

## 纤维滤袋孔径特征对过滤性能的影响

柳静献<sup>1</sup>, 李亚霏<sup>1</sup>, 吕超<sup>1</sup>, 赵翰鹏<sup>2</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;  
2. 中国铁道科学研究院集团有限公司标准计量研究所, 北京 100081)

**摘要:** 为探究袋式除尘滤料孔径特征及其对过滤性能的影响, 分别选用针刺毡、水刺毡和覆膜类纤维滤袋共13种样品, 采用泡点法对其最大孔径及平均孔径进行测试, 利用场发射分析扫描电镜-Image-pro plus 6.0计算机图像软件联用分析针刺毡和水刺毡类纤维滤袋的孔径分布。结果表明: 针刺毡最大孔径及平均孔径均大于水刺毡, 覆膜类滤料的最大孔径及平均孔径最小; 内部孔喉最大孔径及平均孔径会影响到透气度、过滤效率和过滤阻力的大小, 随着孔径的增大, 透气度逐渐增加; 孔径越小则过滤效率越大。此外, 水刺毡滤料的表观孔径分布较针刺毡滤料更加集中, 分布更加均匀, 这对提高滤料的过滤效率有一定程度的影响。

**关键词:** 纤维滤袋; 孔径分布; 透气度; 分级计数效率; 过滤阻力

中图分类号: TS 174 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)11-1629-09

## Effect of Pore Characteristics on Filtration Performance of Filter Bag

LIU Jing-xian<sup>1</sup>, LI Ya-fei<sup>1</sup>, LYU Chao<sup>1</sup>, ZHAO Han-peng<sup>2</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Standards & Metrology Research Institute China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China. Corresponding author: LIU Jing-xian, E-mail: liujingxian@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** To study the effect of pore characteristics on filtration performance of filter bag, the maximum pore size and mean pore size of thirteen kinds of samples are determined by bubble-point method, mainly including needled filter bag, spunlace filter bag and membrane covered filter bag. In addition, the pore distribution characteristics of needled filter bag and spunlace filter bag are also analyzed by a combination of scanning electron microscope and Image-pro plus 6.0. The results show that the maximum pore size and mean pore size of needled filter bag are larger than those of the spunlace filter bag, and the pore size of the membrane covered filter bag is the lowest one. The maximum pore size and mean pore size of the internal pore throat have an effect on the air permeability, filtration efficiency and pressure drop of filter bags. Air permeability increases with the increase of pore size. The filtration efficiency increases with the decrease of pore size. Additionally, the pore distribution of spunlace filter bag is more concentrated and uniform than other kinds of filter bags, which has a certain degree of influence on the improvement of filtration efficiency of filter materials.

**Key words:** filter bag; pore size distribution; air permeability; fractional counting efficiency; pressure drop

作为世界第一大工业制造国, 我国的钢铁、 占比例较大, 重工业的发展一方面带来了巨大经济  
电力、水泥、燃煤锅炉等重工业在工业产值中所 经济效益, 促进了我国经济的快速发展; 另一方面

收稿日期: 2023-06-07

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划项目(2022YFC2503201); 国家自然科学基金资助项目(52174215); 辽宁省兴辽人才计划(XLYC2002091); 辽宁省揭榜挂帅科技攻关专项(2021JH1/10400023); 浙江省重点研发计划项目(2020C03089); 工信部绿色制造项目(2018LSLN001)。

作者简介: 柳静献(1966-), 男, 河北元氏人, 东北大学教授, 博士生导师。

也产生了大量的烟尘污染,为大气环境治理带来了巨大的挑战. 21 世纪以来,工业化进程产生的废水、废气和废液,以及大量汽车尾气的排放造成了居民生活环境质量急剧下降,这些工业含尘废气的排放增加了呼吸道疾病的患病概率,对居民健康产生了极大的威胁<sup>[1-3]</sup>. 在国家推行绿色发展方式,促进人与自然和谐共生的大背景下,各行业对废气排放制定了更加严格的污染物排放标准.

袋式除尘是控制粉尘尤其是微细颗粒物的最有效手段,过滤材料是其核心,其过滤性能很大程度上取决于其孔径大小及其分布特征. 刘造芳等<sup>[4]</sup>和赖艳等<sup>[5]</sup>分别探究了温度和纤维混合比对针刺滤料孔径及透气度的影响,但并未研究其对过滤性能的影响规律. Bao 等<sup>[6]</sup>研究了纤维直径、纤维形状、纤维结构以及杨氏模量对纤维滤料除尘效率的影响规律. Niedziela 等<sup>[7]</sup>通过分析纤维图像研究了针刺毡滤料孔径尺寸、孔径形状和孔径取向对纤维强度的影响. Rawal<sup>[8]</sup>开发了预测非织造结构孔径分布的模型,发现纺粘非织造滤料和针刺非织造滤料的实验孔径分布和理论孔径分布有很好的 consistency. Li 等<sup>[9]</sup>推导出纳米纤维过滤效率和孔径之间的数学模型. Nakamura 等<sup>[10]</sup>研究了纤维直径和孔隙率等非织造滤料设

计参数对孔径分布的影响,用来预测纤维滤料的中值直径. Seok 等<sup>[11]</sup>研究了孔径和纤维直径对金属纤维过滤器压差特性、烟灰颗粒沉积质量以及过滤效率的影响,为袋式纤维滤料孔径特征提供参考依据.

