

改性SiO₂凝胶涂层滤料制备与性能

李晴 钱付平 薛怡 董伟 韩云龙 鲁进利

Preparation and performance of modified SiO₂ gel coating filter material

LI Qing, QIAN Fuping, XUE Zhiyi, DONG Wei, HAN Yunlong, LU Jinli

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201030.005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚对苯二甲酸乙二醇酯滤料超疏水表面的制备及性能

Preparation and properties of polyethylene terephthalate filter material with superhydrophobic surface

复合材料学报. 2020, 37(12): 3017–3025 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200421.003>

聚对苯二甲酸乙二醇酯纳米纤维膜/涤纶针刺毡过滤复合材料的制备及性能

Preparation and characterization of polyethylene terephthalate nanofiber membrane/polyester needle felt composite filters

复合材料学报. 2019, 36(3): 572–577 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180704.002>

电纺制备聚丙烯腈/聚偏氟乙烯复合纤维膜及其空气过滤性能

Preparation of polyacrylonitrile/polyvinylidene fluoride composite fiber membrane by electrospinning and its air filtration performance

复合材料学报. 2021, 38(3): 741–748 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200814.001>

苯基膦酸铈与十溴二苯醚阻燃玻璃纤维增强聚对苯二甲酸乙二醇酯复合材料

Cerium phenylphosphonate and decabromodiphenyl oxide for flame retardancy of glass fiber reinforced poly(ethylene terephthalate) composites

复合材料学报. 2019, 36(10): 2259–2265 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190522.001>

电气石颗粒/聚苯硫醚针刺毡复合过滤材料的过滤性能

Filtration performance of tourmaline particles/polyphenylene sulfide needle composite filter

复合材料学报. 2018, 35(7): 1816–1821 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171115.007>

纳米SiO₂驻极体/聚乳酸复合熔喷非织造材料的制备及性能

Preparation and properties of nano-SiO₂ electret/PLA composite meltblown nonwovens

复合材料学报. 2017, 34(3): 486–493 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160607.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20201030.005

改性 SiO₂ 凝胶涂层滤料制备与性能



李晴, 钱付平*, 薛沁怡, 董伟, 韩云龙, 鲁进利

(安徽工业大学 建筑工程学院, 马鞍山 243032)

摘要: 从滤料表面改性的角度对提高滤料在高湿环境中运行的稳定性进行研究。以聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 滤料为基材、正硅酸乙酯 (TEOS) 为前驱体、甲基三乙氧基硅烷 (MTES) 为低表面能物质, 采用溶胶-凝胶法, 在滤料表面原位生成 SiO₂ 纳米粒子, 制备改性 SiO₂ 凝胶涂层滤料。采用 FESEM-EDS、FTIR 和接触角测量仪分析了 PET 滤料表面化学成分、润湿性能及表面形貌的变化。结果表明: 整理后 PET 滤料表面生成 SiO₂ 纳米粒子, 经 MTES 改性处理后滤料表面布满疏水的甲基基团, 滤料疏水性能显著提高, 其表面水接触角达 154.11°。SiO₂ 颗粒在滤料表面均匀分布, 凝胶聚合物仅在纤维交叉处沉积, 使滤料透气性得以保证, 过滤效率由 97.0595% 增加到 99.2028%, 过滤品质因数由 0.02124 增加到 0.02761, 提升了 30%。

关键词: 聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 纤维滤料; 超疏水特性; 过滤性能; 高湿黏性颗粒; 溶胶-凝胶法
中图分类号: TB322 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2021)08-2489-08

Preparation and performance of modified SiO₂ gel coating filter material

LI Qing, QIAN Fuping*, XUE Zhiyi, DONG Wei, HAN Yunlong, LU Jinli

(School of Architecture and Civil Engineering, Anhui University of Technology, Ma' anshan 243032, China)

Abstract: In this paper, from the perspective of surface modification of filter material, how to improve its stability in high humidity environment has been studied. Using polyethylene terephthalate (PET) filter material as the substrate, ethyl orthosilicate (TEOS) as the precursor, and methyltriethoxysilane (MTES) as the low surface energy substance, the sol-gel method was used to generate in-situ on the surface of the filter material SiO₂ nanoparticles to prepare modified SiO₂ gel-coated filter material. Then, FESEM-EDS, FTIR and a contact angle measuring instrument were used to analyze the changes in the surface chemical composition, wettability and surface morphology of the PET filter material. The results show that SiO₂ nanoparticles are formed on the surface after finishing, and the surface is covered with hydrophobic methyl groups after MTES modification treatment. Thus, its hydrophobic property is significantly improved, and its surface water contact angle reaches 154.11°. At the same time, the SiO₂ particles are evenly distributed on the surface, and the gel polymer is only deposited at the intersection of the fibers, which ensures air permeability, and the filtration efficiency increases from 97.0595% to 99.2028%, and the filtration quality factor increases by 30%, from 0.02124 to 0.02761.

