

综述

耐高温非织造过滤材料的制备及功能化研究进展

李 宽¹, 邵瑞琪¹, 王 维¹, 时欣宇¹, 贾志坤²,
刘胜凯¹, 石海婷¹, 徐志伟^{1*}

(1. 天津工业大学 纺织科学与工程学院 先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300387; 2. 河北华北石油工程建设有限公司, 河北 任丘 062552)

摘要: 耐高温非织造过滤材料具有出色的耐热性能和结构强度, 在工业高温烟尘处理技术中占据首选地位。该文综述了耐高温非织造过滤材料的制备方法和功能化改性策略的最新研究进展。首先, 阐述了耐高温非织造过滤材料的制备方法和过滤机理, 介绍了针刺法、水刺法、熔喷纺丝法、静电纺丝法、离心纺丝和气流纺丝法的优势和缺点, 简述了布朗扩散、惯性冲击、重力沉降、粒子拦截和静电吸附影响纤维材料过滤效率的主要过滤机理; 然后, 重点论述了耐高温过滤材料后整理工艺和功能化改性策略, 通过涂层整理、覆膜处理和溶胶浸渍引入特殊功能基团, 特别是采用表面改性、纳米技术整合和催化剂应用增强了耐高温过滤材料催化脱硝脱硫、降解二噁英、吸附重金属离子等处理特定污染物的能力; 最后, 展望了耐高温非织造过滤材料在提升耐热性、机械稳定性和环保性能的未来发展方向。

关键词: 高温烟尘过滤; 非织造材料; 高效低阻; 制备方法; 后整理工艺; 催化改性
中图分类号: TS176 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-5214 (2025) 04-0720-12

Advances in preparation and functionalization of high temperature resistant nonwoven filtration materials

LI Kuan¹, SHAO Ruiqi¹, WANG Wei¹, SHI Xinyu¹, JIA Zhikun²,
LIU Shengkai¹, SHI Haiting¹, XU Zhiwei^{1*}

(1. Key Laboratory of Advanced Textile Composites, Ministry of Education, School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Hebei North China Petroleum Engineering Construction Co., Ltd., Renqiu 062552, Hebei, China)

Abstract: High-temperature resistant nonwoven filtration materials with excellent heat resistance and structural strength are the preferred choice in industrial high-temperature dust treatment technology. Herein, the recent research progress in the preparation technology and functionalized modification of high temperature resistant nonwoven filtration materials was reviewed. Firstly, the preparation technology and filtration mechanism of high-temperature resistant nonwoven filtration materials were elaborated, with the advantages and disadvantages of preparation technologies, such as needle-punching, hydroentanglement, meltblown spinning, electrostatic spinning, centrifugal spinning, and airflow spinning, introduced, and five main filtration mechanisms affecting the filtration efficiency of fibrous materials, including Brownian diffusion, inertial impact, gravitational sedimentation, particle interception, and electrostatic adsorption, briefly described. Secondly, the finishing process and functionalization modification strategy of high temperature resistant filter materials, like introduction of special functional groups through coating finishing, laminating treatment and sol-gel impregnation, were specifically discussed, especially the use of surface modification, nanotechnology integration and catalyst application for enhancement on the ability of high-temperature resistant filter materials to catalyze denitrification and desulfurization and to degrade dioxins, adsorb heavy metals and other treatment of specific pollutants. Finally, the future development

收稿日期: 2024-04-22; 定用日期: 2024-05-21; DOI: 10.13550/j.jxhg.20240329

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (12205218)

作者简介: 李 宽 (1998—), 男, 硕士生, E-mail: likuan313@163.com. 联系人: 徐志伟 (1978—), 男, 教授, E-mail: xuzhiwei@tiangong.edu.cn.

directions of high-temperature resistant nonwoven filtration materials in terms of heat resistance, mechanical stability, and environmental performance was envisioned.

Key words: high temperature dust filtration; nonwoven materials; efficient and low resistance; preparation methods; finishing process; catalytic modification

随着工业化的加速发展, 冶金、化工、水泥和电力等行业在制造过程中产生的高温烟气已成为主要的空气污染源^[1-3]。这些烟气不仅包含腐蚀性的 H_2S 、 SO_x 、 NO_x 等有害气体, 更含有直接威胁人体健康的 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{1.0}$ 和 $PM_{0.3}$ 等微细颗粒物, 这些颗粒物易吸附致癌的多环芳香烃(PAHs), 并能深入肺部, 影响氧气输送, 增加罹患呼吸道疾病的风险^[4-5]。这一趋势促进了环保标准的提高和低排放技术的发展, 导致减少环境负担的高效过滤材料的研究成为当务之急。

耐高温非织造过滤材料具有卓越的耐热性、化学稳定性和机械强度, 在处理工业高温烟尘中的作用尤为关键。这些过滤材料包括聚四氟乙烯(PTFE)^[6]、聚苯硫醚(PPS)^[7]、芳香族聚酰亚胺(PI)^[8]、聚芳酰胺(PSA)^[9]、芳香族聚噁二唑(POD)^[10]、聚醚醚酮(PEEK)^[11]、对位芳纶(PPTA)^[12]和间位芳纶(PMIA)^[13]等有机纤维, 还包括玻璃纤维^[14]、玄武岩纤维^[15]、陶瓷纤维^[16]和金属纤维^[17]等无机纤维。然而, 单一材质的过滤材料往往功能受限、力学性能不足等。同时, 传统的微米级材料因孔隙率低、单位面积质量高导致过滤阻力增加, 特别是在过滤 $PM_{2.5}$ 等细微颗粒方面表现不佳。

针对微米级非织造空气过滤材料捕获细颗粒物(如 $PM_{2.5}$)效率不高以及导致的较高压力损失问题, 开发在纳米级别上具有耐高温、抗化学腐蚀特性的过滤材料极为重要。新一代过滤材料, 特别是运用纳米技术制备的纳米级纤维静电纺丝滤料, 因其大的比表面积、小孔径和高透气性而备受关注, 展现了过滤效率的提升潜力^[18-19]。静电纺过滤材料虽然物性出色, 但在实际应用中仍需克服能耗和压降方面的问题。熔喷非织造布具有孔隙率高、比表面积大和孔径控制精确等优势, 已经成为空气过滤材料的主流选择^[20-21]。在聚合物材料中引入 TiO_2 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 $BaTiO_3$ 等无机纳米粒子制备的纳米复合材料, 可通过远距离静电相互作用显著提升对污染物的捕获能力^[22]; 金属有机框架(MOFs)复合材料凭借其独特的孔隙结构和高比表面积, 在气体吸附和过滤领域显示出巨大的应用潜力^[23-25]; 电除尘器与袋式除尘器等新型技术设备的开发, 有助于提高亚微米颗粒的收集效率, 实现过滤材料功能的多样化。

本文旨在综述耐高温非织造过滤材料在制备及

功能化改性方面的最新研究进展, 阐述耐高温非织造过滤材料的制备方法和过滤机理, 重点讨论其功能化改性的策略(图1), 分析其目前存在的挑战并展望未来的发展方向。以期为推动环保技术研究的发展和工业污染物排放的规范管理提供科学依据和技术支持, 为实现更高效和可持续的烟气净化解决方案提供参考。

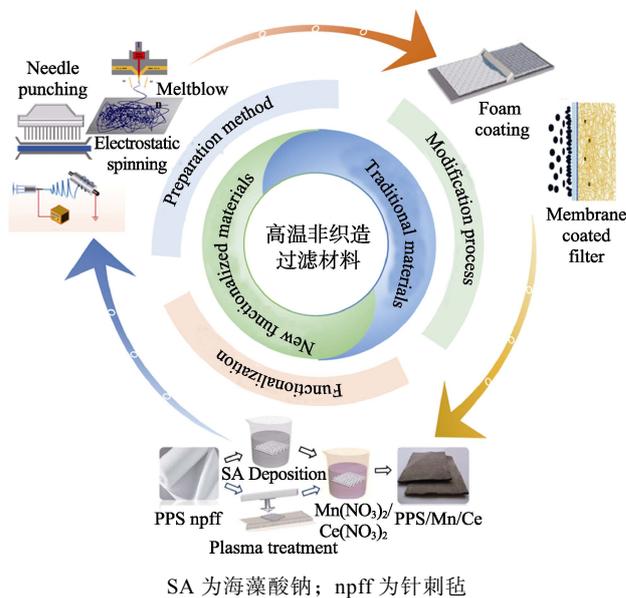


图1 耐高温非织造过滤材料制备方法、改性策略及功能性增强示意图

Fig. 1 Schematic diagram of preparation method, modification process and functional enhancement of high temperature resistant nonwoven filtration materials

1 耐高温非织造过滤材料制备方法和过滤机理

1.1 制备方法

1.1.1 针刺法

针刺法是制造非织造布和高温滤料的关键技术, 通过多次穿刺纤维层的方式, 创建出结构稳定通透、机械强度高立体布料^[26]。针刺滤料具有高容尘量、低压差和优异的过滤性能, 在工业过滤和分离应用中备受青睐, 其性能取决于针刺工艺的针刺密度、深度等参数的精细调整。YEO等^[27]通过提升主针频率至1200次/min的同时, 保持固定的预针和主针密度, 发现此法能够改善过滤材料的透气性和耐久性, 减少压力损失, 并缩小孔径, 从而提升粉尘收集效率。当纤维网足够紧密时, 过度增加针

