

湿法玻纤滤纸多分散气溶胶过滤性能的比较与分析

张帆¹ 王其¹ 阚帆¹ 刘俊源² 葛慧敏^{3a,3b} 宋宇^{3a,3b}

- 九江七所精密机电科技有限公司, 江西 九江 332005;
- 广东惠州天然气发电有限公司, 广东 惠州 516080;
- 东华大学 a. 纺织学院, b. 产业用纺织品教育部工程研究中心, 上海 201620

摘要: 目前已有关于呼吸防护滤材的大量研究, 但气溶胶过滤标准化测试所用多分散性气溶胶的颗粒物直径分布及滤材的分级过滤特性未见报道。选取 3 种不同等级的湿法玻纤滤纸并对其滤材结构进行表征, 采用 PMFT 1000 测试台测试标准条件下氯化钠气溶胶与石蜡油气溶胶的粒径分布, 以及 3 种湿法玻纤滤纸的计数过滤效率、过滤阻力、分级过滤效率与计重过滤效率, 并与 8130A 测试台的测试结果进行对比。研究表明, 高等级的湿法玻纤滤纸在全粒径范围内具有更高的分级过滤效率; 湿法玻纤滤纸的最易穿透粒径与滤纸自身结构关联性低。滤材分级过滤效率与计重过滤效率指标使呼吸防护滤材的性能评价更为全面。

关键词: 湿法; 玻纤滤纸; 空气过滤; 多分散气溶胶; 粒径分布; 分级过滤效率

中图分类号: TS 174.5

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2024)12-0008-06

Poly-dispersed aerosol filtration performance of wet-laid glass-fiber filter papers: comparison and analysis

Zhang Fan¹, Wang Qi¹, Kan Fan¹, Liu Junyuan², Ge Huimin^{3a,3b}, Song Yu^{3a,3b}

- Jiujiang 707 Sci & Tech Co., Ltd., Jiujiang 332005, Jiangxi, China;
- Guangdong Huizhou LNG Power Co., Ltd., Huizhou 516080, Guangdong, China;
- a. College of Textiles, b. Engineering Research Center of Technical Textiles, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: Lots of work focus on the breath protection filters, however, the particle size distribution of poly-dispersed aerosol used in standard aerosol filtration testing and the fractional filtration characteristics of filters have not been reported. Wet-laid glass-fiber filter papers with 3 different grades were selected, and their structural factors were tested. The particle size distribution of NaCl aerosol and paraffin oil aerosol was characterized by PMFT 1000 filter tester. The number filtration efficiency, pressure drop, fractional filtration efficiency and mass filtration efficiency were also measured. Control tests were conducted using 8130A filter tester. It shows that the higher-grade wet-laid glass-fiber filter paper exhibits higher fractional filtration efficiency at the full detected particle size range. The correlation between the most penetrating particle size and the filter paper structure is

基金项目: 上海市启明星项目扬帆专项(23YF1400600); 中央高校基本科研业务费专项资金(2232023G-06)

收稿日期: 2024-09-19

作者简介: 张帆, 男, 1992 年生, 工程师, 主要从事过滤系统设计工作

通信作者: 宋宇, 讲师, 主要研究方向为非织造空气过滤材料, songyu@dhu.edu.cn

low. The fractional filtration efficiency and mass filtration efficiency indicators provide a more comprehensive evaluation of breath protection filters.

Keywords: wet-laid; glass-fiber filter paper; air filtration; poly-dispersed aerosol; particle size distribution; fractional filtration efficiency

随着工业化和城市化的持续推进,空气污染已成为全球公共健康领域普遍关注的议题^[1]。气溶胶作为大气中污染颗粒物的主要存在形式,对人体心血管及呼吸系统造成了严重威胁^[2-3]。当前,使用非织造材料进行空气过滤是实现空气净化的重要手段,而日益严格的工业排放标准、室内空气质量标准及不断提高的职业安全防护意识,均促使人们对非织造空气过滤材料的性能提出更高的要求。