Keywords: polyethylene terephthalate (PET) fiber filter; superhydrophobic property; filter performance; high wet viscosity particles; sol-gel method

中国每天约有 4 000 人死于粉尘污染^[1], 在矿业、钢铁、建材、电力、水泥和制浆等行业的各个过程都会产生大量的粉尘。吸入性粉尘与工人尘肺病和其他呼吸道疾病都与粉尘污染有关。尤

其是在浓度超过标准的情况下, 当排放到大气中时, 它是空气污染的来源^[2]。干式除尘技术, 如袋式或机械式除尘器, 由于其高效、可靠、稳定, 被广泛应用于工业粉尘的控制^[3]。机械式除尘由

收稿日期: 2020-08-13; 录用日期: 2020-10-16; 网络首发时间: 2020-10-30 16:09:58
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201030.005>
基金项目: 安徽省科技重大专项 (18030801109)
通信作者: 钱付平, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为冶金烟气污染控制与超低排放 E-mail: fpingqian@163.com

引用格式: 李晴, 钱付平, 薛沁怡, 等. 改性 SiO₂ 凝胶涂层滤料制备与性能 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(8): 2489-2496.
LI Qing, QIAN Fuping, XUE Zhiyi, et al. Preparation and performance of modified SiO₂ gel coating filter material[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(8): 2489-2496(in Chinese).

于除尘效率低，一般用作初除尘；袋式除尘因结构简单，维护操作方便，除尘效率高而被更多的采用^[4]。但是，我国南方地区颗粒物含水量高^[5]，袋式除尘器在处理湿度较大或黏性较大的含尘气体时，粉尘易黏附在滤袋上，从而升高滤袋的过滤阻力，降低过滤效率，最终导致除尘器的使用寿命下降。因此，针对高湿粉尘研发具有高效、低阻、寿命长等特点的滤料成为袋式除尘器的重要研究方向。

荷叶效应产生的超疏水表面具有疏水、自清洁等优点^[6-7]，其表面通过极强的超疏水性，使水形成近球形，滚动运动收集并去除污垢^[8]。受荷叶独特的抗湿性启发，将微/纳米结构与低表面能材料相结合，可制造超疏水表面^[9-10]。将超疏水技术应用于袋式除尘器滤料织物表面，可显著提高织物的防尘、防潮性能。Hao 等^[11]采用溶胶-凝胶法，通过 SiO₂ 溶胶、交联聚硅氧烷与甲基三乙氧基硅烷 (MTES) 在织物表面的原位缩合反应，对织物进行疏水改性，处理后的织物疏水性明显增强。Kumar 等^[12]选取溶胶-凝胶法制备了以正硅酸乙酯 (TEOS) 为基体，具有良好自清洁性的涂层。但是在过程中使用了氟试剂，氟试剂价格昂贵，并且通常对人类和环境有害^[13]。Wu 等^[14]选用溶胶-凝胶法，以 TEOS 为前驱体，制备了超疏水、超疏油且力学性能好的涂层。张旋宇等^[15]以甲醇为溶剂，甲基三甲氧基硅烷 (MTMS) 为前驱体，通过溶胶-凝胶法制备了疏水 SiO₂ 气凝胶。Latthe 等^[16]将棉织物浸渍于疏水性 SiO₂ 纳米颗粒分散于己烷的悬浊液中，浸渍后的棉织物具有良好的疏水性与自清洁能力。Yang 等^[17]将硅氧烷接枝到棉非织造布的表面，得到一种用于油水分离的超疏水棉非织造布，处理后的非织造布具有良好的疏水性。

在这些工作的启发下，提出一种简单易行的

方法来制作无氟、牢固性好的超疏水涂层滤料。本文采取溶胶-凝胶法，在空隙度高、透气性好、集尘效率高、使用寿命长的聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 滤料^[18]表面原位生成微纳米结构 SiO₂，涂层牢固性强^[19]。采用 MTES 对滤料表面进行低表面能修饰，获得无氟超疏水滤料。探索了超疏水滤料生成过程中，TEOS 与 MTES 不同配比对疏水性能的影响，分析了整理后 PET 滤料表面的化学构成、拒水耐污及过滤性能等的变化规律。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

无水乙醇 (EtOH)，分析纯，购自上海沪试实验室器材股份有限公司，NH₃·H₂O (25%~28%)、正硅酸乙酯 (TEOS)、甲基三乙氧基硅烷 (MTES)，均为分析纯，购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司，乳化剂 (OP-10)，分析纯，购自天津市鼎盛鑫化工有限公司，去离子水为实验室自制，聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 滤料由江苏东方滤袋股份有限公司提供，单位面积质量为 550 g/m²，厚度为 0.436 mm。

1.2 实验方法

采用 EtOH 对 PET 滤料超声清洗 20 min，然后用去离子水清洗至滤料表面呈中性，60℃ 烘干后备用。

将 100 mL EtOH 和 50 mL 去离子水混合，滴入 1 g OP-10，使用 NH₃·H₂O 调节混合溶液 pH 值至 9~10。将清洗过的 PET 滤料置入上述混合溶液中，采用恒压滴液漏斗，以 1 滴/s 的速度滴加 TEOS，在 40℃ 下连续磁搅拌反应 3 h，使 SiO₂ 纳米粒子在滤料表面原位合成。以 0.5 滴/s 的速度在上述溶液中滴加 MTES，在 40℃ 下均匀搅拌 3 h，取出滤料，去离子水洗净，60℃ 温度下干燥 30 min。TEOS、MTES 配比如表 1 所示。

