

聚醚砜/聚苯硫醚复合过滤材料的制备及空气过滤性能的研究

吴友杰

江苏奥凯环境技术有限公司, 江苏 泰州 225300

摘要:针对恶劣工况下高效空气过滤的需求,研究采用相转化法将聚醚砜(PES)铸膜液涂覆于聚苯硫醚(PPS)针刺毡表面,制备了一种新型复合过滤材料。以 *N,N*-二甲基乙酰胺(DMA)为溶剂、聚乙二醇(PEG)为致孔剂配制 PES 铸膜液,系统研究了 PEG 质量分数对 PES/PPS 复合过滤材料微观结构、平均孔径及空气过滤性能的影响。结果表明,当 PEG 质量分数为 10% 时,PES/PPS 复合过滤材料表面可形成大量均匀孔洞,透气性良好,动态过滤性能最佳,能在保证高效捕集亚微米级颗粒的同时,实现较低的压损和较长的循环时间。

关键词: 聚醚砜;聚苯硫醚;粉尘;空气过滤

中图分类号:TS176

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2026)06-0043-06

Preparation of polyethersulfone/polyphenylene sulfide composite filter materials and study on air filtration performance

Wu Youjie

Jiangsu Aokai Environmental Technology Co., Ltd., Taizhou 225300, Jiangsu, China

Abstract: To address the demand for high-efficiency air filtration under harsh operating conditions, a novel composite filter material was prepared by coating a polyethersulfone (PES) casting solution onto the surface of polyphenylene sulfide (PPS) needle-punched felt via the phase inversion method. The PES casting solution was formulated using *N,N*-dimethylacetamide (DMA) as the solvent and polyethylene glycol (PEG) as the porogen. The effects of PEG mass fraction on the microstructure, average pore size, and air filtration performance of PES/PPS composite filter material were systematically investigated. The results showed that when the PEG mass fraction was 10%, PES/PPS composite filter material formed a large number of uniformly distributed pores, exhibiting excellent air permeability and optimal dynamic filtration performance, achieving high-efficiency capture of submicron particles while maintaining low pressure drop and long cycle time.

Keywords: polyethersulfone; polyphenylene sulfide; dust; air filtration

大气污染物尤其是细颗粒物(PM_{2.5})严重危害人类健康和生态环境^[1]。高效的空气过滤材料是

收稿日期:2025-11-18

作者简介:吴友杰,男,2000年生,助理工程师,主要从事过滤材料、袋式除尘的研发工作,920616435@qq.com

治理工业废气、净化汽车座舱及室内环境的关键功能材料之一。聚苯硫醚(PPS)针刺毡因具有优异的耐高温性(长期使用温度可达 160 ℃)、化学稳定性和力学强度,被广泛应用于高温烟气过滤领域^[2]。然而,其原生孔径较大(5~50 μm),对亚微米级颗粒的捕集效率不高,亟须通过表面功能化改性提升过滤细小颗粒的能力^[3]。

聚醚砜(PES)是一种理想的微孔膜材料,同时兼具良好的热稳定性(长期使用温度可达 180 ℃)和耐化学腐蚀性^[4-5]。因此,研究人员对聚醚砜材料展开了一系列研究。宋国城^[6]通过静电纺丝法制备了酚酞聚醚砜(PES-C)纳米纤维复合膜,且研究发现,当纺丝液质量分数为 25%、挤出速度为 4 mL/h、牵伸风压为 0.1 MPa、内管突出距离为 10 mm、接收距离为 25 cm、喷丝管内管直径为 0.5 mm、接收滚筒转速为 150 r/min 时,PES-C 纳米纤维复合膜纺丝过程稳定,未出现断丝、并丝等异常现象,可实现连续化生产,所得纤维形貌均匀光滑。但是,目前通过静电纺丝法制备 PES 纳米纤维膜,生产效率低,难以实现大规模量产。

本研究通过相转化法在 PPS 针刺毡表面制得孔径可控的 PES 微孔膜,结合针刺毡的深层支撑作用与微孔膜的表面筛分效应,实现“高效捕集”与“低阻能耗”的协同优化。PES 铸膜液配方中,致孔剂的质量分数直接影响膜孔结构^[7],可决定 PES/PPS 复合过滤材料(简称复合滤材)的空气过滤性能。因此,研究针对聚乙二醇(PEG)类致孔剂对复合滤材孔道形成及过滤机制的影响,探讨了 PEG 质量分数对 PES 微孔膜成孔效果的作用,并对复合滤材的表观形态、透气性、孔径、动态过滤性能进行测试分析,旨在为产业化制备高性能过滤材料提供新思路。

