

聚四氟乙烯覆膜滤料滤膜耐喷吹性能研究

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:通过脉冲喷吹试验对比 4 种聚四氟乙烯 (PTFE) 覆膜滤料脉冲喷吹前后的膜破损率和透气率, 评估覆膜滤料滤膜性能。结果表明: PTFE 膜的厚度与微细纤维密度呈正相关, 孔径大小与膜厚度呈负相关。在 PTFE 膜复合到聚苯硫醚 (PPS) 滤料表面后, 厚度较大的 PTFE 膜不容易变形, 因此受脉冲喷吹影响较小, 具有更长的使用寿命; 较薄的 PTFE 膜容易被拉伸, 脉冲喷吹后破损严重, 使用寿命较短。并指出, 脉冲喷吹试验可用于评估覆膜滤料滤膜的耐久性及可靠性。试验结果可为 PTFE 膜厚度的选择提供有效参考。

关键词:覆膜滤料; 聚苯硫醚 (PPS) 滤料; 聚四氟乙烯 (PTFE) 膜; 脉冲喷吹; 膜破损率; 孔隙; 透气率; 耐久性

中图分类号: TS 176

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2024)05-0021-06

Investigation on blowout resistance performance of PTFE membrane coated filter materials

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: The membrane breakage rate and air permeability of four kinds of polytetrafluoroethylene (PTFE) membrane coated filter materials before and after pulse injection test were compared to evaluate the membrane performance of membrane coated filter materials. The results showed that, the thickness of PTFE membrane was proportional to the density of microfibrils, and the pore size was inversely proportional to the membrane thickness. After the PTFE membrane was laminated onto the polyphenylene sulfide (PPS) filter material, the thicker PTFE membrane was not easily deformed, so it was less affected by pulse injection and had a longer service life. On the contrary, the thinner PTFE membrane was easy to be stretched, and it was severely damaged by pulse injection and had a shorter service life. It was pointed out that the pulse injection test could be used to evaluate the durability and reliability of the membrane. The test results could provide an effective reference for the selection of PTFE membrane thickness.

Keywords: membrane coated filter material; polyphenylene sulfide (PPS) filter material;

收稿日期: 2024-02-04

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

polytetrafluoroethylene (PTFE) membrane; pulse injection; membrane breakage rate; pore; air permeability; durability

国家统计局数据显示,2023 年我国工业源颗粒物排放量占全国颗粒物排放总量的 33.0%,这表明目前工业仍然是大气颗粒物污染的主要来源。袋式除尘器作为工业污染治理的主流除尘设备,已在电力、水泥、钢铁等行业的烟尘治理中得到广泛应用。随着我国环保标准要求的不断提高,实现污染物超低排放已成为当务之急,尤其是针对 $PM_{2.5}$ 等可吸入颗粒物,高效、低阻的聚四氟乙烯(PTFE)覆膜滤料成为袋式除尘器核心组件的首选。PTFE 覆膜滤料将具有多微孔性的 PTFE 膜复合至纤维网表层,形成具有微孔且无直通孔的特殊结构。过滤时,这种结构的滤料能成功将颗粒污染物截留在 PTFE 膜外侧,有效实现表面过滤。

