

功能性空气过滤材料研究进展

张明洋^{a,b} 陈芳芳^{a,b} 濮从政^{a,b} 吴红^{a,b} 翁晓焯^{a,b} 赵鹏鑫^{a,b} 李龙鑫^{a,b}
马力^{a,b} 魏祎程^{a,b} 刘呈坤^{a,b}

西安工程大学 a. 纺织科学与工程学院;
b. 功能纺织材料及制品教育部重点实验室, 陕西 西安 710048

摘要:探讨了空气过滤材料在功能化方面的研究进展,介绍了空气过滤领域过滤材料的功能化应用,分析了功能性空气过滤材料的研究现状,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。研究为进一步推动空气过滤技术的发展提供参考。

关键词:空气过滤材料;抗菌;抗静电;吸附;阻燃;纳米颗粒

中图分类号:TQ 340.1

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2024)12-0027-08

Research progress on functional air filtration materials

Zhang Mingyang^{a,b}, Chen Fangfang^{a,b}, Pu Congzheng^{a,b}, Wu Hong^{a,b}, Weng Xiaoxuan^{a,b},
Zhao Pengxin^{a,b}, Li Longxin^{a,b}, Ma Li^{a,b}, Wei Yicheng^{a,b}, Liu Chengkun^{a,b}

a. School of Textile Science and Engineering, b. Key Laboratory of Functional Textile Materials and Products,
Ministry of Education, Xi'an Engineering University, Xi'an 710048, Shaanxi, China

Abstract: The research progress of air filtration materials in functionalization was discussed. The application of filter materials in the field of air filtration was introduced. The current status of these filter materials was analyzed. And the advantages and disadvantages of various types of air filtration materials in complex application environment was summarized. The research can provide references for further promoting the development of air filtration technology.

Keywords: air filtration material; antibacterial; antistatic; adsorption; flame retardance; nanoparticle

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,大气污染防控措施已初见成效,但以PM_{2.5}为代表的大气污染物防控形势依然严峻^[1]。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^[2]。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

基金项目:国家自然科学基金(51503168);陕西省创新能力支持计划项目(2020PT-043)

收稿日期:2024-09-04

作者简介:张明洋,女,2000年生,在读硕士研究生,主要研究方向为静电纺纳米空气过滤材料,1972336976@qq.com

通信作者:刘呈坤,教授,主要研究方向为静电纺纳米纤维,liuchengkun@xpu.edu.cn

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^[3]。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^[4]。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^[5]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($\text{PM}_{2.5}$)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 $\text{PM}_{2.5}$ 的过滤效率为98.8%,对粒径为300 nm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^[6]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1 d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1 d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200 Pa时,过滤材料的空气渗透率达 $1\ 270\ \text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。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^[7]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^[8]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^[9]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88 Pa。

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^[10]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^[11]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 0.15 s,且过滤性能优异,其压降为 319 Pa,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 PM_{2.5} 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^[12]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 1.8 mmol/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^[13]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 60 min 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^[14]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 0.040 min⁻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^[15]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 2.25×10⁻⁴ mg/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^[16]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 5.63 kW/m^2 ,峰值热释放率降至 19.44 kW/m^2 ,热释放总量降至 1.28 MJ/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^[17]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^[18]通过在 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 空气中进行 PAN/PVP/ SnCl_2 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/ SnO_2) 纳米纤维膜。热氧化过程中, Sn^{2+} 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/ SnO_2 纳米纤维膜在室温下对 PM 具有较好的过滤性能,其对 $\text{PM}_{0.3}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 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/ SnO_2 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 6.9 s 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/ SnO_2 纳米纤维膜在波数为 1592 cm^{-1} 和 1390 cm^{-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^[19]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 5 min 的点火而不燃烧。点火 3 min 后,试样没有出现任何的机械损伤,点火 5 min 后仅出现了形态上的变化,对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 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^[20]以壳聚糖(CS)作为框架矩阵、竹活性炭(BAC)作为功能颗粒、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 $\text{PM}_{2.5}$ 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 5.30 kJ/g 和 28.2 W/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^[21]。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 °C,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 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 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^[22]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 °C 下热处理 1 h 后,过滤效率仍高达 99.52%,压降低至 45.16 Pa。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^[23]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 °C 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 °C 时仍表现出优异的热稳定性,且对 $\text{PM}_{2.5}$ 的去除率超过 95%。这得益于 PSA 中 $-\text{SO}_2-$ 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^[24]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 °C 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 154.5 Pa,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^[25]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 °C 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 °C 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%。

