韩武望,周 昊,姚庆东,等.蔗糖衍生炭原位改性粗效纤维及其过滤性能研究 [J]. 中国环境科学, 2026,46(3):1310-1319.
Han W W, Zhou H, Yao Q D, et al. Study on in-situ modification of coarse fiber with sucrose derived carbon and its filtration performance [J]. China Environmental Science, 2026,46(3):1310-1319.

蔗糖衍生炭原位改性粗效纤维及其过滤性能研究

韩武望[1],周 昊[1],姚庆东[1],楚化强[1],闾 荔[2],钱付平[1],徐俊超[1*] (1.安徽工业大学能源与环境学院,安徽 马鞍山 243000；2.中国计量大学机电工程学院,浙江 杭州 310018)

摘要：利用蔗糖衍生炭(SDC)原位改性粗效聚酯纤维(PET),在其表面构筑了厚度约 1.15μm 的炭薄层(仅占 PET 纤维孔隙的 10^{-3}),显著改善了纤维的介电性能.结果表明,所得复合过滤材料对 0.3μm 颗粒的过滤效率高达 98.10%,并始终维持低阻特性,其综合质量因子(CQF)显著优于原 PET 纤维.此外,微米炭薄层与 PET 纤维结合牢固,复合材料表现出良好的长期稳定性,可满足重复使用需求.

关键词：过滤；$PM_{2.5}$；高效低阻；原位生长；微米炭薄层；蔗糖衍生炭
中图分类号：X505 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)03-1310-10

Study on in-situ modification of coarse fiber with sucrose derived carbon and its filtration performance.

HAN Wu-wang[1], ZHOU Hao[1], YAO Qing-dong[1], CHU Hua-qiang[1], LV Li[2], QIAN Fu-ping[1], XU Jun-chao[1*] (1.School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243000, China；2.College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China). *China Environmental Science*, 2026,46(3)：1310~1319

Abstract：A thin carbon layer (~1.15μm thick) was fabricated on coarse polyethylene terephthalate (PET) fibers via in-situ modification with sucrose-derived carbon (SDC), which only occupied 10^{-3} of the fiber's pore size and significantly improved the dielectric properties. The composite filter material achieved a high filtration efficiency of 98.10% for 0.3μm particles while maintaining low resistance, resulting in a comprehensive quality factor (CQF) significantly higher than that of the origin PET fibers. Furthermore, the carbon layer was strongly bonded to the PET fibers, ensuring excellent long-term stability and suitability for repeated use.

Key words：filtration；$PM_{2.5}$；high-efficiency and low-resistance；in-situ；micro-carbon thin layer；sucrose-derived carbon

空气动力学直径≤2.5μm 的细颗粒物($PM_{2.5}$)易通过门窗进入室内,持续污染室内空气[1],被人体吸入后,可导致慢阻塞、肺癌等疾病[2-3].据世界卫生组织(WHO)统计,全球每年约 670 万人因此过早死亡.纤维过滤器是去除室内颗粒物的重要手段,传统纤维过滤器通过减小纤维孔隙实现高效过滤,但较小的孔隙使过滤阻力激增[4-5],导致大量能量损耗[6].因此,开发高效低阻的空气过滤技术对保障室内空气质量与降低建筑物能耗具有重要意义.

当前,高效低阻空气过滤技术主要包括纳米纤维过滤[7]和静电增强过滤[8]两类.近年来,静电纺丝技术的进步极大地推动了纳米纤维过滤的发展,当纤维直径小于空气分子的平均自由程(约 65nm)时,气流在纤维表面产生的“滑移效应”可显著降低过滤阻力[9],使材料在具有微小孔隙结构的同时保持低过滤阻力.但纳米纤维存在机械性能差、易堵塞等缺点[10],限制了其在建筑通风系统中的规模化应用.与纳米纤维过滤技术不同,静电增强过滤通过引入静电力来增强纤维对颗粒物的捕获能力.在静电作用下,纤维材料可以在不增加过滤阻力的同时实现高效过滤.静电增强过滤可分为颗粒荷电[11]、纤维荷电[7]以及颗粒纤维双荷电过滤[12-13]三类.颗粒荷电过滤技术利用电晕放电装置[14]或离子发生器[15]对颗粒物直接荷电,通过带电颗粒与纤维间的静电力捕获颗粒物.但该技术对工况敏感[16],且颗粒与纤维间主要为介电泳力,其对过滤效率提升有限[12];与颗粒荷电相反,纤维荷电技术给纤维带电,利用带电纤维捕获中性颗粒.具体实现方式包括驻极体纤维过滤[17]和持续极化纤维过滤[8]两种.驻极体纤维通常在制备时一次性注入大量电荷,但在使用过程中,初

收稿日期：2025-08-09
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52406121,52476096);安徽省自然科学基金资助项目(2308085ME189);安徽省高校科研项目(2024AH050142)
* 责任作者, 副教授, junchxu@ahut.edu.cn

始电荷会逐渐衰减[18],其过滤阻力也会随容尘量增加而上升[19],难以长期保持高效低阻特性.持续极化纤维借助外部电场使纤维持续带电,虽解决了电荷衰减问题,但与颗粒荷电技术相同,本质仍依赖于颗粒与纤维间的介电泳力,对过滤效率的提升始终有限.为解决上述问题,颗粒纤维双荷电技术通过二者的协同作用突破单级荷电的局限.特别是双电场双荷电技术,通过两个不同的电场分别进行颗粒荷电和纤维极化[20],实现了对两个过程的独立调控,显著提升了过滤效率.