PTFE 覆膜滤料具有高效的过滤能力和低阻力特性,以及长使用寿命、低成本等优势^[1-5],但也存在 PTFE 膜易变形受损的缺陷。复杂使用工况下,PTFE 膜一旦破损,则滤料过滤效率将明显下降,并最终影响滤料使用寿命^[6-7]。目前,覆膜滤料滤膜性能主要通过评估其覆膜牢度来判定。如,JB/T 11261—2012《燃煤电厂锅炉尾气治理 袋式除尘器用滤料》^[8]标准中提出采用鼓泡法测试室温条件下覆膜滤料的覆膜牢度,但 PTFE 膜具有一定的透气性,可能会影响 PTFE 覆膜滤料覆膜牢度测试的准确性;T/CAEPI 21—2019《袋式除尘用滤料技术要求》^[9]提出采用拉开法测试覆膜滤料的覆膜牢度。杨小川等^[10]采用拉开法对不同温度下 PTFE 覆膜滤料的覆膜牢度进行了测试和分析,发现覆膜牢度与覆膜工艺的相关性并不显著,但滤料的纤维材质对其产生了显著影响。此外,覆膜牢度会随温度的升高呈现出先降低后升高的趋势。李志荣等^[11]采用拉开法测试了不同材料的覆膜牢度,发现拉开法可用于评估不适用剥离法的非织造覆膜材料。柳静献等^[12]研究膜破损率发现,相对于针刺毡覆膜滤料,膜破损对玻纤机织布覆膜滤料的阻力和过滤效率影响较大。覆膜牢度虽然能反映膜与基材结合力的大小,但无法全面反映实际使用中覆膜滤料滤膜的耐喷吹性能,故存在一定的局限性。

本研究基于脉冲喷吹试验模拟脉冲喷吹除尘装置,对 4 种覆膜滤料喷吹前后的透气率和膜破损率进行比较和分析,探究影响覆膜滤料滤膜性能的因素,以期选择合适的 PTFE 膜与聚苯硫醚(PPS)滤料生产耐喷吹型覆膜滤料提供参考。

1 试验部分

1.1 试验仪器

C1202 型高精度薄膜测厚仪,德国马尔集团;PSDA-20 型孔径分析仪,南京高谦功能材料科技有限公司;G4 pute 型扫描电子显微镜(SEM),复纳科学仪器(上海)有限公司;YG461E-III 型全自动透气性仪,宁波纺织仪器厂;GYS-2QDM 型视频显微镜,厦门顺达诚仪器设备有限公司。

1.2 测试方法

1.2.1 厚度

参照 GB/T 6672—2001《塑料薄膜和薄片 厚度测定 机械测量法》,每种试样取 10 个不同的位置测试厚度,结果取平均值。

1.2.2 孔径

按照 JB/T 13836—2020《袋式除尘器用滤料孔径特征的测定方法》,每种试样裁取直径为 30 mm 的小样,取 3 个不同位置测试孔径,结果取平均值。

1.2.3 微观形貌

利用 GYS-2QDM 型视频显微镜和 G4 pute 型扫描电子显微镜观察试样的表观形貌,并根据破损面积和测试总面积计算 PTFE 膜破损率。

1.2.4 透气率

按照 GB/T 5453—1997《纺织品 织物透气性的测定》,在温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $65\% \pm 4\%$ 、压差为 200 Pa 的条件下,测试试样的透气率。每种试样测 10 块样品,结果取平均值。

1.2.5 脉冲喷吹试验

为评估覆膜滤料在工业烟气除尘过程中特别是长期脉冲喷吹后膜的耐用性和可靠性,本研究采用高压多次脉冲喷吹处理覆膜滤料,观察并比较覆膜

滤料的性能变化。每种覆膜滤料取 6 块样品,其中 1 块样品作为原始样用于对比,其余 5 块样品分别进行 100、200、300、400 和 500 次的脉冲喷吹处理,脉冲喷吹压力为 0.5 MPa,每个脉冲间隔时间为 10 s。本研究参照实用新型专利《一种袋式除尘滤料耐喷吹性能的测试装置》进行了脉冲喷吹试验的设计和搭建^[13],脉冲喷吹试验示意如图 1 所示,样品固定在喷吹口下方,压缩空气直接作用于样品的净气面。