综上所述,前人对纤维滤袋孔径特征进行了一定的研究,但关于纤维滤袋孔径特征对其过滤性能影响的研究仍需进一步展开. 因此,本文对工业中袋式除尘常用的不同类型的纤维滤袋的最大孔径、平均孔径、表征孔径分布情况和过滤性能进行测试,探究滤料内部孔喉最大孔径、平均孔径、表征孔径分布与透气度和过滤性能之间的关系,研究成果为纤维滤料的设计制造及其捕集机理提供实验支撑.

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料

本文选取针刺毡、水刺毡和覆膜滤袋共计 13 种测试样品,分别标号 1#~13#. 采用 JD 2000-2 型电子天平、YG(B) 141D 数字式织物厚度仪、YG(B) 461E 型数字式织物透气性能测试仪对滤料的基本性能参数进行测量. 表 1 给出了实验材料特性参数的测试结果.

表 1 实验样品参数特性  
Table 1 Parameter characteristics of experimental samples

编号	生产厂家	样品类型	面密度/(g·m <sup>-2</sup> )	厚度/mm
1#	ZJHS	针刺毡	687.85	1.64
2#	EEDS	针刺毡	539.56	1.52
3#	FSXDF	针刺毡	597.78	1.43
4#	HHHT	针刺毡	594.07	1.46
5#	ZZYB	超细海岛纤维+针刺毡	535.85	2.11
6#	JH	水刺毡	543.56	1.79
7#	JH	水刺毡	705.48	1.35
8#	JH	水刺毡	741.93	1.40
9#	HSWX	PTFE 覆膜针刺毡	814.67	1.05
10#	HSWX	PTFE 覆膜针刺毡	568.00	1.93
11#	HSWX	PTFE 覆膜针刺毡	628.67	2.03
12#	JSFS	覆膜玻纤机织布	814.67	0.93
13#	YSRD	PTFE 覆膜针刺毡	573.78	1.66

### 1.2 孔径大小及分布测试方法

孔径测试方法一般可以分为直接法和间接法两种. 直接法包括显微镜观察法、X 射线小角度散射测量法、扫描电镜-计算机图像软件联用法. 间接法则是假设孔隙为均匀的直通圆孔,利用一

些与孔径相关的物理现象,通过实验测出的相关物理参数,计算得到孔隙等效孔径,主要包括泡点法、压汞法和气体吸附法<sup>[12-15]</sup>. 孔径测试方法在已知孔径尺寸的基础上结合滤料的材质、孔隙形貌、使用工况、设备资源以及成本进行综合考虑.

原子力显微镜(AFM)和扫描电子显微镜(SEM)等显微方法在测量孔呈圆柱形和直孔时非常有用<sup>[16-18]</sup>。本文主要采用扫描电镜-计算机图像软件联用法对滤料表面孔径分布进行测试,采用泡点法测试滤料内部孔喉的最大孔径及平均孔径。泡点法是采用表面张力小、能够充分浸润试样的润湿剂将滤料完全浸润,在膜的一侧通入气体,并逐步增大气体压力至被浸润在滤料孔隙中的液体按孔径大小顺次打开,测得第1个气泡出现的压力按照式(1)计算最大孔径,测得50%干曲线与湿曲线的交点处压力差得到平均孔径<sup>[19]</sup>,孔径计算方法如式(1)所示:

$$R = \frac{2\gamma \cos \theta}{p} \quad (1)$$

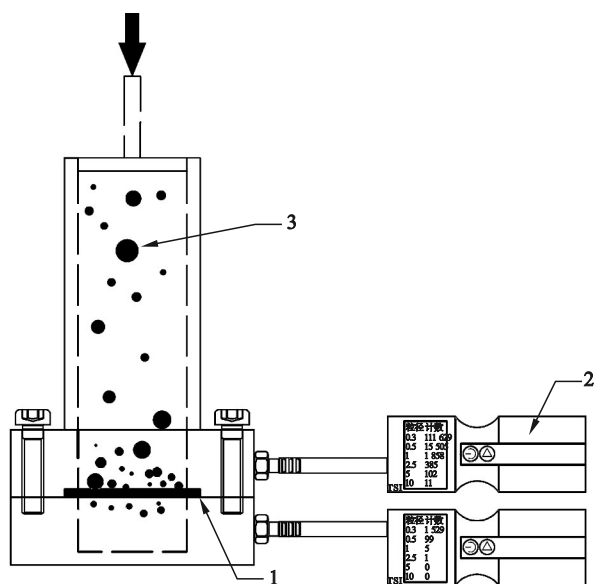
式中: $R$ 为孔的半径, $\mu\text{m}$ ;  $p$ 为排出孔隙中液体所需气体压力, $\text{Pa}$ ;  $\gamma$ 为润湿剂的表面张力, $10^{-5}\text{N/cm}$ ;  $\theta$ 为润湿剂与滤料孔隙壁的接触角, $(^\circ)$ 。

### 1.3 实验装置

图1给出了滤料过滤效率测试装置。使用TSI激光粒子计数器测试滤料在 $1.44 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 风速条件下对粒径为0.3, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0  $\mu\text{m}$ 大气气溶胶颗粒物的分级计数效率。分级计数效率计算公式为

$$f = \frac{C_i^u - C_i^d}{C_i^u} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $f$ 为分级计数效率; $C_i^u$ 为粒径是 $i$ 的上游粒子数目; $C_i^d$ 为粒径是 $i$ 的下游粒子数目, $i=0.3, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0 \mu\text{m}$ 。