表 1 不同改性 SiO₂ 凝胶的正硅酸乙酯 (TEOS)、甲基三乙氧基硅烷 (MTES) 配比

Table 1 Ratio of ethyl orthosilicate (TEOS) and methyltriethoxysilane (MTES) of different modified SiO₂ gels

Test number	R0	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
TEOS/mol	0	0.022	0.064	0.072	0.022	0.064	0.072	0.022	0.064	0.072
MTES/mol	0	0.042	0.064	0.058	0.064	0.058	0.042	0.058	0.042	0.064

1.3 测试与表征

采用 NANO SEM430 型场发射扫描电子显微镜配备能谱仪 (FESEM-EDS) 配件 (美国 FEI 公司) 对

整理前后的 PET 滤料进行表观形貌分析；利用 Nicolet6700 型傅里叶变换红外光谱仪 (美国尼高力公司) 对整理前后 PET 滤料的化学基团进行分

析, 扫描范围为 4 000~500 cm⁻¹; 运用 JC2000D4G 型接触角测量仪(上海中晨数字设备有限公司)测定整理前后涤纶织物的表面静态水接触角(WCA), 液滴大小为 5 μL, 每组试验选取不同位置测 5 次, 取平均值。借助 SJPM-F002- II 型滤料测试台(苏州苏净仪器自控设备有限公司)对 PET 疏水滤料进行过滤性能测试, 测试流量为 32 L/min, 气溶胶粒径为 0.3 μm。

过滤阻力是流体流经过滤材料时, 过滤材料上下表面处流体的压力差值。一般情况下, 过滤材料的过滤阻力会随着过滤风速的增大而增大。过滤材料的过滤阻力越大, 测试系统所消耗的能量越大。过滤阻力的计算公式为

$$\Delta p=p_2-p_1 \tag{1}$$

式中: Δp 为滤料的过滤阻力 (Pa); p_1 为过滤材料的正面所受流体的压强 (Pa); p_2 为过滤材料的背面所受流体的压强 (Pa)。

过滤阻力随过滤效率的增加而增加, 常用过滤品质因数 Q 来评价滤料的过滤性能, Q 值越大, 滤料越能满足高过滤效率和低过滤阻力的要求, 过滤品质因数 Q 计算公式如下式所示:

$$Q=-\ln(1-\eta)/\Delta p \tag{2}$$

式中: Q 为滤料的过滤品质因数 (Pa⁻¹); η 为滤料的过滤效率 (%)。

2 结果与讨论

2.1 纳米 SiO₂ 粒子的合成

以 TEOS 为前驱体, 采用 Stöber 法制备 SiO₂ 纳米粒子。通过控制 pH 值及反应温度来控制 SiO₂ 的粒径。TEOS 在 NH₃·H₂O 的催化作用下, 分水解和缩合两个步骤来合成 SiO₂ 纳米粒子。第一步, TEOS 在碱性环境下水解生成原硅酸和相应的醇, 第二步, TEOS 与原硅酸或硅酸之间进行缩合形核, 然后反应继续发生, 最终微核生长形成纳米 SiO₂ 粒子^[20], 反应机制如图 1 所示。

2.2 PET 滤料水接触角

当 MTES 为固定量, 改变 TEOS 添加量, MTES/TEOS 对 PET 滤料润湿性能的影响如图 2 所示。可知: 原样的接触角为 129.2°; 经 TEOS 和 MTES 整理后, 其静态接触角(CA)显著增加, 且随着 MTES/TEOS 的增加, 滤料表面接触角逐步增大; 当 MTES/TEOS=1(R2) 时, PET 滤料拒水效果最优, 接触角达到 154.11°, 达到了超疏水的效果; 而当 MTES/

TEOS 继续增加时, 滤料表面接触角有所降低。这主要是由于 TEOS 脱水缩合形成 SiO₂ 颗粒, SiO₂ 内部存在的聚硅氧烷和外部存在的硅烷醇基(Si—OH), 表面能较大, 颗粒倾向于团聚^[21]。经 MTES 对其表面进行修饰后, SiO₂ 颗粒表面官能团发生变化, 同时—CH₃ 基团的引入降低了 SiO₂ 的表面能, 提高了其分散性。当 MTES 用量小时, 接枝到纳米 SiO₂ 颗粒表面量太少, 无法改善纳米 SiO₂ 分散液中的团聚现象。当 MTES 用量过多时, MTES 水解的产物会发生缩合反应, 影响—CH₃ 的接枝效果。

2.3 PET 滤料的表观形貌

图 3 为 R0~R9 PET 滤料的原始质量与改性处理后的质量。可以看出, 改性后 PET 滤料的质量均有所增加, 表明滤料表面有涂层附着。其中 R2 最优, 平均每克滤料附着 0.2085 g 涂层。疏水处理前后 PET 滤料纤维的微观形貌如图 4 所示。从图 4(a0) 可以看出, 未处理过的 PET 滤料表面较光滑平整。图 4(a)~4(i) 为经 R1~R9 改性处理后滤料的微观形貌。可知, 原位生成 SiO₂ 后, 大量的 SiO₂ 微纳米颗粒牢固的附着在纤维上, 经 TEOS 脱水缩合原位生成的 SiO₂ 纳米粒子与 MTES 复合整理后, 在 PET 滤料表面出现均匀的微纳米粗糙结构沉积物, 表明改性凝胶沉积到滤料表面。