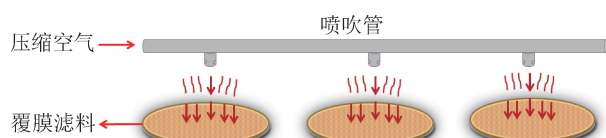


图 1 脉冲喷吹试验示意
Fig. 1 Diagram of pulse injection test

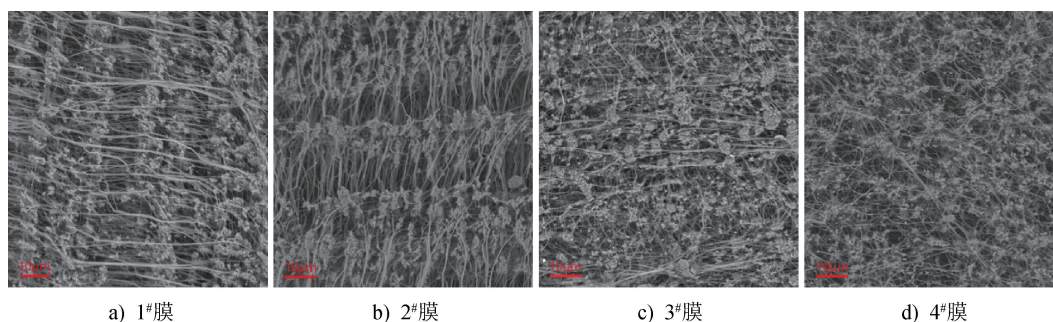


图 2 不同厂家 PTFE 膜的表面微观形貌
Fig. 2 Surface morphologies of PTFE membranes from different manufacturers

不同厂家生产的 PTFE 膜基本特征参数见表 1,可以看出 4 种 PTFE 膜的厚度顺序是 3#膜>1#膜>2#膜>4#膜,平均孔径表现为 4#膜>2#膜>1#膜>3#膜,平均孔径的大小与膜厚度呈负相关关系。这是因为较厚的 PTFE 膜中微细纤维堆积较紧密,相对较小的孔隙空间限制了孔径的大小。

表 1 PTFE 膜基本特征参数

Tab. 1 Characteristic parameters of PTFE membranes

样品	厚度/ μm	平均孔径/ μm	生产厂家
1#膜	0.85	2.46	A 厂
2#膜	0.83	2.57	B 厂
3#膜	1.05	1.69	C 厂
4#膜	0.47	8.12	D 厂

1.3.2 覆膜滤料

将 4 家厂家生产的 PTFE 膜通过高温热压的方式分别复合到同一批次的 PPS 滤料表面,依次得到

1.3 试验材料

1.3.1 PTFE 膜

PTFE 膜是以 PTFE 树脂为原料经膨化拉伸形成的多微孔膜。制备 PTFE 膜的方法有机械拉伸法、纺丝法和致孔剂法等。其中,机械拉伸法较为常用,所制备的 PTFE 膜具有“微细纤维-岛状结点”的特殊结构。拉伸可分为单向拉伸、双向拉伸和三向拉伸等^[14-16]。本研究选取来自不同厂家生产的 PTFE 膜作为研究对象,其中 1#膜和 2#膜为双向拉伸法制备的 PTFE 膜,3#膜和 4#膜为三向拉伸法制备的 PTFE 膜。图 2 为 4 家厂家生产的 PTFE 膜表面微观形貌,可以看出 PTFE 膜是由不同线密度的微细纤维组成的。这些微细纤维无规则地排列在一起,且微细纤维之间还存在未被拉伸的 PTFE 树脂,构成了岛状结点。

1#、2#、3#、4#覆膜滤料(编号同 PTFE 膜)。

图 3 展示了 4 种覆膜滤料表面 PTFE 膜的形态结构。对比图 2 和图 3 可以观察到,不同厂家生产的 PTFE 膜复合到 PPS 滤料表面后,PTFE 膜整体被拉伸并变得更稀薄。其中,3#覆膜滤料表面 PTFE 膜的岛状结点相对较大且密集,微细纤维杂乱分布并紧密相连,这与厚度最大的 3#膜在高温热压复合过程中不易被拉伸变薄有关;1#和 2#覆膜滤料表面 PTFE 膜岛状结点分布相对稀疏,透过 PTFE 膜可隐约观察到下层的 PPS 纤维;4#覆膜滤料表面 PTFE 膜接近透明,透过 PTFE 膜清晰可见 PPS 纤维,这与 4#膜本身厚度最小,复合到 PPS 滤料表面后被拉伸得更稀薄有关。

