

工业烟尘过滤用水刺玻纤复合滤料性能研究

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: 对水刺工艺和针刺工艺两种不同生产工艺制得的玻纤复合滤料进行性能测试与对比。结果表明: 水刺工艺对玻纤的损伤小; 水刺玻纤复合滤料的挺度值低, 耐折性能好, 可减少纤维原料使用量; 过滤性能方面, 水刺玻纤复合滤料的残余阻力低于针刺玻纤复合滤料的, 过滤效率则高于针刺滤料的。

关键词: 水刺工艺; 针刺工艺; 过滤材料; 玻璃纤维; 残余阻力; 过滤效率

中图分类号: TS 176

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2024)02-0028-06

Study on properties of spunlaced glass fiber composite filters for industrial dust filtration

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 properties of glass fiber composite filters prepared by two different processes, spunlaced process and needle process, were tested and compared. The results show that the spunlaced process can reduce the damage to glass fibers. Spunlaced glass fiber composite filters have low stiffness, good folding performance, and can reduce the use of fiber raw materials. In terms of filtration performance, the residual resistance of spunlaced glass fiber composite filters is lower than that of needled glass fiber composite filters, and the filtration efficiency is higher than that of needled filters.

Keywords: spunlaced process; needle process; filter material; glass fiber; residual resistance; filtration efficiency

研究表明,城市环境空气中空气动力学当量直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)及沙漠环境中含微生物的 $\text{PM}_{2.5}$,对人类的呼吸健康有重要影响^[1-3]。 $\text{PM}_{2.5}$ 在大气中可以停留很长时间,并进行远距离

的传播,是过敏性肺病和炎症的主要致病因素。据报道,2019年全球因空气污染问题而死亡的人数约有667万^[4]。目前,空气过滤仍是防止纳米颗粒及大气中有害气体污染领域最有前景的技术^[5-6]。袋

收稿日期:2023-10-31

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

式除尘技术凭借除尘效率高(对细颗粒粉尘的除尘效率高达 99.9%)的特性,在工业烟尘治理中发挥着重要作用。滤袋是袋式除尘器的核心部件,直接影响袋式除尘技术的除尘效率^[7]。滤袋用滤料的生产工艺与结构直接影响滤袋的滤尘性能与使用寿命。玻璃纤维(玻纤)复合滤料因具有较好的耐高温和耐化学性能,常用于高温除尘工况下。然而,玻璃纤维属于一种脆性材料,其耐折性、耐磨性较差,采用针刺工艺进行玻纤复合滤料的生产加工时,易造成纤维损伤^[8]。徐山等^[9]已证实,针刺过程中钩刺的切割是造成玻纤强力下降的主要原因,进而导致复合玻纤针刺毡的强力下降。杨东等^[10]对比了针刺和水刺工艺制得的聚苯硫醚(PPS)滤料的性能,何丽芬等^[11]对比了针刺和水刺工艺制得的芳纶滤料的性能,他们发现在力学强度、清灰性能和过滤精度方面,采用水刺工艺制得的滤料具有一定的优势。何丽芬等^[12]还制备出一种开纤化水刺滤料,相对于针刺滤料及常规水刺滤料,这种开纤化水刺滤料中纤维之间相互缠结得更紧密,过滤效率更高且运行阻力更低,其拉伸断裂强力也更高。目前,袋式除尘领域大多采用针刺滤料制备滤袋。针刺滤料是利用刺针对纤网进行加固的,刺针本身的钢性及刺钩对纤维的损伤,导致纤网加固存在一定的缺陷。水刺滤料则采用高压水针对纤网进行加固,水刺工艺对纤网的损伤小,可使纤维之间缠结更加紧密^[13-14]。当前水刺非织造布的研究多集中在对其性能的研究方面^[15-17],这类非织造布产品大多应用于卫生材料和医疗用品等领域,纤网面密度通常在 200 g/m² 以下^[18]。随着水刺技术的进步及水刺压力的提高,水刺非织造布产品的面密度现已可提升至 800 g/m²^[14, 19]。水刺滤料的开发研究目前主要集中在有机纤维复合滤料制备方面,如不同 PPS 与聚四氟乙烯(PTFE)混合比的复合水刺滤料制备。研究表明,水刺工艺可降低 PPS/PTFE 复合滤料的生产成本,提高其过滤性能^[20]。目前尚未有研究对水刺玻纤复合滤料的性能进行探讨。本文通过分析水刺工艺与常规针刺工艺制得的玻纤复合滤料的物理、力学性能,耐折性能及过滤性能,尝试寻求合适的工艺解决针刺过程中玻纤易损伤,纤维缠结差等问题,提高玻纤复合滤料的力学性能,延长其使用寿命。研究旨在为今后低成本、高使用寿命水刺玻纤