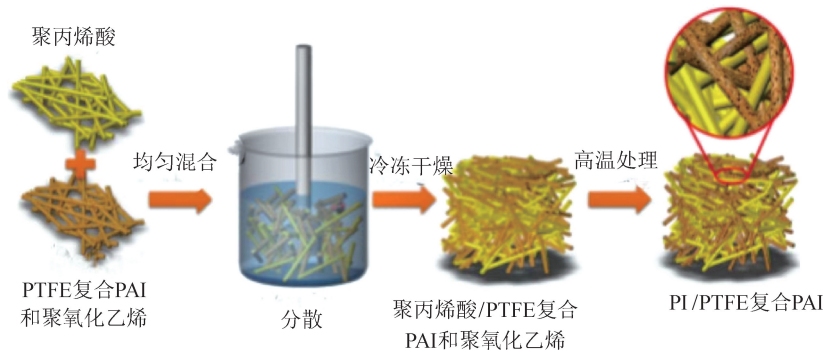


图 1 气凝胶高温过滤材料制备流程

Fig. 1 Preparation process of aerogels high temperature filter materials

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^[26]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 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 下浸泡 24 h。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^[27]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^[28]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^[24]以高性能 PEEK 纤维为原料,制备出在酸、碱及 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 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 24 h 的 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 高温处理后,力学性能均无明显下降,对粒径为 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 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^[29]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 1.49 MJ/m^3 ,弹性模量分别达 0.631、0.742 和 0.935 GPa。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 0.365 g/m^2)、超薄(厚约 $0.5\text{ }\mu\text{m}$)和抗拉强度高(72.8 MPa)等优良的综合性能,能够实现粒径为 $300\sim 500\text{ nm}$ 颗粒 99.999%的过滤效率,且压降低至 92 Pa。Sun 等^[30]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^[31]通过静电纺丝法,利用掺杂压电的 LiNbO_3 (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^[32]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 $\text{PM}_{0.3}$ 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。Mirković 等^[33]采用静电纺 PAN 聚合物作为微孔碳纳米纤维(MCF)的前

驱体,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 $PM_{2.5}$ 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。



期刊采编平台

中国知网下载

参考文献

[1] 刘统强,绳俊,刘琼,等. 5 个典型城市站点 $PM_{2.5}$ 污染与气象要素的关联性分析及应用[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2022, 48(3): 83-92.

[2] 刘来红,朱玲英. 高效空气过滤材料的发展与特点[J]. 产业用纺织品, 2005, 23(4): 6-8.

[3] 赵倩,陈锦苗,邱长玉,等. 口罩用抗菌空气过滤材料的研究进展[J]. 产业用纺织品, 2023, 41(2): 1-8.

[4] 潘芳良,潘志娟. 静电纺纤维制品在空气过滤中的应用[J]. 产业用纺织品, 2011, 29(5): 34-39.

[5] WANG C Y, WU S Y, JIAN M Q, et al. Silk nanofibers as high efficient and lightweight air filter[J]. Nano Research, 2016, 9(9): 2590-2597.

[6] YAKOVLEVA O I, SASHINA E S, NABIEVA I A. Needle punched nonwoven silk waste material with antifungal properties for air filtration[J]. Journal of Natural Fibers, 2022, 19(17): 15367-15376.

[7] GEETHA K, SIVASANGARI D, KIM H S, et al. Electrospun nanofibrous ZnO/PVA/PVP composite films

for efficient antimicrobial face masks [J]. Ceramics International, 2022, 48(19): 29197-29204.

[8] ZHAI F Q, LUO Y Y, ZHANG Y C, et al. Viscosity simulation of glass microfiber and an unusual air filter with high-efficiency antibacterial functionality enabled by ZnO/graphene-modified glass microfiber [J]. ACS Omega, 2022, 7(16): 14211-14221.

[9] CHEN K N, SARI F N I, TING J M. Multifunctional TiO_2 /polyacrylonitrile nanofibers for high efficiency $PM_{2.5}$ capture, UV filter, and anti-bacteria activity[J]. Applied Surface Science, 2019, 493: 157-164.

[10] SHIM E, EOM H, KIM Y. Fabrication of a carbon/polytetrafluoroethylene nanoparticle-coated antistatic bag filter using air-assisted electrospinning[J]. Advanced Powder Technology, 2022, 33(8): 103706.

[11] 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]. Journal of Industrial Textiles, 2023, 53: 259882075.

[12] WANG Z, YUAN X X, CONG S, et al. Color-changing microfiber-based multifunctional window screen for capture and visualized monitoring of NH_3 [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(17): 15065-15072.