空气过滤材料过滤性能的评价离不开标准化测试。其中,GB 2626—2019《呼吸防护用品 自吸过滤式防颗粒物呼吸器》是针对包括粉尘、烟、雾和微生物在内的各类气溶胶颗粒物设定的强制性防护标准。该标准不仅应用于呼吸防护滤材测试^[4],其规定的过滤测试条件(如面风速为 5.33 cm/s)也广泛应用于高温烟气除尘^[5]、汽车滤清系统^[6]、暖通空调高效过滤^[7]等领域滤材的检测与分析。聚苯乙烯乳胶颗粒因粒径高度集中,常用于颗粒传感器的校准^[8]。而常规气溶胶如粉尘气溶胶等的粒径则呈多分散特性^[9]。参照 GB 2626—2019 生成的氯化钠气溶胶数量中位数直径为 75 nm^[10]、质量中位数直径为 260 nm^[11],油性气溶胶的数量中位数直径为 185 nm^[10]、质量中位数直径为 330 nm^[12],但关于这些气溶胶的粒径分布详情鲜有文献报道。同时,针对该标准条件下非织造滤材在相应粒径范围内的分级过滤特性,目前也未见报道。此外,非织造空气滤材领域的其他常用测试标准,如 GB/T 6719—2009《袋式除尘器技术要求》和 DL/T 1175—2021《火力发电厂锅炉烟气袋式除尘器 滤料滤袋技术条件》等,同样未涉及气溶胶的多分散性及滤材的分级过滤特性评估^[13-14]。

本文以 3 种不同结构、等级标准的湿法玻纤滤纸为研究对象,参照 GB 2626—2019,使用德国 Palas 公司的 PMFT 1000 型滤材过滤性能测试系统测试其对多分散气溶胶的过滤性能,并使用美国 TSI 公司的 8310A 型自动滤料测试仪进行对照试验。探讨在该气溶胶防护滤材测试标准条件下生成的气溶

胶的多分散性,以及滤材结构对其多分散气溶胶过滤特性的影响,为后续气溶胶过滤用滤材的设计与开发提供新思路。

1 试验

1.1 滤材和仪器

试验用滤材为 F8 和 F9 等级的一般通风用玻纤滤纸,以及 H11 等级的中高效玻纤滤纸,由南京玻璃纤维研究设计院有限公司提供。

试验用仪器如表 1 所示。

表 1 试验用仪器

Tab. 1 Test instruments

仪器	生产供应商
FLEX 1000 型扫描电子显微镜	日本日立有限公司
CFP-1100AI 型孔径分析仪	美国 PMI 公司
YG461E 型全自动织物透气仪	温州方圆仪器有限公司
PMFT 1000 型滤材过滤性能测试系统	德国 Palas 公司
Promo 1000 型光度计	德国 Palas 公司
8130A 型自动滤料测试仪	美国 TSI 公司
8587A 型光度计	美国 TSI 公司

1.2 试验方法

1.2.1 纤维直径分布

采用 FLEX 1000 型扫描电子显微镜(SEM)观察湿法玻纤滤纸表面。每种滤纸的正反面均随机拍摄 5 张 SEM 图,并导入 ImageJ 软件进行纤维直径测量。

1.2.2 孔径及其分布

参照 GB/T 2679. 14—1996《过滤纸与纸板最大孔径的测定》,采用具有一定表面张力的 GalwickTM 浸润液充分润湿湿法玻纤滤纸试样,然后采用 CFP-1100AI 型孔径分析仪测量试样的孔径及其分布。每种滤纸试样进行 3 次平行测试,结果取平均值。

1.2.3 透气性

参照 GB/T 5453—1997《纺织品 织物透气性的测定》,采用 YG461E 型全自动织物透气仪,测试湿

法玻纤滤纸的透气性。每种滤纸取不同部位进行10次平行测试,结果取平均值。

1.2.4 气溶胶过滤性能

参照 GB 2626—2019,在帕刺斯仪器(上海)有限公司使用 PMFT 1000 型滤材过滤性能测试系统测试湿法玻纤滤纸的多分散气溶胶过滤效率和过滤阻力,在必维申美商品检测(上海)有限公司采用 8130A 型自动滤料测试仪进行对照测试。2 种滤材过滤性能测试仪统称为“测试台”。