刺参数会损伤纤维网和基布，从而削弱滤料性能。此外，混合不同类型的纤维可以提高滤料的热稳定性和过滤效率。YU 等^[28]采用 PTFE 织物作为基材，结合预氧化聚丙烯腈 (OPAN) 纤维与 PPS 纤维构成的功能层，开发了一种复合过滤器。随着 PPS 纤维质量分数的增加，纤维间的缠结也随之增多，进而增强了热稳定性；当 PPS 纤维质量分数增至 40% 时，该复合过滤器对 2.5 μm 颗粒的过滤效率显著提升，可达 94.68%。尽管如此，要制造出高过滤效率、低阻力又能容纳大量灰尘的过滤材料仍然是一个挑战，需要采用涂层、覆膜、驻极处理或改性等多种技术手段来实现。

1.1.2 水刺法

水刺法是通过使用高压水流打击纤维，生产出柔软、坚韧、透气的非织造布，同时避免了材料表面的毛刺，保持纤维结构的完整性，适合制造耐高温和耐腐蚀的高性能纤维材料（如 PPS 和 PTFE）。最新研究显示，水刺法可改善纺织品的物理特性，并且在非织造复合滤料的应用上展现出优异的性能。ZHANG 等^[29]将水刺法与针刺法相结合，有效地提升了 PTFE 纤维的纤维振动，随着处理能量的增加，织物孔径减小，透气性和过滤性能显著提高。在材料创新方面，阳建军等^[30]将碳纤维网与 PI 纤维叠层并经水刺加工，制备的复合滤材保持了原有的细小孔径，并表现出耐高温和抗静电性，此技术拓展了复合滤材在玻璃窑、燃煤锅炉等行业的应用潜力。此外，水刺法在微/纳米纤维过滤器的开发中也显示了巨大的潜力，LIU 等^[31]通过调整聚氨酯 (PU) 纳米纤维与聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 微米纤维的比例和布局，开发出一种层次分明的微/纳米纤维过滤器（图 2），该过滤器能在低压下对 PM_{2.5} 实现高达 99.93% 的过滤效率。尽管水刺法优点显著，但在处理质量或密度较大材料时的“分层”问题，限制了其应用范围。

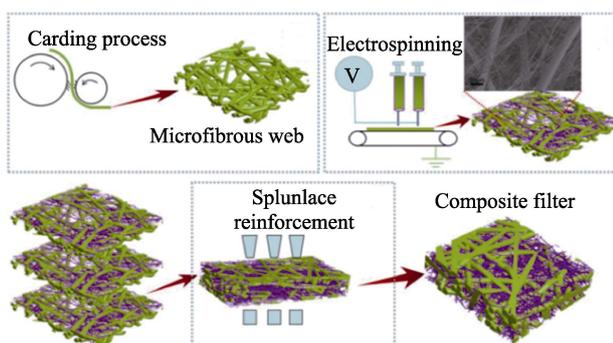


图 2 PET/PU 混合过滤器的制作原理示意图^[31]

Fig. 2 Schematic diagram of fabrication of PET/PU hybrid filter^[31]

1.1.3 熔喷法

熔喷法是制造超细非织造材料的核心技术，它通过熔融和高速气流拉伸聚合物而制备具有高过滤效率的细纤维网。该法不仅加工成本低、生产快速环保，而且制备的纤维直径微小、比表面积大，并可通过静电吸附颗粒极大地提升过滤性能^[32]。近期的研究聚焦于优化熔喷材料的微观结构以制造高性能滤料等方面，ZHANG 等^[33]采用聚丙烯 (PP) 和硬脂酸镁 (MgSt) 为原料，制造了一种驻极体过滤器，该过滤器具有蓬松结构和高孔隙率，对 PM_{2.5} 的过滤效率达到 99.22%，并且展现出良好的过滤稳定性。然而，传统熔喷纺丝形成的纤维直径相对较大，可能影响最终的过滤效率。CHEN 等^[34]使用纯 PPS 作为原料，未添加任何添加剂，通过熔体微分静电纺丝装置 (PMDES) 高效制备出 PPS 纳米纤维（图 3），其平均直径为 1.28 μm ，约为传统熔融静电纺丝法的 1/10。这不仅提升了熔喷非织造材料的应用潜力，也为精细过滤技术的未来发展开辟了新路径。

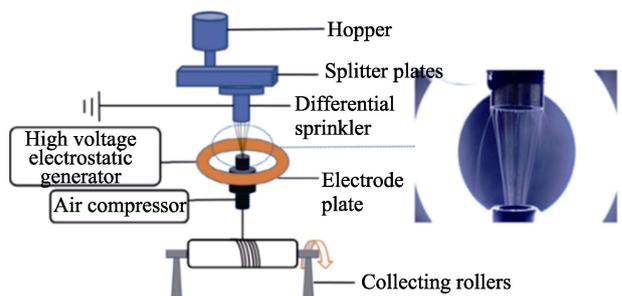


图 3 PMDES 装置及其纺丝工艺示意图^[34]

Fig. 3 Schematic diagram of PMDES device and its spinning process^[34]

1.1.4 静电纺丝法

静电纺丝法因能够生产具有微孔径、高比表面积的纳米纤维膜而成为制备耐高温和耐化学侵蚀空气过滤材料的首选^[35]。相比于传统的离心纺丝或气流纺丝法，静电纺丝法制备的滤材在 PM_{2.5} 去除方面表现出高效率 and 低压降的特性。通过优化聚合物溶液的配比或引入新材料（如 MOFs），可以制备过滤效率极高且在极端条件下稳定的纳米纤维滤材。WEI 等^[36]将聚芳烯硫磺 (PASS) 粉末溶解在 1,3-二甲基-2-咪唑啉酮 (DMI) 中，制备了 PASS 溶液，在该溶液中加入 UiO-66 后，使用 15 kV 的直流高电压 (DC) 和 16 cm 的纺丝距离，通过静电纺丝技术成功制造了 PASS/UiO-66 复合纳米纤维过滤器 (PASS-U)。随后，通过氧化处理，将 PASS-U 改性为氧化型 PASS-U (O-PASS-U) 纳米纤维过滤器（图 4a），该过滤器对 PM_{2.5} 的过滤效率达到 99.97%，同时具有很低的压降 (55.25 Pa)，即使经酸碱、强极性溶剂或 400 °C 的高

温处理,也能保持稳定的纤维结构和出色的过滤性能。AN 等^[37]采用熔融静电纺丝技术,成功地制备出平均直径仅 4.12 μm 的 PPS 超细纤维,这一直径约为传统熔融纺丝法的 1/3。纤维直径的降低极大地提升了 PPS/PP 微纤维膜的过滤效率,特别是对直径 $>3 \mu\text{m}$ 的颗粒过滤效率接近 100%;此外,该微纤维膜还能在 260 $^{\circ}\text{C}$ 的高温下稳定运行,这一创新为大规模生产环保型 PPS 超细纤维提供了新思路。

1.1.5 离心纺丝法和气流纺丝法

离心纺丝法和气流纺丝法作为高效的微纳米纤维生产方法也受到了人们的广泛关注。离心纺丝法是通过高速旋转的喷头将聚合物溶液或熔体甩出,并在离心力作用下形成细丝的方法^[38](图 4b);气流纺丝法则利用高速气流拉伸熔融或溶液聚合物流以形成直径更小的纤维^[39],此法节省能源,适合大规模生产。ZHANG 等^[40]将甲酸溶液、尼龙-6 和聚氧化乙烯(PEO)混合后,通过喷气纺丝法制备了具有独特的三维梯度结构和“喇叭形”气体通道的尼龙-6 微纳纤维复合膜(图 4c),能够高效逐级过滤不同大小的颗粒,并且在高温、高湿环境中依然维持了 99.99%的过滤效率和 144 Pa 的低压降。

对各种高温过滤材料制备技术的选择,需要根据材料的预期应用和性能要求进行。针刺法和水刺法制备的高温过滤材料适合高强度特性的应用要求;熔喷法和静电纺丝法则更适合对高温过滤材料的过滤性能有较高要求的场景;成本敏感或大规模

生产的状态下,离心纺丝法和气流纺丝法可提供有效的解决方案。表 1 为不同高温过滤材料制备技术的优缺点。由表 1 可知,每种制备技术都具有独特的优势和缺点对比,合理选择可以优化高温过滤材料的性能和生产效率。

