

不同质量比聚苯硫醚/聚四氟乙烯 复合滤料的过滤性能

郑智宏^{1,2,3}

1. 厦门中创环保科技股份有限公司, 福建 厦门 361101;
2. 福建省袋滤材料与技术重点实验室, 福建 厦门 361101;
3. 厦门市袋滤材料与技术重点实验室, 福建 厦门 361101

摘要:聚苯硫醚/聚四氟乙烯(PPS/PTFE)复合滤料是目前燃煤电厂电袋/袋式除尘器广泛应用的耐高温滤料之一。制备 4 种不同 PPS 与 PTFE 纤维质量比的 PPS/PTFE 复合滤料, 并对其基本物理性能表面形貌、力学性能、缠结系数及过滤性能进行测试分析。研究表明, 随着 PTFE 纤维质量分数的增大, PPS/PTFE 复合滤料的厚度、透气性及横向断裂强力呈下降趋势, 而横向断裂伸长率则呈上升趋势。相对于 PPS 滤料, PPS/PTFE 复合滤料的过滤性能有所提升, 对微细粉尘的捕集效率明显提高。研究结果为燃煤电厂微细粉尘的超低排放提供依据和参考。

关键词:复合滤料; 聚苯硫醚(PPS); 聚四氟乙烯(PTFE); 过滤性能; 力学性能

中图分类号: TS 176

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2024)10-0039-07

Filtration performance of polyphenylene sulfide/polytetrafluoroethylene composite filters with different mass ratios

Zheng Zhihong^{1,2,3}

1. Xiamen Zhongchuang Environmental Protection Technology Co., Ltd., Xiamen 361101, Fujian, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Bag Filter Materials and Technology, Xiamen 361101, Fujian, China;
3. Xiamen Key Laboratory of Bag Filter Materials and Technology, Xiamen 361101, Fujian, China

Abstract: Polyphenylene sulfide/polytetrafluoroethylene (PPS/PTFE) composite filter is one of the high temperature resistant filters that widely used in electrostatic-fabric integrated precipitator/bag dust collector in coal-fired power plants. Four kinds of PPS/PTFE composite filters with different mass ratios of PPS to PTFE fibers were prepared, and their basic physical properties, surface morphology, mechanical properties, entangling coefficient and filtration performance were tested and analyzed. The results showed that with the increase of PTFE mass fraction, the thickness, permeability and cross direction breaking strength of PPS/PTFE composite filters decreased, while the cross direction breaking elongation increased. Compared with PPS filters, the filtration performance of PPS/PTFE composite filters was improved, and the capture efficiency to fine dust was significantly improved. The research results can provide basis and reference for ultra-low fine

收稿日期: 2024-07-23

作者简介: 郑智宏, 男, 1984 年生, 高级工程师, 主要从事过滤材料的研发及测试工作, 328936042@qq.com

dust emission in coal-fired power plants.

Keywords: composite filter; polyphenylene sulfide (PPS); polytetrafluoroethylene (PTFE); filtration performance; mechanical property

随着全球工业化和城市化的快速发展,由火力发电、钢铁冶炼及水泥制造等行业产生的大气污染物造成的环境污染问题不容忽视,尤其是细颗粒物(PM)中空气动力学当量直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物($\text{PM}_{2.5}$),对人类健康的危害较大^[1-5]。为有效改善空气质量,减少工业炉窑中 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放,提高除尘器对 $\text{PM}_{2.5}$ 的过滤效率至关重要^[6-7]。

目前,聚苯硫醚/聚四氟乙烯(PPS/PTFE)复合滤料是燃煤电厂电袋/袋式除尘器广泛应用的耐高温滤料之一。已有许多学者针对PPS/PTFE复合滤料展开诸多研究^[8-10]。翁美玲等^[11]设计制备了3种不同聚苯硫醚(PPS)与聚四氟乙烯(PTFE)纤维质量比的PPS/PTFE水刺复合滤料,并通过静态过滤效率测试发现,不同质量比的PPS/PTFE复合滤料的过滤性能非常接近,但PTFE质量分数为50%时滤料的性能表现最佳,出口粉尘质量浓度为 8.02 mg/m^3 。张楠等^[12]探究了水刺工艺参数及面层组分对PPS/PTFE复合滤料力学性能及过滤性能的影响,发现随着PTFE纤维质量分数增大,复合滤料的透气率、断裂强力及孔径下降,过滤效率则明显提高。目前的研究大多聚焦于PPS/PTFE复合滤料制备工艺的探讨与性能分析方面,针对不同质量比PPS/PTFE复合滤料对 $\text{PM}_{2.5}$ 过滤效率的分析还有所