测试气溶胶为氯化钠气溶胶与石蜡油气溶胶。测试面积为 100 cm^2 ,设定流量为 32 L/min ,对应的面风速为 5.33 cm/s 。每种滤纸进行3次平行测试,结果取平均值。

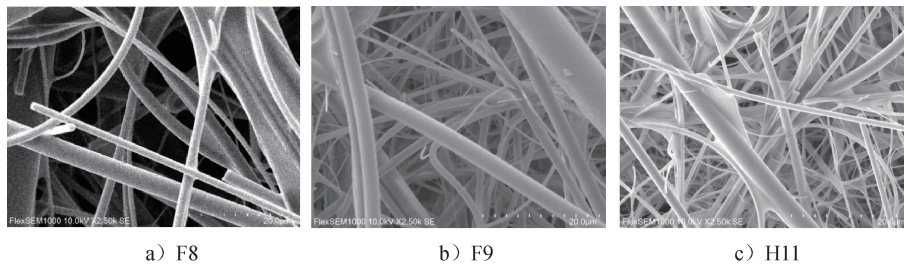


图1 3种湿法玻纤滤纸的SEM图

Fig. 1 SEM images of three kinds of wet-laid glass-fiber filter papers

基于3种滤材的SEM图,分别量取了131、153和162根纤维的直径,得到对应的纤维直径分布如图2所示。可知,F8、F9和H11湿法玻纤滤纸的纤维平均直径分别为 (3.38 ± 2.74) 、 (2.74 ± 1.95) 和 $(1.87 \pm 1.49)\text{ }\mu\text{m}$,表明滤纸等级越高,其纤维平均直径越小。

2.1.2 滤材结构参数与孔径分布

3种湿法玻纤滤纸的结构参数见表2。可以看出,3种滤材的面密度非常接近。尽管滤纸等级越高,对应的纤维平均直径越小,但3种滤材的孔隙率

2 结果与讨论

2.1 纤维直径与滤材结构

2.1.1 纤维直径分布

试验用F8、F9和H11湿法玻纤滤纸的微观结构SEM图如图1所示,使用的放大倍数分别为1800、2500和2500。由图1可以看出,湿法玻纤滤纸表面既含有微细纤维,又有较粗的纤维,纤维直径分布呈现出较大离散性。这是由于在滤纸制备的配抄(类似于纺织领域的混棉)工序,细纤维的加入可提高滤纸过滤效率,而粗纤维的引入能够降低过滤阻力^[15]。

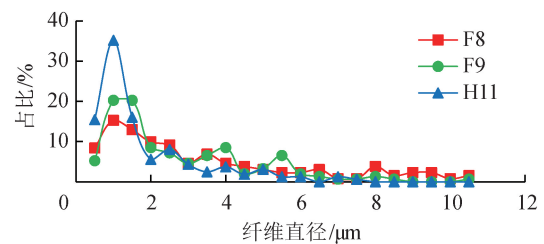


图2 3种湿法玻纤滤纸的纤维直径分布

Fig. 2 Fiber diameter distribution of three kinds of wet-laid glass-fiber filter papers

与平均孔径相差不大。

表2 3种湿法玻纤滤纸的结构参数

Tab. 2 Structural factors of three kinds of wet-laid glass-fiber filter papers

湿法玻纤滤纸	面密度/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$	厚度/ μm	孔隙率/%	平均孔径/ μm
F8	73.13 ± 0.85	658.6 ± 14.0	95.70	5.79 ± 0.05
F9	76.45 ± 0.70	794.4 ± 76.0	96.27	4.68 ± 0.12
H11	72.43 ± 0.91	555.0 ± 8.5	94.94	6.36 ± 0.14

