上，应利用无废城市和废旧物质回收利用体系重点城市建设工作，进行规模化、网络化、智能化布局和建设，开展“两网融合”（生活垃圾分类网点与废旧物资回收网点）、回收利用产业链条或渠道建立、产业基地培育等工作。

3.2 突出产业减碳绩效解决经济动力问题

再生产品附加值低、缺乏市场认可，企业发展缺乏经济动力，这种“循环而不经济”的现象是导致废旧纺织品回收利用产业发展困难最根本最直接的原因。我国已出台了《资源综合利用产品和劳务增值税优惠目录》等资源综合利用税收优惠政策，但并未从根本上解决企业盈利的困境。废旧纺织品回收利用具有明显的碳减排绩效，其碳减排环节如图 2 所示。因此，在“碳达峰碳中和”的时代背景下，应抓住废旧纺织品回收利用减碳降碳的产业特点，研究该产业“碳资产”概念，通过核算企业生产运行过程中的碳减排量，参与碳排放权交易，以此形成助推产业发展的经济动力。

我国现有碳排放权交易形式分为基于总量控制的碳配额交易与基于项目取得的核证自愿减排量（CCER）交易。CCER 方式虽已暂停，但在 2012 年其交易市场框架就已形成。根据国内外经验，引入 CCER 交易及抵销机制可降低控排行业的减碳成本。从碳市场的完整性来说，CCER 是对碳配额交易的重要补充，仍有研究和探索应用的价值。

碳交易过程参与者一般包括碳排放权购买方与出售方、碳排放核查机构、政府主管部门和第三方平台。废旧纺织品回收利用减碳绩效交易模型构建如图 3 所示。

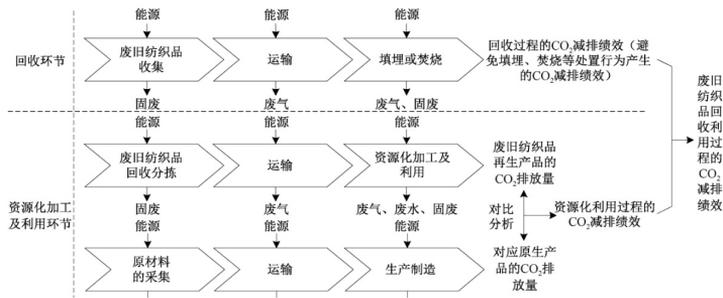


图2 废旧纺织品回收利用碳减排绩效产生节点及核算思路图

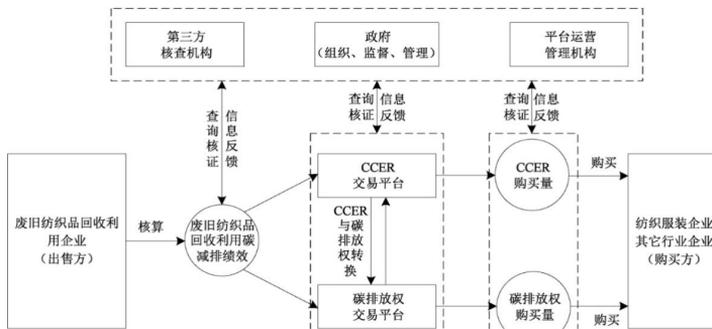


图3 废旧纺织品回收利用企业碳减排绩效交易模型图

推动废旧纺织品回收利用企业参与碳交易，首先需要根据标准方法，核算出其一定周期内的 CO₂ 减排量，经核查后在主管部门监管下出售给交易平台。研究制定 CCER 减排量与碳排放权转换机制，实现 CCER 交易平台与碳排放权交易平台的联通。随后其他企业可通过平台购买所需的 CCER 量或碳排放权，以此发挥市场配置资源的决定性作用。这种交易机制可将废旧纺织品回收利用企业经营过程中产生的社会效益转化成经济效益，并使资本流入企业，以此增加该产业的发展动力。

3.3 研究制定行业规范条件及标准体系

规范化、标准化是废旧纺织品回收利用产业实现规模化、市场化的前提，通过制定并实施标准，指导规范行业活动，使生产模式由家庭作坊式向专业化分工合作转变，建立上下游产业链，进而产生集聚效应，扩大产业规模，达到产业化发展的目的。目前虽有几项废旧纺织品回收利用的国家标准已发布，但尚未形成体系，对行业的管理、

工艺、技术和环保等方面缺乏引导，同时产业技术以及产品检验、评价等缺乏规范，导致其再生产品的市场推广难度较大。

为此，首先以引导废旧纺织品回收利用产业规模化发展、鼓励企业做优做强为原则，研究制定《废旧纺织品循环利用行业规范条件》，从企业基本要求、生产条件、技术能力、产品开发、质量保证、产业链衔接、社会责任、信息公开、信息化管理等角度出发，明确行业企业生产运行的相关要求，为行业规范化发展指明方向。此外，规范条件应加强引导资源化利用企业与上游回收机构及下游市场需求的衔接。

同时，在促进废旧纺织品循环利用体系建设的框架下，从行业基础、综合管理以及产业链的不同环节出发，研究制定一系列标准并形成体系，使整个产业能够采用统一的技术和管理要求，科学设置回收模式，建立回收渠道，提高回收效率，保证回收原料的供应和质量，选择绿色低碳的生产工艺和技术方法，加强上下游企业衔接，延伸产业链，从根本上达到节能减排、高效运转、提升产品附加值、提高经济效益的目的。废旧纺织品回收利用产业标准体系框架构建如图 4 所示。

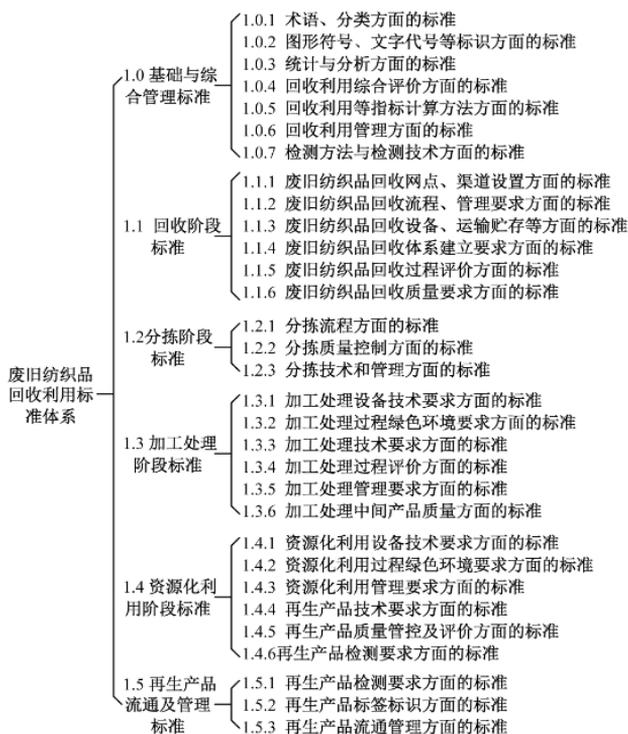


图 4 废旧纺织品回收利用产业标准体系架构图

3.4 研究建立大数据管控平台及数据库

建立废旧纺织品回收利用信息化管控平台是推动该产业规范化发展的重要切入点。从区域管理角度出发，将废旧纺织品回收利用过程的物质流和信息流对应连接，形成智能高效可追溯、线上线下相融合、企业政府互动、产业流程全闭环的数字化体系，达到对产业全流程监管目标，为出台相关产业政策、法规提供科学依据。