表 2 对 4 种覆膜滤料的基本特征参数进行了归纳。从表 2 可以看出,未覆膜 PPS 滤料的透气率为

118.6 L/(dm²·min);复合后,4种覆膜滤料的透气率都小于未覆膜 PPS 滤料的透气率,且透气率顺序为 4[#]覆膜滤料>2[#]覆膜滤料>1[#]覆膜滤料>3[#]覆膜滤

料,这与 4 种 PTFE 膜的孔径大小分布规律一致,即孔径越大,覆膜滤料的透气率越大。

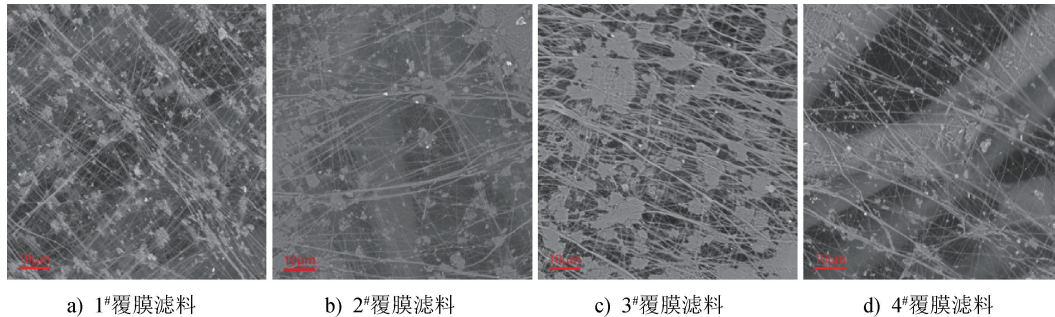


图3 覆膜滤料表面 PTFE 膜微观形貌

Fig. 3 Microstructure of PTFE membranes on the surface of coated filter materials

表2 PPS 滤料覆膜前后特征参数

Tab. 2 Characteristic parameters of PPS filter materials before and after membrane coating

样品	面密度/ (g·m ⁻²)	厚度/mm	透气率/ (L·dm ⁻² ·min ⁻¹)	断裂强力/N		断裂伸长率/%	
				横向	纵向	横向	纵向
未覆膜 PPS 滤料	556	1.88	118.64	1 692	1 167	33.9	20.9
1 [#] 覆膜滤料	553	1.87	41.87	1 681	1 175	34.0	19.1
2 [#] 覆膜滤料	561	1.92	43.96	1 756	1 163	34.2	23.8
3 [#] 覆膜滤料	550	1.89	28.11	1 651	1 201	33.8	22.7
4 [#] 覆膜滤料	555	1.91	70.03	1 783	1 229	30.6	24.3

2 试验结果与分析

2.1 膜破损率

使用视频显微镜和扫描电子显微镜观察原始样和脉冲喷吹 500 次的覆膜滤料表面 PTFE 膜的破损情况,结果如图 4 所示。图 4 中,经脉冲喷吹 500 次的 1[#]~4[#]覆膜滤料的 PTFE 膜相较于原始样均出现了不同程度的破损,且都呈不规则状,其中 3[#]覆膜滤料的 PTFE 膜破损呈较窄的细条状。

基于视频显微镜软件计算得到的 PTFE 膜破损率如图 5 所示,可以看出:(1)4 种覆膜滤料的 PTFE 膜破损率均随着脉冲喷吹次数的增加而增大。(2)3[#]覆膜滤料脉冲喷吹后 PTFE 膜破损率相对较小,1[#]覆膜滤料的次之。(3)脉冲喷吹 200 次后,2[#]覆膜滤料的 PTFE 膜破损率略高于 4[#]覆膜滤料的,但继续增加脉冲喷吹次数发现,2[#]覆膜滤料的 PTFE 膜破损率小于 4[#]覆膜滤料的,表明 2[#]覆膜滤料的使用耐久性优于 4[#]覆膜滤料的。(4)500 次脉冲喷吹后,