在双电场双荷电技术中,颗粒与纤维间的静电作用对过滤效率的提升至关重要.颗粒的荷电性能受其固有物化性质限制,而纤维的荷电性能则与其介电性能密切相关.传统粗效纤维虽具有低阻优势,但介电性能普遍较差,难以满足双电场双荷电技术对高介电纤维的要求.为此,利用介电性能优异的材料对粗效纤维进行改性成为可行的解决思路.炭材料凭借其优异的介电性能、可控的孔隙结构和稳定的理化性质,在超级电容器、污染物吸附等领域应用广泛[21].这些特性使得炭材料成为一种极具潜力的改性材料,其有望增强纤维与颗粒间的静电作用,从而满足高效过滤需求.炭材料的制备原料众多.其中,蔗糖作为糖业副产品(全球年产量超 1.8 亿 t),因其价格低廉、易于获得,且碳化过程可控等[22-24]优点被本文选为碳源.此外,当前的改性方法如浸渍法、湿式反应沉积法、烧结法、静电纺丝法、粒子沉积法和气相沉积法[25-29]等,存在涂层改性弱、孔隙易堵塞、制备工艺复杂等问题.相比之下,原位生长法操作简便、结构可控、结合强度高,展现出强大的应用潜力.已有研究[30]成功利用聚多巴胺(PDA)原位改性了粗效聚酯纤维(PET),改性后的 PDA@PET 过滤器在 0.4m/s 风速下,对 0.3μm 的颗粒物,过滤效率高达 99.48 %,阻力仅 9.5Pa.但这种过滤器的核心原料价格高昂(盐酸多巴胺￥7.10~14.18/g).为此,本文提出一种在 PET 纤维表面原位生长微米级蔗糖衍生炭(SDC)的方法,精准调控炭层厚度及形貌,旨在改善纤维的介电性能,从而增强纤维的有效电场,提高颗粒的过滤效率,并克服涂层负载不牢固、纤维孔隙易堵塞的问题.

1　材料与方法

1.1　SDC@PET 复合过滤材料的制备

将分析纯蔗糖(国药试剂公司)与 36wt% H_2SO_4 溶液按 1:50(g/mL)混合,在 50℃下搅拌 10min 得到蔗糖酸催化水解液,H_2SO_4 提供的氢离子会加速蔗糖的水解与后续的碳化速率,在氢离子的作用下,蔗糖被酸水解成 D−葡萄糖和果糖.然后,将粗效聚酯纤维材料(PET,直径 50mm、厚度 10mm)浸入水解液中,并转移至水热反应釜,在 95°C、常压条件下进行原位聚合反应,D−葡萄糖和果糖将在 PET 纤维表面自发缩聚,并形成蔗糖衍生炭(SDC)薄层.经过原位生长过程后,将产品洗涤至中性并干燥,最终获得命名为 SDC@PET−*x*(*x* 表示改性时间)的复合过滤材料,制备流程如图 1 所示.

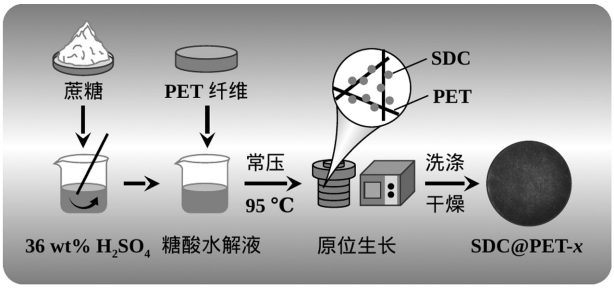


图 1　原位生长制备蔗糖衍生炭粗效纤维复合过滤材料

Fig.1　Synthesis of sucrose−derived carbon coarse fiber composite filter materials by in−situ

1.2　过滤性能测试方法

为了研究 SDC@PET−*x* 复合过滤材料的过滤性能,搭建了如图 2(a)所示的双电场双荷电过滤性能实验平台,主要由颗粒发生模块、颗粒过滤模块和颗粒检测模块组成.颗粒发生模块采用蚊香燃烧产生的烟雾作为颗粒源,由微型气泵抽出并与 HEPA 过滤后的空气混合,然后输送到颗粒物过滤模块.颗粒过滤模块分为颗粒荷电区和纤维极化区.由于放电场和极化场是分开的,因此可以独立控制颗粒荷电与纤维极化.颗粒荷电区由连接高压电源正极的金属放电针,以及接地的金属环组成,金属针通过电晕放电使颗粒物带电.极化区由分别与高压电源正极、接地极连接的前置金属网和后置金属网所组成.通电后,在金属网间形成均匀的外部电场.将 SDC@PET−*x* 置于金属网间,在外部电场的作用下,表面产生感应电荷.带电颗粒进入极化区后,在静电力的作用下被过滤纤维捕集.颗粒检测模块由气溶胶稀释器、粒度分析仪(GRIMM Labortechnik

GmbH,11−A)、压差计和微型气泵组成.分别对上游和下游的空气进行采样,测量颗粒物浓度和压差.

如图 2(b)所示,在放电区和极化区均处于关闭状态时,颗粒物随气流运动并穿过纤维间的孔隙,难以被纤维捕获.在放电区关闭,极化区开启时,颗粒先随气流运动至带电纤维附近,然后在介电泳力的作用下向纤维靠近,由于静电作用较弱,颗粒未被纤维捕获,而是随气流绕过纤维.在同时开启放电区和极化区电源时,带电颗粒会在静电力的作用下,被纤维表面的电荷吸引,并最终被纤维捕获.