搭建废旧纺织品回收利用信息代管控平台是一项系统工程，涉及软件信息和硬件设施、废物回收和产品再生、产业发展和城市建设等多个领域，因此平台建设应由政府主管部门牵头，结合当地产业特点和城市发展状况，依托行业组织，充分运用数字信息技术，建立涵盖区域产业链物质流、信息流、票据流和资金流的管控平台。该平台的功能模块及运行逻辑构建如图 5 所示。

废旧纺织品回收利用信息化管控平台可围绕包括回收分拣、资源化加工、资源化利用和市场消费等环节的产业链，设置数据采集、数据开发分析、数据应用和管理服务等功能模块。在建设平台之前，政府部门应结合当地产业特点和城市发展阶段，对废旧纺织品回收利用产业发展进行规划，将回收利用经营基础设施纳入城市管理规划，对回收点、中转站、分拣中心等设施提供空间保障，促进分散无序的回收方式发展成为有组织、有规划、有标准、有大企业介入的新型回收体系。同时发挥骨干企业作用，鼓励他们整合网络和经营资源，提高组织化程度和产业规模。

废旧纺织品回收产业链上各类型企业，需建设数字化信息中心，按照行业规范条件和相关标准，实时收集进出的废旧纺织品种类、数量及加工、资源化利用等方面的生产经营数据，并与废旧纺织品回收利用信息化管控平台联网。数据开发分析模块针对产业特征，建立数据模型和仿真分析工具，对平台所收集的数据进行处理，得到废旧纺织品的回收率、资源化利用率、回收利用过程的碳减排绩效、再生产品的碳足迹等信息。数据应用模块不断积累以上数据，通过其在时间、空间维度以及产业链上表现出的特征，进行产业分析、商业分析、税务分析、经济分析以及环境效益和经济效益分析。而管理服务模块可向参与废旧纺织品回收利用产业管理的各部门开放数据接口，数据采集、数据开发分析和数据应用等模块的数据也可根据管理需要被查阅，以支撑管理部门进行政务处理和政策制定。

另外，平台还有与未来产业绿色低碳发展及城市建设工作相衔接的空间，如与纺织行业生产者责任延伸机制衔接，将企业的产品绿色设计信息导入平台，以此促进废旧纺织品回收利用产业链条闭环；再如与上文提到的废旧纺织品回收利用企业碳减排

绩效交易工作结合，平台实现产业全流程跟踪，其数据可充分满足碳交易对数据准确和公平性的要求。

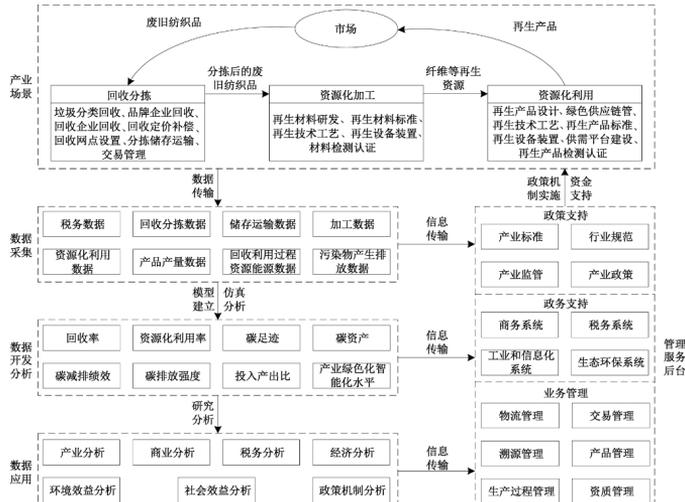


图5 废旧纺织品回收利用信息化管控平台功能结构及运行逻辑图

4 结束语

本文解析了我国废旧纺织品回收利用产业目前存在的问题和发展的局限，通过政策、市场及社会环境、回收渠道及模式、产业技术等方面的分析可以发现，随着我国社会进入高质量发展的新阶段，生态文明建设推进、绿色低碳政策的实施、数字化信息化技术的发展以及市场的规范成熟，都为废旧纺织品回收循环利用产业发展提供了巨大的空间。为此，本文从政策推进、低碳导向、标准规范和数字化协同4个方面，提出充分利用各项政策建立协同推进产业发展机制、突出产业减碳环境绩效解决回收经济动力问题、研究制定行业规范条件及标准体系、构建规划产业信息化管控平台等推动废旧纺织品回收利用产业健康良性发展的对策建议和机制构想。

产业用纺织品隔声降噪研究进展

吴霖昀 张旺笋

[立信门富士纺织机械(中山)有限公司]

1 概述

产业用纺织品作为纺织品的重要组成部分，是指经过专门设计的、具有工程结构特点的纺织品，其能够达到某种功能，而不像普通服装用纺织品，仅作为美观装饰和满足穿着需要。国际上按用途将产业用纺织品分为十二大类，分别是工业用、医疗卫生用、安全防护用、运动休闲用、土木工程用、交通运输用、环保工业用、功能性服装用、建筑用、家用、包装用、农业用纺织品。其中，家用类产业用纺织品是除功能性服装用产业用纺织品以外，日常生活中最常见的，其几乎涵盖所有用于家居的功能性纺织品，包括室内软装如地毯、墙布、窗帘布等。这些纺织品作为室内环境的重要组成部分，被广泛用于各类居家、办公、娱乐等室内场所。随着科技的发展，人们对这类产业用纺织品提出了更高的要求，如要求其具有防污防水性、阻燃性、抗菌性、紫外线防护性、防霉抗菌性等。窗帘的主要功能是在室内与室外形成一道屏障，起到保护隐私，阻隔光线和一定程度的装饰作用。随着技术的发展，具有阻燃、防水、抗紫外线、隔声降噪、调节室温等功能的窗帘受到人们的青睐。目前，市场上的窗帘布种类繁多，有卷帘布、直帘、罗马帘等。人们对窗帘的功能性要求也越来越高，具有隔声降噪功能的窗帘可以减少室外噪声对人体身心健康的危害，符合人们对健康生活的追求。

室外噪声是通过空气传播进入室内的，其通过窗户时强度会得到一定程度的减弱，窗帘可进一步削弱噪声强度。隔声窗帘能降低声音透过织物的强度和经织物反射后的强度，改变声音的传播路线，其一方面可以阻隔外界噪声，另一方面能够吸收室内噪声，从而调节室内声环境，起到降噪作用。墙纸不仅具有美化、个性化墙面的作用，

而且能提高室内声音的清晰度，在现代家居装修中备受青睐。未经装饰处理的四面光滑的房间内，壁面和地面均为硬而密实的材料，容易对声波产生一次及多次的反射，因此这样的室内传声清晰度差。当室内采用了墙纸、窗帘和地毯等柔性纺织材料时，声波进入墙纸等纺织材料中，一方面可以减少室内回声，使传声更清晰，另一方面能够降低声音的传播效率，达到隔声的效果。