4 种覆膜滤料的 PTFE 膜破损率顺序为 3[#]覆膜滤料<1[#]覆膜滤料<2[#]覆膜滤料<4[#]覆膜滤料。

观察和分析脉冲喷吹后的 PTFE 膜破损率,对于评估覆膜滤料在实际工况中的耐久性及可靠性具有重要的参考意义。

2.2 透气性

对脉冲喷吹前后的 4 种覆膜滤料进行透气性测试,其相较于各自原始样的透气率增长率(即脉冲喷吹前后透气率之差与原始样透气率的比值)如图 6 所示。从图 6 可以看出:随着脉冲喷吹次数的增加,4 种覆膜滤料的透气率增长率均呈现增大的趋势,这种变化可能与脉冲喷吹作用后覆膜滤料中 PTFE 膜的孔隙有所增大有关,这也表明 PTFE 膜受到了损伤。脉冲喷吹后,3[#]覆膜滤料的透气率增长率最小,1[#]覆膜滤料的透气率增长率整体略小于 2[#]覆膜滤料的,4[#]覆膜滤料的透气率增长率最大。4 种覆膜滤料脉冲喷吹前后透气率增长率顺序为 3[#]覆膜滤料<1[#]覆膜滤料<2[#]覆膜滤料<4[#]覆膜滤料。