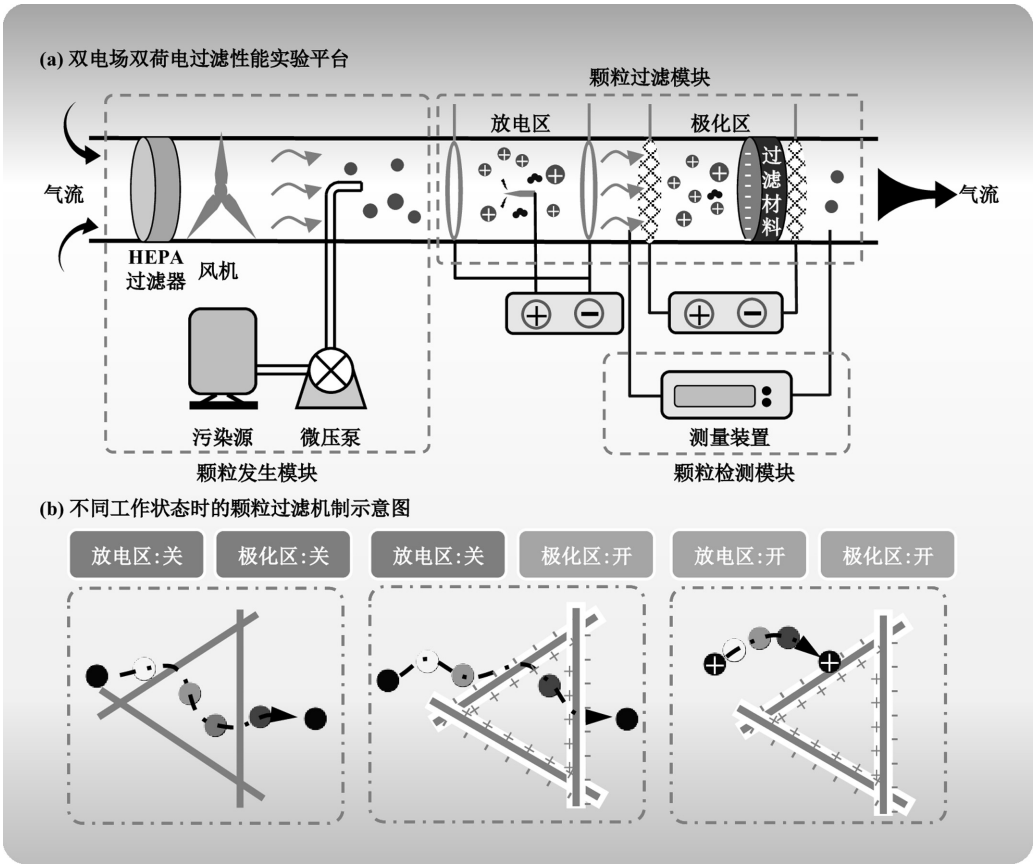


图 2 过滤性能实验平台与过滤机制示意

Fig.2 Experimental platform for filtration performance and filtration mechanism

1.3 性能评价指标

采用过滤效率、过滤阻力和综合质量因子评价 SDC@PET−x 复合过滤材料的性能.特定粒径 $d_p = x$ μm 的颗粒的过滤效率 η_x 使用以下公式计算:

$$\eta_x = 1 - \frac{C_{out}}{C_{in}} \tag{1}$$

式中: C_{out} 为过滤装置出口处特定粒径颗粒物的数量浓度,个/L; C_{in} 为过滤装置入口处特定粒径颗粒物的数量浓度,个/L.

过滤阻力△P 为固定风速下,过滤材料对空气流动产生的阻力.过滤阻力的计算公式如下:

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \tag{2}$$

式中: P_{in} 为过滤装置入口处的静压,Pa; P_{out} 为过滤装置出口处的静压,Pa.

外加电场的作用提高了过滤效率,但同时也增加了过滤装置的能耗,因此在评价材料性能时需计算电场力做功引起的额外电耗 P_e.电耗的计算公式如下:

$$P_e = \frac{U_c I_c + U_p I_p}{A} \tag{3}$$

式中: U_c 为双电场双荷电静电增强空气过滤装置的放电电压,kV; I_c 为双电场双荷电静电增强空气过滤装置的放电区的环路电流,mA; U_p 为双电场双荷电静电增强空气过滤装置的极化电压,kV; I_p 为双电场双荷电静电增强空气过滤装置的极化区的环路电流,mA; A 为装置内横截面积,m^2.

综合质量因子(CQF)可以用来评价包含电场力做功在内的综合能耗[31].CQF 的分子与过滤效率成正比,分母综合了风扇驱动风机的阻力损失及电源产生的电能消耗.CQF 值越大,表明过滤器的阻力越低、电能消耗越少、效率越高.CQF 的计算公式如下:

$$\mathrm{CQF}=\frac{-\ln(1-\eta_x)}{\Delta P+\Delta P'}=\frac{-\ln(1-\eta_x)}{\Delta P+\dfrac{\eta_{\mathrm{f}}P_{\mathrm{e}}}{v_{\mathrm{air}}}} \tag{4}$$

式中: ΔP 为过滤阻力,Pa; $\Delta P'$为装置电场力做功换算的阻力,Pa; η_{f}为风机效率,取 70 %; P_{e} 为装置的额外电耗,W/m^2; v_{air} 为风速,m/s.

1.4　介电性能表征与感应电场模拟

为了表征 SDC@PET−x 复合过滤材料及原 PET 材料的介电性能,通过 Agilent 4980A 精密阻抗分析仪测试其电容 C,并根据计算得到 PET 及 SDC@PET−x 的相对介电常数(ε_{r}).计算公式如下:

$$\varepsilon_{\mathrm{r}}=\frac{4CL}{\varepsilon_0\pi d^2} \tag{5}$$

式中: C 为常温、10kHz 下样品的电容,F; L 为样品厚度,m; ε_0 为真空介电常数,8.854×10^{-12}F/m; d 为测试电极直径,m.

采用 COMSOL Multiphysics 软件模拟计算 SDC@PET 复合材料与原 PET 材料在外加电场作用下产生的感应电场.计算被简化为二维,将单根纤维置于两块平行的不锈钢板的中心,板间距离为 2cm,两板分别设为 +10kV 电压和接地,其间介质为空气.表 1 总结了模型的相关参数.

表 1　模型参数设置

Table 1　Model parameter settings

名称	值	名称	值
纤维直径	30 μm	纤维 ε_{r}	1.240
SDC 层厚度	1.2 μm	SDC 层 ε_{r}	6.448
钢板 1	10kV	钢板 2	接地

2　结果与讨论

2.1　电压对过滤性能的影响

采用双电场双荷电过滤实验平台,研究了不同电压情况下,PET 材料与 SDC@PET−x 复合材料对 0.3 μm 颗粒的过滤效率(以 $\eta_{0.3}$ 表示).如图 3(a)所示,未施加电压时,所有材料的 $\eta_{0.3}$ 均小于 40 %.而在仅施加极化电压(U_{p})时,随着 U_{p} 从 0kV 增大至 13kV,材料的过滤效率也逐渐提高.具体而言,PET 材料的过滤效率从初始的 12.80% 提升至 51.41%,SDC@PET−4 的过滤效率从 22.67%提升至 57.75%,SDC@PET−5 的过滤效率从 33.20%提升至 78.85%,SDC@PET−6 的过滤效率从 33.92%提升至 59.10%,可见,复合材料的过滤效率均超过原 PET 材料.这是由于 SDC 的负载显著改善了 PET 材料的 ε_{r}(表 2),改性后的 SDC@PET−x 复合材料能在外部恒定电场下感应出高密度极化偶极子,从而在纤维表面形成范围更广、强度更高的极化电场,并吸引颗粒沉积在纤维表面,实现过滤效率的提升.图 4 的模拟结果进一步证明了上述分析,SDC 的负载使复合纤维的有效感应电场范围更大(图中浅色部分),其电场强度由原 PET 纤维的 1.126×10^{3}V/mm 增强至 1.356×10^{3}V/mm.