2 材料降噪原理及种类

声音是由物体的振动引起的，正常人耳可听到的声音频率为 20~20000Hz。声音传播的原理是：当声音在介质中传播遇到某种材料时，一部分声波进入材料内被吸收消耗转化成热能，一部分声波被材料反射，还有一部分声波发生折射和衍射，剩余的声波透过材料继续传播。基于此，设计隔声降噪材料时，需综合考虑其对声音的吸收和反射效果。物理学观点认为，噪声是指强弱和频率变化都无明显规律的杂乱无章的声音。生理学观点认为，一切影响人类生活和工作的、不被需要的、对人体有害的声音都可称为噪声。按照频率，噪声分为低频、中频和低频噪声。其中，频率低于 500Hz 的被称为低频声，500~2000Hz 的为中频声；高于 2000Hz 的为高频声。

材料的降噪方法分为吸声和隔声。吸声是指当声波入射到材料内部后，一部分声能被转化成热能而耗散掉，引起声波的衰减，从而减弱反射声，使总的噪声降低。材料的吸声效果用吸声系数 ($\alpha, 0 < \alpha < 1$) 表征。 α 值越大，表示材料的吸声性能越好。常见的吸声材料可以分为多孔吸声材料和共振吸声材料 2 种。多孔吸声材料从表面至内部分布有许多细小敞开的通道，从而可使声波衰减，其以吸收中高频声波为主，常见的多孔吸声材料有纺织品材料、开孔型泡沫塑料等。多孔吸声材料又可分为有机纤维材料（丙纶、锦纶、聚酯纤维）、无机纤维材料（石棉、岩矿棉、玻璃棉等）、有机泡沫材料（以树脂或橡胶为基体，添加一些辅助材料）、无机泡沫材料（泡沫玻璃、泡沫金属）和多孔复合材料（以树脂、橡胶、金属、陶瓷、水泥为基体，添加弹性体纤维颗粒作为填充物）等。共振吸声材料依靠共振作用即通过振动摩擦产生热能消耗声能，其主要吸收中低频声波。共振吸声材料主要有闭孔型泡沫塑料、膜状材料、板状材料和穿孔板等。共振吸声材料按结构可分为含单个共振器结构、穿孔板结构、微穿孔板结构和薄板薄膜结构材料。用构件将噪声源与接收者分开，阻断声音的传播，从而达到降噪目的的措施称作隔声。材料的隔声能力通常用隔声量表征，隔声量越大，

说明材料的隔声性能越好。

材料吸声和材料隔声的区别在于，材料的吸声着眼于声源一侧反射声能的大小，目标是尽可能减小反射声能；材料的隔声着眼于入射声源另一侧透射声能的大小，目标是尽可能减小透射声能。一般情况下，噪声的频率越高，其波长越小，越不容易透过材料，因此随着频率的增大，吸声系数或隔声量呈增大趋势。

3 产业用纺织品隔声降噪性能影响因素

纺织材料具有轻薄、柔软、疏松多孔的特性。在针织物、机织物和非织造布结构的纺织品中，纤维间存在许多孔隙，多孔疏松透气的纺织材料对入射声能的反射较小，其主要是通过吸收声能来达到降噪效果。声波进入纺织材料内部后，引起材料内部孔隙中空气和纤维振动，一部分声能转化为热能而耗散掉。

纺织品具有较好的高频吸声性能，是因为随着声波频率的增大，材料孔隙内空气质点的振动速度加快，故而加快了热交换速度，使得纺织材料在高频段下具有良好的吸声效果。但由于其结构疏松，隔声性能较差，对中低频噪声的吸声效果不好，很难单独作为降噪材料使用。室外噪声经墙体阻隔后进入室内的多为中低频噪声，因此需要突破纺织品对中低频噪声的降噪难关。将纺织材料与其他材料复合构建降噪结构体是其未来的发展方向之一。可以通过织造、复合及涂层整理等方式构建复合降噪结构体。

目前，在纺织品声学性能的研究中，非织造布因加工方便，纤维层网状分布且易与其他材料和结构体复合而广泛应用；机织物结构较稳定，可通过功能性纤维的应用达到吸声隔声的效果；针织物则因成圈组织结构易脱散而较少用作降噪材料。

从纺织品的特性来看，影响纺织品吸声隔声性能的因素主要有：织物特性如织物组织结构、厚度、密度、孔隙率等，纤维特性如纤维种类、直径和横截面等。上述因素均无法单独用来衡量织物的降噪效果，因为各因素之间存在一定的联系，如织物组织结构的变化影响织物密度和孔隙率。因此，在研究纺织品降噪性能时，应综合考虑和设计这些参数，以达到良好的吸声隔声效果。

3.1 织物组织结构、密度、厚度及孔隙率

纺织品尤其是机织物的组织结构对其隔声性能有很大的影响，改变组织结构意味着织物的密度和孔隙率也相应发生改变。织物的孔隙率过大，声波会直接穿透织物；

孔隙率过小,大部分声波会被织物反射而无法起到吸声作用。材料厚度一直是隔声降噪领域研究的重点因素。一般情况下,降噪材料越厚,声音越难穿透材料,理论上隔声性能越好,但对纺织品而言并非完全如此。此外,对于家用类产业用纺织品如窗帘和墙布而言,其应用场景对织物厚度有也要求,通常以轻薄织物为主,因此,需要考虑在一定织物厚度范围内提升织物的隔声降噪性能。

李想等对不同组织结构及不同厚度涤纶机织物的隔声性能进行了测试,发现同一种涤纶织物在 1000~10000Hz 频率范围内的声级衰减量随着声波频率的变化而变化,织物在 2000、4000、8000Hz 时的声级衰减量较大,在其他频率下的衰减量较小;平纹、斜纹、缎纹、方平及蜂巢这 5 种组织结构中,蜂巢组织涤纶织物的降噪性能最好,且随着织物层数的增加,降噪性能呈提升趋势并存在一个理想厚度。梁丽娟对不同材质、厚度、组织结构的经编间隔织物的吸声和隔声性能进行研究,发现:经编间隔织物的密度越大,织物的吸声性能越好,且表面密实的经平绒结构织物比网眼结构织物的吸声性能更好;多层经编间隔织物层叠后,随着织物厚度的增加,织物的吸声峰值向低频方向移动;将经编间隔织物和海绵分别与同等规格的绒布复合后,对比其吸声效果发现,与绒布复合前,经编间隔织物较同厚度的海绵,吸声频带更宽,低频吸声性能更好,而频率相同时,吸声系数大于海绵,与绒布复合后,经编间隔织物的吸声性能相对复合前显著提升;两层经编间隔织物与绒布复合后,其吸声系数超过 0.2,达到吸声材料的标准要求。测试单层经编间隔织物的隔声性能发现,薄而密实的织物比厚而疏松的织物的隔声性能好很多,表明密度是影响纺织品隔声性能的重要因素;表面组织是经平绒的织物比表面是网孔结构的织物具有更好的隔声效果;经编间隔织物和海绵与绒布复合后,隔声量均显著增大,而不论是复合前还是复合后,经编间隔织物的隔声性能均优于海绵。总体而言,具有更好透气性、结构稳定、生产过程环保的经编间隔织物在降低噪声和抗压缓冲应用方面是海绵材料的优良替代品。温晓丹织制了 7 种不同孔隙率的蜂巢组织与平纹组织机织物,构建不同的双层结构体,并对试样的表面粗糙度进行测试。该研究将 2 层织物叠在一起,构建了双层具有孔隙梯度的机织物结构体并对其进行声学测试,结果显示:当双层织物孔隙率差值小于 9.75%时,大孔隙率织物面向声源侧时吸声效果较好;当双层织物孔隙率差值大于 9.75%时,小孔隙率织物面向声源侧时吸声效果较好;当双层织物孔隙率差值等于 9.75%时,不同孔隙率织物面向声源侧时的吸声性能相当;在 800~5000Hz 频段,随着平均粗糙度的增大,试样的吸声性能逐渐提高,原因是粗糙、凹凸不平的表面有助于增大织物与声