综上,膜的损伤程度可利用覆膜滤料的透气率

增长率表征,即透气率增长率越大,膜的破损越严重。

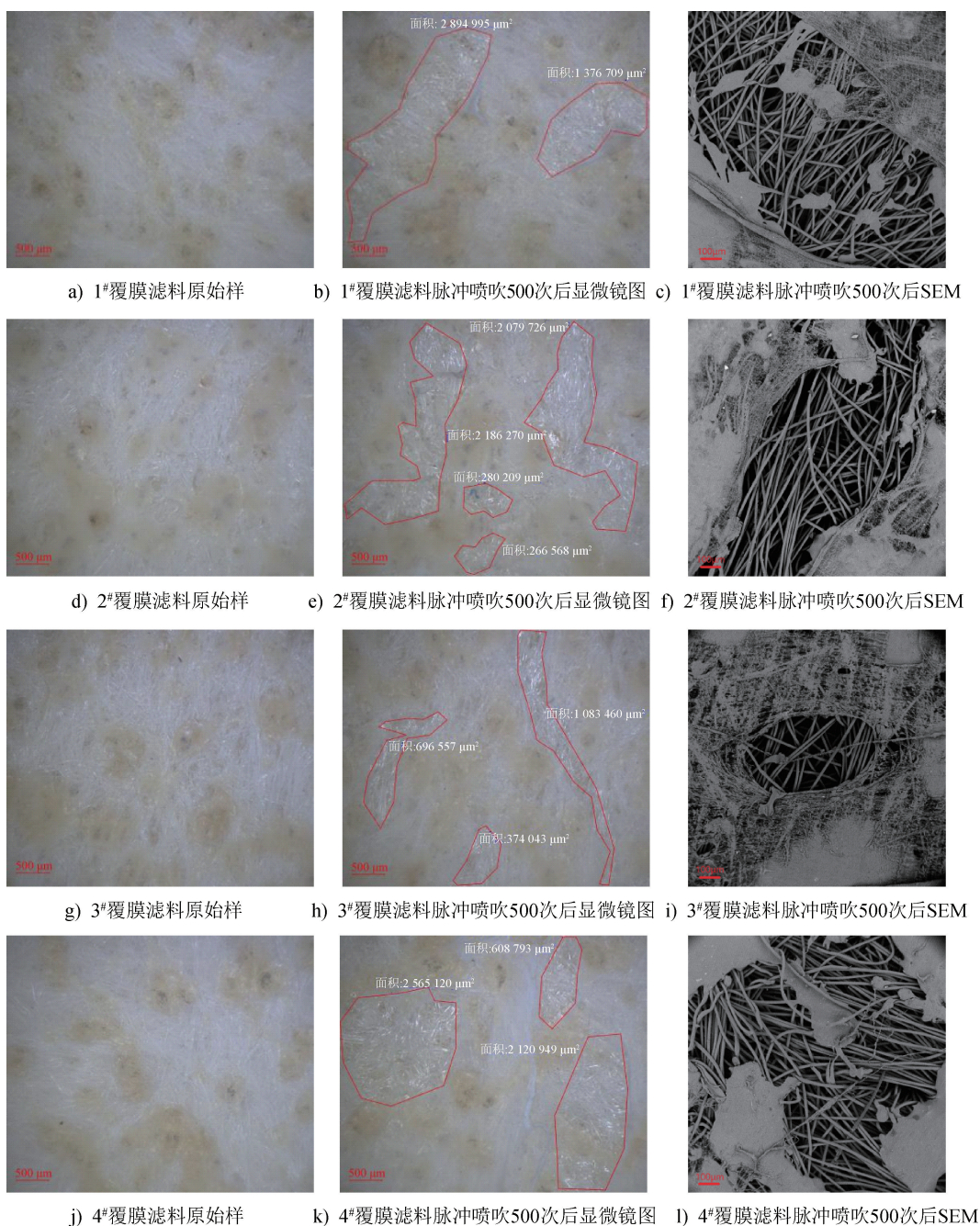


图 4 500 次脉冲喷吹前后覆膜滤料表面 PTFE 膜微观形貌
Fig. 4 Microstructure of PTFE membranes on the surface of membrane coated filter materials before and after 500 pulse injection cycles

3 结论

实际生产中,PTFE 膜厚度的选择需综合考虑多方面因素。较厚的 PTFE 膜虽有助于更好地维持复合后滤料的表面形态,降低受脉冲喷吹损伤的可

能性,但也会导致孔隙尺寸减小,覆膜滤料运行阻力增加等问题,进而影响除尘器的稳定运行并增加经济成本。

脉冲喷吹试验及表面形貌分析得出:

(1)PTFE 膜的厚度与微细纤维密度呈正相关,厚度较大的 PTFE 膜具有较小的孔径。将 PTFE 膜

复合到 PPS 滤料表面时,较厚的 PTFE 膜不易发生形变和拉伸,而较薄的 PTFE 膜易被拉伸变得更薄。

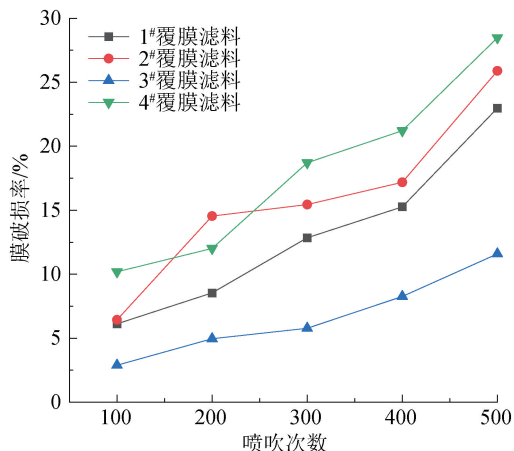


图5 不同脉冲喷吹次数下覆膜滤料 PTFE 膜破损率
Fig. 5 PTFE membrane breakage rate of membrane coated filter materials under different pulse injection times

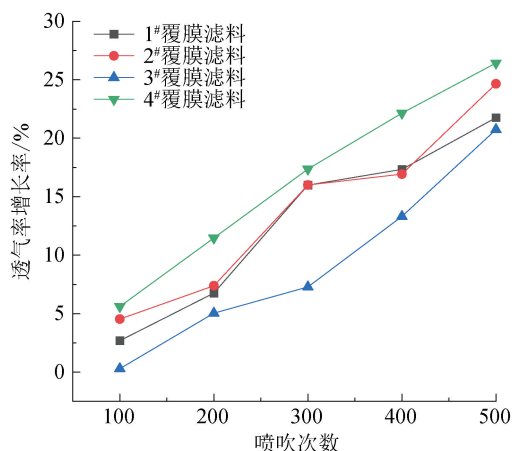


图6 不同脉冲喷吹次数下覆膜滤料透气率增长率
Fig. 6 Permeability growth rates of membrane coated filter materials under different pulse injection times