2.4 PET 滤料的化学结构

MTES/TEOS 为 1 时处理后的 PET 滤料(R2) 与未处理滤料的 FTIR 图谱如图 5 所示。可以看出, 765 cm⁻¹ 处的吸收峰为 Si—O—Si 的伸缩振动, 这个峰的存在证实了薄膜内部形成了一个网络结构^[22], SiO₂ 颗粒成功附着在滤料表面。与原样相比, 该峰值的相对强度表 SiO₂ 网络相对坚硬^[23]。1 271 cm⁻¹ 处出现 Si—CH₃ 中—CH₃ 的对称变形振动吸收峰, 1 670 cm⁻¹ 处是—OH 的伸缩振动和弯曲振动吸收峰, 经 TEOS、MTES 整理后的滤料与原样相比—OH 减少, 2 970 cm⁻¹ 处是 C—H 键不对称伸缩振动峰, 经疏水处理后的滤料在 2 970 cm⁻¹ 处的 C—H 峰强于未处理的 PET 滤料, 说明 R2 与原样相比增加了带有一 CH₃ 的 SiO₂。

2.5 改性后 PET 滤料表面元素组成

经疏水改性后 PET 滤料的表面 EDS 图像和元素成分含量如图 6 及表 2 所示。PET 纤维的组成元素主要有 C、O 两种元素^[24-25], 由图 6 及表 2 可看出, 改性后的纤维表面含有 C、O 和 Si 三种元素, 说明 SiO₂ 颗粒成功附着在纤维表面上。经过

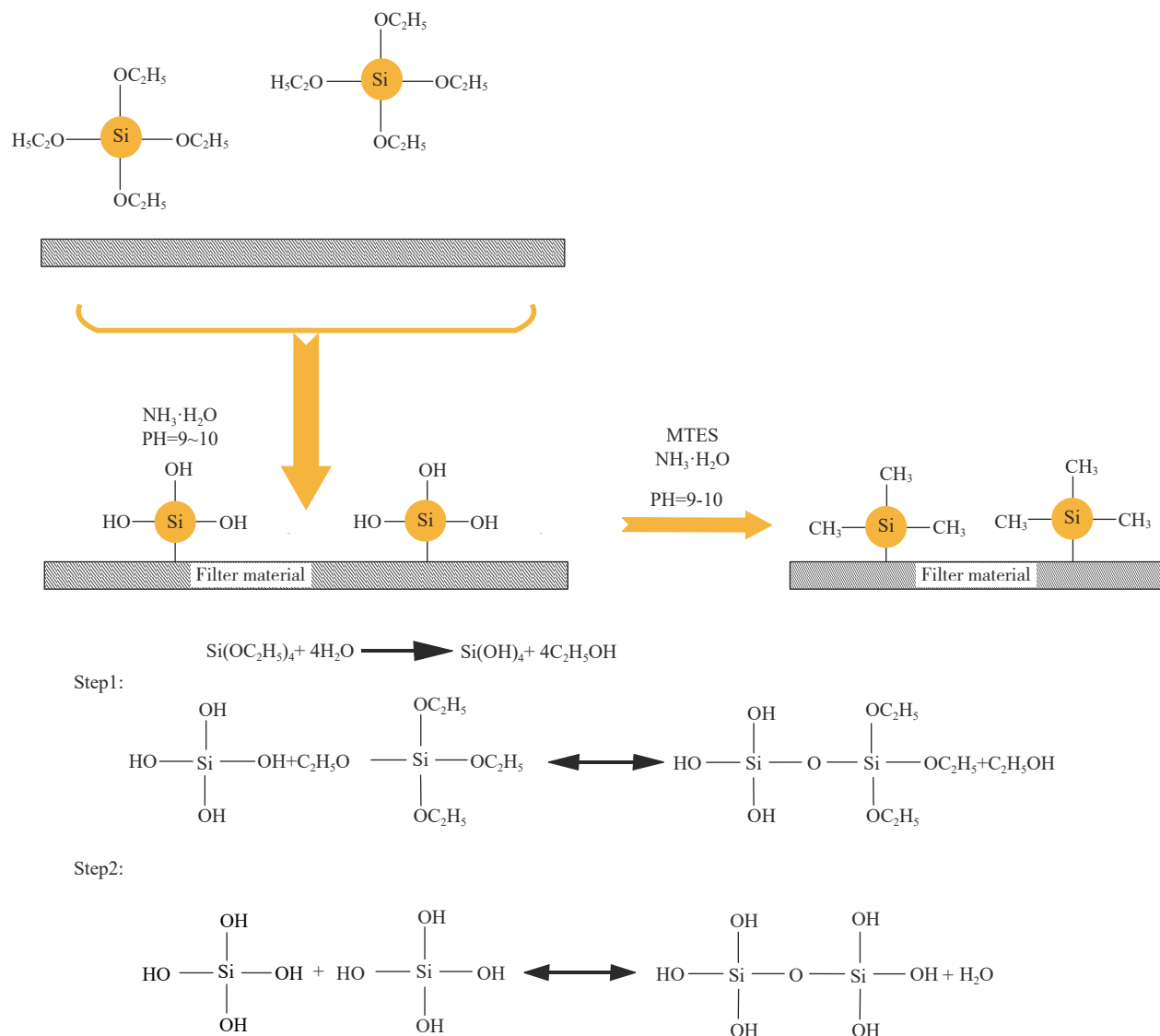


图1 TEOS在碱性环境下水解缩合反应机制

Fig. 1 Schematic diagram of TEOS hydrolysis condensation reaction in alkaline environment