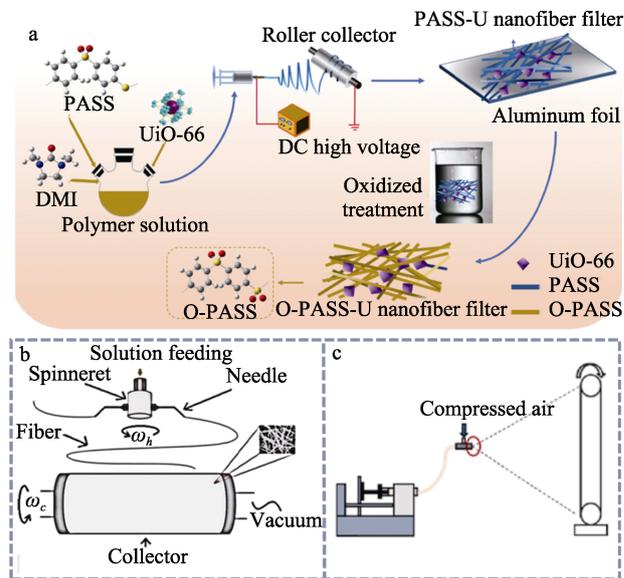


图 4 O-PASS-U 纳米纤维过滤器的制备过程示意图 (a)^[36];离心纺丝法示意图 (b)^[38];喷气纺丝法示意图 (c)^[40]

Fig. 4 Schematic diagrams of fabrication process of O-PASS-U nanofiber filter (a)^[36], centrifugal spinning method (b)^[38] and air-jet spinning equipment (c)^[40]

表 1 不同高温过滤材料制备技术的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of different high-temperature filter material preparation techniques

制备方法	特点	优点	缺点	适用场景
针刺法	使用刺针对纤维网进行反复穿刺	结构均匀、强度高、适合厚型非织造材料	生产速度较慢、能耗较高	家具、家纺、过滤等
水刺法	利用高压水流对纤维网喷射使纤维纠缠	生产效率高、强度好、适于多种纤维	设备成本较高、水耗大	医疗、卫生材料、清洁材料等
熔喷法	聚合物熔体经喷丝孔喷出,由高速热空气拉伸后,收集成纤网	生产速度快、纤维细、孔隙率高、过滤性能好	强度相对较低、对原料要求高	空气和液体过滤材料、个人防护用品
静电纺丝法	高电压使聚合物喷射并带电,产生细纤维并收集于接收器	可制备纳米级纤维,比表面积大、孔隙率高	生产效率有限、成本较高	高性能过滤材料、催化剂载体、药物缓释
离心纺丝法	纤维通过离心力作用从喷丝孔甩出,然后凝固成纤网	纤维结构均匀、生产连续	设备复杂、对纤维种类有限制	生产工业用非织造布
气流纺丝法	气流对喷出的聚合物熔体或溶液进行拉伸和凝固,形成纤维	工艺简单、成本较低,适合大规模生产	纤维较粗、孔隙率相对较低	农业覆盖材料、家居用品、简单过滤材料

1.2 过滤机理

烟尘过滤是由多种过滤机制共同作用的复杂过程,颗粒物的尺寸多样性要求过滤材料能够通过多种方式实现有效截留。捕获 PM 的主要机制为布朗扩散、惯性冲击、重力沉降、粒子拦截和静电吸附,它们影响纤维材料的过滤效率,其示意图如图

5a 所示;单纤维捕集机理示意图如图 5b 所示。这些机制的交互作用对提高过滤材料的综合性能至关重要,图 5c 为上述 5 种机制作用下的典型过滤效率和总效率示意图。在材料设计时,应充分考虑这些机制,以实现针对不同尺寸颗粒污染物的高效过滤^[41-44]。

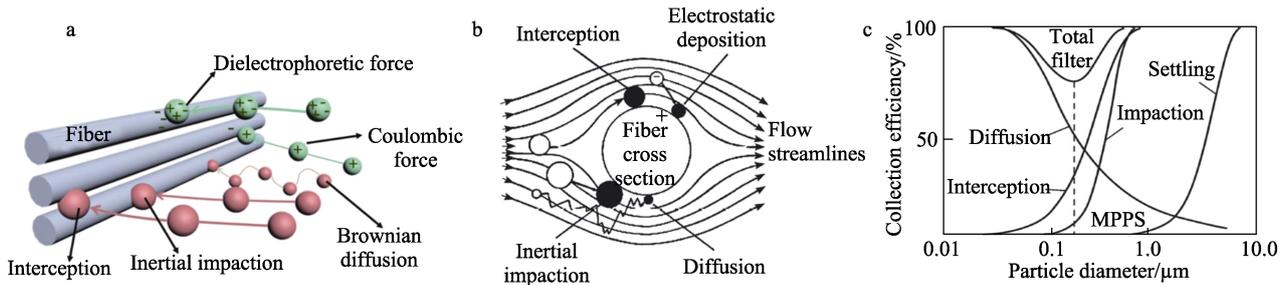


图 5 捕获 PM 的主要机制示意图 (红色粒子代表被动捕获; 绿色粒子代表主动捕获) (a)^[41]; 单纤维捕集机理示意图 (b)^[43]; 单个单纤维的过滤效率和总效率示意图 (c)^[43]

Fig. 5 Schematic diagrams of mechanism of PM capture (red particles represent passive capture and green particles represent active capture) (a)^[41], single-fiber capture mechanism (b)^[43] and filtration efficiency of individual single-fiber mechanism and total efficiency (c)^[43]

(1) 布朗扩散。气溶胶粒子在接近纤维时的运动与气体的运动是不一样的,对于微小尺寸颗粒(粒径 $<0.1 \mu\text{m}$),布朗扩散起主要作用,颗粒受气体分子随机的不断碰撞,运动轨迹变得无规则,增大了与过滤纤维接触的概率,从而被后者捕获^[45]。此过程中,越小的颗粒运动越不稳定,过滤纤维将其捕集的效率越高。

(2) 惯性冲击。气体中的较大质量颗粒物在高速气流作用下因惯性而与流线路径分离,进而发生撞击,被过滤纤维材料捕获。对粒径 $>5 \mu\text{m}$ 的颗粒,该机制特别明显,过滤纤维的效率主要受颗粒大小、质量和气流速度影响^[46-47]。

(3) 重力沉降。同惯性冲击一样,重力沉降机制主要适用于自身密度大、气流密度小的大颗粒。空气携带固体颗粒物穿越过滤介质时,重力的影响使颗粒物从气流中脱离出来,最终沉积在过滤材料的纤网上。一般对于粒径 $<0.5 \mu\text{m}$ 的气溶胶,为了便于研究过滤机制,可以忽略重力对其影响^[48-49]。

(4) 粒子拦截。过滤纤维的颗粒物捕集效率在烟尘过滤中受到气流动力学和颗粒物与纤维表面间范德华力的共同影响。当颗粒物接近纤维表面至一定距离时,范德华力的吸引作用导致颗粒物被纤维直接拦截。拦截效率受颗粒物的大小、纤维的粗细以及过滤材料的布局紧密程度的共同控制^[50]。因此,优化纤维特性和过滤材料的结构,对提高过滤效率至关重要。

(5) 静电吸附。在烟尘过滤中,静电力是颗粒物捕集的一个关键因素,它通过直接吸引或增强布朗运动间接作用于颗粒物来提高过滤效率。对于细小的亚微米颗粒,静电作用尤为重要,因为它能有效地补充传统机械过滤机制的不足^[51-52]。因此,在设计高效的过滤材料时,必须综合考虑静电吸引和机械拦截等多种过滤机制,以实现广泛尺寸范围内颗粒物的全面捕集。

此外,过滤材料的效率受纤维特性、结构设计、孔隙特性、介质厚度以及操作条件(如空气流速、温度和湿度)的综合影响。特别是存在一个最易穿透的粒径(MPPS),对于这一尺寸范围的颗粒,传统的过滤机制效果不佳。因此,为实现更效率的烟尘过滤,必须深入理解过滤过程中的主导机制,并有针对性地设计和改进过滤材料。

2 耐高温非织造过滤材料后整理工艺

2.1 涂层整理

涂层复合技术可加强和扩展材料的功能特性,在航空、军事、汽车等行业应用广泛,同时被广泛运用于过滤材料领域。为解决传统针刺过滤材料初始除尘效率低的问题,通常采用预涂层技术进行结构优化,旨在设计出高效率、低阻力的产品。

在过滤领域,通过不同的涂层技术来提高过滤材料的性能。PTFE 乳液涂层剂因其独特的功能性特征而被认为是理想的涂层剂,王艳丽等^[53]将聚丙烯腈预氧化纤维(PANOF)纤维混合到芳纶 1313 纤维中,制备了复合针刺毡(npff),在其表面涂覆 PTFE 乳液后发现,此法可显著改善滤料的缠结能力、减小孔径,并提高过滤效率。乳液发泡也是一种经济高效的涂层方法,利用发泡剂和 NH_4^+ 助剂的特性来制作具有细小孔径通道的“海绵体”结构,泡沫涂层在厚度方向上呈多孔斜向交错,能够实现高效的超细粉尘过滤功能。CHEN 等^[54]将发泡剂和增稠剂加入到 PTFE/聚乙烯醇(PVA)水溶液中,搅拌均匀后均匀地涂覆在玻璃纤维毡表面,形成具有稳定过滤性能的 PTFE 泡沫涂层膜(图 6a、b),所制备的 PTFE 泡沫玻纤毡初始压降为 319 Pa,使用过程中增至 392 Pa,过滤效率可达 91.09%。然而,国内在研究发泡涂层高温过滤材料时,还面临诸如成本、技术和实验成果向工业生产转化等挑战。撒粉涂层技术作为一种热熔聚合物涂层的简易方法,在工业生产中具