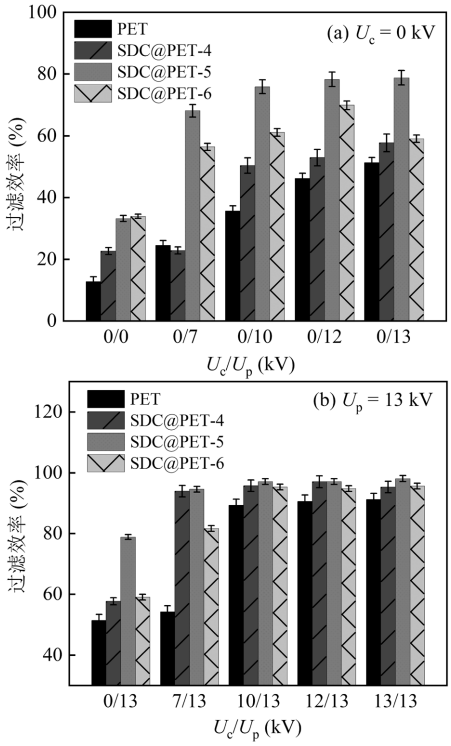


图 3　不同电压下 PET 和 SDC@PET−x 材料的过滤效率

Fig.3　The $\eta_{0.3}$ of PET and SDC@PET−x

此外,不同复合材料对 0.3μm 颗粒的过滤效率也不同,主要受改性时间影响,在同样的 U_{p} 下,过滤效率排序为:SDC@PET−5>SDC@PET−6>SDC@PET−4.这一现象源于两方面因素,原位生长的过程

中,SDC 的负载量与改性时间正相关.相同 U_p 下,SDC 的负载量越少,复合材料能产生的感应电荷就越少,过滤效率就越低.3 种复合材料中,SDC@PET−4 的负载量最少,因此其过滤效率最低.另一方面,通过调节改性时间可以调控 SDC 在纤维表面的形貌(图 5(b)),这种形貌的差异会影响复合材料表面的偶极电荷,从而影响其过滤效率.改性时间为 4 或 6h 时,SDC 以颗粒状均匀分散在纤维表面.而改性时间为 5h 时,SDC 在纤维表面呈现出许多不规则的块状突起,使得 SDC@PET−5 的纤维表面更粗糙.这种粗糙的表面不但增加了容纳颗粒的空间,使其具有更大的容尘量,还有效增强了纤维表面的偶极电荷[32],从而强化了颗粒与纤维间的静电作用,相对介电常数的测试结果(表 2)也显示 SDC@PET−5 具有更高的相对介电常数,这直接证实了上述分析,因此 SDC@PET−5 表现出更高的过滤效率.

表 2 原 PET 与 SDC@PET 复合材料的物理性能参数

Table 2 Physical properties of PET and SDC@PET fibers

材料	ε_r	孔隙率(%)	质量损失(%)
PET	1.240	99.04	−−
SDC@PET−4	1.622	99.00	1.07
SDC@PET−5	6.448	98.99	1.04
SDC@PET−6	5.145	98.98	1.02

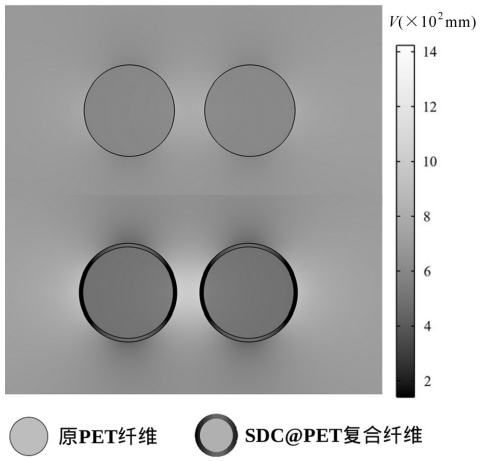


图 4 原 PET 与 SDC@PET 复合纤维在外加电场下的感应电场

Fig.4 Induced polarization electric field in bare PET and SDC@PET fibers under external electric field

图 3(b)显示在固定 U_p = 13kV 的条件下,3 种 SDC@PET 复合材料的过滤效率均达到 95%以上,而纯 PET 材料的过滤效率仅 89.30%.继续增大 U_c 至 13kV,此时 PET 的过滤效率达到峰值,$\eta_{0.3}$ = 91.22%,SDC@PET−4 与 SDC@PET−5 同样达到峰值,$\eta_{0.3}$ 分别为 95.34%和 98.10%,SDC@PET−6 的 $\eta_{0.3}$ 相比 U_c = 12kV 时略有下降,为 95.65%.可见,颗粒荷电对过滤效率的提升效果显著.