1 试验部分

1.1 试验材料

PES,相对分子质量 65 000,德国巴斯夫股份有限公司生产;PPS 针刺毡,厚度 2.0 mm,面密度 550 g/m²,江苏奥凯环境技术有限公司生产;*N,N*-二甲基乙酰胺(DMA),分析纯,国药集团化学试剂有限公司生产;PEG,相对分子质量 400,上海阿拉丁生化科技

股份有限公司生产;乙醇,分析纯,国药集团化学试剂有限公司生产;去离子水,实验室自制。

1.2 PES 铸膜液的制备

在制备铸膜液前,将 PES 置于 120 ℃烘箱中干燥 4 h。随后,将 PES、DMA 溶液(质量分数分别为 82%,77%,72%,67%)、PEG 溶液(质量分数分别为 0,5%,10%,15%)加入三颈圆底烧瓶,80 ℃下磁力搅拌 4 h 至完全溶解,静置脱泡 12 h,制得均一、透明的 PES 铸膜液。

1.3 复合滤材的制备

将 PPS 针刺毡经乙醇预处理去除表面油污,平铺于玻璃板上。采用涂布器(线棒间隙 80 μm)将 PES 铸膜液均匀涂覆于 PPS 针刺毡表面,在空气中静置 20 s(温度 25 ℃,相对湿度 80%);随后立即浸入 25 ℃的去离子水凝固浴中进行相转化,2 h 后取出;再在去离子水中继续静置 24 h(每隔 4 h 更换一次去离子水),随后使用去离子水洗涤,去除残留溶液,置于 60 ℃热风烘箱中干燥 3 h,即得复合滤材。根据 PEG 质量分数,将制备的复合滤材分别命名为 PES/PPS-0、PES/PPS-5、PES/PPS-10、PES/PPS-15。

1.4 性能表征

1.4.1 微观结构

采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope,SEM)观察复合滤材的表面结构。具体操作为,将样品粘贴在扫描电子显微镜载物台上,放入喷金仪中进行喷金处理,设置喷金时间 50 s、喷金电流 10 mA,然后放入扫描电子显微镜中观察样品,设置加速电压为 5.0 kV。

1.4.2 孔隙结构

采用孔径分析仪(美国 Porous Materials Inc 公司生产)测试复合滤材的平均孔径。将复合滤材切割成直径为 1.5 cm 的圆形,使用仪器配套的试剂浸透 30 min 后,将过滤面向上放入孔径分析仪的测试槽中,拧紧槽口的盖子后进行测试,得到复合滤材的孔径分布情况(包括平均孔径、最大孔径、最小孔径等)。每种样品测量 3 次,最终结果取平均值。

1.4.3 透气率

采用 FX3300-IV 型全自动织物透气量仪(瑞士 TexTest 公司生产)对复合滤材进行透气测试。测试条件为测试面积 20 cm²、测试压强 200 Pa。每种样品测试 10 次,结果取平均值。

1.4.4 动态过滤性能

基于国际标准 VDI 3926 Blatt 1-2004 *Testing of cleanable filter media - standard test for the evaluation of cleanable filter media* 测定复合滤材的动态过滤性能,试验样品的直径为 150 mm。粉尘浓度为 $(5.0 \pm 0.5) \text{ g/m}^3$, 过滤风速为 2 m/min (风量为 $1.85 \text{ m}^3/\text{h}$)。试验顺序是初期 30 次循环+稳定化 5 000 次循环+最后 30 次循环。初期 30 次循环和最后 30 次循环的方法为:复合滤材随着运行时间的延长,两侧的压差会渐渐升高。当压差达到 1 000 Pa 时,脉冲空气对复合滤材迎尘面的粉尘进行清灰。该过程重复进行 30 次,即为 30 次循环。在试验的过程中记录试验时间(t, s)和压力(P, Pa)的变化,同时称量透过复合滤材的粉尘质量(M, g)。稳定化 5 000 次循环是指在运行过程中,每 5 s 对复合滤材清灰一次,清灰压力为 500 kPa,共清灰 5 000 次。出口粉尘浓度($C, \text{g/m}^3$)根据式(1)计算,捕集效率($\eta, \%$)根据式(2)计算。

$$C = \frac{3\ 600M}{1.85t} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{1 - C}{5} \times 100\% \quad (2)$$