欠缺^[13-15]。基于此,本文以PPS和PTFE纤维为原料,制备4种不同纤维质量比的PPS/PTFE复合滤料,通过分析滤料的孔径大小、力学性能及缠结系数,探讨不同质量比PPS/PTFE复合滤料对 $\text{PM}_{2.5}$ 过滤效率的影响。研究旨在为燃煤电厂实现污染物超低排放的滤料选型和工程应用提供依据和参考。

1 试验部分

1.1 PPS/PTFE复合滤料的制备

1.1.1 材料

PPS纤维,长51 mm,线密度为2.2 dtex;PTFE纤维,长52 mm,线密度为4.4~8.8 dtex;PTFE基布,面密度为 110 g/m^2 ,纬向密度和经向密度分别为60根/(10 cm)和140根/(10 cm)。

1.1.2 制备工艺

制备基布为PTFE织物、面层为不同纤维质量比PPS/PTFE混纺物的PPS/PTFE复合滤料。按面层PPS与PTFE纤维质量比分别为100:0、20:80、30:70和50:50制备PPS/PTFE复合滤料,并依次命名为P-0、P-20、P-30和P-50。

按图1所示的工艺流程制备PPS/PTFE复合滤料。

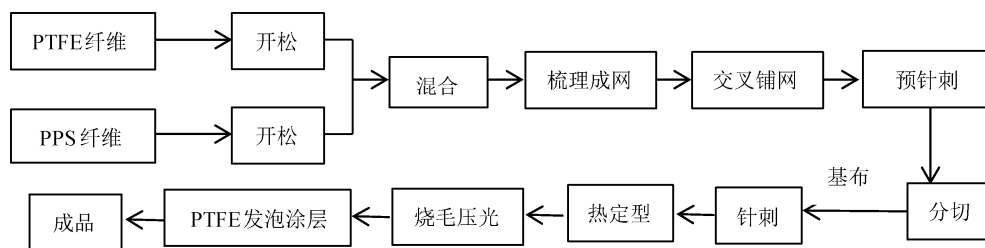


图1 PPS/PTFE复合滤料制备工艺流程

Fig. 1 Preparation process of PPS/PTFE composite filters

1.2 PPS/PTFE复合滤料的规格参数与性能测试

1.2.1 面密度

按照GB/T 24218.1—2009的规定,裁取面积为 100 cm^2 的圆形试样5块,采用BSM420.3型电子天平称量其质量,结果取平均值,再计算滤料面密度。

1.2.2 透气率

按照GB/T 5453—1997的规定,试验面积为 50 cm^2 ,压差为200 Pa,试验环境温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $(65 \pm 4)\%$ 。采用YG-461E-Ⅲ型全自动透气量仪测试PPS/PTFE复合滤料试样上10个不

同位置的透气率,结果取平均值。

1.2.3 厚度

按照 GB/T 3820—1997 的规定,测试滤料试样的厚度。测试时设定砝码压力为 0.5 kPa,压脚面积为 2 000 mm²,试验环境温度为 (20±2)℃、相对湿度为 (65±4)%,测试试样上 10 个不同位置的厚度,结果取平均值。

1.2.4 表面微观形貌

采用 G4 Pure 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察 PPS/PTFE 复合滤料试样的表面微观形貌。

1.2.5 拉伸性能

按照 GB/T 24218.3—2010 的规定,沿纵向 (MD) 和横向 (CD) 截取规格为 50 mm×350 mm 的试样各 5 条。采用 YG026D-II 型电子织物强力机进行试样的拉伸性能测试,设置夹持长度为 200 mm,有效宽度为 50 mm,拉伸速度为 100 mm/min,测试结果取平均值。