复合滤料的开发提供参考。

1 试验

1.1 试样

试验用试样为芳纶与玻璃纤维混纺的玻纤复合滤料,其中,水刺玻纤复合滤料(编号为 SGL-1 和 SGL-2)由福建省袋滤材料与技术重点实验室制备,针刺玻纤复合滤料(编号为 GL-1 和 GL-2)为某厂家生产的商用滤料。

1.2 试验仪器

试验仪器包括电子天平(上海精天电子仪器有限公司)、数字式织物厚度仪(温州方圆仪器有限公司)、全自动透气量仪(宁波纺织仪器厂)、G4 Pure 型扫描电子显微镜[复纳科学仪器(上海)有限公司]、电脑挺度测定仪(广州润湖仪器有限公司)、滤料耐折试验机(东莞市恒通检测仪器有限公司)、电子织物强力机(常州纺织仪器厂)、VDI 滤料模拟测试装置(德国 FilTEq 公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 面密度

取面积为 100 cm² 的圆形试样 10 块,按照 GB/T 24218.1—2009《纺织品 非织造布试验方法 第 1 部分:单位面积质量的测定》进行面密度测试。试验环境温度为(20±2)℃、相对湿度为(65±4)%,测试结果取平均值。

1.3.2 厚度

按照 GB/T 3820—1997《纺织品和纺织制品厚度的测定》进行试样的厚度测试。设定测试压力为 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,结果取平均值。

1.3.3 透气率

按照 GB/T 5453—1997《纺织品 织物透气性的测定》测试试样的透气率。试样面积为 50 cm²,压差为 200 Pa,试验环境温度为(20±2)℃、相对湿度为(65±4)%,测 10 个试样,测试结果取平均值。

1.3.4 微观形貌

采用 G4 Pure 型扫描电子显微镜(SEM)观察玻纤复合滤料的表现形貌。

1.3.5 力学性能

取规格为 350 mm×50 mm 的经、纬向试样各 5 块,按照 GB/T 3923.1—2013《纺织品 织物拉伸性能 第 1 部分:断裂强力和断裂伸长率的测定(条样法)》对试样进行断裂强力和断裂伸长率测试。试验环境温度为(20±2)℃、相对湿度为(65±4)%。

1.3.6 耐折性能

取规格为 350 mm×50 mm 的经、纬向试样各 5 块,设置滤料耐折试验机的弯折角度为 160°,以 80 次/min 的速度弯折试样 15 万次,然后对弯折试验前后试样的力学性能进行测试与对比。试样的耐折性能用断裂强力保持率表征。断裂强力保持率计算式如式(1)所示。

$$D_i = \frac{P_i}{P_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: D_i 为断裂强力保持率,%; P_i 为弯折后试样断裂强力平均值,N; P_0 为原始试样(弯折前试样)断裂强力平均值,N。

1.3.7 挺度

弯曲一块垂直夹持的试样的自由端,试样弯曲到一定角度时的抗力记为弯曲挺度。取规格为 70 mm×38 mm 的经、纬向试样各 5 块,以 300(°)/min 的速度将试样弯曲到 45°,记录仪器显示的挺度值。测

试结果取平均值。

1.3.8 过滤性能

取一块直径为 150 mm 的圆形试样,按照 GB/T 6719—2009《袋式除尘器技术要求》的测试方法对试样进行过滤效率和排放浓度测试。

2 试验结果与讨论

2.1 物理性能

表 1 为 4 种玻纤复合滤料的面密度、厚度及透气率测试结果。由表 1 可以看出,水刺玻纤复合滤料(SGL-1 和 SGL-2)的面密度比针刺玻纤复合滤料(GL-1 和 GL-2)的小 10%以上,厚度也仅约为针刺玻纤复合滤料的 1/2。水刺玻纤复合滤料的透气率也小于同类型针刺玻纤复合滤料的。表明水刺过程中,在高压水流作用下,玻纤复合滤料中向下运动的纤维与被反射反弹的纤维相互交叉纠缠,与针刺玻纤复合滤料相比,水刺玻纤复合滤料中纤维之间的缠结更紧密,导致透气率较小;水刺工艺在获得相同使用性能的同时,可减少纤维原料的使用量;玻纤复合滤料经 PTFE 薄膜高温热压处理(覆膜)后,表面变得更光滑,透气率大幅下降。