压损为最后 30 次循环时,最后 1 次喷吹后设备自动记录的压损。循环时间为最后 30 次循环所花

费的总时间。

试验用粉尘为德国工程师协会(verein deutscher ingenieure, VDI)规定的试验用粉尘,其成分为氧化铝,参数如表 1 所示。

表 1 粉尘参数

Tab. 1 Dust parameters

分析项目	检测结果
比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	172
固体分/ $\%$	78.9
松装堆密度/ $(\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	0.43
碳质量分数/ $\%$	0.14
D10/ μm	1.5
D50/ μm	5.5
D90/ μm	23.2

注:D10 为样品累计粒度分布达到 10%时对应的粒径值;D50 为样品累计粒度分布达到 50%时对应的粒径值;D90 为样品累计粒度分布达到 90%时对应的粒径值。

2 结果与讨论

2.1 微观结构分析

由图 1 可知,当 PEG 质量分数为 0 时,铸膜液在 PPS 纤维之间成膜,复合滤材表面并无孔隙结构;当 PEG 质量分数为 5%时,复合滤材表面出现少量开孔和孔洞结构;当 PEG 质量分数为 10%时,复合滤材表面存在大量孔洞且分布均匀,形成了相对

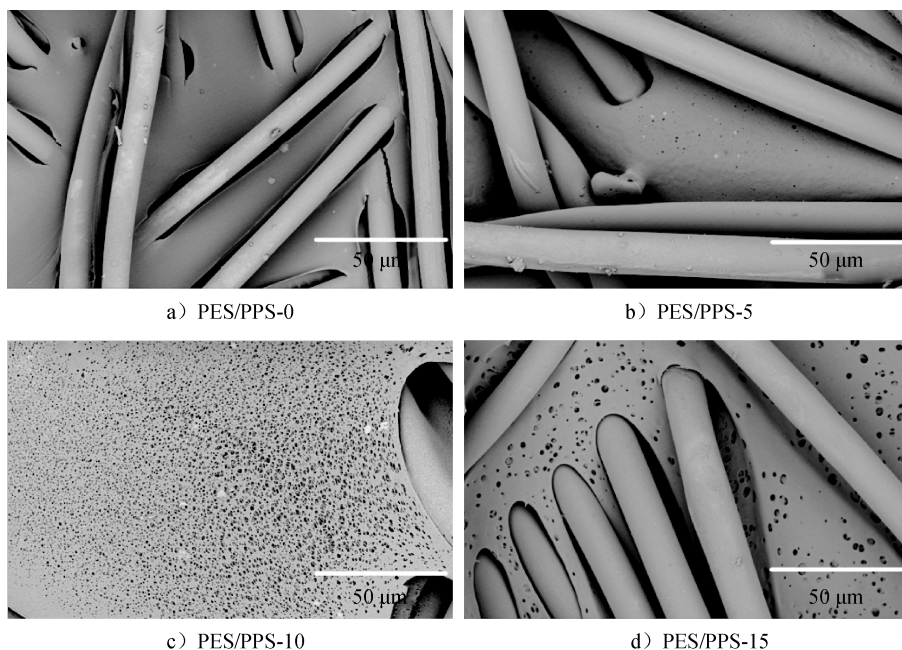


图 1 不同 PEG 质量分数下 PES/PPS 复合过滤材料 SEM 照片
Fig. 1 SEM images of PES/PPS composite filter materials with different PEG mass fractions

理想的孔隙网络;当 PEG 质量分数为 15% 时,复合滤材的孔洞数量减小,但孔径增大。

2.2 孔隙结构分析

随着 PEG 质量分数的增加,复合滤材的平均孔径呈现先减小后增大的趋势,如图 2 所示。当 PEG 质量分数为 0 时,无致孔剂的情况下 PES 膜会形成致密并缺乏微孔的结构,此时复合滤材平均孔径较大,主要源于 PPS 针刺毡的原生大孔,且孔径分布较为分散,如图 3a) 所示。当 PEG 质量分数增加至 5% 时,复合滤材开始形成少量孔洞,部分 PES 填充 PPS 针刺毡的大孔,使平均孔径有所减小,整体孔径分布收窄,如图 3b) 所示。当 PEG 质量分数达到 10% 时,复合滤材形成大量均匀孔洞,孔径进一步细化,平均孔径达到最小值,整体孔径分布也更加集