原位生成 SiO_2 纳米颗粒, MTES 低表面能处理后的 PET 滤料表面 C、O 和 Si 这三种元素分布均匀。其中 Si 元素沿纤维表面均匀分布表明滤料被 SiO_2 颗粒覆盖。

2.6 PET 滤料过滤性能

表3为整理后的滤料 R2 和原样相比的过滤性能变化。结果表明, PET 滤料经改性 SiO_2 整理后, 过滤效率从 97.0595% 提升到 99.2028%, 同时滤料的阻力压降从 166 Pa 提升到 175 Pa, 这是由于 SiO_2 纳米粒子附着在纤维滤料上, 一定程度上减小了滤料的孔径。经改性 SiO_2 凝胶整理后, 过滤品质因数从 0.02124 增加到 0.02761, 表明改性 SiO_2 凝胶的整理改进了滤料过滤效率和过滤阻力

的平衡, 在保证过滤阻力较低的前提下提高其过滤效率。

2.7 PET 滤料稳定性

疏水滤料表面的耐磨性由砂纸磨损测试对其进行表征^[26]。图7为静态接触角随磨损循环的变化。根据磨损循环评价对改性后滤料 R2 的超疏水涂层的耐磨性进行分析。将 R2 表面朝下放置在粒度为 $13\ \mu\text{m}$ 的砂纸上, 并将 40 g 的砝码置于滤料上, 沿着横向和纵向推动 10 cm 为一个周期, 在 25 个周期中测量滤料表面的水接触角与磨损周期的变化。

由图7可知, 在 25 次磨损循环后, 滤料的接触角从 154.11° 下降到 150.6° , 仍显示出超疏水性,

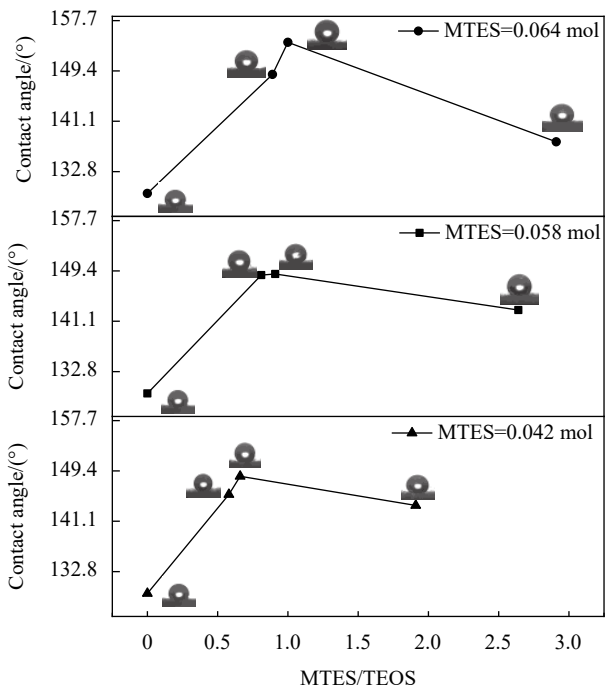


图2 固定 MTES 浓度下 MTES/TEOS 变化时滤料表面的静态接触角

Fig.2 Contact angle on the filter surface when MTES/TEOS changes under fixed MTES concentration

这表明该涂层表面具有良好的耐磨损性。

疏水 PET 滤料在实际袋式除尘器的使用中，通常在恶劣的环境中工作。本文采用 HCl 和 NaOH 调节溶液的 pH 值，将改性后的 PET 滤料 R2 浸入不同 pH 值 (pH=1, 3, 5, 7, 9, 11, 13) 的水溶液中 24 h，水洗烘干后进行接触角测试^[27]。以分析处理后滤料的化学稳定性。