波的接触面积，进而提高共振效应，使织物的吸声性能提升。

3.2 纤维横截面形态与线密度

除织物组织结构外，还可以通过改变织物的纤维规格参数实现降噪效果。如纤维横截面形态的不同对织物隔声性能有一定的影响，改变纤维横截面形态可以赋予织物不同的隔声性能。构成织物的纤维横截面通常为圆形或椭圆形，采用异形横截面的纤维可以增加声波的反射，从而赋予织物更好的隔声性能。此外，织物中的纤维越细，纤维线密度越小，其隔声降噪性能越好。

范晓丹对圆形截面和三角形截面纤维织制的平纹、斜纹和蜂巢结构织物进行隔声性能测试，发现三角形截面纤维织制的平纹织物比圆形截面纤维平纹织物具有更好的声学性能。研究还发现，织物的吸声隔声效果与孔隙率呈负相关关系；测量平纹、斜纹、蜂巢结构织物的孔径后发现，织物孔径越小，中低频吸声效果越好，而中低频隔声效果则随着孔径的增大而呈增加趋势。张文韬采用静电纺丝技术分别制备了聚酰胺6（PA6）和聚乳酸（PLA）纳米纤维膜，再以非织造布作为基材，非织造布选用聚酯再生纤维针刺毡和吸声棉，将纳米纤维膜和非织造布复合制成吸声材料，复合后的2种吸声材料相比复合前的基材，吸声性能表现出不同程度的提升；在0~1600Hz的低频段，PLA纳米纤维膜与基材复合后，材料的吸声系数比复合前的基材提高了0.1~0.5，在0~5000Hz频段内，复合后材料的隔声性能提高了10%~50%，且纤维层更蓬松的PLA复合材料的隔声效果比PA6复合材料的更好。纳米纤维直径小，比表面积大，纳米纤维膜孔隙小且孔隙率高，声波通过纤维膜时更易与之发生碰撞，使声能转化为热能，因而吸声隔声性能更好。

3.3 涂层整理方式

通过涂层整理的方式可赋予纺织材料各种功能，常见的涂层整理技术有防水、阻燃等。通过涂层整理的方式将聚合物浆液连续涂覆于纺织材料表面，改变织物厚度、面密度及粗糙度等因素，可综合改善纺织材料的声学性能。此外，涂层浆液中还可以添加不同的填料，以进一步改善纺织材料的性能。

纺织品涂层加工过程中，通常要求设备具有较大的灵活性，从而方便工艺参数的调整以达到不同的整理效果。目前常见的涂层整理方式主要有3种：

（1）刮刀涂层，适用于黏度较大的涂料，常用于防水涂层、泡沫涂层、遮光涂层等方面，是市面上最常见的涂层方式；（2）磁辊涂层，特点是通过磁力大小精准控制

上浆量,从而达到薄涂效果,适用于水状低黏度的浆料,常用于涂料染色、功能涂层、低渗透涂层等方面;(3)圆网印花涂层,通过不同的网孔形状将浆料印制到织物表面,适用于单色印花、3D涂层和针织材料涂层等方面。

涂层可以是单面覆涂,也可采用双面覆涂方式。对于为实现隔声功能的涂层整理而言,单面涂层织物需考虑涂层面和织物面对声波不同的吸声效果。常用的涂层聚合物有丙烯酸酯、聚氨酯和聚氯乙烯(PVC)等,其中PVC在目前的研究中常被用作隔声降噪涂覆材料。林希宁将玄武岩短纤维和玄武岩织物分别与PVC黏结剂复合,制备隔声复合材料。他先用醋酸、氢氧化钠、有机硅烷对纤维表面进行改性处理,以增加玄武岩纤维与PVC之间的亲和力,再将纤维加入PVC黏结剂中,测试所得含玄武岩纤维的复合材料试样的隔声性能,结果发现,试样隔声性能随玄武岩纤维添加量的增加而提升,不同纤维含量隔声复合材料的平均隔声量达30~40dB,但吸声性能未得以明显改善。随着纤维直径增大,吸声性能改善,平均吸声系数为0.06~0.07;纤维长度越短,所得复合材料的吸声性能越好,平均吸声系数为0.06~0.09。对于不同层数玄武岩织物与PVC复合得到的隔声复合材料,随着织物层数的增加,复合材料试样的隔声性能明显提升,平均隔声量达35~40dB。通过对比将玄武岩短纤维加入PVC黏结剂中和将玄武岩织物与PVC复合这2种隔声复合材料的隔声性能,发现短纤维加入PVC黏结剂中并分布于材料内部制得的复合材料,隔声效果比织物与PVC复合制得的复合材料的更好。将短纤维作为填料加入聚合物浆液中是一种创新的降噪复合体构建方式,添加短纤维可使聚合物材料的硬度和密度增大,且短纤维呈长条状,相比常见的粉末填料与颗粒填料,其能以更大的表面积接触进入材料内部的声波,进而起到相互碰撞并消耗声能的作用。

在织物与聚合物复合而成的复合材料中,织物与聚合物的用量占比对材料的隔声降噪性能有较大影响。以织物为基体材料、聚合物为薄层覆涂材料时,织物的多孔吸声占主导作用;以聚合物为基体材料或聚合物涂层厚度大于织物厚度时,密封性好的聚合物涂层膜起主要的隔声作用。杨天兵采用棉纤维织制具有不同组织循环数的蜂窝织物,并以颗粒改性PVC树脂为基体、蜂窝织物为增强材料,制备不同组织循环数与排列的蜂窝织物/PVC隔声复合材料。研究发现,复合前蜂窝织物的厚度和透气性随着组织循环数增大而增加,隔声性能则随之下降;双面涂覆改性PVC树脂后,所得复合材料在100~8000Hz频段的平均隔声量比复合前的蜂窝织物增大了5.8~7.0倍,且双面覆涂PVC的复合材料的隔声量随着织物组织循环数增大呈现先增大后减小的趋势。

另外，杨天兵还采用双面浇注 PVC 溶液的方法制备了蜂窝织物/PVC 隔声复合材料，与双面覆涂法相比，双面浇注法的 PVC 基体材料用量增加，PVC 的阻尼性能在隔声方面起主导作用，蜂窝织物起辅助作用，所得双面浇注复合材料在中低频段的隔声性能比双面覆涂复合材料的好。温晓丹在聚氨酯溶液中分别加入二氧化硅、三氧化二铁、氧化锌 3 种不同填料，并用其对机织物进行涂层处理。研究发现，添加了填料的 3 种涂层织物的表面粗糙度大，吸声性能好。温晓丹还在蜂巢织物表面覆涂糯米胶，然后与 0~5mm 厚的空气层复合，结果显示：在 1000~5000Hz 频段，空气层的引入对未涂糯米胶的织物吸声性能影响显著，空气层厚度越大，结构体的吸声性能越好；在 1000~5000Hz 频段，涂胶织物与空气层复合后结构体的吸声性能也随着空气层厚度的增大而增大；涂胶处理还额外增大了结构体的厚度，空气层对涂胶织物吸声性能的提升效果大于对未涂胶织物吸声性能的提升效果，结构体吸声系数峰值对应的频率随空气层厚度的增大而减小，共振频率向低频移动。