中,如图 3c) 所示。继续增加 PEG 质量分数至 15%,虽然孔洞数量减少,但因孔径增大,使平均孔径有上升趋势,整体孔径分布较为分散,如图 3d) 所示。以上结果表明,PEG 质量分数对复合滤材的孔隙结构有显著的调控作用^[8]。

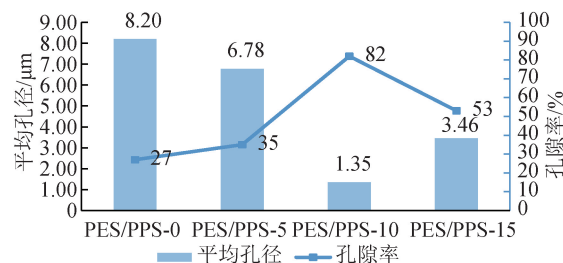


图 2 PES/PPS 复合过滤材料的平均孔径及孔隙率

Fig. 2 Average pore size and porosity of PES/PPS composite filter materials

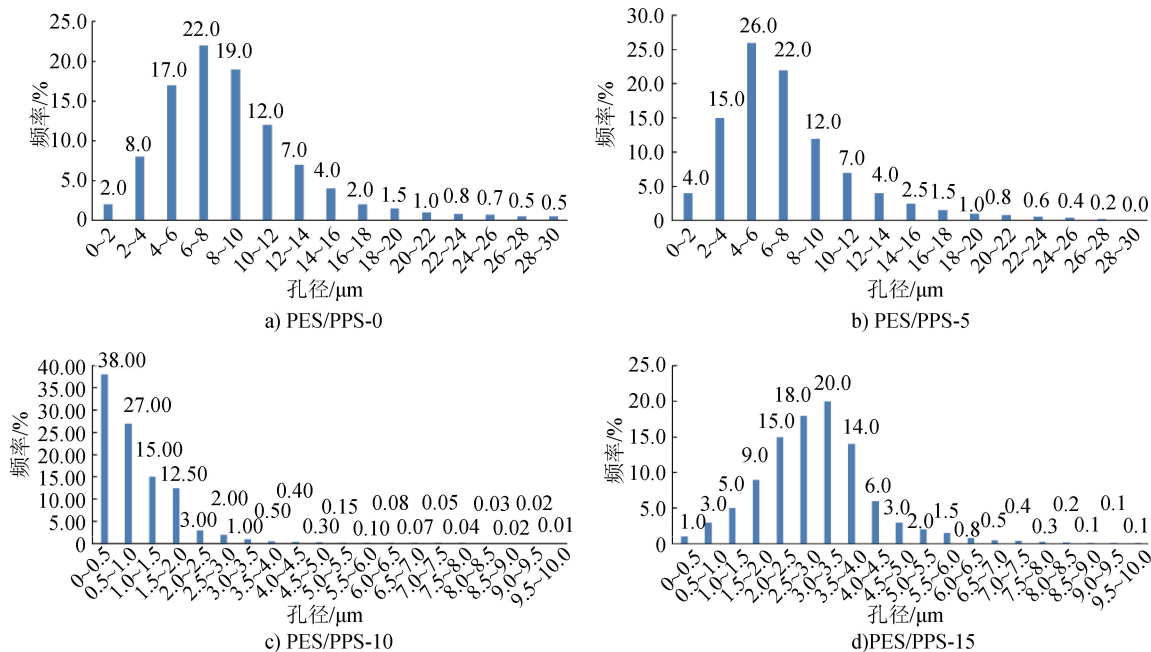


图 3 PES/PPS 复合过滤材料孔径分布

Fig. 3 Pore size distribution of PES/PPS composite filter materials

2.3 透气率分析

复合滤材的透气率如图 4 所示。当 PEG 质量分数为 0 时,复合滤材的透气率较低,这是因为 PES 在 PPS 纤维之间形成了连续的膜层,填充了 PPS 针刺毡原有的孔隙,导致复合滤材的透气率大幅下降;当 PEG 质量分数为 5% 时,复合滤材表面并未出现大量微孔,因此复合滤材的透气率未明显提升;当 PEG 质量分数为 10% 时,复合滤材的透气率小幅提升,这是因为在致孔剂的作用下,复合滤材表面孔洞