1.2.6 缠结性能

采用缠结系数评价 PPS/PTFE 复合滤料的缠结性能^[16-17]。缠结系数的计算式如式(1)所示。

$$C = \frac{\varepsilon_{MD} + \varepsilon_{CD}}{G} \quad (1)$$

式中: C 为缠结系数, $N \cdot m^2/g$; ε_{MD} 为滤料纵向断裂强力, N ; ε_{CD} 为滤料横向断裂强力, N ; G 为滤料的面密度, g/m^2 。

1.2.7 孔径分布

测试前,采用表面张力为 16 mN/m 的润湿剂 GQ-16 对 PPS/PTFE 复合滤料试样进行润湿,然后采用 PSDA-20 型孔径分析仪测试其孔径及分布。

1.2.8 动态过滤性能

采用德国 FILTEq 公司的 1-AT 型 VDI 滤料模

拟测试装置(图 2)测试和评估 PPS/PTFE 复合滤料试样的动态过滤性能。

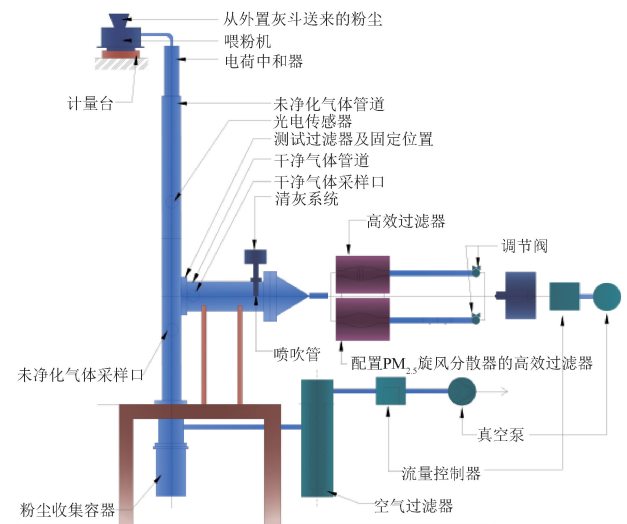


图 2 VDI 滤料模拟测试装置
Fig. 2 VDI filter simulation test device

滤料的过滤性能主要采用残余压差、清灰周期和粉尘排放浓度等指标衡量^[18-19]。由于 GB/T 6719—2009 未涉及 PM_{2.5} 过滤效率的滤料动态过滤性能检测,因此,本文采用美国 ASTM 6830 标准对 PPS/PTFE 复合滤料进行动态过滤性能分析。具体试验参数设置如表 1 所示。试验步骤包括下述 3 个阶段。

(1) 试运行阶段:滤料经过滤老化 10 000 次,每次间隔 5 s 进行强制清灰;

(2) 恢复阶段:30 次定压过滤循环,当滤料压差上升至 1 000 Pa 时,设备系统设定脉冲阀自动开启并清灰;

(3) 性能测试阶段:设定试验时间为 6 h,当滤料压差上升至 1 000 Pa 时,设备系统设定脉冲阀自动开启并清灰。

表 1 PPS/PTFE 复合滤料动态过滤性能测试参数

Tab. 1 Test parameters of PPS/PTFE composite filters for dynamic filtration performance

测试参数	粉尘名称	粉尘质量浓度/ (g·m ⁻³)	过滤风速/ (m·h ⁻¹)	清灰时滤料 压差/Pa	喷吹压力/ MPa	脉冲阀 开启时间/ms
数值	Pural NF	18.4±3.6	120±6	1 000 ±12	0.50±0.03	50±5

2 结果与讨论

2.1 基本物理性能

制备的 4 种 PPS/PTFE 复合滤料试样的基本物

理性测试结果如表 2 所示。可以看出,4 种复合滤料的基本物理性能存在明显差异。在试样面密度相近的条件下,随着 PTFE 纤维质量分数的增大,试样的厚度呈现出线性减小的趋势,这主要是由于 PTFE 纤维的密度大于 PPS 纤维,因此 PTFE 纤维质