有实用价值。通过撒粉机将粉末状聚合物均匀地散布在基布上,然后高温处理使粉末熔化,并黏附在基布表面,形成较高过滤精度的微孔层。张月等^[55]在芳纶 npff 上散布粒径一致的聚全氟乙丙烯(FEP)粉末,并进行烘干和冷轧处理,成功地在其表面形成 FEP 颗粒组成的微孔薄膜结构,经过撒粉涂层处理,提升了过滤材料的耐磨性,同时也显示出替代 PTFE 覆膜工艺的潜力。

2.2 覆膜处理

覆膜过滤是通过在过滤基材上添加一层微孔膜来提升微粒捕集率的方法,这种薄膜表面过滤不仅增加了过滤效率,还提高了气体的纯度。覆膜效果依赖于滤材的特性、薄膜的生产工艺、控制粒径的能力以及薄膜与基底材料之间的结合程度。

覆膜技术主要有传统的黏结剂法和新开发的高温热压复合技术。黏结剂法采用特殊黏合剂将基布和膜结合在一起,为解决传统黏结剂在黏合强度方面存在的不足,XU 等^[56]将 PTFE 溶液和低聚物 PI 制成耐高温共混黏合剂,然后将其均匀涂抹在 PEEK 无纺布上,在黏合剂顶部添加膨体聚四氟乙烯(ePTFE)膜,形成具有“三明治”结构的无纺布过滤器(图 6c)。该过滤器能够在高温和酸碱环境下工作,与 PEEK 无纺布过滤器相比,对 2.5 μm 颗粒过滤效率从 72.09%提升至 98.58%。另一种方法是

将基布和薄膜通过表面处理和高温热压复合成为一体,XIE 等^[57]将聚酰亚胺胶黏剂涂抹在金属网过滤器表面,在温度为 200 °C、压力为 1.5 MPa 的条件下将金属网过滤器和 PTFE 膜进行热压复合。高温热压复合过滤器比传统的聚酯包覆 PTFE 过滤器具有更优异的耐高温性能、过滤效率以及再生效率。以上黏结和热压覆膜技术可以提高基材的过滤性能、延长滤料的清洗周期,但同时覆膜后阻力增长较快,并且在高温热压以及使用过程中 PTFE 微孔膜容易破损,导致过滤精度下降。KIM 等^[58]电纺不同比例 PTFE-PVA 纺丝液,在 330~390 °C 进行热处理实现了 PVA 的分解,成功地得到涂覆在 PTFE 泡沫涂层过滤器表面的纯 PTFE 纳米纤维层。与普通的 PTFE 泡沫过滤器相比,覆 PTFE 纳米纤维膜的复合过滤器表面自由能较低,液滴接触角更大,清洗周期延长了 9%,清洗效率提高了 3.9%~5.4%,有效减少了因过滤膜损伤而造成过滤精度下降的问题。

在高温烟气超净排放领域,覆膜滤料因其高效性而成为首选,浸渍和涂层技术则提供辅助。主要挑战在于提升材料对高温、酸碱和水解腐蚀的耐受性,增强覆膜的机械稳定性。此方面研究应集中开发新的覆膜技术,以提高非织造滤料在恶劣环境下的性能,促进工业烟气净化技术发展。

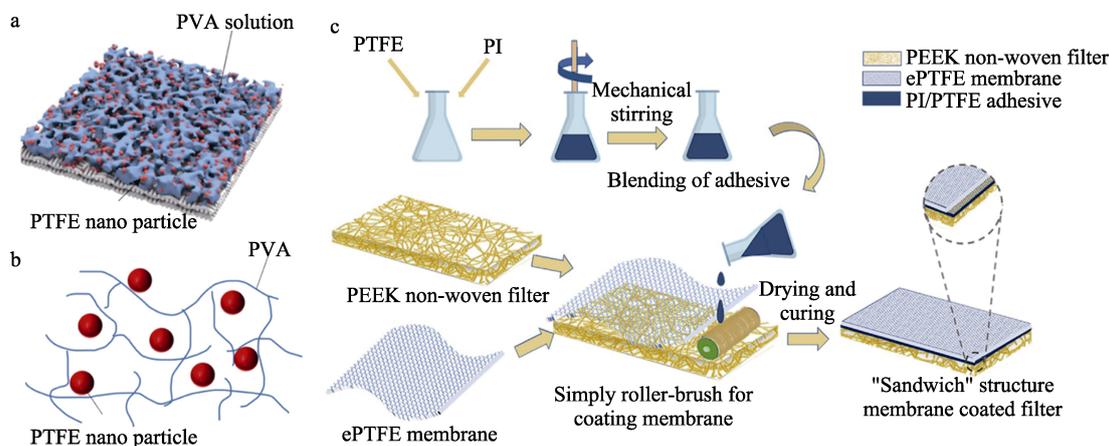


图6 PTFE泡沫涂层膜的模拟结构(a、b)^[54];涂覆ePTFE膜的PEEK无纺布过滤器的制备示意图(c)^[56]

Fig. 6 Simulated structure of PTFE foam-coated membrane (a,b)^[54]; Schematic representation of preparation of PEEK nonwoven filter coated with ePTFE membrane (c)^[56]

2.3 溶胶浸渍处理

溶胶浸渍法是将基材浸泡在含有纳米粒子的溶胶中,然后经热处理形成一个连续均匀的膜或涂层,因操作简单、功能多样及低成本而受到青睐。在过滤领域,将溶胶和乳液浸渍结合,能够缩小滤材的孔径、提高过滤效率。要获得高质量的滤膜,必须精确控制化学和热处理过程。

加入浸渍后的乳化液浸渍涂层会显著影响针毡的形态和结构,最终影响过滤性能。LYU 等^[59]使用直接浸渍技术,制备了 PPS 纤维和 PTFE 乳液融合的复合 npff。结果表明,PTFE 乳液浸渍涂层增加了复合 npff 对 <2.5 μm 颗粒的过滤压降,降低了收集效率,但对于较大颗粒的收集效率与普通 PPS npff 相似,并通过 3 种乳液浸渍涂层分布模型

解释验证这一结果。在此基础上, LYU 等^[60]提出了一种创新技术, 将电气石(TM)颗粒均匀分散并喷洒于芳纶纤维(AF)上, 随后在室温下, 使用 PTFE 乳液对含 TM 颗粒的 AF 滤料进行浸渍处理, 并在 200 °C 的真空环境中烘干, 成功制备了 AF/PTFE/TM 复合滤料。结果表明, TM 颗粒的添加促进了超细网状 PTFE 长丝的形成, 有效缓解了由

PTFE 乳液引起的滤料堵塞问题, 提升了机械过滤效率, 并降低了压降。该研究为电气石颗粒及热释电、压电材料在工业过滤中的应用提高了新思路。

表 2 为 3 种不同后整理技术的对比, 包括它们各自的优势和劣势。由表 2 可知, 选择最合适的后处理技术, 可以显著提升高温烟气过滤材料的综合过滤效能。

表 2 后整理技术对比
Table 2 Comparison of finishing techniques

	涂层整理	覆膜处理	溶胶浸渍
过滤效率	提升程度中等	过滤效率高	效率提升不明显
过滤阻力	阻力较大	因覆膜具有高孔隙, 阻力小	阻力取决于溶胶类型和浸渍方式
容尘量	滤材的尘粒截留能力强	容尘性能处于平均水平	溶胶颗粒填充可增强容尘量
使用寿命	受涂料质量、工艺、预处理等多因素影响	因膜的耐久性而延长寿命	化学稳定性提升寿命
成本	成本适中	膜材料和工艺较昂贵	成本适中
优点	增强滤料的化学稳定性	高过滤精度、良好的透气性	经济高效, 增强过滤与化学稳定性
缺点	影响滤料的透气性和压降	成本高, 且在高温和化学腐蚀环境下稳定性差	增加滤料的质量和阻力, 影响其长期使用的稳定性
其他需考虑因素	材料的选择和工艺的适应性	膜材料的孔隙率和孔径分布	溶胶的化学性质和对滤料孔隙的影响

3 耐高温非织造过滤材料功能化技术

工业生产中的高温燃烧会释放固体颗粒物、NO_x、SO_x 和挥发性有机物(VOCs)等污染物, 为避免二次污染, 通常运用原位氧化法、浸渍煅烧法和涂覆法开发新型催化性空气过滤材料, 这种过滤材料不仅能去除颗粒物, 还能分解有害气体, 显著提升空气净化性能^[61]。

3.1 催化脱硝

NO_x 是主要的工业废气污染物, 为减少其排放, 主要采用选择性催化还原(SCR)和吸附剂^[62]吸附技术来实现。传统的 SCR 工艺(需 350 °C 以上), 新型催化剂能在约 230 °C 下高效且低成本脱硝, 有助于减少燃料燃烧时 NO_x 的排放。催化剂需在低温下具有较高的催化活性, 锰氧化物正好满足这一点。根据所含元素种类的多少, Mn 基催化剂可分为单组分、双组分和多组分 Mn 基催化剂。