由图 8 可知，当 pH=3~11，其接触角在 150° 以上小范围波动，均达到超疏水要求；pH=13 时，

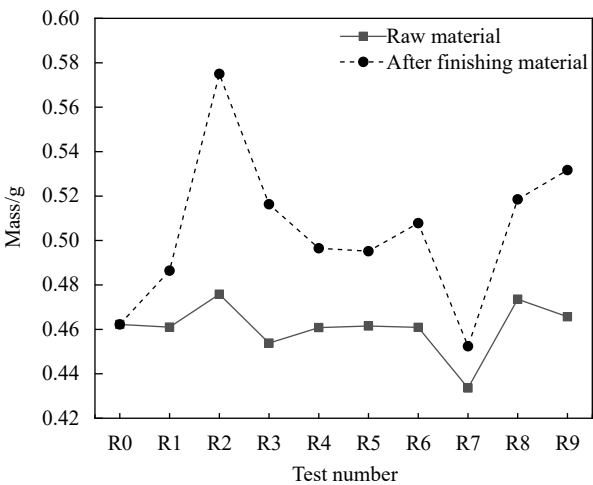


图3 滤料的原始质量与改性处理后的质量

Fig.3 Raw and after modification mass of the filter material

滤料的接触角轻微下降至 148.4°；在 pH=1 时，接触角为 151.59°，表明处理后的涂层具有优异的耐酸性及良好的耐碱性。

3 结论

以正硅酸乙酯 (TEOS) 为前驱体，甲基三乙氧基硅烷 (MTES) 为改性剂，通过溶胶-凝胶的方法制备疏水 SiO₂ 涂层。TEOS 在 NH₃·H₂O 催化下发生水解-缩合反应，在滤料表面原位生长 SiO₂ 颗粒，再使用 MTES 对其进行低表面能修饰，获得牢固黏附的无氟超疏水聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 滤料。探究 MTES 与 TEOS 的用量对疏水性能 and 过滤性能的影响，经 FTIR、SEM、EDS、接触角测量仪和滤料测试系统对改性后 PET 滤料表面化学成分、形貌的变化、润湿性能和过滤性能进行了详细探究。

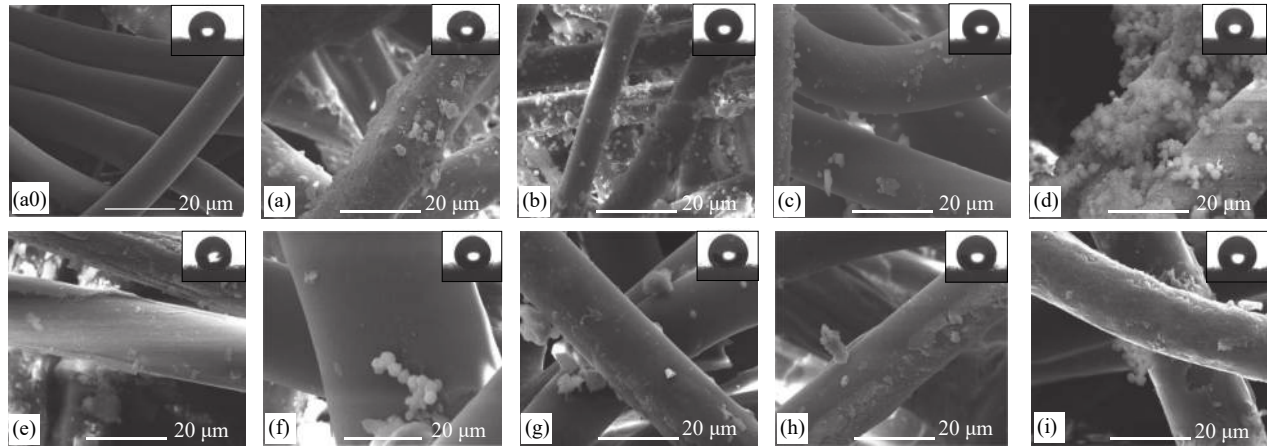


图4 不同改性剂添加量 (R0~R9) 时纤维滤料的 SEM 图像

Fig.4 SEM images of fiber filter with different modifier addition amounts (R0~R9)