表 1 4 种玻纤复合滤料的参数特性

Tab. 1 Parameter characteristics of of 4 kinds of glass fiber composite filters

试样编号	面密度/(g·m ⁻²)	厚度/mm	透气率/(L·dm ² ·min ⁻¹)	生产工艺
GL-1	1 019.5	3.9	163.8	针刺
GL-2	954.1	3.5	43.5	针刺+PTFE 覆膜
SGL-1	796.3	1.9	115.3	水刺
SGL-2	817.6	1.8	39.0	水刺+PTFE 覆膜

2.2 微观形貌

4 种玻纤复合滤料的 SEM 图如图 1 所示。GL-1 由芳纶与玻璃纤维缠结而成,其表面的孔径大小不一。GL-2 表面经 PTFE 覆膜处理后,PTFE 薄膜与部分纤维黏结在一起,与滤料形成一个整体,使滤料表面的孔径变小。水刺玻纤复合滤料相比针刺玻纤复合滤料,其纤维缠结更紧密,纤维与纤维间的孔隙也更小,尤其是 SGL-2 试样,其表面经 PTFE 覆膜处理后,滤料整体孔径非常小。对比图 1a)~图 1d)可以看出,覆膜后玻纤复合滤料表面变得更光滑且孔隙减小,PTFE 薄膜上的微纤维纵横交叉,

形成三维立体网状结构,而这种结构可使玻纤复合滤料的过滤机理由“深层过滤”转变为“表层过滤”,提升滤料捕集微细粉尘的过滤效率。

2.3 力学性能

4 种玻纤复合滤料的经、纬向拉伸性能测试结果如图 2 所示。断裂强力可用于表征滤料的力学性能,是确保滤料结实耐用的重要参数,与滤料使用寿命密切相关。由图 2a)可以看出,4 种玻纤复合滤料的经向断裂强力均大于纬向断裂强力,这是因为 4 种玻纤复合滤料的经向强力主要由玻纤基布提供,滤料纬向强力主要由纤维之间的缠结提供。其

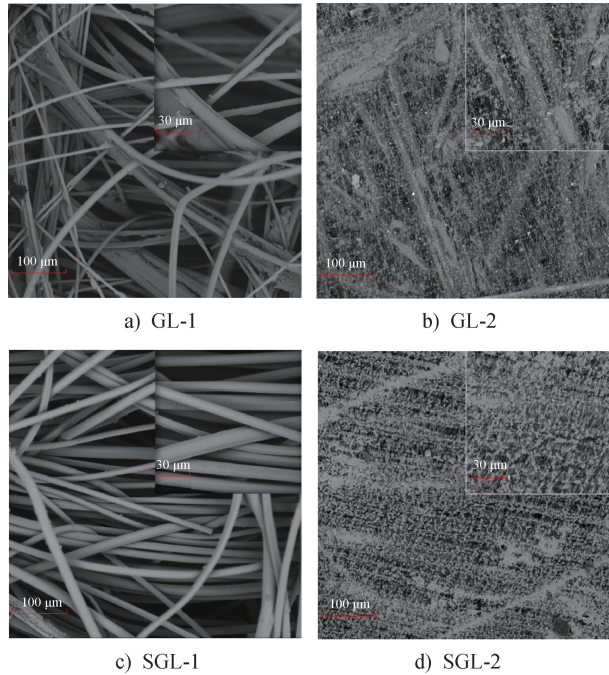


图 1 4 种玻纤复合滤料的 SEM 图

Fig. 1 SEM images of 4 kinds of glass fiber composite filters

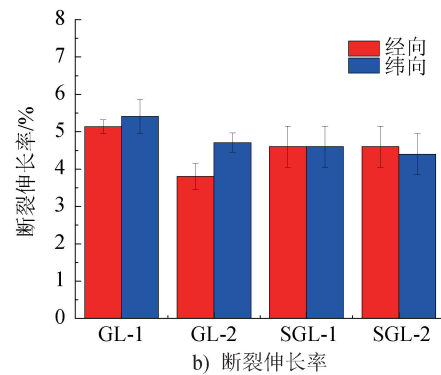
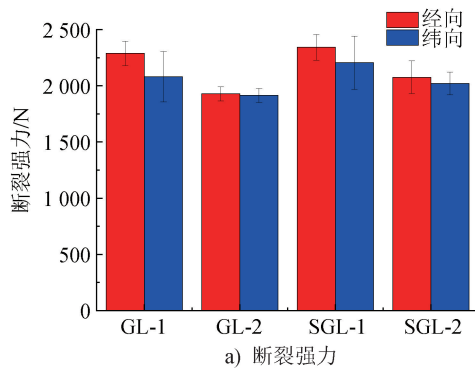