最新应对固体燃料燃烧带来 NO_x 排放问题的研究中, 高温滤料负载单组分 Mn 基催化剂可以实现脱硝。JU 等^[63]使用等离子体处理技术, 先对 PPS npff 进行活化, 然后采用原位沉积方式, 将 MnO₂ 催化剂一步负载至活化后的 PPS npff 材料上, 制备了 MnO₂ 修饰 PPS npff。研究发现, MnO₂ 修饰 PPS npff 在 200 °C 下表现出优异的 NH₃-SCR 活性(接近 85%), 同时除尘效果显著增强。该研究为制备结构紧凑、低成本、高效益、操作简便且具有优异除

尘和脱硝效果的新型综合过滤材料提供了可能性。

在单组分 Mn 基催化剂中掺杂一种过渡元素(如 Cu、Fe)的氧化物, 可得到双组分 Mn 基催化剂。与单组分 Mn 基催化剂相比, 双组分 Mn 基催化剂增强了反应的活性和选择性, 提高了催化剂的耐高温性和稳定性。这种优势主要归因于双组分催化剂中 Mn 与其他金属元素的协同作用。PARK 等^[64]设计了复杂而高效的三层结构过滤器: 顶层由高温泡沫构成, 中间层通过将 CuMnO_x 催化剂均匀嵌入聚磺酰胺褶皱过滤毡中制备, 底层则是由耐高温的玻璃纤维布和酚醛树脂构筑。这种过滤器适用温度 150~250 °C, 尤其在表面风速为 1 m/min、催化剂负载量为 350 g/m²、200 °C 条件下, 能够实现超过 90% 的 NO 清除效率。类似的, CHEN 等^[65]采用海藻酸钠沉积、等离子体预处理和热处理等多步骤工艺, 将 Mn 和 Ce 基催化剂加载到 PPS npff 上。研究显示, 经 Mn/Ce 氧化物修饰的 PPS npff 能完全过滤直径 > 4 μm 的颗粒, 并且在温度为 220 °C 时展现出超过 80% 的脱硝效率。

多组分催化剂由多种金属元素组成, 如 Mn-Fe-Cu、Mn-Fe-Co 等。这种催化剂通常具有更复杂的结构, 通过不同金属元素之间的协同作用, 可以进一步提高脱硝反应的效率和选择性, 同时具有较好的抗 SO₂ 腐蚀的能力。普通浸渍法制备的复合催化过滤器黏结强度不足, 催化剂容易脱落。XU 等^[66]使用超声波浸渍将 Mn-Ce-Sm-Sn(MCSS)多

组分催化剂加载到 P84 过滤器上,制备的功能化 P84 过滤器在 160~260 °C 下的 NO 去除率 > 95%, 解决了传统浸渍法黏结力不足的问题。在工业脱硝应用中,相比于单组分 Mn 基催化剂,多组分 Mn 基催化剂被认为是更优的选择。

3.2 催化脱硫

在燃煤厂和电厂等环境中, 硫氧化物的存在及其排放导致酸雨形成, 酸化水质并严重破坏生态系统。因此, 开发耐高温且稳定的新型陶瓷滤芯和其他高效抗硫过滤材料用于烟气脱硫至关重要。这些材料的制备关键在于, 通过浸渍法、涂层法等物理方法或氧化还原共沉淀法、原位生长法等化学方法将催化剂牢固负载到滤料上, 在去除 SO₂ 的同时保持其除尘性能。目前, 将高吸附性能的多孔碳材料或 MOFs 与现有过滤材料结合, 被视为脱硫技术未来的发展方向^[67-68]。

近期, 燃煤电厂等高硫环境中的应用研究聚焦于提高催化过滤器的抗硫性能。YANG 等^[69]通过优化 PTFE 乳液浓度、催化剂颗粒大小和煅烧温度, 并采用泡沫涂层技术, 成功地制备了 Mn-Ce-Nb-O_x/P84 催化过滤毡。在 200 °C 下, 这种催化过滤毡对 PM_{2.5} 的去除率高达 99%, 对 NO 的去除率也达到 95.3%, 即便在 SO₂ 体积分数高达 0.015% 的环境下, 其对 NO 的去除效率依然保持在 85% 左右, 表明泡沫涂层可以显著增强滤料对硫化物的抵抗能力。单良等^[70]采用浸渍法成功地制备了 VMoTi/玻纤复合催化滤布, 该滤布在 200~250 °C 展现出优良的 NO 脱除效果。当催化剂负载量为 130 g/m² 时, NO_x 的脱除率约 85%, 并且在连续 240 min 的抗水、抗硫稳

定性测试中, NO_x 的脱除率能够维持在 75% 以上, 一旦排除水和 SO₂ 的影响, VMoTi/玻纤复合催化滤布脱硝率能迅速恢复至约 85%, 体现了其卓越的抗水、抗硫性能。

在探索脱硫技术的进展中, 着重开发和优化具有高效脱硫能力的过滤材料。针对燃烧过程中产生的硫化物, SONG 等^[71]通过真空气相沉积技术, 将 V、Mo 盐转化为纳米催化剂, 并涂覆于陶瓷纤维滤管上 (CCFTs), 研究了在 180~330 °C 下通过添加 NaHCO₃ 实现 CCFTs 的脱硫、脱硝和除尘效果。结果发现, 添加 NaHCO₃ 后滤管的脱硝率为 97.62%、脱硫效率为 94.23%, 显示出良好的环保净化能力。将 MOFs 负载在纳米纤维上也展示了在脱硫领域的应用潜力。ZHANG 等^[72]选用了不同的 MOFs 材料 (ZIF-8、Mg-MOF-74、MOF-199 和 UiO-66-NH₂), 并将它们嵌入聚丙烯腈 (PAN) 基质中, 通过静电纺丝技术成功地制备了改性纳米纤维过滤器。这些过滤器利用 MOFs 的开放金属位点、聚合物上的官能团以及纳米填料间的静电作用, 有效提升了对 PM 捕获和 SO₂ 的吸附能力。特别是, UiO-66-NH₂/PAN 和 MOF-199/PAN 改性纳米纤维膜在 SO₂/N₂ 混合气体环境中展现了高效的 SO₂ 选择性吸附能力, 吸附量分别高达 0.019 和 0.014 g/g。这些研究成果不仅展示了纳米技术和材料科学在环保领域的应用潜力, 也为未来脱硫技术的发展指明了方向, 更有效地应对燃烧过程中产生的硫化物污染的难题。表 3 展示了几种典型的耐高温非织造过滤材料在脱硝和脱硫等方面应用的实例。

表 3 耐高温非织造过滤材料的功能应用

Table 3 Functional applications of high temperature resistant nonwoven filtration materials

基材	催化剂	功能	机理	应用特性	参考文献
PPS 毡	Mn/Ce 氧化物	脱硝	$4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ $\text{NO} + \text{NO}_2 + 2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ $6\text{NO}_2 + 8\text{NH}_3 \rightarrow 7\text{N}_2 + 12\text{H}_2\text{O}$	对 >4 μm 颗粒去除率 100%; 220 °C 时, PPS npff/Mn/Ce-P 脱硝效率 > 80%	[65]
陶瓷纤维滤管 (CCFTs)	纳米 V/Mo	脱硝 脱硫	$\text{HCl} + \text{NaHCO}_3 \xrightarrow{\text{催化剂}} \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{NaHCO}_3 \xrightarrow{\text{催化剂}} \text{Na}_2\text{SO}_3 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2$ $\text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{NaHCO}_3 \xrightarrow{\text{催化剂}} \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2$	330 °C、0.8 m/min 过滤速率条件下, 脱硝率最高 97.62%、脱硫率最高 94.23%	[71]
陶瓷过滤器 (CFE)	V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂	脱硝	$4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + 5\text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	250~375 °C、1 m/min 时 NO 转化率可达 100%, 在 300 °C、2 m/min 时 NO 转化率降至 99.3%	[73]
PPS 毡	Mn-Ce-Co-O _x	脱硝 除二噁英	$4\text{NH}_3 + 4\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ $4\text{NH}_3 + 2\text{NO} + 2\text{NO}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	200 °C 时 Mn-Ce-Co-O _x /PPS 对二噁英的分解率达 88.6%, 对 NO 的分解率高达 96%; 有效过滤 <1 μm 的微粒, 且过滤阻力低	[74]
SiC 膜	TiO ₂ /Pt	脱 VOCs	$\text{VOCs} + \text{O}_2 \xrightarrow{\text{催化剂}} \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	SiC@TiO ₂ /Pt 膜在 262 °C 和 1 m/min 的过滤速率下对三聚甲苯的降解表现出高催化活性, 转化率接近 100%	[75]