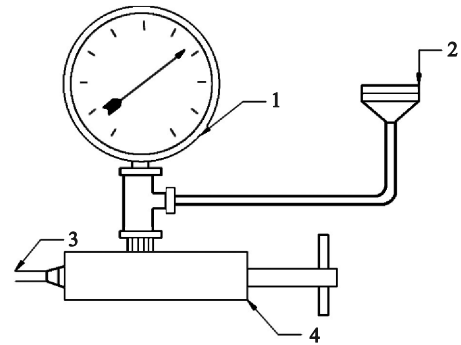


1—纤维滤袋; 2—TSI激光粒子计数器; 3—颗粒物。

图1 滤料过滤效率测试装置

Fig. 1 Test instrument of filtration efficiency for the filter materials

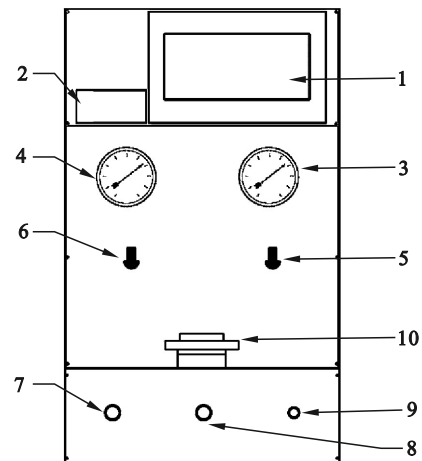
纤维滤袋内部孔喉的最大孔径及平均孔径由MPD-15K $\beta$ x型孔径测试仪测试,孔径测试原理及孔径测试仪如图2~图3所示;采用Ultra Plus型场发射分析扫描电镜分析纤维结构、形貌以及尺寸大小,将所得扫描电镜图片用Image-pro plus 6.0软件进行处理分析,得到试样的表征孔径分布情况;使用透气度测试仪测试滤料在 $0.5\sim 3.0 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 下的阻力特性和透气度。



1—压力表; 2—膜固定器; 3—气源接口; 4—微量调节器。

图2 泡点法测试原理

Fig. 2 Principle for bubble point method test



1—触摸显示器; 2—打印机; 3—预压压力表; 4—气源压力表; 5—功能切换阀; 6—测试吹干切换阀; 7—预压旋钮; 8—微调 I; 9—微调 II; 10—滤材夹具。

图3 MPD-15K  $\beta$  x 孔径测试仪

Fig. 3 MPD-15K  $\beta$  x aperture measuring instrument

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 滤料内部孔喉直径特性

利用泡点法得到的1#~13#样品内部孔喉的最大孔径以及平均孔径见表2,其中第1冒泡点压力反映最大孔径,群泡点压力反映平均孔径。由表2可以看出,冒泡点压力越小则孔径越大。例如,1#~5#针刺毡滤料中,5#样品的最大孔径值为

124.49  $\mu\text{m}$ , 为针刺毡滤料中最大孔径的最大值, 第 1 冒泡点压力最小为 0.71 kPa; 6#~8#水刺毡滤料中, 8#样品的最大孔径值最小, 第 1 冒泡点压力最大. 此外, 水刺毡滤料的最大孔径值整体上小于针刺毡滤料. 例如, 3 种水刺毡滤料中最大孔径值最大为 6#样品, 其值仅与针刺毡滤料中最大孔径值第二位的 4#样品相近. 9#~13#覆膜滤料中最大孔径值由小到大依次为 9#, 13#, 10#, 11#, 12#, 平均孔径值由小到大依次为 9#, 11#, 13#, 10#, 12#.

表 2 滤料内部孔隙直径  
Table 2 Pore size of the filter materials

样品 编号	第 1 冒泡点压力 kPa	最大孔径 $\mu\text{m}$	群泡点压力 kPa	平均孔径 $\mu\text{m}$
1#	0.82	109.03	0.89	95.79
2#	0.78	113.43	0.92	96.53
3#	1.02	86.67	1.08	82.03
4#	0.86	104.07	1.05	84.98
5#	0.71	124.49	0.89	99.50
6#	0.85	104.99	0.93	96.37
7#	1.00	89.47	1.10	81.18
8#	1.07	83.14	1.19	74.80
9#	1.19	72.85	1.70	50.76
10#	0.91	95.13	1.20	72.05
11#	0.79	109.30	1.68	51.61
12#	0.79	112.78	1.05	84.43
13#	1.17	74.61	1.38	62.75

5#针刺毡滤料的平均孔径最大为 99.50  $\mu\text{m}$ , 6#水刺毡滤料的平均孔径最大为 96.37  $\mu\text{m}$ , 12#覆膜滤料的平均孔径最大为 84.43  $\mu\text{m}$ . 由此可以看出, 覆膜滤料的平均孔径值小于水刺毡滤料, 针刺毡滤料的平均孔径值在 3 种类型滤料中最大.