图 2 4 种玻纤复合滤料的拉伸性能

Fig. 2 Tensile property of 4 kinds of glass fiber composite filters

率测试结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, SGL-1 和 SGL-2 的经、纬向断裂强力保持率均分别大于 GL-1 和 GL-2 的, 表明水刺玻纤复合滤料纤维之间的缠结更紧密, 在弯折试验中受到的损伤小, 耐折性能较好, 整体力学性能更优。

2.5 挺度

挺度可用于表征滤料的柔韧性, 挺度值越大, 滤料的柔韧性越差, 挺度值越小, 柔韧性越好^[21-22]。柔韧性差的滤袋在脉冲清灰过程中膨胀收缩幅度较小, 清灰效果差, 运行阻力高, 从而缩短了滤袋的使用寿命; 柔韧性好的滤袋更能适应脉冲清灰过程的气流压力和冲击, 膨胀收缩幅度大, 清灰效果好, 运

中, SGL-1 的纬向断裂强力大于 GL-1 的, 两者的经向断裂强力接近; SGL-2 与 GL-2 的经、纬向断裂强力均相差不大。玻纤复合滤料纬向断裂强力大小依次为 SGL-1>GL-1>SGL-2>GL-2, 表面覆膜后玻纤复合滤料的断裂强力出现了一定程度的下降。由图 2b) 可以看出, 4 种玻纤复合滤料的经、纬向断裂伸长率均小于 6%, 且未表现出明显的差异。总体而言, 无论是否覆膜, 水刺滤料的纬向强力比同类型针刺滤料的高, 再次说明水刺工艺对玻纤复合滤料的损伤小, 可使纤维之间缠结得更紧密。

2.4 耐折性能

玻璃纤维虽强力高, 耐高温及耐酸碱性能良好, 但其易脆断, 耐折性能差, 从而应用受限。本文通过试验模拟滤袋使用过程中受烟气及脉冲清灰影响时发生的弯折形变, 进行 15 万次 160° 弯折试验, 测试弯折后玻纤复合滤料的断裂强力保持率, 评价其耐折性能。4 种玻纤复合滤料弯折后的断裂强力保持

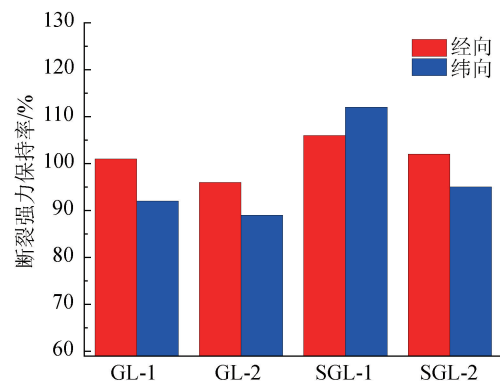


图 3 4 种玻纤复合滤料弯折后的断裂强力保持率
Fig. 3 Breaking strength retention rate of 4 kinds of glass fiber composite filters after bending

行阻力低。4种玻纤复合滤料的挺度测试结果如图4所示。由图4可以看出, SGL-1和SGL-2的经、纬向挺度值均明显小于GL-1和GL-2的, 可知水刺工艺相比针刺工艺, 能大幅降低玻纤复合滤料的挺度, 使滤料更加柔软, 易清灰。即水刺工艺能够改善滤料的柔韧性, 提高滤料的清灰性能, 降低袋式除尘器运行阻力。