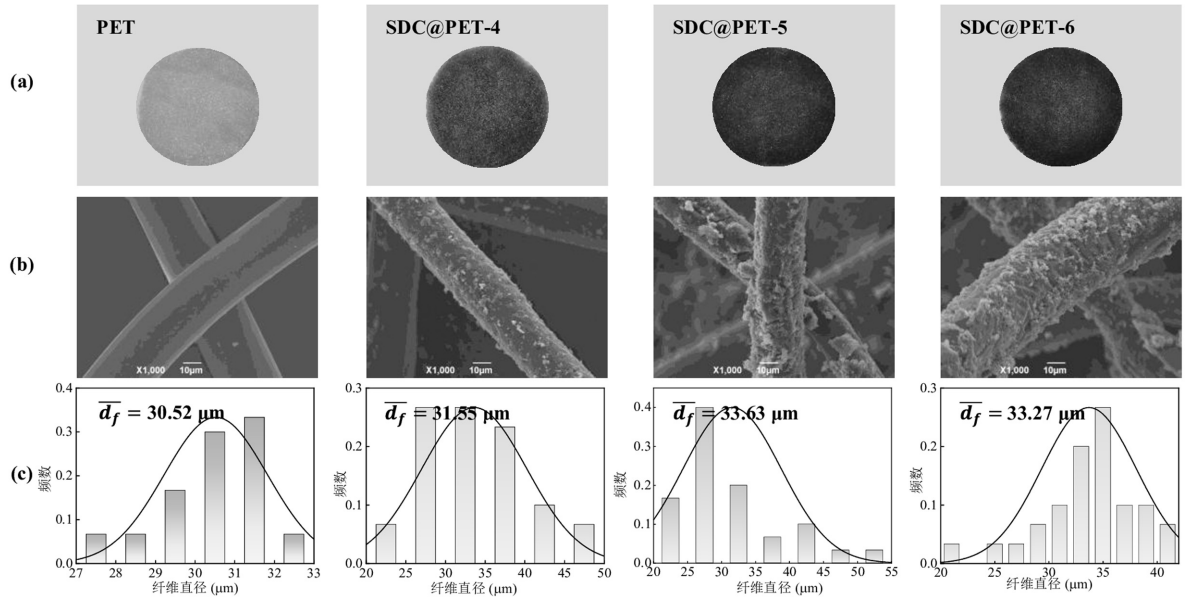


图 5 原 PET 和 SDC@PET 复合纤维的形貌与直径分布

Fig.5 The fiber morphology and diameter distribution of bare PET and SDC@PET

(a) 实物; (b) SEM; (c) 纤维直径分布

2.2 风速对过滤性能的影响

风速是影响过滤性能的重要因素,高风速时颗

粒通常难以被有效捕获,同时过滤阻力也更高.因此选择过滤效率最高时的放电电压和极化电压条件(U_c = U_p = 13kV),研究了风速对过滤效率与过滤阻力的影响.图 6(a)显示,当风速从 0.4m/s 增大至 4m/s 时,PET 的过滤效率从 91.18%降低至 44.20%,SDC@PET−4 从 95.34%降低至 49.85%,SDC@PET−5 从 98.10%降低至 76.63%,SDC@PET−6 从 95.65%降低至 81.18%.特别是原 PET 材料,由于介电性能差,过滤效率受风速影响较大.而随着改性时间增长,风速对 SDC@PET 复合材料的影响逐渐减小.

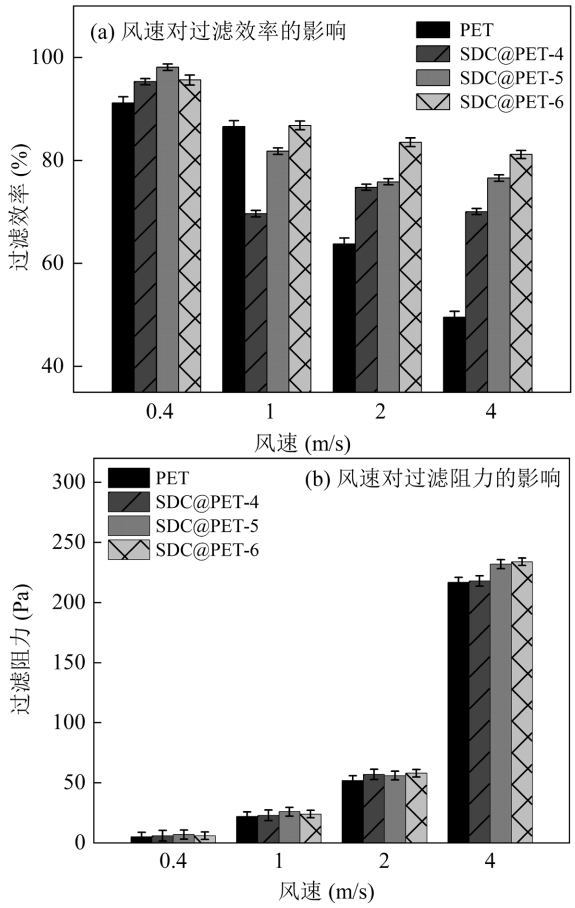


图 6　风速对过滤效率和过滤阻力的影响

Fig.6　Effect of air velocity on filtration efficiency and filtration resistance

如图 6(b)所示,随着风速增大,材料的过滤阻力也随之增大.当速度增加到 1,2,4m/s 时,PET 纤维的过滤阻力从 5Pa 分别增加到 22,52,217Pa.复合材料的过滤阻力同样随之增大,但其在不同风速下的过滤阻力与纯 PET 纤维基本一致,始终保持与粗效纤维相同的低阻特性.这是由于在原位改性过程中,通过调控改性时间制备的复合材料,其平均纤维直径相较原 PET 纤维几乎不变(如图 5(c)).具体而言,通过计算可得,SDC 薄层的平均厚度仅为 1.15μm,约占 PET 纤维孔隙(通常为 10^2~10^3μm 量级[33])的 10^{-3}(即千分之一),因此不会对阻力产生显著影响.此外,SDC 的负载并未对纤维的孔隙率产生显著影响(表 2),这进一步说明了原位改性方法的优越性.

2.3　综合质量因子与性能比较

CQF 是衡量空气过滤器性能的关键指标,其综合反映了过滤效率与能耗水平.如图 7(a)所示,在风速为 0.4m/s、仅施加极化电压时,随着 U_p 逐渐增大,PET 材料与 SDC@PET−x 复合材料的过滤效率逐渐提高,因此 CQF 也随之增大.在相同 U_p 下,复合材料的 CQF 高于原 PET 材料.这得益于 SDC 的负载对材料介电性能的改善,显著提高了复合材料的过滤效率.同时复合材料的过滤阻力与原 PET 材料基本一致(图 6(b)).因此,复合材料在相同条件下表现出更高的 CQF.

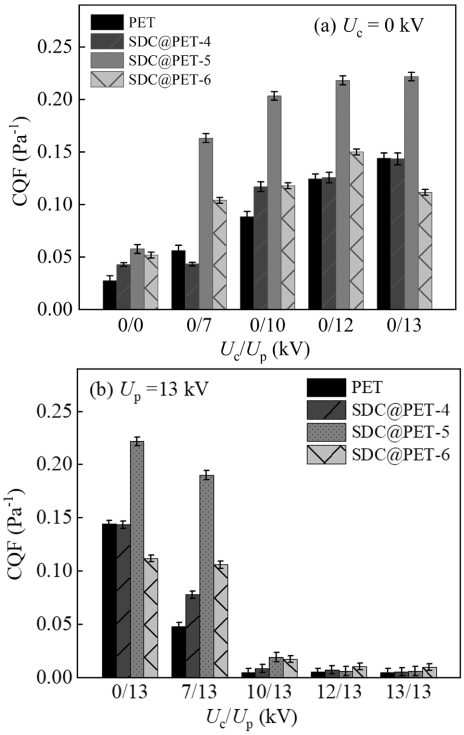


图 7　不同电压下 PET 和 SDC@PET−x 材料的 CQF

Fig.7　The CQF of PET and SDC@PET−x

固定 U_p = 13kV,增大 U_c,如图 7(b)所示,尽管放电电压的增加可以进一步提高材料的过滤效率,但伴随的高能耗导致 CQF 急剧下降.值得注意的是,当 U_p = 13kV、U_c = 7kV 时,复合材料不但具有较高的

CQF,同时也展现出良好的过滤性能.例如,设置 U_p = 13kV、U_c = 7kV,PET 的过滤效率为 88.84,CQF 为 0.04816Pa^{-1},而 SDC@PET−5 的过滤效率高达 94.64 %,CQF 为 0.19049Pa^{-1},显著优于原 PET 材料.这表明,对于介电性能优异的复合材料,无需高放电电压即可实现高效过滤与高 CQF 的平衡.