量分数的增大导致面密度相近的情况下 PPS/PTFE 复合滤料厚度减小。滤料 P-50 的 PTFE 纤维质量分数最大,厚度最小。随着 PTFE 纤维质量分数的增大,4 种 PPS/PTFE 复合滤料试样的透气率未呈现出明显的变化规律。

表 2 4 种滤料试样的基本物理性能

Tab.2 Basic physical properties of four kinds of filter samples

试样编号	面密度/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	透气率/ ($\text{L}\cdot\text{dm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$)	厚度/ mm
P-0	591.6±10.5	145.8±5.4	1.97±0.06
P-20	600.4±10.0	129.6±5.2	1.96±0.04
P-30	593.1±13.4	137.4±7.3	1.83±0.07
P-50	596.8±11.2	127.0±17.7	1.63±0.05

2.2 表面微观形貌

4 种滤料的表面微观形貌 SEM 图如图 3 所示。本文制备的 4 种滤料均经过烧毛压光和 PTFE 发泡涂层处理,从而确保纤维表面均涂覆有 PTFE 涂层。由图 3 可以看出,PPS 纤维呈圆柱状^[20-21],其表面光滑,部分由于烧毛压光工艺的影响而局部呈融结点状结构;PTFE 纤维因采用膜裂法生产而呈扁平状^[22]。由图 3d)可观察到,PTFE 纤维与 PPS 纤维交错缠绕抱合,形成了含大量孔洞的结构。针刺过程中,部分 PTFE 纤维受刺针的影响而发生原纤化,见图 3 箭头示意处。这种原纤化的 PTFE 纤维可形成更为紧密的三维纤维网络结构,进而对复合滤料的透气率产生影响。

2.3 孔径分布

4 种滤料试样的孔径分布如表 3 和图 4 所示。可以看出,滤料 P-0 的孔径主要分布在 2.00~53.21 μm ,其中,孔径为 2.00~20.00 μm 的约占 51.53%,孔径为 20.00~53.21 μm 的约占 48.47%;滤料 P-20 的孔径主要分布在 2.00~54.48 μm ,其中,孔径为 2.00~20.00 μm 的约占 53.21%;滤料 P-30 的孔径主要分布在 2.00~49.74 μm ,其中,孔径为 2.00~20.00 μm 的约占 57.81%;滤料 P-50 的孔径主要分布在 2.00~48.17 μm ,其中,孔径为 2.00~20.00 μm 的约占 58.84%,孔径为 22.00~48.17 μm 的约占 40.74%。可知,随着复合滤料中 PTFE 纤维质量分数的增大,制备的滤料孔径呈现减小的趋势。这与 PTFE 纤维的原纤化有关,PTFE 纤维原纤化后形成的细 PTFE 纤维,与 PPS 纤维形成更紧密的三

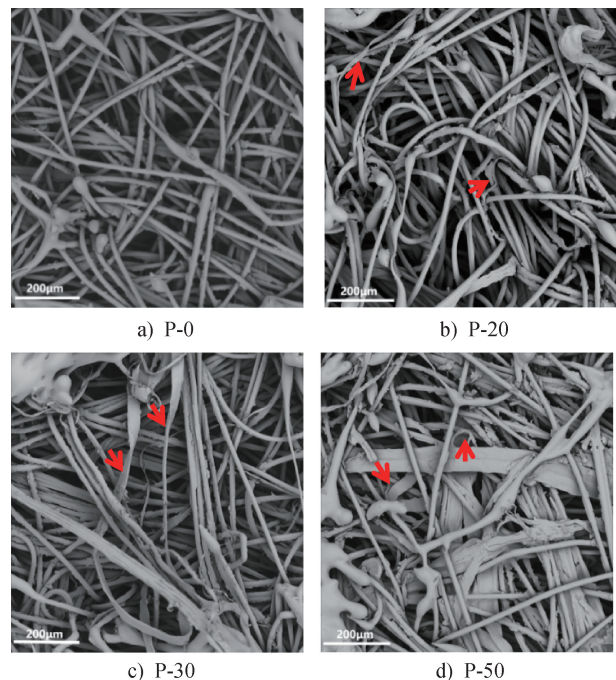


图 3 4 种滤料试样的表面微观形貌

Fig.3 Surface morphology of four kinds of filter samples

维纤维网络结构,导致滤料的孔径减小。

表 3 4 种滤料试样的孔径

Tab.3 Pore size of four kinds of filter samples

试样编号	最大孔径/ μm	最小孔径/ μm	平均孔径/ μm
P-0	53.21	2.24	18.30
P-20	54.48	2.46	19.23
P-30	49.74	2.77	18.85
P-50	48.17	2.54	16.11