在纺织材料涂层整理中，不同特性填料的加入对材料隔声性能的影响不同。玻璃微珠属于一种塑料类黏弹性阻尼材料，可通过降低物体的机械振动来减小噪声，其通常以纳米级填料的形式加入涂层液并均匀分布在溶液中，实现对织物的隔声降噪处理。空心微珠是一种含中空腔体的微小圆形球体颗粒，内壁厚度和粒径是衡量其性质的主要指标，微珠粒径通常为几微米到几毫米不等。中空玻璃微珠具有密度小、质轻、压缩强度高、分散性好、加工性能优异等特点，同时还具有保温隔热、隔声、吸能缓冲、电绝缘强度高、耐磨、防辐射、电磁屏蔽性好、吸水率低等特性，能够赋予聚合物优良的性能，因此常用作填充材料来制备复合材料，在防撞减震及防爆抗震的汽车、航空航天、军事装备及船舶等工业领域具有广阔的应用前景。

中空微珠（HGM）目前较多应用于提高复合材料的力学性能方面。李旦探讨了中空玻璃微珠作为填充材料对泡沫塑料性能的影响，结果发现：中空玻璃微珠能起到核剂的作用，有助于增加材料单位体积内泡沫孔的数量，且中空玻璃微珠的存在使气体的存在空间受到压缩，能限制气泡的增大，减小泡沫孔的尺寸，而单位体积内泡沫孔数量越多，尺寸越小，分布越均匀，泡沫塑料的密度越小，力学性能越好；中空玻璃微珠分布在泡沫孔壁周围，能够对泡沫孔壁起支撑作用，进而提高泡沫塑料的压缩强度和拉伸性能。

在产业用纺织品隔声降噪领域，HGM 也有很大的探索和应用空间。普丹丹等以聚 PVC 为基体材料、HGM 为填充材料、涤纶织物为增强材料，采用接触成型技术将 HGM

混入 PVC 浆料中,再浇注到涤纶织物上制备涤纶/PVC-HGM 复合材料,并测试材料的隔声性能。研究结果显示,在 100~630Hz 低频段,复合材料试样的隔声量随频率的变化较小;在 630~10000Hz 中高频段,隔声量随频率的增大而显著增大,最大隔声量达 28~30dB,但增大 HGM 的体积分数后,试样的隔声量与低体积分数 HGM 试样的隔声量基本相当,即 HGM 体积分数的增大不能显著提高涤纶/PVC-HGM 复合材料试样的隔声性能。另外,普丹丹等还将不同粒径的 HGM 加入 PVC 中,结果发现,随着复合材料试样中填充的 HGM 粒径的增大,试样的隔声性能提高。张伟程等以聚氨酯为基体,中空玻璃微珠和偶氮二甲酰胺(商品名 AC 发泡剂)为填料,并加入一定量增塑剂,采用熔融共混法制备了一种软质复合材料。研究表明:随着 HGM 添加量的增加,复合材料的最大吸声系数降低,吸声系数峰值向入射声波的高频段方向移动,即 HGM 的加入并不能有效提升该复合材料的吸声性能,但可使材料在高频段的吸声性能提高;AC 发泡剂的加入可使材料产生的泡沫孔数量增加,有效提高材料的吸声系数,但 AC 发泡剂添加量过大时,泡沫孔内气压过大,泡沫孔易发生合并和坍塌,吸声系数反而有所下降。

4 结束语

纺织品作为良好的柔性多孔吸声材料,在吸声、隔声降噪方面有着其他降噪材料不可替代的优势。在实现室内隔声降噪方面,应考虑在不影响室内装饰材料原本功能的基础上,从改变纤维特性、织物结构及复合具有降噪功能的结构体或填料等方面着手,提高室内隔声降噪产业用纺织品的降噪效果。未来,随着技术的发展,与纺织材料复合的多功能轻薄降噪结构体有望广泛应用于室内环境中。

来源:产业用纺织品 2024 年第 02 期

2024/2025

中国产业用纺织品技术发展报告

2024/2025 Technology Development Report of China Industrial Textiles

附录

2024年发布的纺织标准目录

国家标准

序号	标准编号	标准名称	代替标准号	采标情况	实施日期	发布日期
1	GB/T 2910.9-2024	纺织品 定量化学分析 第 9 部分： 醋 酯纤维与某些 其他纤维混合物 (苯甲 醇法)	GB/T 2910.9 - 2009	ISO 1833-9: 2019,MOD	2024-10-01	2024-03-15
2	GB/T 2910.11-2024	纺织品 定量化学分析 第 11 部分： 某些纤维素纤维与 某些其他纤维的混 合物 (硫酸法)	GB/T 2910.11- 2009	ISO 1833 - 11:2017,MOD	2024-11-01	2024-04-25
3	GB/T 2910.16-2024	纺织品 定量化学分析 第 16 部分： 聚丙烯纤维与某些 其他纤维的混合物 (二甲苯法)	GB/T 2910.16- 2009	ISO 1833 - 16:2019,MOD	2024-10-01	2024-03-15
4	GB/T 3920-2024	纺织品 色牢度试 验 耐摩擦色牢度	GB/T 3920-2008	ISO 105-X12: 2016,MOD	2027-07-01	2024-12-31
5	GB/T 5324-2024	棉与涤纶混纺本色 纱线	GB/T 5324-2009		2024-11-01	2024-04-25
6	GB/T 5325-2024	棉与涤纶混纺 本色布	GB/T 5325-2009		2024-10-01	2024-03-15
7	GB/T 11047.3-2024	纺织品 织物勾丝 性能的检测和 评 价 第 3 部分：针 布滚筒法			2024-10-01	2024-03-15

序号	标准编号	标准名称	代替标准号	采标情况	实施日期	发布日期
8	GB/T 12705.1-2024	纺织品 织物防钻 绒性试验方法第 1 部分：摩擦法	GB/T 12705.1- 2009		2024-10-01	2024-03-15
9	GB/T 12705.2-2024	纺织品 防钻绒性 试验方法 第 2 部分：转箱法	GB/T 12705.2- 2009		2024-11-01	2024-04-25
10	GB/T 14799-2024	土工合成材料有效 孔径的测定干筛法	GB/T 14799-2005		2024-10-01	2024-03-15
11	GB/T 16605-2024	再生纤维素丝织物	GB/T16605-2008		2026-12-01	2024-11-28
12	GB/T 17592-2024	纺织品 禁用偶氮 染料的测定	GB/T 17592-2011	ISO 14362-1: 2017,MOD	2025-04-01	2024-03-15
13	GB/T 17630-2024	土工合成材料动态 穿孔试验落锥法	GB/T 17630-1998 (2008)	ISO 13433: 2006,MOD	2024-10-01	2024-03-15
14	GB/T 18737.5-2024	纺织机械与附件 经轴 第 5 部分： 经 编机用分段整 经轴		ISO 8116-5: 2008,MOD	2025-07-01	2024-12-31
15	GB/T 20384-2024	纺织品氯化苯和氯 化甲苯类化合物的 测定	GB/T 20384-2006		2024-10-01	2024-03-15
16	GB/T 21294-2024	服装理化性能的检 验方法	GB/T 21294-2014		2024-10-01	2024-03-15
17	GB/T 21295-2024	服装理化性能的技 术要求	GB/T 21295-2014		2024-10-01	2024-03-15
18	GB/T 22849-2024	针织 T 恤衫	GB/T 22849-2014		2024-10-01	2024-03-15
19	GB/T 26378-2024	粗梳毛织品	GB/T 26378-2011		2024-10-01	2024-03-15
20	GB/T 26382-2024	精梳毛织品	GB/T26382-2011		2024-10-01	2024-03-15
21	GB/T 28465-2024	服装衬布检验规则	GB/T 28465-2012		2024-10-01	2024-03-15