## 2.2 透气度

图 4 为试样滤料透气度与孔径之间关系. 由图 4 可以看出, 3 种覆膜滤料的透气度处于 1.978~3.432  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$  范围内, 其中 9#样品的透气度最小, 为 1.518  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 1#~5#针刺毡滤料的透气度为 5.450~16.940  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ , 其中 3#样品的透气度最小为 5.450  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 6#~8#水刺毡滤料的透气度为 7.728~16.440  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ , 8#样品透气度最小为 7.728  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ . 可以看出针刺毡滤料透气度约是覆膜滤料的 1.76~11.16 倍, 水刺毡滤料透气度是覆膜型滤料的

2.49~10.83 倍, 说明了在对常规滤料进行覆膜处理后, 透气度发生明显的下降. 将不同类型滤料的透气度最小者进行对比可以发现, 9#样品透气度约为 3#的 3/11, 约为 8#样品的 1/5.

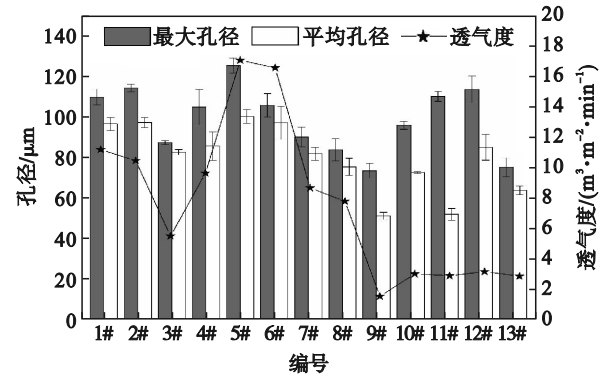


图 4 滤料透气度与孔径

Fig. 4 Air permeability and the pore size of the filter materials

由图 4 也可以看出, 6#样品的最大孔径值仅比 4#样品大 0.916  $\mu\text{m}$ , 但是平均孔径值要比 4#样品大 11.39  $\mu\text{m}$ , 因此透气度要比 4#样品多 6.876  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 7#样品的平均孔径值比 3#样品小 0.847  $\mu\text{m}$ , 最大孔径值要比 3#样品大 2.779  $\mu\text{m}$ , 透气度比 3#样品大 3.51  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ , 说明最大孔径及平均孔径对滤料的透气度均有影响. 6#样品的平均孔径值在与 1#和 2#样品相近的情况下, 其最大孔径值比 1#, 2#样品分别小 4.044, 8.442  $\mu\text{m}$ , 但是透气度要比 1#和 2#样品分别大 5.44, 6.06  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 8#比 3#样品平均孔径值要小 7.227  $\mu\text{m}$ , 最大孔径值比 3#样品小 3.53  $\mu\text{m}$ , 但是透气度却要比 3#样品大 2.278  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 由此表明水刺毡滤料最大平均孔径值在较小的情况下, 依旧可以保证较高的透气度, 在保证过滤效率的情况下降低过滤阻力.

对于 5 种覆膜滤料, 随着平均孔径值增大, 透气度也随之增大. 针刺毡、水刺毡以及覆膜滤料的最大孔径及平均孔径与透气度之间总体上呈现随着最大孔径、平均孔径的增大, 透气度增大的规律. 由图 4 还可以看出, 覆膜滤料的透气度明显小于针刺毡和水刺毡滤料. 常规针刺毡滤料一般采用直径 1~2 mm 的刺针进行反复刺穿将纤网加固而成, 而水刺毡滤料是利用高速高压水流形成的直径为 0.1 mm 的水针使纤维相互缠结抱合成毡. 因此, 针刺毡滤料通常针孔较大, 最大孔径及平均孔径值也较大, 透气度高; 而水刺毡滤料中的纤维损伤程度小、无针孔, 其孔径值相对较

小;覆膜类滤料以针织布或非织造布作为基底,在其上覆盖 PTFE 薄膜,其表层微孔直径更小,当含气流通过滤料时所受到的阻力较大,相较于针刺毡和水刺毡滤料,颗粒物更不易通过覆膜滤料.

### 2.3 过滤效率

图 5 为 13 种滤料在  $1.44 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  风速条件下分级计数效率.由图 5 可以看出,1#~5#针刺毡滤料中 5#样品对  $0.3 \sim 10.0 \mu\text{m}$  粒径的颗粒物过滤效率最低.3#样品对  $0.3, 0.5 \mu\text{m}$  粒径颗粒物的过滤效率最高,其次为 1#样品.4#样品的最大孔径及平均孔径比 1#样品小,而其对颗粒物的分级计数效率却低于 1#样品.

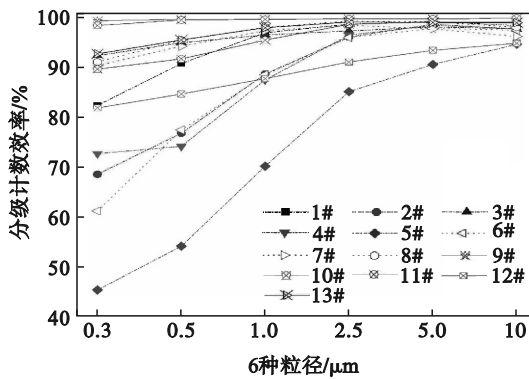


图 5 1#~13#滤料在  $1.44 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  风速条件下分级计数效率

Fig. 5 Fractional counting efficiency of the 1#~13# samples at flow velocity of  $1.44 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

5 种样品对  $2.5 \sim 10.0 \mu\text{m}$  的颗粒物过滤效率基本相同,对  $10 \mu\text{m}$  颗粒物的过滤效率接近 99%.6#~8#水刺毡滤料对微细粒子过滤效率按照 6#,7#,8#的顺序逐次增加.9#样品在 5 种覆膜滤料中对  $0.3 \sim 10.0 \mu\text{m}$  的颗粒物过滤效率最高.对于  $0.3 \sim 2.5 \mu\text{m}$  的颗粒物而言,水刺毡滤料的分级计数效率随着最大孔径及平均孔径的增加而增大,覆膜滤料的分级计数效率随平均孔径变化规律明显.