续表 3

基材	催化剂	功能	机理	应用特性	参考文献
多孔陶瓷膜管 (CMT)	Co/Mn	脱甲苯	$C_7H_8 \rightarrow CO_2 + H_2O$	将甲苯分解为 CO_2 和 CO , 其中催化剂 [$n(Co) : n(Mn) = 1 : 0.11$] 的最佳降解率为 97.7%, CO_2 的选择性为 93.8%	[76]
P84 毡	改性 Mn-Ce	脱硝 抗硫	$SO_3 + 2NH_3 + H_2O \rightarrow (NH_4)_2SO_4$ $SO_3 + NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4HSO_4$ $Mn + SO_2 + SO_3 \rightarrow Mn_2(SO_4)_3 + MnSO_4$	Fe、Co、Cu 改性滤料在低浓度 SO_2 下, Fe 的抗硫性最好; SO_2 体积分数 0.045%、200 °C 时, 改性 Fe-Mn-Ce 滤料脱硝效率 93.4%, 1,2-二氯苯去除率 96.1%	[77]
陶瓷过滤器 (CF)	ZnO/R-CuO	脱硫	高温脱硫 (HTDS) $H_2S + ZnO + CuO \rightarrow ZnS + H_2 + CuS + Cu_2S$	ZnO/R-CuO 吸附剂在 873 K 下 HTDS 生成 ZnS 和 Cu_2S , 硫化率 82%~90%; 过滤器可同时实现高温再生 (HTRG) 和微粒过滤 (HTPF), 颗粒去除率 >98%	[78]
镍 (Ni) 纳米纤维过滤器	Ni	除 NO	$2NO \xrightarrow{\text{催化剂}} N_2 + O_2$	Ni 纳米纤维过滤器具有优异的 PM1 (空气中颗粒物, 过滤直径 1 μm) 和 NO 去除能力; 在风速为 5.3 cm/s 时, 过滤效率高达 99.86%	[79]
PP 无纺布	氧化石墨烯 (rGO)	除甲苯 二甲苯	静电相互作用 $\pi-\pi$ 相互作用	聚 [丙烯 (PP) -g- 甲基丙烯酸二甲胺乙酯 (DMAEMA)]/rGO 的吸附效率随 rGO 中氧含量的减少及甲苯初始浓度的提高而提升, 其最高吸附量可达 39.1 mg/g, 过滤效率 72.2%	[80]
PMIA 纳米纤维膜	TiO ₂	光降解	$MB + H_2O + O_2 \xrightarrow{\text{催化剂}} CO_2 + H_2O + \text{其他产物}$	TiO ₂ 质量分数 5% 的 PMIA/TiO ₂ 纳米纤维膜对 PM2.5 的过滤效率 (99.3%) 极高, 且压力降低 (61 Pa), 同时具备良好的光催化降解亚甲基蓝 (MB) 的能力	[81]

3.3 降解二噁英和吸附重金属离子

城市垃圾和工业废弃物焚烧过程中产生的二噁英和重金属离子 (Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 等) 会对环境和人体健康带来潜在的危害。开发有效的污染控制技术^[82], 如金属催化、活性炭吸附和高温熔融等, 以降低或消除这些危害、减少有害物质的排放, 从而保护环境安全和公共健康, 是当前研究的重点。

目前, 活性炭吸附法是使用最多的控制二噁英的技术, 但该技术不能彻底去除二噁英。CUI 等^[83]报道了一种袋式过滤+粉状活性炭技术, 旨在解决传统活性炭袋式过滤器活性炭利用率低、二噁英去除不彻底的问题。研究发现, 粉状活性炭展现出较粉煤灰混合活性炭更长的高效吸附时间, 且在极高的初始浓度下仍能在 7 h 内保持 90% 以上的去除效率。该技术能显著提升二噁英的清除率, 并优化活性炭的使用效率, 为垃圾焚烧烟气处理提供了一种改进方案。目前, 传统的单袋过滤系统已不能满足更严格的国家排放标准。LUO 等^[84]开发了一种双袋室过滤系统, 该系统整合了选择性非催化还原 (SNCR)、半干法洗涤、活性炭与小苏打注入技术以及蒸汽-烟气换热器 (SGH) 和选择性催化还原塔, 这一系统能够实现二噁英的去除率高达 98%, 同时达到 HCl 的完全去除, 展示了超出传统单袋系统的高效性能 (图 7a)。在此基础上, 采用催化剂降解方法, 能

够彻底去除二噁英。常用的降解去除二噁英的催化剂为 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$, 其去除效率可达 80% 以上。KAWAMOTO 等^[85]将 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 催化剂浸渍于过滤器的织物上, 该法可有效分解和吸附烟气中的二噁英, 大幅降低其含量至 0.1 ng-TEQ/ m^3N (TEQ 代表毒性等价, 是二噁英类化合物的相对毒性度量单位) 以下, 展示了其在减少环境污染方面的潜力。

在减少燃煤锅炉有害物质的排放研究中, 重金属离子 Hg 的捕获同样重要^[86]。燃煤烟气中的 Hg 主要有 3 种形式: 单质汞 (Hg^0)、氧化汞 (Hg^{2+}) 和颗粒汞 (Hg^P), 其中大部分的 Hg^P 和 Hg^{2+} 可被常规的颗粒物控制设备脱除, 因此, 织物过滤器去除烟气中 Hg 的难点在于 Hg^0 的去除。HRDLICKA 等^[87]分别将 Au/TiO₂ 和 Pd/Al₂O₃ 浸渍在编织过滤器上, 研究了这 2 种涂层对 Hg^0 的氧化去除效果。结果显示, 这 2 种涂层的 Hg^0 氧化效率分别达到 40%~60% 和 50%~80%。SUNG 等^[88]通过在 PTFE/玻璃纤维过滤器上涂覆粉末活性炭 (PAC) 制备 PAC 涂层过滤器, 将 Hg^0 的去除效率从普通过滤器的 73.00% 提高到 83.16% (图 7b~c), 此技术优化后在实际的商业燃煤电厂得到了应用, 为减少工业排放中的二噁英和其他有害物质提供了有效的解决方案和思路。

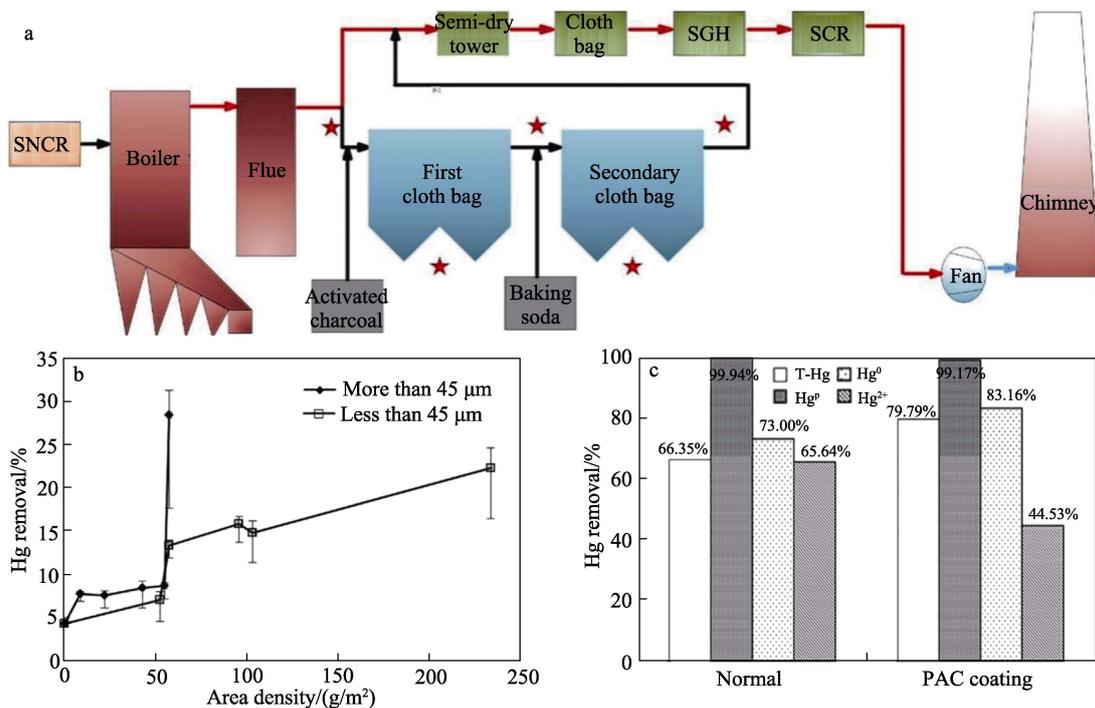


图 7 大、轻双袋系统实验台结构 (a)^[84]; PAC 涂层过滤器对 Hg 的去除性能 (b、c)^[88]

Fig. 7 Structure of large and light dual baghouse filter system test bench (a)^[84]; Hg removal performance by PAC coated filter (b, c)^[88]

4 结束语与展望

目前, 高温非织造过滤材料的研究已取得了显著的进展, 特别是在功能化改性方面, 实现了对特定有害物质捕捉效率和材料稳定性的双重提升。但是, 面对不断变化的工业排放和环境保护要求, 这一领域仍存在一些挑战, 未来的研究方向应集中于如下几个方面:

(1) 在非织造过滤材料的性能强化和耐用性提高方面, 开发新型耐高温、高效能纤维技术, 如采用硅酸铝纤维、聚苯并咪唑 (PBI) 纤维等材料。通过结合不同类型的纤维, 实现性能互补, 从而增强整体过滤材料的效能。同时, 研究提升纤维间的相互结合力和耐久性, 以满足日益严苛的工业使用要求。

(2) 制备技术方面, 根据具体的过滤需求, 优化针刺、水刺、熔喷等非织造过滤材料技术, 包括引入新型纳米颗粒、共轭微孔聚合物、MOFs 等创新材料, 促进纳米纤维制备工艺产业化、规模化, 并结合超细纤维层和耐高温 npff 技术, 生产性能稳定的复合梯度过滤材料。