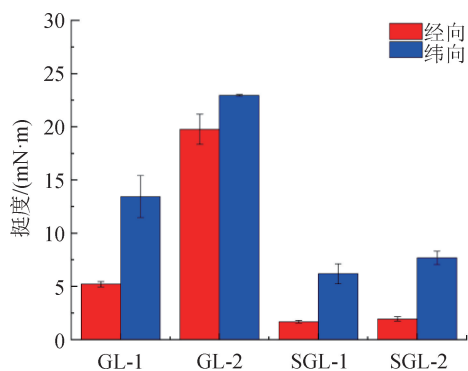


图4 4种玻纤复合滤料的挺度

Fig. 4 Stiffness of 4 kinds of glass fiber composite filters

2.6 动态过滤性能

动态过滤性能是滤料性能评估的关键指标, 其评价指标包括残余阻力、过滤效率、清灰周期等。本文通过VDI滤料模拟测试装置模拟实际工况(粉尘浓度、过滤风速)条件下滤料的反复过滤与清灰, 分析4种不同滤料动态过滤性能的差异。滤料的残余阻力是滤料动态过滤性能的主要考核指标。残余阻力是指每个周期清灰结束后, 滤料的剩余压差。滤料的残余阻力越低, 其清灰周期越长, 袋式除尘器的运行费用就越低。4种玻纤复合滤料老化前后残余阻力随循环次数的变化情况如图5所示。由图5可以看出, GL-1和SGL-1在前30个循环周期的残余阻力远低于GL-2和SGL-2的。这是因为覆膜后玻纤复合滤料实现了表层过滤, 残余阻力提高。前30个循环周期, GL-2和SGL-2的残余阻力值变化趋势基本一致, GL-1和SGL-1的相当。但经10000次老化后, 在后30个循环周期, 试样的残余阻力表现出明显的差异, 其中, GL-2的残余阻力最大, GL-1次之, SGL-2再次之, SGL-1的残余阻力最小。水刺滤料在后30个循环周期的残余阻力明显低于针刺滤料的, 其中SGL-1的残余阻力基本稳定在约277 Pa, 相比同类型的针刺滤料GL-1降低了近45%, SGL-2的残余阻力也比同类型的针刺滤料

GL-2降低了约20%。这表明, 水刺滤料的残余阻力比针刺滤料的小得多, 原因是水刺滤料的微孔结构使粉尘很难渗入其深层, 并且水刺滤料挺度低, 柔韧性好, 清灰时粉尘更容易剥落, 从而实现了良好的表层过滤效果。

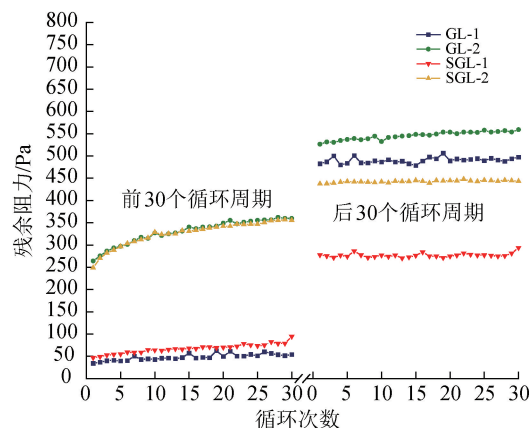


图5 4种玻纤复合滤料老化前后循环次数对残余阻力的影响

Fig. 5 Effect of cycle times on residual resistance of 4 kinds of glass fiber composite filters before and after aging

图6比较了4种玻纤复合滤料后30个循环周期的过滤效率和出口排放浓度。由图6可知: 4种玻纤复合滤料的过滤效率均大于99.99%, 超过了T/CAEPI 21—2019标准要求的过滤效率指标, 过滤效率大小依次为SGL-2>GL-2>SGL-1>GL-1; 4种玻纤复合滤料的出口排放浓度均小于0.2 mg/m³, 出口排放浓度大小依次为GL-1>SGL-1>GL-2>SGL-2, 其中SGL-2的出口排放浓度仅为0.014 mg/m³, 表明水刺工艺及PTFE覆膜处理可以有效提高玻纤复合滤料的过滤精度。

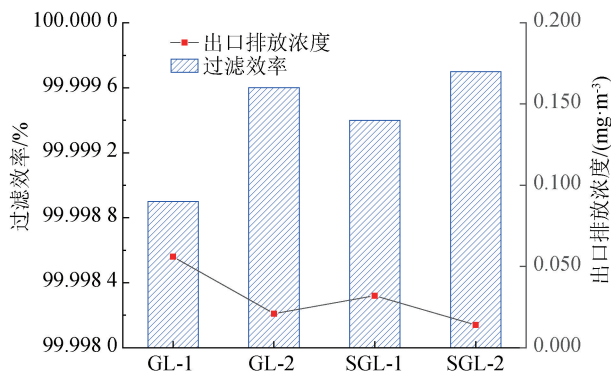


图6 4种玻纤复合滤料的过滤效率和排放浓度

Fig. 6 Filtration efficient and emission concentration of 4 kinds of glass fiber composite filters