13 种滤料对 PM 2.5 过滤效率与孔径关系进行探究,如图 6 所示.由图 6 可以看出,在针刺毡滤料中,3#样品的平均孔径和最大孔径值最小,PM 2.5 过滤效率最高.3#,1#,4#,2#,5#样品的 PM 2.5 过滤效率依次降低.4#样品平均孔径和最大孔径值均要小于 1#样品,但 PM 2.5 过滤效率更低.除 1#与 4#样品的特殊情况外,5 种滤料的 PM 2.5 过滤效率变化规律总体与孔径值成正相关.水刺毡滤料的最大孔径及平均孔径对 PM 2.5

过滤效率有影响,即随着孔径的减小,滤料的 PM2.5 过滤效率随之增大.覆膜滤料的 PM 2.5 过滤效率随着平均孔径的减小而降低.

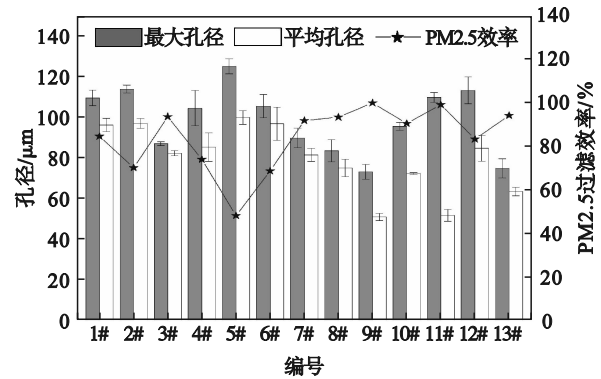


图 6 实验样品对 PM 2.5 过滤效率与孔径

Fig. 6 PM 2.5 filtration efficiency and the pore size of the samples

在孔径与滤料的分级计数效率关系研究过程中发现,9#样品平均孔径值为  $50.762 \mu\text{m}$ ,在 5 种覆膜滤料中数值最小,PM 2.5 过滤效率可达到 99.51%.覆膜滤料的整体过滤水平要大于普通针刺及水刺料.针刺毡及水刺毡滤袋本身具有三维非通孔结构,可以有效捕集粒径较小的颗粒物,主要依靠深层机械过滤机理.随着过滤时间的增加,粉尘逐渐沉积于滤袋表面形成尘饼,使得滤袋由深层过滤转向表面过滤,过滤效率将进一步提高.孔径的减小对过滤效率的提高有显著影响,因为孔径减小时尘饼更容易形成且致密,但这也造成了滤袋压差的增加.根据机械捕集效率可知<sup>[20]</sup>,滤料的纤维直径越小,纤维表面积越大,孔径越小,过滤效率越高.针刺毡滤料的最大孔径及平均孔径较水刺毡滤料要小,含气流通过时,水刺毡滤料能更有效地捕集气流中的颗粒物,过滤效率较高.覆膜滤料主要依靠表面膜过滤机理捕集脱除颗粒物,沉积的粉尘层较薄且不易穿透,其透气性小、孔隙率低、过滤效率高.

### 2.4 阻力特性

图 7~图 8 为滤料在不同过滤风速 ( $0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ) 条件下的过滤阻力.由图可以看出,过滤阻力随着风速的增加线性增大.对 13 种滤料的阻力曲线进行线性拟合,拟合数据见表 3,拟合方程斜率的大小代表了阻力增长率.

纤维直径与滤料初始压降的关系如式(3)<sup>[21]</sup>所示:

$$d_f = \sqrt{\frac{v\mu_g L}{\Delta p_0}} [64\alpha^{1.5}(1+56\alpha^3)]. \quad (3)$$

式中:  $d_f$  为纤维直径,  $\mu\text{m}$ ;  $v$  为过滤风速,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $\mu_g$  为空气动力黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $L$  为滤料厚度,  $\text{mm}$ ;  $\alpha$  为堆积密度,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\Delta p_0$  为过滤阻力,  $\text{Pa}$ .