序号	标准编号	标准名称	代替标准号	采标情况	实施日期	发布日期
22	GB/T 29865-2024	纺织品色牢度试验耐摩擦色牢度小面积法	GB/T 29865-2013	ISO 105 - X16:2016, MOD	2026-12-01	2024-11-28
23	GB/T 30166-2024	纺织品 丙烯酰胺类化合物的测定	GB/T 30166-2013		2024-10-01	2024-03-15
24	GB/T 31126.2-2024	纺织品 全氟及多氟化合物的测定 第 2 部分：气相色谱 - 质谱法			2025-06-01	2024-11-28
25	GB/T 31900-2024	机织儿童服装	GB/T 31900-2015		2026-12-01	2024-11-28
26	GB/T 31901-2024	服装穿着试验及评价方法	GB/T 31901-2015		2026-12-01	2024-11-28
27	GB/T 31903-2024	服装衬布产品标记、标志与包装	GB/T 31903-2015		2024-10-01	2024-03-15
28	GB/T 31904-2024	非织造黏合衬	GB/T 31904-2015		2024-10-01	2024-03-15
29	GB/T 32151.47-2024	温室气体排放核算与报告要求第 47 部分：化纤生产企业			2025-05-01	2024-10-26
30	GB/T 35270-2024	婴幼儿背带（袋）	GB/T 35270-2017		2026-12-01	2024-11-28
31	GB/T 35443-2024	纺织品 定量化学分析 海藻纤维与某些其他纤维的混合物	GB/T 35443-2017		2025-04-01	2024-03-15
32	GB/T 35611-2024	绿色产品评价 纺织产品	GB/T 35611-2017		2026-10-01	2024-09-29
33	GB/T 43716-2024	纺织品 夜光余辉性能试验方法 亮度计法			2024-10-01	2024-03-15
34	GB/T 43717-2024	数字化试衣虚拟服装属性			2024-10-01	2024-03-15
35	GB/T 43721-2024	纺织品 苯扎氯铵的测定			2024-10-01	2024-03-15

序号	标准编号	标准名称	代替标准号	采标情况	实施日期	发布日期
36	GB/T 43820-2024	纺织品 含相变材料的纺织品蓄热和放热性能的测定			2024-10-01	2024-03-15
37	GB/T 43821-2024	纺织品 铅释放量的测定			2024-10-01	2024-03-15
38	GB/T 43822-2024	纺织品 织物最大吸水量下干燥速率的测定			2024-10-01	2024-03-15
39	GB/T 43823-2024	纺织品 抗病毒活性的测定		ISO 18184:2019,MOD	2024-10-01	2024-03-15
40	GB/T 43830-2024	智能服装 术语和定义		ISO 18831:2016,MOD	2024-10-01	2024-03-15
41	GB/T 43831-2024	棉及化纤纯纺、混纺本色布检验、标志与包装			2024-10-01	2024-03-15
42	GB/T 43832-2024	纺织品 苯胺的测定			2024-10-01	2024-03-15
43	GB/T 43955-2024	棉及化纤纯纺、混纺纱线检验、标志与包装	整合 FZ/T 10007- FZ/T 10008-2018	2018、	2024-11-01	2024-04-25
44	GB/T 44214-2024	蚕丝中非蚕丝蛋白质含量试验方法			2025-02-01	2024-07-24
45	GB/T 44475-2024	壮锦			2025-05-01	2024-10-26
46	GB/T 44722-2024	纺织品 喹啉的测定			2025-04-01	2024-09-29
47	GB/T 44835-2024	纺织品 含氯有机溶剂的测定			2025-06-01	2024-11-28
48	GB/T 44836-2024	纺织品 草甘膦及其盐的测定			2025-06-01	2024-11-28
49	GB/T 44870-2024	纤维碳化生产成套装备的术语、分类及型号编制方法			2025-06-01	2024-11-28

序号	标准编号	标准名称	代替标准号	采标情况	实施日期	发布日期
50	GB/T 44871-2024	纺织品 二异氰酸酯类化合物的测定			2025-06-01	2024-11-28
51	GB/T 44872-2024	纺织产品洗后外观通用技术要求			2025-06-01	2024-11-28
52	GB/T 44945-2024	纺织品 定量化学分析 桑蚕丝与柞蚕丝的混合物			2025-06-01	2024-11-28
53	GB/T 45040-2024	床上用品 乳胶制品透气性试验方法			2025-07-01	2024-12-31
54	GB/T 45041-2024	婴幼儿毛及仿毛针织品			2025-07-01	2024-12-31
55	GB/T 45042-2024	纺织品 定量化学分析 聚丙烯腈预氧化纤维与某些其他纤维的混合物			2025-07-01	2024-12-31
56	GB/T 45043-2024	纺织品 己二酸酯的测定 气相色谱-质谱法			2025-07-01	2024-12-31
57	GB/T 45044-2024	纺织品 色牢度试验 耐渗色色牢度			2025-07-01	2024-12-31
58	GB/T 45066-2024	数字化试衣 虚拟人体属性 术语和定义		ISO18825-2:2016,MOD	2025-07-01	2024-12-31
59	GB/T 45068.1-2024	数字化试衣 系统性能评估 第1部分:虚拟人体表示		ISO 20947-1:2021,MOD	2025-07-01	2024-12-31
60	GB/T 45178-2024	化学纤维 抗氧化活性测定 DPPH和 ABTS 法			2025-07-01	2024-12-31
61	GB/T 45179-2024	化学纤维 短纤维摩擦因数的测定 绞盘法			2025-07-01	2024-12-31

行业标准

序号	标准编号	标准名称	代替标准号	采标情况	实施日期	发布日期
62	FZ/T 01050-2024	纺织品 纱线疵点的分级与检验方法 电容式(2017)	FZ/T 01050-1997		2027-01-01	2024-12-10
63	FZ/T 01175-2024	纺织品 金属镀膜纤维鉴别方法			2025-01-01	2024-07-05
64	FZ/T 01176-2024	纺织品 织物干燥速率的测定 热板法			2025-01-01	2024-07-05
65	FZ/T 01177-2024	纺织品 定量化学分析 聚 3- 羟基丁酸 -戊酸酯 / 聚乳酸 (PHBV/PLA) 共混物 纤维与某些其他纤维的混合物			2025-07-01	2024-12-10
66	FZ/T 01178-2024	纺织品 昆虫驱避剂含量的测定 气相色谱 - 质谱法			2025-07-01	2024-12-10
67	FZ/T 01179-2024	纺织品 总铅和总镉含量的测定 电化学分析法			2025-07-01	2024-12-10
68	FZ/T 01180.1-2024	非织造布及其制品 接缝强力的测定 第 1 部分: 条样法			2025-07-01	2024-12-10
69	FZ/T 01180.2-2024	非织造布及其制品 接缝强力的测定 第 2 部分: 抓样法			2025-07-01	2024-12-10
70	FZ/T 07032-2024	聚酯和涤纶行业绿色工厂评价要求			2025-07-01	2024-12-10
71	FZ/T 07033-2024	制丝企业综合能耗计算方法及分级定额			2025-07-01	2024-12-10