3种湿法玻纤滤纸的孔径分布如图3所示。可以看出,3种试样的孔径分布均较集中,表明试样的

孔径均匀性与结构一致性好,进而能够确保样品间的过滤性能差异小。

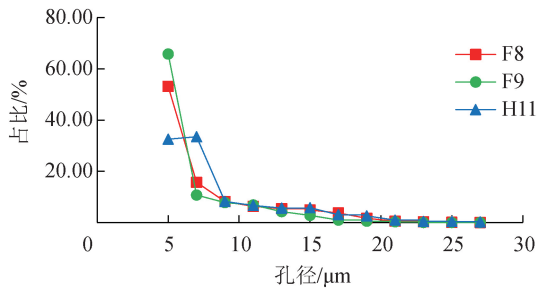


图 3 3 种湿法玻纤滤纸的孔径分布

Fig. 3 Pore size distribution of three kinds of wet-laid glass-fiber filter papers

2.2 过滤性能

2.2.1 湿法玻纤滤纸的透气性

3 种湿法玻纤滤纸的透气率测试结果如表 3 所示。可知在相同测试条件下,滤纸等级越高,透气率越小,透气性越差。这是由于尽管 3 种滤材的面密度、孔隙率、平均孔径相近,但高等级滤纸的纤维平均直径小、比表面积大,对气流的阻滞作用强,具体表现在透气率小。

表 3 3 种湿法玻纤滤纸的透气率

Tab. 3 Air permeability of three kinds of wet-laid glass-fiber filter papers

湿法玻纤滤纸	压差/Pa	测试面积/cm ²	透气率/(mm·s ⁻¹)
F8	100	20	117.84±5.63
F9	100	20	79.05±1.30
H11	100	20	41.17±0.49

2.2.2 氯化钠溶胶过滤性能

使用 PMFT 1000 测试台的 Promo 1000 型光度计测试过滤上游的氯化钠气溶胶在 0.107 ~ 2.950 μm 的粒径分布,测试结果包含 24 个数据点,如图 4 所示。可得氯化钠气溶胶颗粒的粒径数量平均值为 0.210 μm,粒径数量中位数为 0.165 μm。

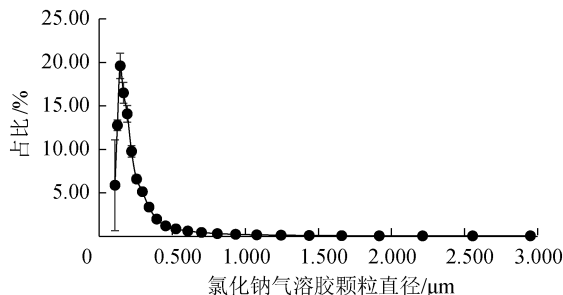


图 4 氯化钠气溶胶的粒径分布

Fig. 4 Particle size distribution of NaCl aerosol

采用 PMFT 1000 测试台和 8130A 测试台测试的湿法玻纤滤纸对多分散氯化钠气溶胶的过滤性能如图 5 所示。结果显示,高等级的玻纤滤纸具有更高的氯化钠气溶胶过滤效率和过滤阻力。此外,2 种测试台测得的计数过滤效率[图 5a)]与过滤阻力[图 5b)]结果极为接近。以 H11 滤纸为例,2 种测试台计数过滤效率测试差值仅为 1.46%,而这一差值也符合美国 NOISH 标准中规定的差异要求。

PMFT 1000 测试台使用的 Promo 1000 型光度计除能够测试过滤效率、过滤阻力等常规指标外,还能够给出与图 4 所示粒径分布一一对应的分级过滤效率,即滤材对氯化钠气溶胶在 0.107 ~ 2.950 μm 范围内每一粒径数据点的分级过滤效率。该分级过滤效率测试原理与 EN 1822-2019《高效空气过滤器》标准的相同,均是基于粒子计数法。