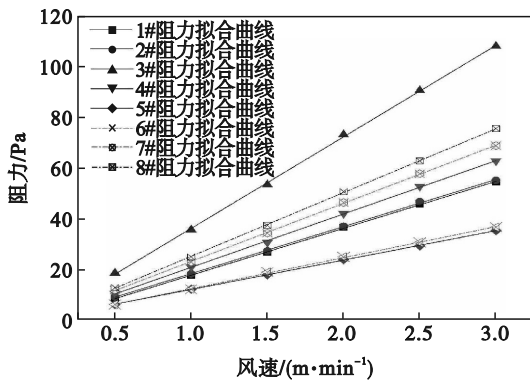


图 7 1#~8#样品过滤阻力

Fig. 7 Pressure drop of the samples from 1# to 8#

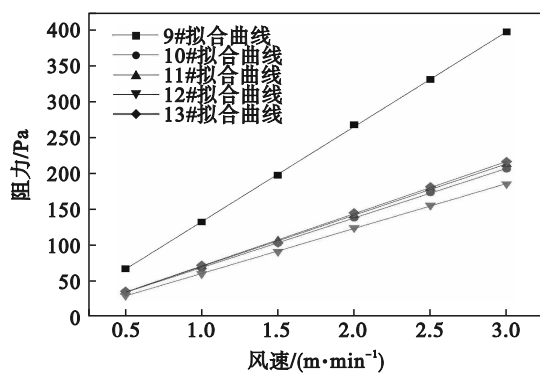


图 8 9#~13#样品过滤阻力

Fig. 8 Pressure drop of the samples from 9# to 13#

表 3 实验滤料阻力拟合曲线数据

Table 3 Pressure drop fitted curve of the samples

编号	斜率	标准误差
1#	18.42	0.02
2#	18.46	0.18
3#	35.92	0.35
4#	20.93	0.20
5#	11.54	0.68
6#	12.15	0.14
7#	22.82	0.14
8#	25.03	0.17
9#	131.94	0.74
10#	68.86	0.36
11#	71.26	0.50
12#	62.46	0.42
13#	72.51	1.18

由表 3 可以看出,随着孔径值的增大,阻力增长速度减缓.在针刺毡滤料中,1#与 2#样品的平均孔径值相近,阻力增长率也非常接近,2#样品的阻力值要稍大于 1#样品,这与两者透气度的关系相对应.随着风速增加,3#样品的阻力增加率最大,这是因为 3#样品的平均孔径值为  $82.031\ \mu\text{m}$ ,最大孔径值为  $86.669\ \mu\text{m}$ ,孔径是 1#~5#针刺毡滤料中的最小者,气流穿过纤维时受到的阻碍会增大,与纤维发生摩擦会增大,因此过滤阻力也会更大.水刺毡滤料在不同风速下的阻力按照 6#,7#,8#的顺序逐渐增大,与其最大孔径及平均孔径的变化趋势一致.由式(3)可知,针刺毡和水刺毡滤料纤维直径越小,孔径越小,过滤阻力越大.

将针刺毡滤料与水刺毡滤料进行对比发现,虽然 6#水刺毡滤料的平均孔径和最大孔径均比 2#样品小,但是阻力增加速度要比 2#样品小 6.3%,6#样品最大孔径仅比 4#样品大  $0.916\ \mu\text{m}$ ,过滤阻力增加率小 8.8%.7#,8#与 3#样品相比同样具有孔径小,过滤阻力增长率也同样小的特点,说明水刺毡滤料在降低孔径的同时,可以保证良好的透气度、较低的阻力和阻力增长率,对过滤效率降低影响较小,有利于减少 PM 2.5 的排放,减少能耗.所有覆膜滤料阻力随风速增长的速度要大于针刺毡、水刺毡滤料.覆膜滤料的阻力增长率明显增加,9#样品的平均孔径为 5 种覆膜滤料最小者,随着风速的增大阻力增长迅速.其次分别是 13#,11#,12#以及 10#样品.

对比 5 种覆膜滤料的阻力增长率,发现其大小与平均孔径相对应,说明覆膜滤料的平均孔径越小,表面膜微孔占比就越高,当含空气体流经这些多而小的微孔时,粉尘越容易不可逆地堵塞表面过滤介质的膜微孔,阻力增长更快,过滤效率更高<sup>[22]</sup>.对比 Seok 等<sup>[11]</sup>的研究结果,随着金属过滤器的平均孔径减小,阻力斜率急剧增加. Liu 等<sup>[22]</sup>探究了孔径和纤维直径对 3 种常规滤袋和 2 种覆膜袋式除尘器静态及动态过滤性能的影响.静态过滤性能实验表明,滤袋孔径极大地影响表面过滤介质织物结构的过滤阻力和过滤效率.在深层过滤介质中,过滤介质的孔径越小,其对细颗粒物的过滤精度就越高. Soo 等<sup>[23]</sup>探究了过滤器类型、采样流速、采样时间和标称孔径对覆膜空气过滤器捕集效率的影响,发现覆膜空气过滤器对 NaCl 的捕集效率和压降随着孔径的减小而增大.前人研究结果与本文有很好的的一致性.

### 3 滤料表观孔径

采用扫描电镜-计算机图像软件联用法对 5 种针刺毡滤料以及 3 种水刺毡滤料表观孔径进行分析,探究表征孔径分布与过滤性能之间的关系.由于在进行 SEM 过程中滤料导电性较差,因此在滤料表面进行喷金处理,使得使用扫描电子显微镜测定的孔径值总体偏小<sup>[24]</sup>.

滤袋孔径分布测试结果如图 9 所示,将所得孔径相对频率进行拟合得到滤料孔径分布拟合曲线,观察曲线可以发现孔径分布符合对数正态函数.由图 9 可以看出,3#样品的孔径分布范围最窄,偏小孔径值占比高,5.0~7.5 μm 区间内的孔径值占比约 16.73%,7.5~10.0 μm 内的孔径分布占比约为 20.52%.5#样品在 12.5~15.0 μm 范围内的孔径值占比最高,小于 10.0 μm 的孔径值占比约

有 26.1%,但是效率在 5 种针刺样品却最低,这是因为 5#样品由海岛纤维和涤纶 2 种纤维构成.海岛纤维是非相容的 2 种热力学高聚物按一定比例复合后进行共混纺丝,由海组分和岛组分 2 种组分构成,未经开纤的海岛纤维较常规的化学纤维更粗、线密度更大,经过开纤后获得束状或藕状的超细纤维束.开纤后的海岛纤维直径减小,织物比表面积增大<sup>[25]</sup>.图 10 为 5#样品的 SEM 图,由图 10 可以看出,5#样品只有部分海岛纤维被开纤,开纤后的纤维直径减小,与涤纶纤维混合造成了孔径值的降低.由于海岛纤维截面呈现“岛”的状态,表面更加粗糙,大气尘被 5#样品捕集时,更多颗粒物被未开纤的海岛纤维拦截,造成了 5#样品过滤效率低,但其阻力较针刺毡滤料也较低,因此开纤后的海岛纤维应用于过滤材料中有助于提高微细物的捕集性能,延长滤料的使用寿命.