2.4 力学性能与缠结系数

4 种滤料试样的力学性能测试结果如图 5 所示。可以看出,4 种滤料试样的断裂强度和断裂伸长率存在明显的差异。具体而言,试样 P-0 的 CD 断裂强度最大,而滤料 P-50 的 CD 断裂强度最小;随着 PTFE 纤维质量分数的增大,PPS/PTFE 复合滤料的 CD 断裂强度呈直线下降趋势,而 CD 断裂伸长率则呈上升趋势;随着 PTFE 纤维质量分数的增大,PPS/PTFE 复合滤料的 MD 断裂强度和 MD 断裂伸长率则基本保持不变,这是因为滤料的 CD 断裂强度主要由纤维网提供,而 MD 断裂强度则主要取决于基布^[23]。

表 4 列出了 4 种滤料试样的缠结系数测试结果。可以看到,随着 PTFE 纤维质量分数的增大,

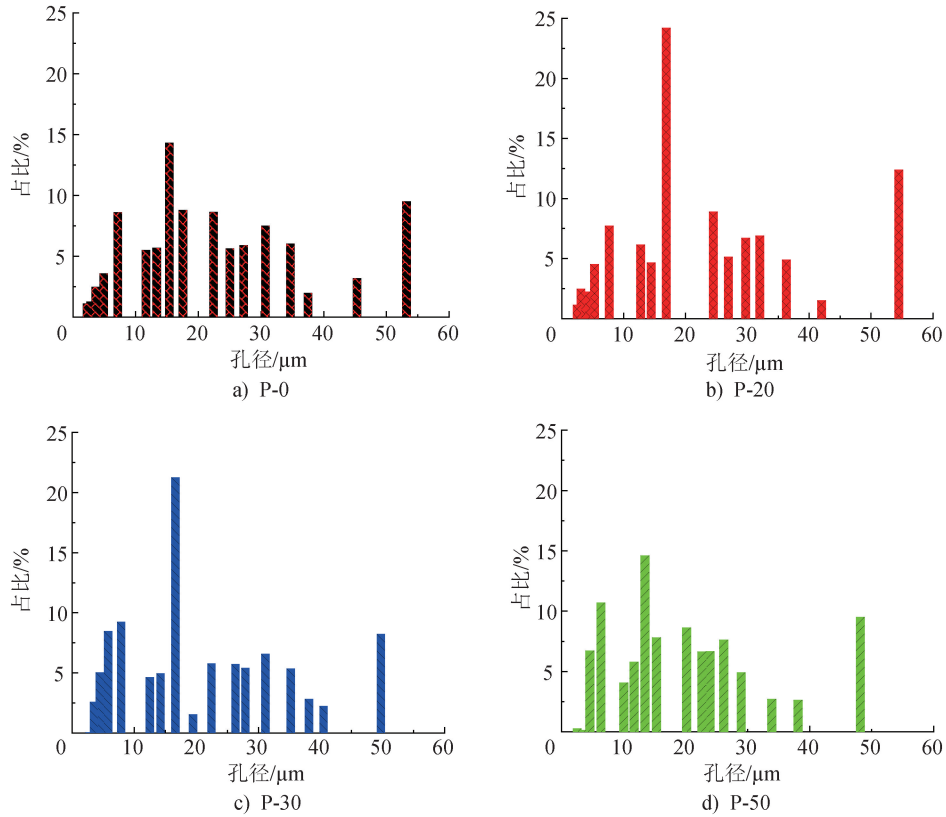


图 4 4 种滤料试样的孔径分布

Fig. 4 Pore size distribution of four kinds of filter samples

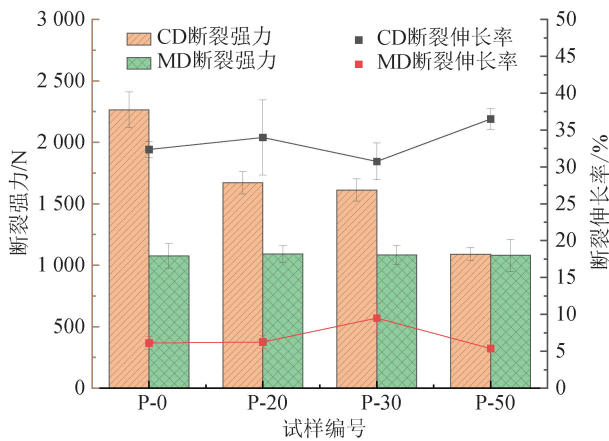


图 5 4 种滤料试样的断裂强力与断裂伸长率

Fig. 5 Breaking strength and breaking elongation of four kinds of filter samples

PPS/PTFE 复合滤料的缠结系数呈减小的趋势。这是因为 PPS 纤维具有良好的卷曲性能,易于形成网络结构,且经过针刺加固后,纤维之间的缠结变得更加紧密,因此,试样 P-0 的缠结系数最大。而其余 3 种滤料试样中由于含有 PTFE 纤维,而 PTFE 纤维本身强度较低,加之针刺过程中部分 PTFE 纤维的

原纤化,导致纤维直径减小,进一步降低了 PTFE 纤维的强度。随着 PTFE 纤维质量分数的增大,PPS/PTFE 复合滤料的原纤化程度也随之上升,滤料断裂强力下降,缠结系数也呈现线性下降的趋势。

表 4 4 种滤料试样的缠结系数