3 种湿法玻纤滤纸的分级过滤效率如图 5c) 所示,可以看出,等级越高的玻纤滤纸在全粒径范围内的过滤效率越高。高等级滤纸通常具有更高等级的过滤精度,但由图 5c) 可以看出,F8 和 H11 滤纸对氯化钠气溶胶的最易穿透粒径(MPPS)均为 0.143 μm,而 F9 滤纸的 MPPS 为 0.165 μm,表明在 GB 2626-2019 测试条件下,滤材对氯化钠气溶胶的 MPPS 与滤材结构关联性低。结合图 5c) 可计算得 3 种滤材的计重过滤效率如图 5d) 所示。可知,F8、F9 和 H11 湿法玻纤滤纸的计重过滤效率分别为 (89.56±2.52)%、(94.94±1.01)% 和 (99.33±0.01)%。计重过滤效率越高,表明滤材对大粒径颗粒物的捕获能力越强。通常,大粒径颗粒物在体积与质量上占主导地位,当过滤阻力一定时,滤材捕获颗粒物的体积与质量越多,其所对应的容尘量越大,因此,计重过滤效率这一指标对于分析滤材的容尘量具有重要的指导意义。总体而言,滤材分级过滤效率与计重过滤效率指标使呼吸防护滤材的性能评价更加全面。

2.2.3 石蜡油气溶胶过滤性能

使用 PMFT 1000 测试台的 Promo 1000 型光度计测试过滤上游的石蜡油气溶胶在 0.107 ~ 2.950 μm 的粒径分布,测试结果包含 24 个数据点,如图 6 所示。可得石蜡油气溶胶的粒径数量平均值为 0.380 μm,粒径数量中位数为 0.255 μm。

采用 PMFT 1000 测试台和 8130A 测试台测试

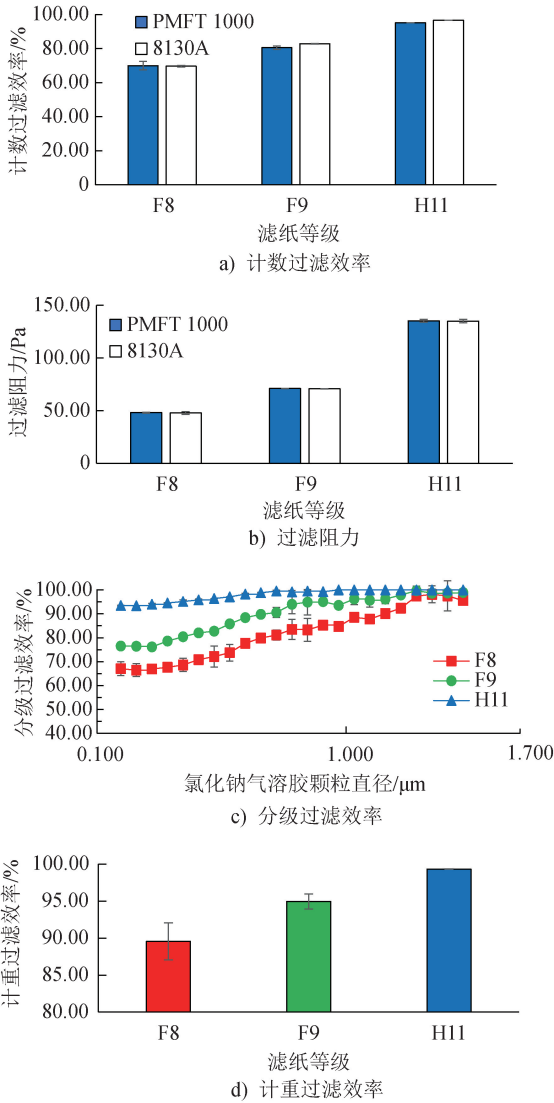


图5 多分散氯化钠气溶胶过滤性能

Fig. 5 Filtration performance against poly-dispersed NaCl aerosol

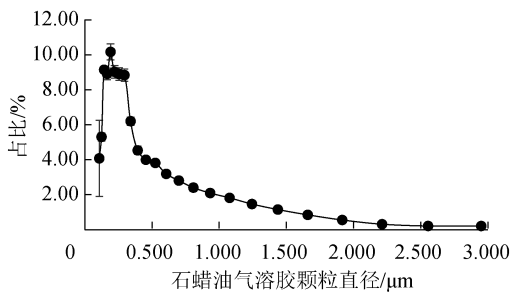


图6 石蜡油气溶胶的多分散粒径分布
Fig. 6 Particle size distribution of oily aerosol

的湿法玻纤滤纸对多分散石蜡油气溶胶的过滤性能如图7所示。结果显示,高等级的玻纤滤纸具有更高的石蜡油气溶胶过滤效率。同时,PMFT 1000 测试台测得的计数过滤效率略高于 8130A 测试台的