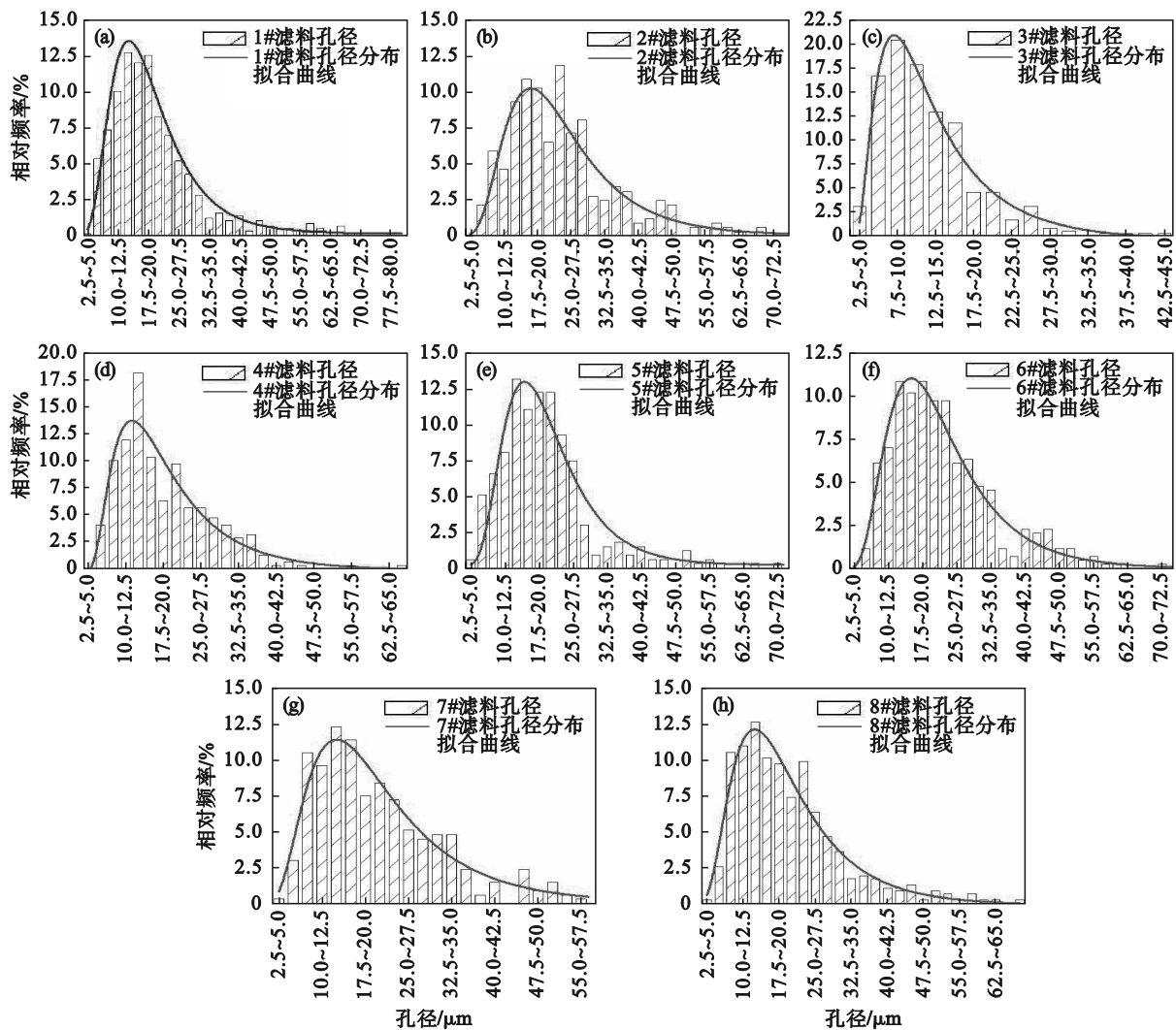


图 9 1#~8#滤料孔径分布

Fig. 9 Pore size distribution of the samples from 1# to 8#

(a)—1#滤料; (b)—2#滤料; (c)—3#滤料; (d)—4#滤料; (e)—5#滤料; (f)—6#滤料; (g)—7#滤料; (h)—8#滤料.