(3) 过滤机理研究方面, 发展跨尺度模型以全面模拟过滤过程, 研究气流与颗粒物间的多相流体力学及其对过滤效率的影响; 探索介质结构与性能的关联, 设计成本效益的模拟工具, 结合实验与模拟, 提高预测准确性; 开发实时监测技术以延长材

料的使用寿命, 考虑环境因素对性能的影响, 为耐高温过滤材料的设计和应用提供科学支撑。通过更加深入的过滤机制探究, 优化高温非织造材料性能, 促进过滤技术发展。

(4) 在材料改性方面, 重点研究如何通过涂层、覆膜、溶胶浸渍等后整理工艺来增强材料的化学稳定性和物理耐用性, 提升材料的耐高温、耐腐蚀、耐水解和抗氧化等性能。同时, 致力于开发高效低阻、生物可降解和智能响应系统, 以增强材料的实用性和环保性。

(5) 在功能化方面, 非织造材料定制化功能在耐高温、疏水防油、脱硫脱硝等方面研究多处于实验室阶段, 未来研究应提升其处理复杂烟气环境的效能, 利用多样原材料与技术, 优化纳米纤维规模化生产。注重使用生物基或可回收材料制备过滤材料, 预防和减少二次污染。

参考文献:

[1] KINNUNEN H, HEDMANE M, ENGBLOM M, *et al.* The influence of flue gas temperature on lead chloride induced high temperature corrosion[J]. *Fuel*, 2017, 196: 241-251.

[2] SOUZANDEH H, WANG Y, NETRAVALI A N, *et al.* Towards sustainable and multifunctional air-filters: A review on biopolymer-based filtration materials[J]. *Polymer Reviews*, 2019, 59(4): 651-686.

[3] LIU Y S, QIAN X M, ZHANG H, *et al.* Preparing micro/nano-fibrous filters for effective PM2.5 under low filtration resistance[J]. *Chemical Engineering Science*, 2020, 217: 115523.

[4] SHARMA A K, BALIYAN P, KUMAR P. Air pollution and public health: The challenges for Delhi, India[J]. *Reviews on Environmental*

- Health, 2018, 33(1): 77-86.
- [5] ZHUO L H, MA C, XIE F, *et al.* Methylcellulose strengthened polyimide aerogels with excellent oil/water separation performance[J]. Cellulose, 2020, 27(13): 7677-7689.
- [6] WANG F, ZHU H L, ZHANG H P, *et al.* An elastic microporous material with tunable optical property[J]. Materials Letters, 2016, 164: 376-379.
- [7] LYU Y R, HE H W, CHEN F X, *et al.* Polyphenylene sulfide (PPS) fibrous felt coated with conductive polyaniline *via in situ* polymerization for smart high temperature bag-filter[J]. Materials Research Express, 2019, 6(7): 075706.
- [8] BAO F, DAI X M, DONG Z X, *et al.* Fabrication and properties of polyimide copolymer fibers containing pyrimidine and amide units[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55: 11763-11778.
- [9] JIN S X, YU J L, ZHENG Y S, *et al.* Preparation and characterization of electrospun PAN/PSA carbonized nanofibers: Experiment and simulation study[J]. Nanomaterials, 2018, 8(10): 821.
- [10] ZHANG Z X, LI W T, YE G D, *et al.* Influence of cyclodehydration on formation and properties of poly(*p*-phenylene-1,3,4-oxadiazole) fibre[J]. Plastics, Rubber and Composites, 2007, 36(7/8): 343-349.
- [11] WANG C L, LUAN J S, XU Z P, *et al.* Preparation and properties of a novel, high-performance polyether ether ketone fabric[J]. High Performance Polymers, 2018, 30(7): 794-802.
- [12] LI S D (李少东), ZHANG T (张田), YANG G H (杨光豪), *et al.* Research progress of aramid filter materials[J]. Shanghai Textile Technology (上海纺织科技), 2022, 50(10): 7-11.
- [13] YU J, TIAN X, XIN B J, *et al.* Preparation and characterization of PMIA nanofiber filter membrane for air filter[J]. Fibers and Polymers, 2021, 22(9): 2413-2423.
- [14] ZOU C, SHI Y L, QIAN X M. Characterization of glass fiber felt and its performance as an air filtration media[J]. Journal of Industrial Textiles, 2022, 51(S1): 1186-1206.
- [15] ZHAO T, LI H, JIA X, *et al.* Facile preparation of ZIF-8 functionalized basalt fiber felt and its high adsorption capacity for iodine[J]. Surfaces and Interfaces, 2023, 41: 103318.
- [16] JIA C, XU Z, LUO D F, *et al.* Flexible ceramic fibers: Recent development in preparation and application[J]. Advanced Fiber Materials, 2022, 4(4): 573-603.
- [17] LIU X D, DING X Y, CHEN C, *et al.* Investigating the filtration behavior of metal fiber felt using CFD-DEM simulation[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2019, 13(1): 426-437.
- [18] WU Y P (吴延鹏), ZHONG Q Y (钟乔洋), XING Y (邢奕), *et al.* Research progress of electrospinning nanofiber membranes in air filtration[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2021, 38(8): 1530-1541.
- [19] GE J L, ZONG D D, JIN Q, *et al.* Biomimetic and superwetable nanofibrous skins for highly efficient separation of oil-in-water emulsions[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(10): 1705051.
- [20] HASSAN M A, YEOM B Y, WILKIE A, *et al.* Fabrication of nanofiber meltblown membranes and their filtration properties[J]. Journal of Membrane Science, 2013, 427: 336-344.
- [21] KAUR S, SUNDARRAJAN S, RANA D, *et al.* Influence of electrospun fiber size on the separation efficiency of thin film nanofiltration composite membrane[J]. Journal of Membrane Science, 2012, 392: 101-111.
- [22] ZHOU G, XU Z, ZHANG Y L, *et al.* Effect of different antibacterial agents doping in PET-based electrospun nanofibrous membranes on air filtration and antibacterial performance[J]. Environmental Research, 2024, 243: 117877.
- [23] WANG W X, HOU Z C, ZHANG H X, *et al.* Harsh environmental-tolerant ZIF-8@polyphenylene sulfide membrane for efficient oil/water separation and air filtration under extreme conditions[J]. Journal of Membrane Science, 2023, 685: 121885.
- [24] ZHOU Z D, WANG W, SHI H T, *et al.* Metal-organic framework based polymer fibers: Review on synthesis and applications[J]. Advanced Materials Technologies, 2023, 8(15): 2300121.
- [25] CHENG Y, WANG W, YU R R, *et al.* Construction of ultra-stable polypropylene membrane by *in-situ* growth of nano-metal-organic frameworks for air filtration[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 282: 120030.
- [26] ZHANG X, WANG Y X, LIU W J, *et al.* Needle-punched electret air filters (NEAFs) with high filtration efficiency, low filtration resistance, and superior dust holding capacity[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 282: 120146.
- [27] YEO S Y, KIM O S, LIM D Y, *et al.* Effects of processing condition on the filtration performances of nonwovens for bag filter media[J]. Journal of Materials Science, 2005, 40: 5393-5398.
- [28] YU B, ZHAO X M. Fabrication and characterization of pre-oxidized PAN composite filters[J]. The Journal of the Textile Institute, 2018, 109(10): 1360-1366.
- [29] ZHANG N, JIN X Y, HUANG C, *et al.* Improved filtration properties of hydroentangled PTFE/PPS fabric filters caused by fibrillation[J]. Indian Journal of Fibre & Textile Research, 2017, 42(3): 278-285.
- [30] YANG J J (阳建军), XU X J (徐新杰), YU Z Q (郁宗琦). Development of high temperature resistance and antistatic composite filter materials[J]. Technical Textiles (产业用纺织品), 2019, 37(11): 5-8.
- [31] LIU Y S, QIAN X M, WANG L, *et al.* Hierarchical micro/nanofibrous filter for effective fine-particle capture[J]. Powder Technology, 2020, 360: 1192-1199.
- [32] HAO X B, ZENG Y C. A review on the studies of air flow field and fiber formation process during melt blowing[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(27): 11624-11637.
- [33] ZHANG H F, LIU J X, ZHANG X, *et al.* Design of electret polypropylene melt blown air filtration material containing nucleating agent for effective PM2.5 capture[J]. RSC Advances, 2018, 8(15): 7932-7941.
- [34] CHEN Q Q, LIU Y J, DENG H J, *et al.* Melt differential electrospinning of polyphenylene sulfide nanofibers for flue gas filtration[J]. Polymer Engineering & Science, 2020, 60(11): 2887-2894.
- [35] WU T (吴婷), ZHOU W T (周伟涛), LI Y (李勇), *et al.* Preparation of PET/CA root hair-like fluffy nanofibrous composite films and their cooking oil fume filtration performance[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2022, 39(9): 1788-1793.
- [36] WEI Z M, SU Q, WANG X J, *et al.* Nanofiber air filters with high-temperature stability and superior chemical resistance for the high-efficiency PM2.5 removal[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021, 60(27): 9971-9982.
- [37] AN Y, YU S Y, LI S M, *et al.* Melt-electrospinning of polyphenylene sulfide[J]. Fibers and Polymers, 2018, 19: 2507-2513.
- [38] TEPEKIRAN B N, CALISIR M D, POLAT Y, *et al.* Centrifugally spun silica (SiO₂) nanofibers for high-temperature air filtration[J]. Aerosol Science and Technology, 2019, 53(8): 921-932.
- [39] WANG H L (王浩伦). Fabrication and application of oxide nanofibers by blow spinning[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology (电子科技大学), 2020.
- [40] ZHANG L Y, ZHENG Q M, GE X C, *et al.* Preparation of nylon-6 micro-nanofiber composite membranes with 3D uniform gradient structure for high-efficiency air filtration of ultrafine particles[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 308: 122921.
- [41] XIAO J, LIANG J C, ZHANG C, *et al.* Advanced materials for capturing particulate matter: Progress and perspectives[J]. Small Methods, 2018, 2(7): 1800012.
- [42] LU T, CUI J X, QU Q L, *et al.* Multistructured electrospun nanofibers for air filtration: A review[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(20): 23293-23313.
- [43] YANG C F. Aerosol filtration application using fibrous media-An industrial perspective[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2012, 20(1): 1-9.
- [44] JIANG W, CHEUNG C S, CHAN C K, *et al.* The aerosol penetration