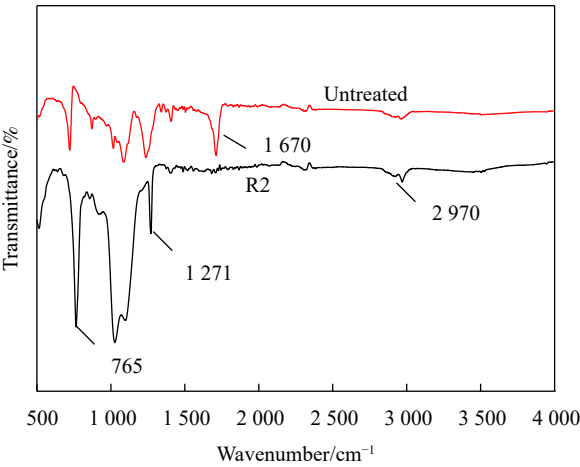


图5 改性前后滤料的 FTIR 图谱

Fig. 5 FTIR spectra of filter material before and after modification

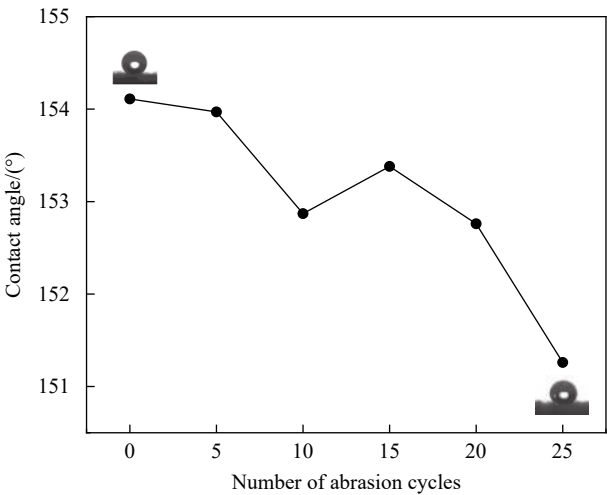


图7 滤料静态接触角随磨损循环的变化

Fig. 7 Contact angle of filter changes with abrasion cycles

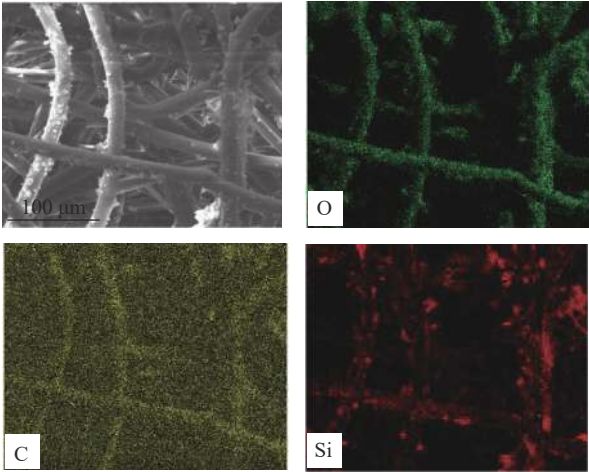


图6 改性后滤料表面的 EDS 图像

Fig. 6 EDS images of modified filter material surface

表 2 改性后滤料表面主要元素含量

Table 2 Content of main elements on the surface of modified filter material

Element	C	O	Si
Content/wt%	82.05	16.71	1.24

表 3 改性前后滤料过滤性能变化

Table 3 Change of filter performance before and after modification

	Untreated PET filter material	R2
Filtration efficiency/%	97.0595	99.2028
Filter resistance/Pa	166	175
Quality factor	0.02124	0.02761

(1) 经 SEM、EDS 分析：SiO₂ 纳米颗粒均匀分布在滤料表面，在纤维滤料表面沉积，形成微纳级粗糙结构；经 FTIR 分析：MTES 低表面能修饰

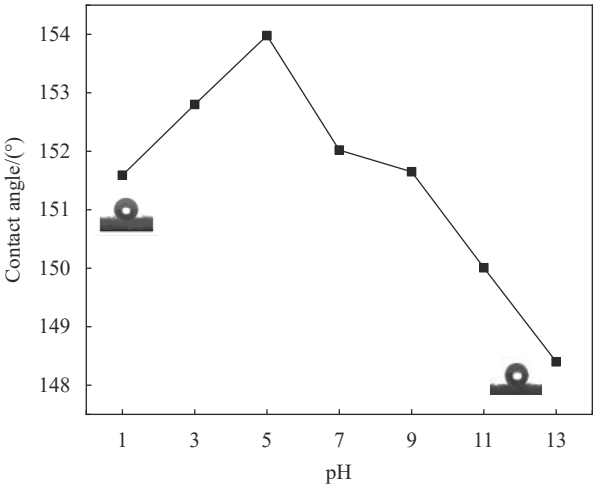


图8 滤料静态接触角随不同 pH 值的变化

Fig. 8 Contact angle of filter changes with different pH values

后的 PET 滤料表面布满起到疏水作用的—CH₃ 基团，两者共同作用下赋予滤料表面超疏水性能。

(2) 疏水整理的最佳 MTES、TEOS 添加量如下：MTES 为 0.064 mol，TEOS 为 0.064 mol，整理后每克滤料附着了 0.2085 g 疏水涂层，接触角达到 154.11°，得到超疏水滤料。

(3) 由滤料测试系统在 32 L/min 的过滤风速下对 0.3 μm 的颗粒进行测试可知：改性 SiO₂ 纳米粒子均匀分布在纤维表面，过滤效率由 97.1595% 提升到 99.2028%，过滤阻力略有增加，但过滤品质因数由 0.02124 增加到 0.02761，提升了 30%，改善了滤料的过滤性能。

(4) 通过砂纸的磨损循环评价 R2 的耐磨性，经 25 次磨损循环后其疏水角仍达到 150.6°，表现

出良好的耐磨性; 将 R2 浸入不同 pH 值 (pH=1, 3, 5, 7, 9, 11, 13) 的水溶液中 24 h, pH=13 时, 滤料的接触角轻微下降至 148.4°, 其余接触角在 150° 以上小范围波动, 均达到超疏水要求, 表明处理后的涂层具有优异的耐酸性及良好的耐碱性。

参考文献:

- [1] CAO B W, WANG S L, DONG W, et al. Investigation of the filtration performance for fibrous media: Coupling of a semi-analytical model with CFD on Voronoi-based micro-structure[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 251: 117364.
- [2] LI J L, ZHOU F B, LI S H. Experimental study on the dust filtration performance with participation of water mist[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, 109: 357-364.
- [3] ANDERSEN B O, NIELSEN N F, WALTHER J H. Numerical and experimental study of pulse jet cleaning in fabric filters[J]. *Powder Technology*, 2016, 291: 284-298.
- [4] FINDANIS N, SOUTHAM M. Control and management of particulate emissions using improved reverse pulse-jet cleaning systems[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 49: 228-238.
- [5] 陈路敏, 钱付平, 叶蒙蒙, 等. 脉冲喷吹清灰高湿粉尘剥落的数学模型研究[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(S2): 683-690.
CHEN L M, QIAN F P, YE M M, et al. Research on mathematical model of high humidity dust spalling by pulse jet cleaning[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S2): 683-690(in Chinese).
- [6] SRIRAMULU D, REED E L, ANNAMALAI M, et al. Synthesis and characterization of superhydrophobic, self-cleaning NIR-reflective silica nanoparticles[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 35593.
- [7] CAO C Y, GE M Z, HUANG J Y, et al. Robust fluorine-free superhydrophobic PDMS-ormosil@fabrics for highly effective self-cleaning and efficient oil-water separation[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2016, 4(31): 12179-12187.
- [8] LU Y, SATHASIVAM S, SONG J, et al. Robust self-cleaning surfaces that function when exposed to either air or oil[J]. *Science*, 2015, 347(6226): 1123-1135.
- [9] SAM E K, SAM D K, LV X, et al. Recent development in the fabrication of self-healing superhydrophobic surfaces[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 373: 531-546.
- [10] LU S, ZHAO Y, HU X, et al. Biomimetic fabrication of micron/nano-meter assembled superhydrophobic polymer fiber fabrics for oil/water separation[J]. *Materials Letters*, 2019, 262: 127152.
- [11] HAO L F, GAO T T, XU W, et al. Preparation of crosslinked polysiloxane/SiO₂ nanocomposite via in-situ condensation and its surface modification on cotton fabrics[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 371: 281-288.
- [12] KUMAR D, WU X, FU Q T, et al. Development of durable self-cleaning coatings using organic inorganic hybrid sol-gel method[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 344: 205-212.
- [13] KONG X, ZHU C, LV J, et al. Robust fluorine free superhydrophobic coating on polyester fabrics by spraying commercial adhesive and hydrophobic fumed SiO₂ nanoparticles[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 138: 105342.
- [14] WU X H, FU Q T, KUMAR D, et al. Mechanically robust superhydrophobic and superhydrophobic coatings derived by sol-gel method[J]. *Materials and Design*, 2016, 89: 1302-1309.
- [15] 张旋宇, 徐丽慧, 沈勇, 等. 疏水SiO₂气凝胶的常压制备及其在棉织物上的应用研究[J]. *功能材料*, 2018, 49(3): 3118-3123.
ZHANG X Y, XU L H, SHEN Y, et al. Preparation of hydrophobic SiO₂ aerogel at atmospheric pressure and its application on cotton fabrics[J]. *Functional Materials*, 2018, 49(3): 3118-3123(in Chinese).
- [16] LATTHE S S, SUTAR R S, KODAG V S, et al. Self-cleaning superhydrophobic coatings: Potential industrial applications[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 128: 52-58.
- [17] YANG J, PU Y, HE H, et al. Superhydrophobic cotton non-woven fabrics through atmospheric plasma treatment for applications in self-cleaning and oil-water separation[J]. *Cellulose*, 2019, 26(12): 7507-7522.
- [18] 郭颖赫, 赫伟东, 柳静献. 聚对苯二甲酸乙二醇酯纳米纤维膜/涤纶针刺毡过滤复合材料的制备及性能[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(3): 572-577.
GUO Y H, HE W D, LIU J X. preparation and properties of polyethylene terephthalate nanofiber membrane/polyester needled felt filter composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(3): 572-577(in Chinese).
- [19] 徐林, 任煜, 张红阳, 等. 涤纶织物表面TiO₂/氟硅烷超疏水层构筑及其性能[J]. *纺织学报*, 2019, 40(12): 86-92.
XU L, REN Y, ZHANG H Y, et al. Construction and performance of TiO₂/fluorosilane superhydrophobic layer on polyester fabric surface[J]. *Journal of Textile Research*, 2019, 40(12): 86-92(in Chinese).
- [20] SUN H X, XU Y Y, ZHOU Y Y, et al. Preparation of superhydrophobic nanocomposite fiber membranes by electrospinning poly(vinylidene fluoride)/silane coupling agent modified SiO₂ nanoparticles[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, 134(13): 44501.

- [21] 欧阳舛舛, 李双双, 石琢, 等. 改性纳米SiO₂/硅橡胶复合材料的制备及性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36(7): 1700-1707.
OUYANG Z M, LI S S, SHI Z, et al. Preparation and properties of modified nano-SiO₂/silicone rubber composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(7): 1700-1707(in Chinese).
- [22] RAO A V, GURAV A B, LATTHE S S, et al. Water repellent porous silica films by sol-gel dip coating method[J]. [Journal of Colloid and Interface Science](#), 2010, 352(1): 30-35.
- [23] HA T, CHOI S G, JUNG S, et al. The improvement of mechanical and dielectric properties of ordered mesoporous silica film using TEOS-MTES mixed silica precursor[J]. [Ceramics International](#), 2008, 34(4): 947-951.
- [24] 罗文. 超浸润空气过滤织物的制备及其性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
LUO W. Preparation and performance study of super-soaked air filter fabric[D]. Nanjing: Southeast University, 2018(in Chinese).
- [25] 董伟, 钱付平, 李晴, 等. 聚对苯二甲酸乙二醇酯滤料超疏水表面的制备及性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(12): 3017-3025.
DONG W, QIAN F P, LI Q, et al. Preparation and properties of polyethylene terephthalate filter material superhydrophobic surface [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(12): 3017-3025(in Chinese).
- [26] 齐春红. 基于低表面能二氧化硅超疏水表面的制备及其防结冰性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
QI C H. Study on the preparation and anti-icing performance of low surface energy silica superhydrophobic surface[D]. Taiyuan: North China University, 2020(in Chinese).
- [27] 李晓霞. 超疏水二氧化硅溶胶的制备及性能应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
LI X X. Preparation and Application of superhydrophobic silica sol[D]. Ji'nan: Shandong University, 2020(in Chinese).