序号	标准编号	标准名称	代替标准号	采标情况	实施日期	发布日期
72	FZ/T 07037-2024	纺织企业水重复利 用率计算方法			2025-04-01	2024-12-10
73	FZ/T 07038-2024	节水型企业 丝绸 行业			2025-04-01	2024-12-10
74	FZ/T 07039-2024	节水型企业 毛纺 织行业			2025-04-01	2024-12-10
75	FZ/T 07040-2024	节水型企业 聚酯 涤纶行业			2025-04-01	2024-12-10
76	FZ/T 07041-2024	纺织企业水平衡测 试导则			2025-04-01	2024-12-10
77	FZ/T 07042-2024	废旧纺织品回收利 用碳减排评价导则			2025-04-01	2024-12-10
78	FZ/T 08005-2024	可水洗纯棉絮片			2025-01-01	2024-07-05
79	FZ/T 08006-2024	产品碳足迹 产品 种类规则 纺织产 品			2025-01-01	2024-07-05
80	FZ/T 08007-2024	一次性蒸汽眼罩			2025-05-01	204-10-24
81	FZ/T 12008-2024	维纶本色纱线	FZ/T 12008-2014		2026-07-01	2024-07-05
82	FZ/T 12010-2024	棉氨纶包芯本色纱	FZ/T 12010-2011		2026-07-01	2024-07-05
83	FZ/T 12022-2024	涤纶与黏胶纤维混 纺色纺纱线	整合 FZ/T 12022-2019、 FZ/T 12046-2014		2026-07-01	2024-07-05
84	FZ/T 12036-2024	棉羊毛混纺色纺 纱线	FZ/T 12036-2012		2026-07-01	2024-07-05
85	FZ/T 12037-2024	棉本色强捻纱	FZ/T 12037-2013		2026-07-01	2024-07-05
86	FZ/T 12041-2024	芳纶色纺纱线	FZ/T 12041-2013		2026-07-01	2024-07-05
87	FZ/T 12080-2024	棉包涤纶弹力丝氨 纶双芯本色纱			2025-01-01	2024-07-05

序号	标准编号	标准名称	代替标准号	采标情况	实施日期	发布日期
88	FZ/T 13001-2024	色织牛仔布	整合 FZ/T 13001-2013、FZ/T 13036-2016、 FZ/T 13037- 2016、FZ/T 13038-2016		2027-01-01	2024-12-10
89	FZ/T 13006-2024	涤黏混纺本色布	FZ/T 13006-2014		2026-07-01	2024-07-05
90	FZ/T 13015-2024	篷盖用维纶本色帆 布	FZ/T 13015-2014		2026-07-01	2024-07-05
91	FZ/T 13029-2024	棉竹节本色布	FZ/T 13029-2014		2026-07-01	2024-07-05
92	FZ/T 13031-2024	竹浆黏胶纤维与涤 纶混纺本色布	FZ/T 13031-2015		2026-07-01	2024-07-05
93	FZ/T 13061-2024	灯芯绒棉本色布			2025-01-01	2024-07-05
94	FZ/T 13062-2024	间位芳纶色织布			2025-01-01	2024-07-05
95	FZ/T 14004-2024	再生纤维素纤维印 染布	整合 FZ/T 14004-2014、FZ/T 14012-2022、 FZ/T 14013- 2018、FZ/T 14014-2019		2026-07-01	2024-07-05
96	FZ/T 14005-2024	涤黏混纺印染布	FZ/T 14005-2014		2026-07-01	2024-07-05
97	FZ/T 14009-2024	篷盖用维纶染色防 水帆布	FZ/T 14009-2014		2026-07-01	2024-07-05
98	FZ/T 14028-2024	棉羊毛混纺印染布	FZ/T 14028-2014		2026-07-01	2024-07-05
99	FZ/T 14029-2024	棉磨毛印染布	FZ/T 14029-2014		2026-07-01	2024-07-05
100	FZ/T 14058-2024	棉多层印染布			2025-01-01	2024-07-05

序号	标准编号	标准名称	代替标准号	采标情况	实施日期	发布日期
101	FZ/T 21018-2024	分梳貉子绒			2025-07-01	2024-12-10
102	FZ/T 22011-2024	精梳山羊绒机织纱	整合 FZ/T 22007-2012、 FZ/T 22011-2014		2026-07-01	2024-07-05
103	FZ/T 22020-2024	貉子绒针织绒线			2025-07-01	2024-12-10
104	FZ/T 24017-2024	超高支精梳纯羊绒 织品	FZ/T 24017-2012		2027-01-01	2024-12-10
105	FZ/T 24034-2024	貉子绒针织品			2025-07-01	2024-12-10
106	FZ/T 30003-2024	纺织品 麻棉混纺 产品定量分析 方 法 光学显微镜法	FZ/T 30003-2009		2026-07-01	2024-07-05
107	FZ/T 32004-2024	亚麻与棉混纺本色 纱线	FZ/T 32004-2009		2026-07-01	2024-07-05
108	FZ/T 32005-2024	苧麻棉混纺本色纱 线	FZ/T32005-2006		2026-07-01	2024-07-05
109	FZ/T 33006-2024	苧麻棉混纺本色布	FZ/T33006-2006		2026-07-01	2024-07-05
110	FZ/T 40011-2024	制丝水质			2025-01-01	2024-07-05
111	FZ/T 44010-2024	蚕丝软席			2025-01-01	2024-07-05
112	FZ/T 50010.13-2024	再生纤维素纤维用 浆粕 反应性能的 测定	FZ/T 50010.13-2011		2026-07-01	2024-07-05
113	FZ/T 50064-2024	化学纤维 短纤维 色度色差试验方法			2025-07-01	2024-12-10
114	FZ/T 51023-2024	纤维级循环再利用 聚己内酰胺 (PA6)	切片		2025-01-01	2024-07-05
115	FZ/T 51024-2024	纤维级无锑循环再 利用聚对苯二甲酸 乙二醇酯 (PET) 切片			2025-07-01	2024-12-10