- through an electret fibrous filter[J]. *Chinese Physics*, 2006, 15(8): 1864.
- [45] PEERBOOM N, SCHMIDT E, TRYBALA E, *et al.* Cell membrane derived platform to study virus binding kinetics and diffusion with single particle sensitivity[J]. *ACS Infectious Diseases*, 2018, 4(6): 944-953.
- [46] BAI H, QIAN X M, FAN J T, *et al.* Theoretical model of single fiber efficiency and the effect of microstructure on fibrous filtration performance: A review[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 60(1): 3-36.
- [47] WANG J X, WU Z, WANG H M, *et al.* Ventilation reconstruction in bathrooms for restraining hazardous plume: Mitigate COVID-19 and beyond[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 439: 129697.
- [48] KONDA A, PRAKASH A, MOSS G A, *et al.* Aerosol filtration efficiency of common fabrics used in respiratory cloth masks[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(5): 6339-6347.
- [49] WANG A B, ZHANG X, GAO L J, *et al.* A review of filtration performance of protective masks[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(3): 2346.
- [50] OWENS L P, HUBBE M A. Performance factors for filtration of air using cellulose fiber-based media: A review[J]. *BioResources*, 2023, 18(1): 2440-2519.
- [51] WANG C S. Electrostatic forces in fibrous filters-A review[J]. *Powder Technology*, 2001, 118(1/2): 166-170.
- [52] ADANUR S, JAYSWAL A. Filtration mechanisms and manufacturing methods of face masks: An overview[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2022, 51(S3): 3683-3717.
- [53] WANG Y L (王艳丽), WU L N (吴玲娜), JIN W H (金万慧), *et al.* Preparation and properties of aramid 1313(MPIA)/PANOF needle punched filter material[J]. *Advanced Textile Technology (现代纺织技术)* 2019, 27(6): 26-30.
- [54] CHEN M M, CHEN Q, ZENG Y C, *et al.* A continuous polytetrafluoroethylene foam-coating to glass fiber mat with superior self-cleaning, antistatic and high filtration efficiency performances[J/OL]. *Journal of Industrial Textiles*, 2023. <https://doi.org/10.1177/15280837231188965>.
- [55] ZHANG Y (张月), ZHANG T (张田), WANG H (王洪). Powder coating treatment of filter materials[J]. *Technical Textiles (产业用纺织品)*, 2018, 36(8): 31-36.
- [56] XU Q F, WANG G B, XIANG C H, *et al.* Preparation of a novel poly(ether ether ketone) nonwoven filter and its application in harsh conditions for dust removal[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 253: 117555.
- [57] XIE B, LI S H, CHU W, *et al.* Improving filtration and pulse-jet cleaning performance of metal web filter media by coating with polytetrafluoroethylene microporous membrane[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 136: 105-114.
- [58] KIM H B, HAN B, LEE M H. Enhanced filtration characteristics of a PTFE foam-coated filter using PTFE nanofibers[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 305: 127970.
- [59] LYU C, SHEN R Q, YANG Y, *et al.* Effect of polytetrafluoroethylene (PTFE) emulsion impregnation coating on filtration performance and thermal property of polyphenylene sulfide (PPS) needle felt[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2023, 20(4): 1423-1433.
- [60] LYU C, CHENG J, SHEN R Q, *et al.* Fabrication and evaluation of aramid fiber/polytetrafluoroethylene emulsion/tourmaline particle composite filter media: Filtration performance, thermal behavior, and mechanical property[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2022, 51(S3): 3998-4021.
- [61] LI Y S (李银生), LIU M (刘猛), DUAN Y F (段钰锋), *et al.* Optimal preparation of quaternary catalytic functional PPS filter materials and their chemical properties[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress (化工进展)*, 2020, 39(1): 267-277.
- [62] ZHANG C, AN G L, WANG L W, *et al.* Multi-stage ammonia production for sorption selective catalytic reduction of NO_x[J]. *Frontiers in Energy*, 2022, 16(5): 840-851.
- [63] JU L X, LI F, ZHOU R, *et al.* Manganese oxides decorated polyphenylene sulfide needle-punching fibrous felts: A new composite for dust removal and denitration application[J]. *Fibers and Polymers*, 2021, 22(9): 2483-2490.
- [64] PARK Y O, LEE K W, RHEE Y W. Removal characteristics of nitrogen oxide of high temperature catalytic filters for simultaneous removal of fine particulate and NO_x[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2009, 15(1): 36-39.
- [65] CHEN Y, HE H W, WU S H, *et al.* Mn/Ce oxides decorated polyphenylene sulfide needle-punching fibrous felts for dust removal and denitration application[J]. *Polymer*, 2020, 12(1): 168.
- [66] XU M T, CHEN L G, CHENG X P, *et al.* Simultaneous catalytic removal of NO and chlorobenzene over Mn-Ce-Sm-Sn-O_x/P84 composite catalytic filter[J/OL]. *Journal of Rare Earths*, 2023. DOI: 10.1016/j.jre.2023.11.010.
- [67] IRURETAGOYENA D, BIKANE K, SUNNY N, *et al.* Enhanced selective adsorption desulfurization on CO₂ and steam treated activated carbons: Equilibria and kinetics[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 379: 122356.
- [68] YANG K, YAN Y, CHEN W, *et al.* The high performance and mechanism of metal-organic frameworks and their composites in adsorptive desulfurization[J]. *Polyhedron*, 2018, 152: 202-215.
- [69] YANG B, HUANG Q, CHEN M D, *et al.* Mn-Ce-Nb-O_x/P84 catalytic filters prepared by a novel method for simultaneous removal of particulates and NO_x[J]. *Journal of Rare Earths*, 2019, 37(3): 273-281.
- [70] SHAN L (单良), YIN R Q (尹荣强), WANG H (王慧), *et al.* Preparation of VMO/Ti/glass fiber catalytic filter-cloth and research on its dust and NO_x synergistic removal performance[J]. *JCIESC Journal (化工学报)*, 2021, 72(9): 4892-4899.
- [71] SONG Y L, ZHANG Y Z, WU Q W, *et al.* Experimental study on the desulfurization, denitration, and dust removal characteristics of ceramic fiber filter tubes[J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36(7): 3715-3726.
- [72] ZHANG Y Y, YUAN S, FENG X, *et al.* Preparation of nanofibrous metal-organic framework filters for efficient air pollution control[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2016, 138(18): 5785-5788.
- [73] MIAO L F, JI Z L, WANG X T, *et al.* Insights into the calcination temperature and loading amount of the catalyst support (TiO₂) in the fibrous ceramic-based catalytic filter element prepared by microwave drying[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(19): 31057-31065.
- [74] PENG Y Q, DING J M, GUO X H, *et al.* Low-temperature catalytic oxidation of PCDD/Fs over MnCeCo_x/PPS catalytic filter[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(57): 120355-120365.
- [75] LI C, ZHANG F, FENG S S, *et al.* SiC@TiO₂/Pt catalytic membrane for collaborative removal of VOCs and nanoparticles[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(31): 10564-10571.
- [76] DING Y C, LIU W, HUANG W J, *et al.* Enhancement of flue gas low-concentration toluene removal in pulsed plasma coupling with porous ceramic modified catalyst reactor[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, 62(7): 3249-3258.
- [77] WAN J, LIU M, LI T, *et al.* Effect of additives on sulfur resistance of catalytic filter material during denitrification and synergistic decomposition of 1,2-DCBz[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(43): 98400-98416.
- [78] WANG T C, WEI L W, HUANG H L, *et al.* High-temperature syngas desulfurization and particulate filtration by ZnO/ceramic filters[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(15): 13813-13818.
- [79] TANG X C, WANG X F, YANG L J, *et al.* Multifunctional nickel nanofiber for effective air purification: PM removal and NO reduction from automobile exhaust[J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55: 6161-6171.