图 8 表明,在风速 0.4m/s、U_p = 13kV、U_c = 7kV 时,尽管复合材料因其略高的过滤阻力导致风机功耗高于原 PET 材料,但是由于其电场功耗主要取决于放电场,受材料影响较小,故无明显差异.因此,复合材料的总功耗与 PET 材料的总功耗基本一致,这说明 SDC 的负载未对原 PET 材料的功耗产生显著影响.

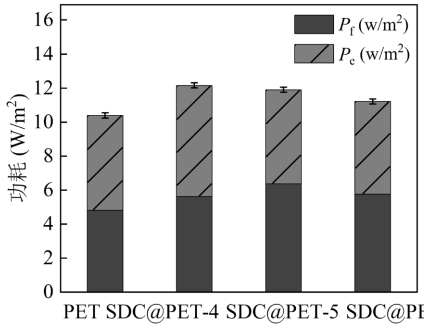


图 8 风速 0.4m/s、U_p = 13kV、U_c = 7kV 时 PET 与 SDC@PET 的功耗

Fig.8 The power consumption of PET and SDC@PET at an air velocity of 0.4m/s with U_p = 13kV and U_c = 7kV

为全面评价 SDC@PET 过滤器的性能,将其对 0.3 μm 颗粒的过滤效果与常见过滤器进行对比.鉴于不同过滤器测试风速各异,引入阻力系数[34]来统一评估阻力水平,阻力系数值越大,表明测试风速越低、过滤阻力越高.阻力系数的计算公式如下:

$$\beta = \frac{\Delta P}{v_{air}} \tag{6}$$

式中:ΔP 为过滤阻力,Pa; v_{air} 为风速,m/s.

如图 9 所示,商用过滤器依赖机械过滤,其高填充密度与微小孔隙结构使过滤阻力较高.驻极体过滤器初始过滤效率高,但其电荷易衰减,过滤后期主要依靠机械作用去除颗粒,因此也具有较高的过滤阻力.持续极化过滤器在外加电场下,利用粗效纤维去除颗粒,具有相对较低的过滤阻力,但其静电作用弱,过滤效果不佳.而本文的 SDC@PET 过滤器同时实现了高过滤效率和低过滤阻力,有效地解决了空气过滤技术中高效低阻难以兼得的难题.表 3 为过滤器的关键测试条件.

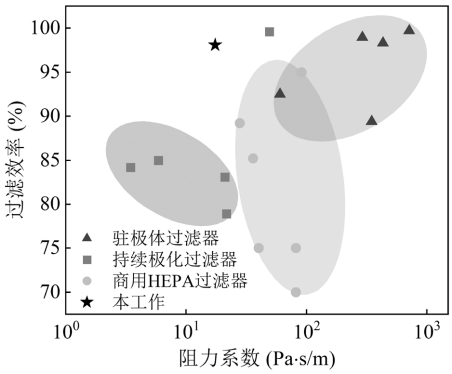


图 9 SDC@PET 过滤器与其他过滤器的过滤性能对比

Fig.9 Comparison of filtration performance between SDC@PET filter and other filters

驻极体过滤器[35-39],持续极化过滤器[40-44],商用过滤器[45-46]

表 3 各过滤器的关键测试条件

Table 3 Key testing conditions for various filters

过滤器类型	污染物类型	风速(m/s)	来源
驻极体过滤器	表皮葡萄球菌和 KCl 颗粒	0.13	[35]
	NaCl 颗粒	0.13	[36]
	NaCl 颗粒	0.05	[37]
	NaCl 颗粒	0.05	[38]
	NaCl 颗粒	0.05	[39]
持续极化过滤器	KCl 颗粒	0.10	[40]
	环境气溶胶	1.00	[41]
	环境气溶胶	0.50	[42]
	环境气溶胶	1.00	[43]
	环境气溶胶	1.10	[44]
商用过滤器	A1 & A2 超细粉尘	2.50	[45]
	燃烧香棒和 NaCl 颗粒	2.50	[46]
	燃烧香棒和 NaCl 颗粒	1.10	[46]
	燃烧香棒和 NaCl 颗粒	1.10	[46]
	燃烧香棒和 NaCl 颗粒	2.00	[46]
	燃烧香棒和 NaCl 颗粒	1.10	[46]
复合过滤材料	燃烧蚊香	0.40	本研究

2.4 长期性性能测试

为系统评估 SDC@PET 复合材料的长期运行稳定性,将综合性能最佳的 SDC@PET−5 复合材料在最佳工况条件下(风速:0.4m/s,电压:U_c = U_p = 13kV),进行了累计 80h (10d)的连续过滤性能测试(图 10).测试结果显示,经过 10d 的连续运行,SDC@PET−5 对目标颗粒物的过滤效率始终稳定保持在 98 %以上(初始过滤效率为 98.10 %,10d 后为 98.03 %).另外,材料的过滤阻力在测试期间仅略微上升(初始阻力约 7Pa,10d 后约 10Pa).这种微小的变化主要源于颗

粒物在纤维表面的持续沉积.

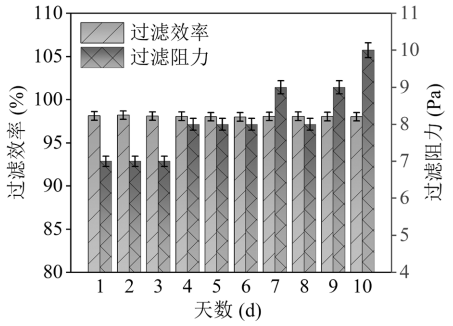


图 10　SDC@PET 复合纤维的长期过滤性能

Fig.10　Long-term filtration performance of SDC@PET fibers

为了评价 SDC 薄层与 PET 纤维的结合牢固度,本文将 SDC@PET 复合材料在 5m/s 的高风速条件下持续冲刷 6h,进行炭层脱落实验,并在实验前后称量样品的质量.通过计算质量损失百分比来量化 SDC 薄层的脱落情况,结果如表 2 所示.在 5m/s 的高风速下持续冲刷 6h,SDC@PET 复合材料的质量未发生显著变化(质量损失约 0.003g),表明原位改性制备的 SDC@PET 复合材料,其 SDC 薄层与 PET 纤维结合牢固,不易脱落.