3 结论

(1) 在确保滤料使用性能与寿命的前提下,水刺玻纤复合滤料的面密度比同类型针刺玻纤复合滤料的小 10% 以上,其纤维之间缠结得更紧密,整体力学性能更优。

(2) 水刺玻纤复合滤料的经、纬向挺度明显小于同类型针刺玻纤复合滤料的,其经、纬向断裂强力保持率均大于同类型针刺玻纤复合滤料的,表明水刺工艺制得的玻纤复合滤料柔韧性和耐折性能更好,有助于延长滤袋的使用寿命。

(3) 过滤性能方面,经 10 000 次老化后,在后 30 个循环周期,4 种玻纤复合滤料的残余阻力表现出明显的差异,残余阻力大小依次为 GL-2>GL-1>SGL-2>SGL-1。总体而言,水刺滤料的长期残余阻力低于同类型针刺滤料的,过滤效率则高于同类型针刺滤料的,其节能减排效果明显。



参考文献

[1] HE M, ICHINOSE T, KOBAYASHI M, et al. Differences in allergic inflammatory responses between urban PM_{2.5} and fine particle derived from desert-dust in murine lungs[J]. *Toxicol Appl Pharmacol*, 2016, 297: 41-55.

[2] TANG M, THOMPSON D, CHANG D Q, et al. Filtration efficiency and loading characteristics of PM_{2.5} through commercial electret filter media[J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 195: 101-109.

[3] ZHAO X, WANG S, YIN X, et al. Slip-effect functional air filter for efficient purification of PM_{2.5} [J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 35472.

[4] 陈明星,王新亚,张威,等. 纤维基耐高温空气过滤材料研究进展[J]. *化工进展*, 2023, 42(5): 2439-2451.

[5] GIVEHCHI R, TAN Z. The effect of capillary force on airborne nanoparticle filtration [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2015, 83: 12-24.

[6] ZHANG H, LIU J, ZHANG X, et al. Design of three-dimensional gradient nonwoven composites with robust dust holding capacity for air filtration [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(31):47827.

[7] 宋磊磊. 高性能纤维针刺毡三维重构及其复合材料性能表征[D]. 天津:天津工业大学, 2016.

[8] 刘侃,赵毅. 高温除尘无机滤料国内外进展综述[J]. *环境工程*, 2017, 35(6): 69-72.

[9] 徐山,杨振东. P84/玻纤复合针刺毡滤料纵横向损伤对比研究[J]. *玻璃纤维*, 2014 (4): 39-46.

[10] 杨东,徐辉,刘江峰,等. 常规针刺与新型水刺工艺对 PPS 滤料性能影响研究 [J]. *化纤与纺织技术*, 2017, 46(3): 29-32.

[11] 何丽芬,于淼涵,刘建祥,等. 芳纶水刺滤料的制备及性能研究[J]. *产业用纺织品*, 2018, 36(5): 13-23.

[12] 何丽芬,于淼涵,刘建祥,等. 开纤化水刺滤料的制备及关键技术研究 [J]. *产业用纺织品*, 2018, 36(4): 18-22.

[13] 郝景标,王勇. 水刺工艺对非织造布产品性能的影响 [J]. *化纤与纺织技术*, 2022, (8): 22-25.

[14] 翁美玲,张孝南,侯伟丽. 水刺工艺在工业除尘滤料上的应用和发展趋势 [J]. *产业用纺织品*, 2011, 29 (11):38-42.

[15] 杨学勇,任强,陈凯. 水刺非织造布产品质量的影响因素分析 [J]. *福建轻纺*, 2010(7):36-38.

[16] 商延航,刘双营. 水刺非织造布透气率的影响因素分析 [J]. *山东纺织科技*, 2022(1): 21-23.

[17] 王远富,马腾飞,雍园园,等. 水刺非织造布厚度影响因素分析 [J]. *山东纺织科技*, 2021(6):26-28.

[18] 董二莹,金银山,王松. 水刺复合非织造布的现状分析及前景展望 [J]. *化纤与纺织技术*, 2022 (1): 46-48.

[19] 蔡伟龙,乐世平,方国阳,等. 水刺工艺对 PPS 滤料产品性能的影响 [J]. *中国环保产业*, 2013 (12): 48-51.

[20] 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.

[21] 李强,宋乐,孙鑫,等. 温度对 PPS 滤料挺度及耐磨性影响的实验研究 [J]. *中国环保产业*, 2018 (3): 18-21.

[22] 毛宁,高洋,韩旭,等. 袋式除尘用滤料挺度与温度关系的试验研究 [J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(3): 826-829.