测试结果,3种滤材的计数过滤效率差值分别为5.13%、6.55%和2.27%[图7a)],其原因有待于从油性气溶胶发生原理的角度明晰。由图7b)可知,2个测试台所得H11湿法玻纤滤纸过滤阻力差值为8.81 Pa,该测试结果差异可能源于测试台间差异或试样间的偏差。

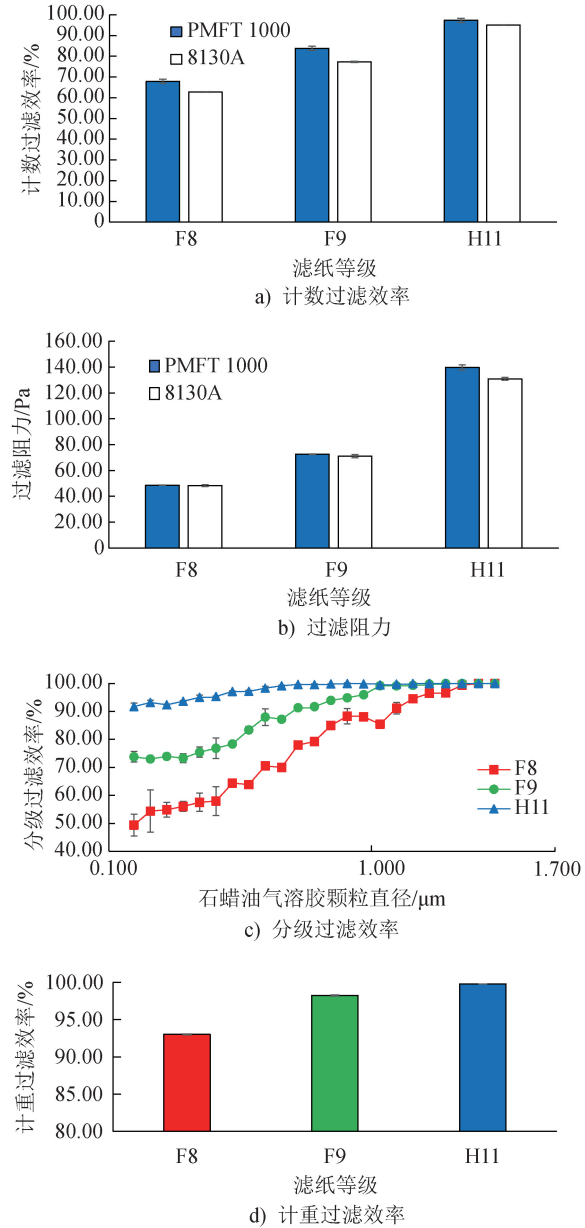


图7 多分散石蜡油气溶胶过滤性能

Fig. 7 Filtration performance against poly-dispersed paraffin oil aerosol

Promo 1000 型光度计还给出了滤材对石蜡油气溶胶在 0.107~2.950 μm 范围内每一粒径大小的分级过滤效率,结果如图7c)所示。可以看出,等级

越高的玻纤滤纸在全粒径范围内对石蜡油气溶胶的过滤效率越高。高等级滤纸通常具有更高等级的过滤精度,但由图 7c)可以发现,F8 和 H11 滤纸对石蜡油气溶胶的 MPPS 均为 $0.124\ \mu\text{m}$,而 F9 滤纸的 MPPS 为 $0.143\ \mu\text{m}$,表明在 GB 2626—2019 测试条件下,滤材对石蜡油气溶胶的 MPPS 与滤材结构关联性低。此外,结合图 7c)可计算得 3 种滤材的计重过滤效率分别为 $(93.02\pm 0.06)\%$ 、 $(98.24\pm 0.10)\%$ 和 $(99.79\pm 0.01)\%$ [图 7d)],表明高等级滤纸对大粒径油性颗粒物的捕获能力更强。通常大粒径颗粒物在体积与质量上占主导地位,当过滤阻力一定时,滤材捕获颗粒物的体积与质量越多,其所对应的油性液滴捕获量越大。综上,计重过滤效率这一指标对于分析滤材吸收油性颗粒物后孔隙饱和情况,以及探究滤材的长效油性气溶胶过滤性能,具有指导意义。