为了评估过滤材料的可重复使用性,将综合性能最佳的 SDC@PET-5 在室温下使用蒸馏水进行多次洗涤并干燥.每次干燥后,在风速 0.4m/s,最佳电压条件(U_c = U_p =13kV)下,重新测试其过滤效率.如图 11 所示,经过 3 次完整的水洗干燥循环后,该材料的过滤效率仍能稳定保持在 96%以上(第 1 次循环后 98.03%,第 2 次循环后 96.45%,第 3 次循环后 96.90%),能够满足重复使用需求.

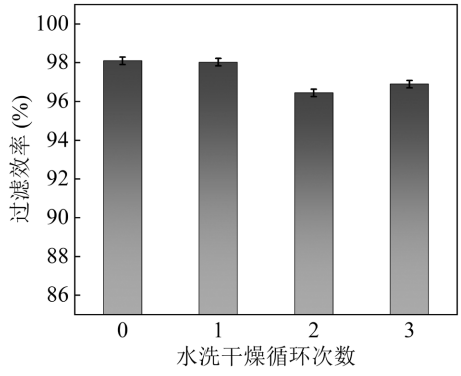


图 11　多次水洗干燥循环后 SDC@PET-5 的过滤效率

Fig.11　Filtration efficiency of SDC@PET-5 fibers after multiple laundry cycles

3　结论

3.1　通过原位改性成功制备了具有优异介电性能的 SDC@PET 复合过滤材料,相比原 PET 材料,复合材料的过滤性能得到显著提升.在 0.4m/s 风速下,负载 SDC 薄层后,材料的过滤效率由 48.97%提升至 96.53%.

3.2　改性实现了纤维表面形貌及 SDC 负载量的精准调控,改性时间为 5h 时,获得的粗糙 SDC 表面能显著增强静电作用,制备的 SDC@PET-5 复合材料过滤效率高达 98.10%.

3.3　蔗糖衍生炭薄层仅占纤维孔隙的的千分之一,因此,复合材料的过滤阻力与原 PET 基本一致,风速从 0.4m/s 增加至 4m/s 时,过滤阻力始终保持在 6 至 236Pa 范围内.

3.4　相比原 PET 材料,经过原位改性的 SDC@PET 复合材料具有更高的 CQF.最佳工况下,SDC@PET-5 不但具有 94.64 %的高过滤效率,同时 CQF 高达 0.19049Pa^{-1}.

3.5　原位改性制备的 SDC@PET 复合材料,其炭层负载牢固、不易脱落,长期性能稳定,且可多次重复使用,在空气净化领域极具应用潜力.

参考文献:

[1] 谢　伟,樊越胜,王　欢,等.基于集总参数模型的室内 $PM_{2.5}$ 浓度预测 [J]. 中国环境科学, 2020,40(2):539-545.
Xie W, Fan Y S, Wang H, et al. Pre-valuation of indoor $PM_{2.5}$ concentration based on lumped parameter model [J]. Chinese Environmental Science, 2020,40(2):539-545.

[2] Xue Y, Wang L, Zhang Y, et al. Air pollution: A culprit of lung cancer [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022,434:128937.

[3] Berg C D, Schiller J H, Boffetta P, et al. Air pollution and lung cancer: A review by international association for the study of lung cancer early detection and screening committee [J]. Journal of Thoracic Oncology, 2023,18(10):1277-1289.

[4] Bian Y, Wang S, Zhang L, et al. Influence of fiber diameter, filter thickness, and packing density on $PM_{2.5}$ removal efficiency of electrospun nanofiber air filters for indoor applications [J]. Building and Environment, 2020,170:106628.

[5] 朱芬芬,王　欢,徐智敏,等.有机固废燃烧烟气中 $PM_{2.5}$ 的过滤比较研究 [J]. 中国环境科学, 2021,41(9):4193-4203.
Zhu F F, Wang H, Xu Z M, et al. Comparative study on filtration of $PM_{2.5}$ in combustion flue gas of organic solid waste [J]. Chinese Environmental Science, 2021,41(9):4193-4203.

[6] Novick V J, Monson P R, Ellison P E. The effect of solid particle mass loading on the pressure drop of HEPA filters [J]. Journal of Aerosol

Science, 1992,23(6):657−665.

[7] Lv D, Zhu M, Jiang Z, et al. Green electrospun nanofibers and their application in air filtration [J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2018,303(12):1800336.

[8] Tian E, Gao Y, Mo J. Experimental studies on electrostatic−force strengthened particulate matter filtration for built environments: Progress and perspectives [J]. Building and Environment, 2023,228: 109782.

[9] 洪 梅,张 铭,马 骁,等.超疏水 PAN/PVDF−HFP/TiO_2 纤维膜及其高温烟尘过滤性能 [J]. 中国环境科学, 2025,45(1):40−49.
Hong M, Zhang M, Ma X, et al. High−temperature soot filtration performance of superhydrophobic PAN/PVDF−HFP/TiO_2 fibrous membranes [J]. Chinese Environmental Science, 2025,45(1):40−49.

[10] El−Aswar E I, Ramadan H, Elkik H, et al. A comprehensive review on preparation, functionalization and recent applications of nanofiber membranes in wastewater treatment [J]. Journal of Environmental Management, 2022,301:113908.

[11] Kim M W, An S, Seok H, et al. Transparent metallized microfibers as recyclable electrostatic air filters with ionization [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020,12(22):25266−25275.

[12] Feng Z, Long Z, Mo J. Experimental and theoretical study of a novel electrostatic enhanced air filter (EEAF) for fine particles [J]. Journal of Aerosol Science, 2016,102:41−54.

[13] 吕 超,杨小川,朱 冕,等.电晕驻极滤袋对荷电微细颗粒物捕集效率 [J]. 中国环境科学, 2024,44(2):663−669.
Lyu C, Yang X C, Zhu M, et al. Collection efficiency of electret bag filter for charged fine particulate matter [J]. Chinese Environmental Science, 2024,44(2):663−669.

[14] Xiang J, Weschler C J, Mo J, et al. Ozone, electrostatic precipitators, and particle number concentrations: Correlations observed in a real office during working hours [J]. Environmental Science & Technology, 2016,50(18):10236−10244.

[15] Kim H J, Han B, Kim Y J, et al. Characteristics of an electrostatic precipitator for submicron particles using non−metallic electrodes and collection plates [J]. Journal of Aerosol Science, 2010,41(11): 987−997.