(2)随着脉冲喷吹次数的增加,4种覆膜滤料的膜破损率逐渐增大。4种覆膜滤料脉冲喷吹后膜破损率顺序为3#覆膜滤料<1#覆膜滤料<2#覆膜滤料<4#覆膜滤料。基于脉冲喷吹一定次数后的膜破损率,可评估覆膜滤料 PTFE 膜的耐久性 & 可靠性。

(3)随着脉冲喷吹次数的增加,4种覆膜滤料的透气率逐渐增大。4种覆膜滤料脉冲喷吹后透气率增长率顺序为3#覆膜滤料<1#覆膜滤料<2#覆膜滤料<4#覆膜滤料。因此,基于透气率增长率可评估覆膜滤料膜的损伤程度,即透气率增长率越大,膜破损程度越严重。

综上,生产实践中,可基于脉冲喷吹试验评估得

到的复合滤料表面膜的耐久性及可靠性,选择合适的 PTFE 膜厚度。

参考文献

- [1] 余佳彬,潘金峰,肖尧,等. 水泥行业用覆膜滤料的制备及其性能研究[J]. 中国水泥, 2021(7): 94-98.
- [2] 周冠辰,刘江峰,徐辉,等. 覆膜滤料与普通滤料性能对比研究[J]. 轻工科技, 2016, 32(1): 93-94.
- [3] 石零,韩书勇,余新明. 覆膜滤料特性实验研究[J]. 工业安全与环保, 2014, 40(11): 64-66.
- [4] 刘江峰,徐辉,周冠辰,等. PTFE 覆膜滤料在氧化铝焙烧使用中的过滤性能分析[J]. 产业用纺织品, 2016, 34(6): 28-32.
- [5] 翟卫中. PPS 表面覆膜滤料和渗透式覆膜滤料的比较[J]. 产业用纺织品, 2007, 25(10): 41-43.
- [6] 岳海生,王桦,陈丽萍,等. 除尘滤料的表面结构分析[J]. 工业安全与环保, 2017, 43(9): 16-19.
- [7] 徐涛,费传军. 袋除尘技术的发展及国产覆膜滤料的应用[J]. 水泥技术, 2018(5): 96-100.
- [8] 中华人民共和国工业和信息化部. 燃煤电厂锅炉尾气治理 袋式除尘器用滤料: JB/T 11261—2012[S]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [9] 中国环境保护产业协会. 袋式除尘用滤料技术要求: T/CAEPI 21—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [10] 杨小川,柳静猷,吕超,等. 高温条件下滤料覆膜牢度特性研究[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(6): 85-89.
- [11] 李志荣,王洪. 附着力拉开法评价非织造布覆膜牢度的适用性研究[J]. 产业用纺织品, 2022, 40(10): 45-50.
- [12] 柳静猷,侯明真,常德强. 膜破损对袋除尘覆膜滤料过滤性能的影响[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(1): 405-413.
- [13] 蔡伟龙,罗祥波,方国阳,等. 一种袋式除尘滤料耐喷吹性能的测试装置: CN203551407U[P]. 2014-04-16.
- [14] 刘文璐,姜超,权慧,等. 两种聚四氟乙烯微孔膜的结构和性能比较[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(7): 122-127.
- [15] 唐志鹏,沈育才,高政,等. 拉伸法制备聚四氟乙烯平板膜的研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(1): 175-182.
- [16] 徐汀. 聚四氟乙烯微孔膜及其过滤材料制备研究[J]. 河南化工, 2020, 37(5): 16-19.