3 结论

本文选择 F8、F9 和 H11 这 3 种等级的湿法玻纤滤纸,利用 PMFT 1000 测试台与 8130A 测试台测试 3 种滤材的氯化钠气溶胶过滤性能与石蜡油气溶胶过滤性能,得出如下结论。

(1) PMFT 1000 测试台的 Promo 1000 型光度计不仅可检测滤材的计数过滤效率,还可测试氯化钠与石蜡油气溶胶的粒径分布,以及滤材的分级过滤效率与计重过滤效率,其对呼吸防护滤材的性能评价更为全面。

(2) 高等级湿法玻纤滤纸具有更小的纤维平均直径,其计数过滤效率、过滤阻力、全粒径范围的分级过滤效率及计重过滤效率更高。3 种湿法玻纤滤纸的最易穿透粒径与其自身结构的关联性低。



期刊采编平台

中国知网下载

参考文献

[1] LIU C, CHEN R, SERA F, et al. Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities [J]. *New England Journal of Medicine*, 2019, 381(8): 705-715.
[2] ZHANG K, BROOK R D, LI Y F, et al. Air pollution,

built environment, and early cardiovascular disease [J]. *Circulation Research*, 2023, 132(12): 1707-1724.
[3] XUE Y G, WANG L X, ZHANG Y M, et al. Air pollution: a culprit of lung cancer [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 434: 128937.
[4] 潘宏杰, 杨小兵, 周川, 等. 新型冠状病毒防护口罩过滤效率测试标准比对 [J]. *纺织学报*, 2021, 42(6): 97-105.
[5] 燕芮, 刘嘉炜, 张旭东, 等. 对位芳纶纳米纤维/熔喷非织造复合过滤材料的制备及性能研究 [J]. *产业用纺织品*, 2021, 39(4): 20-24.
[6] YAO Y Z, LIU S H, YOU T L, et al. Application of microfibrillated fibers in robust and reusable air filters with long service time in the ambient with high oily aerosols concentration [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 295: 121263.
[7] ZHANG W Y, DENG S M, ZHANG S, et al. Energy consumption performance optimization of PTFE HEPA filter media during dust loading through compositing them with the efficient filter medium [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 78: 103657.
[8] KANG S, LAI W T, CHEN S C, et al. Measurement of dispersity of ISO A2 fine dusts by shadowgraph method [J]. *Powder Technology*, 2018, 323: 186-194.
[9] SONG Y, SHIM E. Structure characterization of the clogging process of coarse fibrous filter media during solid particle loading with X-ray micro-computed tomography [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 273: 118980.
[10] LEE K, JUNG S, LEE J, et al. Probing the nanoparticle loading characteristics and the filtration performance with the continuous and intermittent use of disposable filtering masks [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2021, 4(2): 2167-2174.
[11] 吴燕金, 王江, 王洪. 水驻极聚丙烯熔喷非织造材料的制备及其带电特性分析 [J]. *纺织学报*, 2022, 43(12): 29-34.
[12] 张星, 王玉晓, 靳向煜. 高性能改性熔喷材料的制备及其过滤性能 [J]. *上海纺织科技*, 2021, 49(10): 12-16.
[13] 郑智宏. 工业烟尘过滤用水刺玻纤复合滤料性能研究 [J]. *产业用纺织品*, 2024, 42(2): 28-33.
[14] 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.
[15] 冉超, 杨栋, 游天乐, 等. 松厚度对高效滤纸结构和性能影响的数值模拟研究 [J]. *中国造纸*, 2023: 39-45.