Tab. 4 Entanglement coefficient of four kinds of filter samples

试样编号	P-0	P-20	P-30	P-50
缠结系数/($N \cdot m^2 \cdot g^{-1}$)	5.65	4.60	4.55	3.64

2.5 过滤性能

滤料残余压差、清灰周期和过滤精度是评估其过滤性能的重要指标^[19]。性能测试阶段 4 种滤料试样残余压差随周期数的动态变化情况如图 6 所示。可以看出,在性能测试阶段的定压喷吹过程中,4 种滤料的残余压差差异明显。具体而言,滤料 P-50 的残余压差平均值达 605 Pa,远高于其他 3 种复合滤料。滤料 P-30 和滤料 P-20 的残余压差平均值分别为 554 Pa 和 559 Pa,两者差异较小,而滤料 P-0 的残余压差平均值最小,仅为 484 Pa。这表明,

随着 PTFE 纤维质量分数的增大,PPS/PTFE 复合滤料的残余压差呈上升趋势,这可能与针刺过程中 PTFE 纤维原纤化后直径变小,导致 PPS/PTFE 复合滤料的孔径减小相关。

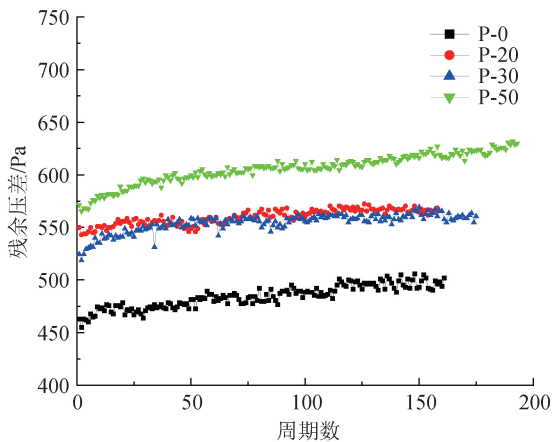


图 6 性能测试阶段滤料残余压差随周期数的动态变化
Fig. 6 Dynamic change of residual pressure difference of filters with the number of cycles during performance test

性能测试阶段滤料清灰周期随周期数的动态变化情况如图 7 所示。可以看出,滤料 P-20 的清灰周期平均值最长,达到 136 s,滤料 P-0 的次之,为 134 s,滤料 P-50 的清灰周期平均值最短,仅为 112 s。在相同的性能测试阶段内,滤料的周期数与其清灰周期呈反比关系,即清灰周期越长,滤料的周期数越小,清灰性能越好。总体而言,随着 PTFE 纤维质量分数的增大,PPS/PTFE 复合滤料的清灰周期逐渐缩短,残余压差则呈上升趋势。