[16] Wang C S. Electrostatic forces in fibrous filters—a review [J]. Powder Technology, 2001,118(1):166−170.

[17] 赫伟东,郭颖赫,毛 宁,等.极化处理对滤料过滤性能的强化 [J]. 中国环境科学, 2018,38(1):112−119.
He W D, Guo Y H, Mao N, et al. Filtration performance enhancement of filter media by polarization treatment [J]. Chinese Environmental Science, 2018, 38(1):166−170.

[18] Thakur R, Das D, Das A. Electret air filters [J]. Separation & Purification Reviews, 2013,42(2):87−129.

[19] Brown R C, WAKE D, GRAY R, et al. Effect of industrial aerosols on the performance of electrically charged filter material [J]. The Annals of Occupational Hygiene, 1988,32(3):271−294.

[20] Lee J K, Kim S C, Shin J H, et al. Performance evaluation of electrostatically augmented air filters coupled with a corona precharger [J]. Aerosol Science and Technology, 2001,35(4):785−791.

[21] Xu J, Xie Y, Yao Q, et al. Advances in sustainable nano−biochar: Precursors, synthesis methods and applications [J]. Nanoscale, 2024,16(32):15009−15032.

[22] Wei L, Yushin G. Electrical double layer capacitors with sucrose derived carbon electrodes in ionic liquid electrolytes [J]. Journal of Power Sources, 2011,196(8):4072−4079.

[23] Kumar R, Nemala S S, Mallick S, et al. High efficiency dye sensitized solar cell made by carbon derived from sucrose [J]. Optical Materials, 2017,64:401−405.

[24] Appiagyei A B, Asiedua−Ahenkorah L, Bathula C, et al. Rational design of sucrose−derived graphitic carbon coated $MnMoO_4$ for high performance asymmetric supercapacitor [J]. Journal of Energy Storage, 2023,58:106383.

[25] Rashid A B, Haque M, Islam S M M, et al. Nanotechnology−enhanced fiber−reinforced polymer composites: Recent advancements on processing techniques and applications [J]. Heliyon, 2024,10(2): e24692.

[26] Xue J, Han R, Li Y, et al. Advances in multiple reinforcement strategies and applications for silica aerogel [J]. Journal of Materials Science, 2023,58(36):14255−14283.

[27] Henning L M, Abdullayev A, Vakifahmetoglu C, et al. Review on polymeric, inorganic, and composite materials for air filters: From processing to properties [J]. Advanced Energy and Sustainability Research, 2021,2(5):2100005.

[28] Cvelbar U, Walsh J L, Černák M, et al. White paper on the future of plasma science and technology in plastics and textiles [J]. Plasma Processes and Polymers, 2019,16(1):1700228.

[29] Amin N A A M, Mokhter M A, Salamun N, et al. Anti−fouling electrospun organic and inorganic nanofiber membranes for wastewater treatment [J]. South African Journal of Chemical Engineering, 2023,44:302−317.

[30] Tian E, Yu Q, Gao Y, et al. Ultralow resistance two−stage electrostatically assisted air filtration by polydopamine coated PET coarse Filter [J]. Small, 2021,17(33):2102051.

[31] Tian E, Mo J. Toward energy saving and high efficiency through an optimized use of a PET coarse filter: The development of a new electrostatically assisted air filter [J]. Energy and Buildings, 2019, 186:276−283.

[32] Gao Y, Tian E, Mo J. Electrostatic Polydopamine−Interface−Mediated (e−PIM) filters with tuned surface topography and electrical properties for efficient particle capture and ozone removal [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023,441:129821.

[33] Tian E, Mo J, Li X. Electrostatically assisted metal foam coarse filter with small pressure drop for efficient removal of fine particles: Effect of filter medium [J]. Building and Environment, 2018,144:419−426.

[34] Xia T, Bian Y, Zhang L, et al. Relationship between pressure drop and face velocity for electrospun nanofiber filters [J]. Energy and Buildings, 2018,158:987−999.

[35] Sim K M, Park H S, Bae G N, et al. Antimicrobial nanoparticle−coated electrostatic air filter with high filtration efficiency and low pressure drop [J]. Science of The Total Environment, 2015,533:266−274.

[36] Liu J, Zhang H, Gong H, et al. Polyethylene/Polypropylene bicomponent spunbond air filtration materials containing magnesium stearate for efficient fine particle capture [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019,11(43):40592−40601.

[37] Lin S, Wang S, Yang W, et al. Trap−induced dense monocharged perfluorinated electret nanofibers for recyclable multifunctional healthcare mask [J]. ACS Nano, 2021,15(3):5486−5494.

[38] Cheng Y, Wang C, Zhong J, et al. Electrospun polyetherimide electret nonwoven for bi−functional smart face mask [J]. Nano Energy, 2017,34:562−569.

[39] Wang Y, Xu Y, Wang D, et al. Polytetrafluoroethylene/Polyphenylene sulfide needle−Punched triboelectric air filter for efficient particulate matter removal [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(51):48437−48449.

[40] Choi D Y, Jung S H, Song D K, et al. Al−coated conductive fibrous filter with low pressure drop for efficient electrostatic capture of ultrafine particulate pollutants [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017,9(19):16495−16504.

[41] Xia F, Gao Y, Tian E, et al. Fast fabricating cross−linked nanofibers into flameproof metal foam by air−drawn electrospinning for electrostatically assisted particle removal [J]. Separation and Purification Technology, 2021,274:119076.

[42] Mo J, Gu Y, Tian E. Efficiently remove submicron particles by a novel foldable electrostatically assisted air coarse filter [J]. Separation and Purification Technology, 2022,288:120631.

[43] Tian E, Mo J, Li X. Electrostatically assisted metal foam coarse filter with small pressure drop for efficient removal of fine particles: Effect of filter medium [J]. Building and Environment, 2018,144:419−426.

[44] Tian E, Xia F, Wu J, et al. Electrostatic air filtration by multifunctional eielectric heterocaking filters with ultralow pressure drop [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020,12(26):29383−29392.

[45] Lee K S, Hasolli N, Lee J R, et al. Dust loading performance of a non−electret HVAC filter module in the presence of an external electric field [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 250:117204.

[46] Fazli T, Zeng Y, Stephens B. Fine and ultrafine particle removal efficiency of new residential HVAC filters [J]. Indoor Air, 2019, 29(4):656−669.

作者简介：韩武望(2001−),男,甘肃天水人,安徽工业大学硕士研究生,主要从事室内空气净化方面研究.发表论文 3 篇.wuwanghanhww@163.com.