序号	标准编号	标准名称	代替标准号	采标情况	实施日期	发布日期
116	FZ/T 52067-2024	无锑涤纶短纤维			2025-01-01	2024-07-05
117	FZ/T 54070-2024	涤纶粗单纤牵伸丝	FZ/T 54070-2014		2026-07-01	2024-07-05
118	FZ/T 54148-2024	循环再利用锦纶 6 弹力丝			2025-01-01	2024-07-05
119	FZ/T 54149-2024	循环再利用锦纶 6 牵伸丝			2025-01-01	2024-07-05
120	FZ/T 54150-2024	循环再利用锦纶 6 预取向丝			2025-01-01	2024-07-05
121	FZ/T 54151-2024	抗蠕变超高分子量 聚乙烯长丝			2025-07-01	2024-12-10
122	FZ/T 60040-2024	黏合衬水洗后分离 性能试验方法	FZ/T 60040-2014		2026-07-01	2024-07-05
123	FZ/T 60052-2024	毛巾产品快干性能 的评价			2025-01-01	2024-07-05
124	FZ/T 60053-2024	家用纺织品 毛巾 产品 术语			2025-01-01	2024-07-05
125	FZ/T 60054-2024	工业除尘滤袋接缝 性能的测定及评价			2025-01-01	2024-07-05
126	FZ/T 62017-2024	毛巾浴衣	FZ/T 62017-2009		2026-07-01	2024-07-05
127	FZ/T 62024-2024	慢回弹枕、 垫类产品	FZ/T 62024-2014 (2017)		2027-01-01	2024-12-10
128	FZ/T 62026-2024	手工粗布床单	整合 FZ/T 62026-2015、 FZ/T 62029-2015		2026-07-01	2024-07-05
129	FZ/T 62027-2024	磨毛面料床上用品	整合 FZ/T 62027-2015、FZ/T 62030-2015		2027-01-01	2024-12-10
130	FZ/T 62028-2024	针织面料床上用品	整合 FZ/T 62028-2015、FZ/T 62031-2015		2026-07-01	2024-07-05

序号	标准编号	标准名称	代替标准号	采标情况	实施日期	发布日期
131	FZ/T 62048-2024	一次性床上用品通用技术规范			2025-07-01	2024-12-10
132	FZ/T 62049-2024	可水洗针织面料隔尿垫			2025-07-01	2024-12-10
133	FZ/T 63001-2024	缝纫线用涤纶本色纱线	FZ/T 63001-2014		2026-07-01	2024-07-05
134	FZ/T 63003-2024	棉工艺绣花线	整合 FZ/T 63003-2011、FZ/T 63007-2007		2027-01-01	2024-12-10
135	FZ/T 63011-2024	锦纶长丝织带	整合 FZ/T 63011-2009、FZ/T 63023-2014		2027-01-01	2024-12-10
136	FZ/T 63015-2024	染色黏胶长丝	FZ/T 63015-2012(2017)		2027-01-01	2024-12-10
137	FZ/T 63017-2024	全棉薄型机织带	FZ/T 63017-2012(2017)		2027-01-01	2024-12-10
138	FZ/T 63058-2024	纤维绳索 聚乙烯 3 股和 4 股绳索			2025-07-01	2024-12-10
139	FZ/T 64039-2024	复膜机织黏合衬	FZ/T 64039-2014		2026-07-01	2024-07-05
140	FZ/T 64041-2024	熔喷纤网黏合衬	FZ/T 64041-2014		2026-07-01	2024-07-05
141	FZ/T 64111-2024	卫生巾（护垫）用 非织造布			2025-01-01	2024-07-05
142	FZ/T 64112-2024	婴幼儿纸尿裤用非 织造布			2025-01-01	2024-07-05
143	FZ/T 64113-2024	无熔滴防静电织物			2025-01-01	2024-07-05
144	FZ/T 64114-2024	口罩用熔喷法非织 造布技术规范			2025-01-01	2024-07-05
145	FZ/T 64115-2024	水刺非织造布用脱 脂棉			2025-07-01	2024-12-10
146	FZ/T 70019-2024	袜子延伸值试验方 法			2025-01-01	2024-07-05

序号	标准编号	标准名称	代替标准号	采标情况	实施日期	发布日期
147	FZ/T 73031-2024	压力袜	FZ/T 73031-2009		2026-07-01	2024-07-05
148	FZ/T 73035-2024	针织彩棉内衣	FZ/T 73035-2010(2017)		2027-01-01	2024/12/10
149	FZ/T 73049-2024	针织口罩	FZ/T 73049-2014		2026-07-01	2024-07-05
150	FZ/T 73052-2024	水洗整理针织服装	FZ/T 73052-2015		2026-07-01	2024-07-05
151	FZ/T 73076-2024	生理针织内裤			2025-01-01	2024-07-05
152	FZ/T 73077-2024	针织速干衣			2025-01-01	2024-07-05
153	FZ/T 73078-2024	仿皮针织裤			2025-01-01	2024-07-05
154	FZ/T 73079-2024	牛角瓜纤维针织内 衣			2025-07-01	2024-12-10
155	FZ/T 73080-2024	热敏变色针织服装			2025-07-01	2024-12-10
156	FZ/T 80002-2024	服装标志、包装、 运输和贮存	FZ/T 80002-2016(2017)		2027-01-01	2024-12-10
157	FZ/T 80004-2024	服装成品出厂检验 规则	FZ/T 80004-2014(2017)		2027-01-01	2024-12-10
158	FZ/T 80014-2024	洁净室服装 通用 技术规范	整合 FZ/T 80012-2012、 FZ/T 80013-2012、 FZ/T 80014-2012		2026-07-01	2024-07-05
159	FZ/T 80016-2024	警示服 电致发光 性能的检测和评价			2025-01-01	2024-07-05
160	FZ/T 80017-2024	机织服装植物染质 量技术要求			2025-01-01	2024-07-05
161	FZ/T 80018-2024	服装 防静电性 能要求及试验方法			2025-01-01	2024-07-05
162	FZ/T 81009-2024	人造毛皮服装	FZ/T 81009-2014		2026-07-01	2024-07-05

序号	标准编号	标准名称	代替标准号	采标情况	实施日期	发布日期
163	FZ/T 81012-2024	机织围巾、披肩	FZ/T 81012-2016(2017)		2027-01-01	2024-12-10
164	FZ/T 81015-2024	婚纱和礼服	FZ/T 81015-2016(2017)		2027-01-01	2024-12-10
165	FZ/T 81018-2024	机织人造革服装	FZ/T 81018-2014(2017)		2027-01-01	2024-12-10
166	FZ/T 81019-2024	灯芯绒服装	FZ/T 81019-2014(2017)		2027-01-01	2024-12-10
167	FZ/T 81025-2024	防雨套装			2025-01-01	2024-07-05
168	FZ/T 81026-2024	中山装			2025-07-01	2024-12-10
169	FZ/T 92069-2024	纬编机用输纱器	FZ/T 92069-2014(2017)		2026-11-01	2024-10-24
170	FZ/T 92071-2024	棉精梳机 分离辊	FZ/T 92071-2009(2017)		2026-11-01	2024-10-24
171	FZ/T 93020-2024	弹性针布	FZ/T 93020-2004(2010)		2026-11-01	2024-10-24
172	FZ/T 93027-2024	棉纺环锭细纱机	FZ/T 93027-2014(2017)		2026-11-01	2024-10-24
173	FZ/T 93074-2024	熔喷法非织造布生 产联合机	FZ/T 93074-2011(2017)		2026-11-01	2024-10-24
174	FZ/T 94054-2024	喷水织机	FZ/T 94054-2009(2017)		2026-11-01	2024-10-24
175	FZ/T 95006-2024	普通轧车	FZ/T 95006-2012(2017)		2026-11-01	2024-10-24
176	FZ/T 95016-2024	松式干燥机	FZ/T 95016-2011(2017)		2026-11-01	2024-10-24
177	FZ/T 97025-2024	横机数控系统	FZ/T 97025-2011(2017)		2026-11-01	2024-10-24

编 辑：韩竞 徐瑶

封面设计：王宁



中国产业用纺织品行业协会
官方微信