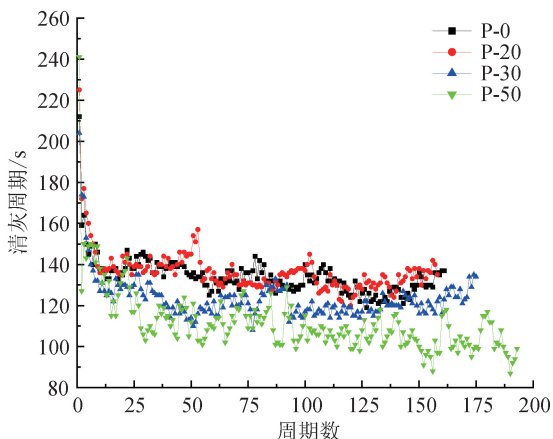


图 7 性能测试阶段滤料清灰周期随周期数的动态变化
Fig. 7 Dynamic change of cleaning period of filters with the number of cycles during performance test

4 种不同质量比 PPS/PTFE 复合滤料在粉尘排

放总质量浓度和 $PM_{2.5}$ 质量浓度方面也表现出明显的差异(图 8)。随着 PTFE 纤维质量分数的增大,PPS/PTFE 复合滤料的粉尘排放总质量浓度和 $PM_{2.5}$ 质量浓度均呈明显的下降趋势。具体而言,粉尘排放总质量浓度从大到小依次为滤料 P-0、滤料 P-30、滤料 P-20、滤料 P-50。这表明,滤料 P-50 具有最高的过滤效率,随着 PTFE 纤维质量分数的增大,PPS/PTFE 复合滤料对细颗粒物的过滤效率得以提升。 $PM_{2.5}$ 质量浓度也遵循相同的规律,表明随着 PTFE 纤维质量分数的增大,PPS/PTFE 复合滤料对细颗粒物的过滤性能提升。

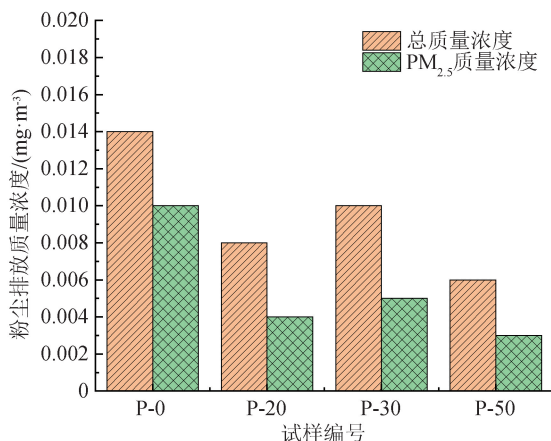


图 8 粉尘排放总质量浓度与 $PM_{2.5}$ 质量浓度
Fig. 8 Total mass concentration and $PM_{2.5}$ mass concentration of dust emission

3 结论

(1) PTFE 纤维质量分数对 PPS/PTFE 复合滤料的物理和力学性能具有显著影响。在相同面密度条件下,随着 PTFE 纤维质量分数的增大,PPS/PTFE 复合滤料的厚度、透气性及断裂强力呈下降趋势,而 CD 断裂伸长率则呈上升趋势。