[13] DAI Z J, ZHU J, YAN J Q, et al. An advanced dual-function MnO_2 -fabric air filter combining catalytic oxidation of formaldehyde and high-efficiency fine particulate matter removal [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(42): 2001488.

[14] DAI Z J, YU J Y, SI Y. Gradient porous structured MnO_2 -nonwoven composite: a binder-free polymeric air filter for effective room-temperature formaldehyde removal[J]. Polymers, 2022, 14(12): 2504.

[15] ORLANDO R, POLAT M, AFSHARI A, et al. Electrospun nanofibre air filters for particles and gaseous pollutants[J]. Sustainability, 2021, 13(12): 6553.

[16] WANG T, YANG J, YAN J, et al. Preparation of modified ammonium polyphosphate and its application in flame retardant air filter paper[J]. Polymer Bulletin, 2022, 79(5): 3085-3098.

[17] YAN J, YANG J, SUN L L, et al. Preparation, structure and application of styrene-acrylic emulsion/modified ammonium polyphosphate in flame retardant air filter paper[J]. Journal of Industrial Textiles, 2022, 51

- (S): 7223S-7238S.
- [18] KANG Y T, CHEN J H, FENG S S, et al. Efficient removal of high-temperature particulate matters via a heat resistant and flame retardant thermally-oxidized PAN/PVP/SnO₂ nanofiber membrane [J]. Journal of Membrane Science, 2022, 662: 120985.
- [19] ZHAO K Y, HUANG J Y, MAO J J, et al. Charged graphene aerogel filter enabled superior particulate matter removal efficiency in harsh environment [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 395: 125086.
- [20] CHEN J R, ZHOU Z N, MIAO Y, et al. Preparation of CS@BAC composite aerogel with excellent flame-retardant performance, good filtration for PM_{2.5} and strong adsorption for formaldehyde [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 173: 354-365.
- [21] 王璐,于斌,祝成炎,等. 耐高温空气过滤材料的发展现状[J]. 产业用纺织品, 2010, 28(3): 1-5.
- [22] YANG X, PU Y, LI S X, et al. Electrospun polymer composite membrane with superior thermal stability and excellent chemical resistance for high-efficiency PM_{2.5} capture [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(46): 43188-43199.
- [23] YANG X, PU Y, ZHANG Y F, et al. Multifunctional composite membrane based on BaTiO₃@PU/PSA nanofibers for high-efficiency PM_{2.5} removal [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 391: 122254.
- [24] 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.
- [25] LI D W, LIU H Z, SHEN Y, et al. Preparation of PI/PTFE-PAI composite nanofiber aerogels with hierarchical structure and high-filtration efficiency [J]. Nanomaterials, 2020, 10(9): 1806.
- [26] CUO Z X, ZHANG J Y, YU B, et al. Spherical Al₂O₃-coated mullite fibrous ceramic membrane and its applications to high-efficiency gas filtration [J]. Separation and Purification Technology, 2019, 215: 368-377.
- [27] CHEN X J, CHEN X Y, ZENG X, et al. Removal of the homolog tellurium of polonium by SiO₂ nanofiber filter for lead alloy-cooled reactors [J]. Toxics, 2022, 10(6): 275.
- [28] WEI Z M, SU Q, YANG J, et al. High-performance filter membrane composed of oxidized poly(arylene sulfide sulfone) nanofibers for the high-efficiency air filtration [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 417: 126033.
- [29] ZHANG S C, LIU H, YIN X, et al. Tailoring mechanically robust poly(*m*-phenylene isophthalamide) nanofiber/nets for ultrathin high-efficiency air filter [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 40550.
- [30] SUN W H, HUI L F, YANG Q, et al. Nanofiltration filter paper based on multi-walled carbon nanotubes and cellulose filter papers [J]. RSC Advances, 2021, 11(2): 1194-1199.
- [31] WANG Z K, CUI Y H, FENG Y H, et al. A versatile silk fibroin based filtration membrane with enhanced mechanical property, disinfection and biodegradability [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 426: 131947.
- [32] MALLOY J, QUINTANA A, JENSEN C J, et al. Efficient and robust metallic nanowire foams for deep submicrometer particulate filtration [J]. Nano Letters, 2021, 21(7): 2968-2974.
- [33] MIRKOVIĆ M, STOJANOVIĆ D B, MIJAILOVIĆ D, et al. Electrospun polyacrylonitrile fibers incorporated with microporous carbon for improved airborne PM_{2.5} filtration [J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 285: 126103.

欢迎投稿《产业用纺织品》

<https://cyyf.cbpt.cnki.net> techtex@dhu.edu.cn