数量增多,分布均匀且致密;当 PEG 质量分数为 15% 时,复合滤材孔径增大,但由于孔隙率降低,透气率呈现下降趋势。

2.4 动态过滤性能分析

在动态过滤性能研究中,依据 VDI 3926 标准对不同 PEG 质量分数的复合滤材以及 PPS 针刺毡(对比样)进行测试,相关数据如表 2 所示。

循环时间方面,未复合 PES 膜的 PPS 针刺毡因其原生大孔径结构(5~50 μm),易透过粉尘,压损

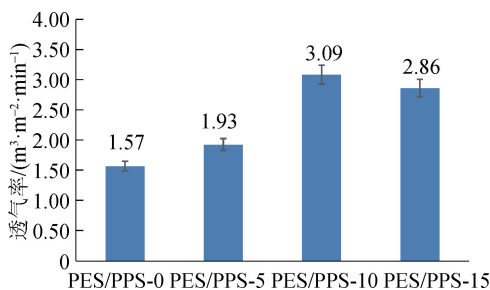


图 4 不同 PEG 质量分数的 PES/PPS 复合过滤材料的透气率

Fig. 4 Air permeability of PES/PPS composite filter materials with different PEG mass fractions

表 2 PES/PPS 复合过滤材料及对比样动态过滤性能测试结果

Tab. 2 Test results on dynamic filtration performance of PES/PPS composite filter material and control sample

参数	PES/PPS-0	PES/PPS-5	PES/PPS-10	PES/PPS-15	PPS 针刺毡
循环时间/s	1 387	2 351	6 345	3 309	4 750
压损/Pa	403	398	296	362	247
出口粉尘浓度/(mg·m ⁻³)	1.01	0.24	0.07	0.18	0.35
集尘率/%	99.979 8	99.995 2	99.998 6	99.996 4	99.993 0

压损方面,PPS 针刺毡因大孔径结构使气流顺畅通过,压损最低,为 247 Pa,但其过滤精度也因此受限。在 PES/PPS 复合过滤材料中,因为 PES 在 PPS 纤维之间连续成膜,填充了 PPS 针刺毡原生的孔隙,因此整体的压损较高,PES/PPS-5 和 PES/PPS-15 的压损分别为 398 Pa 和 362 Pa,而 PES/PPS-10 的压损为 296 Pa,相对较低。这表明复合滤材在高效捕集粉尘的同时,也能够保障气流通过,在过滤效率与气流阻力之间实现了良好的平衡,做到了高效低阻。

出口粉尘浓度方面,PES/PPS-0 出口粉尘浓度高达 1.01 mg/m³,集尘率 99.979 8%,说明其过滤效果差,大量粉尘穿透了滤料。PES/PPS-10 出口粉尘浓度最低,仅为 0.07 mg/m³,集尘率 99.998 6%,其合理的微孔结构能够高效截留粉尘,相比未改性的 PPS 针刺毡,过滤效果得到显著提升。PES/PPS-5 和 PES/PPS-15 的出口粉尘浓度分别为 0.24 mg/m³ 和 0.18 mg/m³,说明在 PPS 针刺毡表面复合 PES 微孔膜可显著提高滤料原有的过滤效果。PEG 的质量分数对 PES 微孔膜的微观结构及复合滤材过滤性能具有显著影响^[9],只有合适的 PEG 质量分数才能实现高效过滤。

较低,故其循环时间为 4 750 s,相对较长。然而,这种结构导致其对亚微米级颗粒捕集效率欠佳。在众多 PES/PPS 复合过滤材料中,PES/PPS-0 循环时间最短,仅 1 387 s。这是由于该试样未形成有效微孔结构,难以有效截留亚微米级颗粒,致使大量粉尘快速在滤材表面堆积,压差迅速上升。随着 PEG 质量分数的增加,循环时间先上升后下降,当 PEG 质量分数为 10%时,循环时间最长,达到 6 345 s,说明复合滤材中形成的大量均匀孔洞能够高效拦截粉尘,实现有效过滤,使复合滤材能在较长时间内维持较低压差。