(2) PTFE 纤维的引入有效改变了 PPS/PTFE 复合滤料的孔隙结构,相较于 PPS 滤料,尽管 PPS/PTFE 复合滤料的残余压差有所增大,但其对微细粉尘,尤其是 $PM_{2.5}$ 的捕集效率显著提高。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] SHEN J L, ZHENG C H, XU L J, et al. Atmospheric emission inventory of SO₃ from coal-fired power plants in China in the period 2009—2014 [J]. Atmospheric Environment, 2019, 197: 14-21.
- [2] JIANG M, LIU X W, CHEN D, et al. Light extinction method for measuring a low particle concentration with white cell optics: relationship between light transmittance and particle properties [J]. Energy & Fuels, 2019, 33(11): 12063-12072.
- [3] YEO Y H, GAWK M A, LEE S Y, et al. Air purifier using super-absorbent polymer for removing air contaminants [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(3): 1-8.
- [4] XIONG Z C, YANG R L, ZHU Y J, et al. Flexible hydroxyapatite ultralong nanowire-based paper for highly efficient and multifunctional air filtration [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5(33): 17482-17491.
- [5] PATERAKI S T, ASIMAKOPOULOS D N, FLOCAS H A, et al. The role of meteorology on different sized aerosol fractions (PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{2.5-10}) [J]. Science of The Total Environment, 2012, 419: 124-135.
- [6] JEONG S, CHO H, SEONGGEUN H, et al. High efficiency, transparent, reusable, and active PM_{2.5} filters by hierarchical Ag nanowire percolation network [J]. Nano Letters, 2017, 17(7): 4339-4346.
- [7] ANWAR M N, SHABBIR M, TAHIR E, et al. Emerging challenges of air pollution and particulate matter in China, India, and Pakistan and mitigating solutions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 416: 125851.
- [8] 杨吉震,皮凡,刘强飞,等. 除尘脱硝功能性针刺毡的制备及其性能[J]. 毛纺科技, 2023, 51(4): 17-22.
- [9] 刘强飞,吴韶华,杨吉震,等. 芳纶纳米纤维改性聚四氟乙烯/聚苯硫醚针刺毡的制备及其性能[J]. 纺织学报, 2021, 42(10): 47-52.
- [10] 郭二宝,吕梅群,刘兴成,等. 热冲击对燃煤电厂袋式除尘滤料织物性能的影响[J]. 环境工程, 2023, 41(3): 84-89.
- [11] 翁美玲,龙海如,张孝南. PPS/PTFE 纤维复合水刺耐高温过滤材料的制备与性能研究[J]. 产业用纺织品, 2012, 30(3): 16-20.
- [12] 张楠,崔鑫,靳向煜,等. 加固工艺及组分对 PPS/PTFE 复合耐高温滤料性能的影响[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2014, 40(2): 202-233.
- [13] 张弛,沈恒根,宋高举. 高温烟气用聚苯硫醚(PPS)滤料耐酸氧化腐蚀性的检测方法初探 [J]. 产业用纺织品, 2022, 40(8): 45-52.
- [14] 陈建文. PM_{2.5} 含量对滤料过滤性能的影响 [J]. 产业用纺织品, 2023, 41(2): 23-27.
- [15] 陈好,陈建文,郑智宏,等. PPS+PTFE 混纺针刺滤袋在燃煤电厂的应用分析 [J]. 产业用纺织品, 2024, 42(6): 48-53.
- [16] 余鹏程,于斌,韩建,等. 聚苯硫醚纤维对其复合滤料结构及力学性能影响[J]. 纺织学报, 2013, 34(7): 5-9.
- [17] 祝晶晶,王洪,吴海波,等. 水刺非织造布的纤维缠结效果分析及影响因素初探[J]. 产业用纺织品, 2012, 30(9): 6-10.
- [18] LIU X C, SHEN H G, NIE X L. Study on the filtration performance of the baghouse filters for ultra-low emission as a function of filter pore size and fiber diameter [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(2): 16020247.
- [19] 雷李娜,郭国梁. 国内袋式除尘器滤袋滤料标准研究与质量问题分析 [J]. 产业用纺织品, 2023, 41(11): 42-45.
- [20] 窦文俊,张如全,张明. 聚苯硫醚针刺非织造材料耐化学性研究 [J]. 上海纺织科技, 2016, 44(1): 31-34.
- [21] 贺湘兵,于斌,韩建,等. 酸碱条件对聚苯硫醚纤维力学性能的影响[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2011, 28(2): 178-181.
- [22] 徐玉康. 聚四氟乙烯耐腐蚀过滤材料结构特征及发展趋势[J]. 纺织学报, 2017, 38(8): 161-171.
- [23] 柳静献,代峰,毛宁. 酸碱交互腐蚀对芳纶滤料性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(7): 1034-1040.

欢迎订阅《产业用纺织品》《国际纺织导报》