3 结论

本研究通过相转化法制备了 PES/PPS 复合过滤材料,系统研究了 PEG 质量分数对其微观结构、孔隙结构、透气性及动态过滤性能的影响。结果表明,PEG 质量分数显著影响了 PES 微孔膜孔道的形成,当 PEG 质量分数为 10%时,制备的复合滤材形成了大量均匀的孔洞,透气性良好,动态过滤性能最佳,可实现较低的压损和较长的循环时间。该研究为恶劣工况下高效空气过滤材料的开发提供了理论依据和技术参考。后续可进一步优化 PES 铸膜液配方,探索不同致孔剂组合对复合滤材性能的影响,以满足更复杂工况的空气过滤需求。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 陈菁,彭金龙,徐彦森.北京市 2014—2020 年 PM_{2.5}

- 和 O₃ 时空分布与健康效应评估[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4071-4082.
- [2] 彭孟娜, 马建伟. 有机耐高温纤维及其在过滤材料中的应用[J]. 产业用纺织品, 2017, 35(10): 27-31.
- [3] 孙亚颇, 焦晓宁. 聚苯硫醚针刺毡在高温除尘上的应用性能研究[J]. 合成纤维, 2010, 39(5): 6-8.
- [4] FARAHANI M H D A, RABIEE H, VATANPOUR V. Comparing the effect of incorporation of various nanoparticulate on the performance and antifouling properties of polyethersulfone nanocomposite membranes [J]. Journal of Water Process Engineering, 2019, 27: 47-57.
- [5] 杨森, 王荣武. 聚醚砜微纳米纤维防水透湿材料的制备及性能分析[J]. 产业用纺织品, 2023, 41(1): 30-37.
- [6] 宋国城. 酚酞聚醚砜纳米纤维复合膜的构筑及亲水改性研究[D]. 上海: 东华大学, 2019.
- [7] 罗杨. 添加剂对 PES 膜结构及性能影响的分子模拟研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2023.
- [8] 李魁, 朱奇, 陈慧英, 等. PEG 的分子量和浓度对 PES 中空纤维膜结构和性能的影响[J]. 功能材料, 2014, 45(4): 4121-4124.
- [9] 董曲. 添加剂对聚醚砜(PES)膜结构和性能的影响及优化[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.

欢迎投稿 2026 年《产业用纺织品》

《产业用纺织品》(月刊), 大 16 开, 全彩色印刷, 定价 12.00 元/册, 全年 144.00 元, 中国标准连续出版物号 $\frac{\text{ISSN } 1004-7093}{\text{CN } 31-1595/\text{TS}}$, 邮发代号 4-492。

《产业用纺织品》创刊于 1983 年, 由教育部主管, 东华大学、全国产业用纺织品科技情报站主办, 中国产业用纺织品行业协会协办, 东华大学期刊中心编辑出版, 月刊, 是全国产业用纺织品领域具有权威性的期刊之一; 为《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊, 已入编中国学术期刊(网络版)、万方数据-数字化期刊群、中文科技期刊数据库、超星期刊域出版平台等; 多次入编《中文核心期刊要目总览》; 现为 CACJ 中国应用型核心期刊; 入选《纺织领域高质量科技期刊分级目录(2025 版)》T3 级; 知网 CI 指数位居纺织科学技术类期刊 Q2 区; 获评上海市高校特色科技期刊; 被 EBSCO 数据库收录; “综述”栏目入选第七届华东地区期刊“优秀栏目”。

秉承“创新、严谨、求实”的办刊作风, 《产业用纺织品》致力于建设高质量、高水平一流学术期刊。

期刊以“产业用纺织品”为特色, 主要刊登国内外有关纺织品的综述文章, 科研、生产技术报告, 报道相关领域的新产品、新材料、新技术及新设备, 并介绍相关的专利、标准、测试方法, 以及相关领域的行业动态、市场信息等。

2026 年, 《产业用纺织品》重点选题方向包括高品质非织造材料、安全防护与应急救援用纺织品、航空航天用高性能纺织品、海洋产业与渔业用纺织品、医疗健康用纺织品、交通运输用纺织品、土工建筑用纺织品、过滤用纺织品等, 欢迎自荐栏目主持人。热忱欢迎国内外纺织高等院校师生、科研人员、产业用纺织行业相关企业工程技术人员等将优秀研究论文发表在《产业用纺织品》上。

《产业用纺织品》承接相关广告, 并热诚为客户宣传, 欢迎有意者来电或 E-mail 联系。

地址: 上海市延安西路 1882 号

东华大学出版社楼 207 室

电话: 021-62378228

E-mail: techtex@dhu.edu.cn

采编平台: <https://cyf.cbpt.cnki.net>