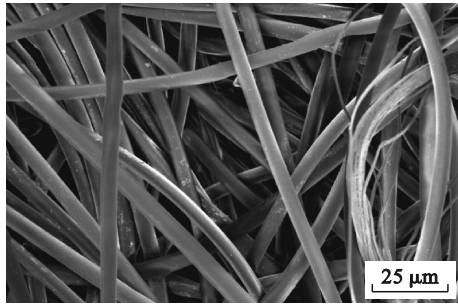


图 10 5#样品 SEM 图

Fig. 10 SEM image of the 5# sample

图 11 为 1#~8# 样品孔径分布累积频率及其拟合曲线. 由图 11 可以看出, 1# 样品在 5.0~7.5  $\mu\text{m}$  之间的孔径占比较高, 约有 5.42%, 小于 10.0  $\mu\text{m}$  的孔径累积有 13%. 从 1# 样品的孔径分布累积频率可以看出, 1# 样品的孔径大小分布更为集中, 分布范围较 2# 样品更广, 在 40  $\mu\text{m}$  之前的累积频率要大于 2# 样品, 2# 样品的孔径分布相较于 1# 样品而言更加分散, 均匀性不强, 综合来看造成了 2# 样品在透气度、阻力和过滤效率层面劣于 1# 样品. 其次为 4# 样品, 小于 10  $\mu\text{m}$  的孔径占比约为

12.31%. 将 4# 与 1# 样品对比可以发现, 两者小于 7.5  $\mu\text{m}$  的孔径值相近, 在 7.5~12.5  $\mu\text{m}$  的孔径值比 1# 样品所占频率更高. 从两者的孔径累积频率拟合曲线也可以看出 1# 样品位于 4# 样品的上方, 这解释了为何 4# 样品的最大孔径及平均孔径和过滤效率均小于 1# 样品. 2# 样品对 0.3  $\mu\text{m}$  的颗粒物过滤效率比 4# 样品低 4.13%, 对 0.5  $\mu\text{m}$  的颗粒物过滤效率比 4# 样品高 2.61%, 对于其他粒径颗粒物的过滤效率两者相差不大. 这是由于 4# 样品小于 10  $\mu\text{m}$  的孔径值要比 2# 样品大 4.21%. 2# 和 4# 样品的孔径分布范围最宽, 但相较于 4# 样品, 2# 样品的孔径偏向于较大值方向, 因此 4# 样品的过滤效率也要高于 2# 样品. 将针刺毡滤料与水刺毡滤料进行对比发现, 水刺毡滤料较小孔径占比更高. 7#, 8# 样品 7.5~10.0  $\mu\text{m}$  间的孔径占比均为 10.54%, 6# 样品的较小孔径占比虽未有针刺毡滤料高, 但是各区间孔径值分布较均匀, 孔径范围相对集中, 因此 6# 样品可以在保证与 2# 样品有相近 PM 2.5 过滤效率的情况下保持较低阻力.

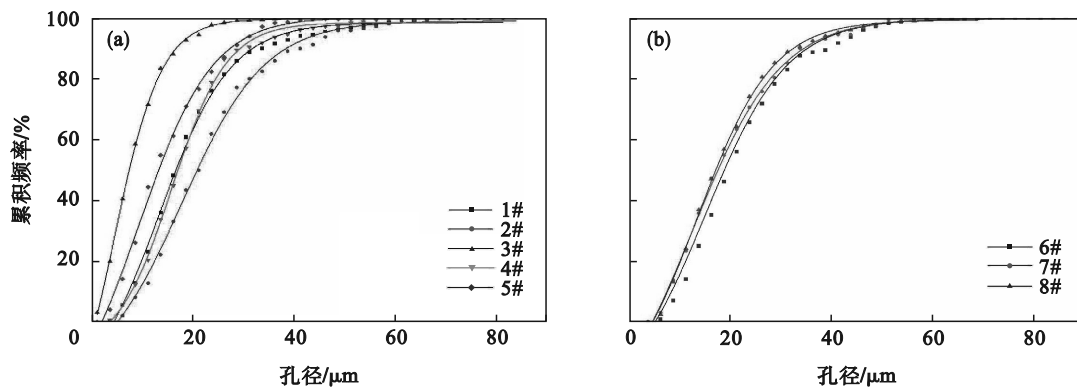


图 11 1#~8# 滤料孔径分布累积频率及其拟合曲线

Fig. 11 Cumulative frequency of the pore size distribution with its fitted curve of the samples from 1# to 8#

(a)—1#~5# 滤料; (b)—6#~8# 滤料.

将 PM 2.5 的过滤效率按从小到大排列分别是 5#, 2#, 4#, 1#, 3#, 孔径分布情况与 4 种滤料的过滤效率比较情况是一致的, 也就是孔径分布范围越窄、相对更加集中, 则过滤效率越高. 蔡伟龙<sup>[26]</sup>研究发现针刺滤袋、水刺滤袋、覆膜滤袋的平均孔径显著减小, 孔径分布逐渐变窄, 除尘效率显著增长. 武松梅等<sup>[27]</sup>探究了熔喷和针刺非织造过滤材料孔径与过滤性能的关系, 发现孔径对过滤效率有直接的影响, 随着孔径的增大, 过滤效率降低, 孔径分散程度越大则过滤效率越低, 过滤阻力越小. 本研究得出的结果与之前的研究一致.

## 4 结 论

1) 覆膜滤料的孔径整体要小于水刺毡滤料, 针刺毡滤料孔径最大.

2) 滤料的孔径对其透气度及阻力有一定影响. 随着最大孔径和平均孔径的增加, 透气度增大、阻力降低, 且最大孔径对透气度的影响程度更大. 针刺毡和水刺毡滤料的透气度高于覆膜滤料. 水刺毡滤料相较于覆膜滤料可以在较小孔径情况下保证一定的透气度、较低的阻力和阻力增长率.

3) 随着平均孔径的降低,覆膜滤料的 PM 2.5 过滤效率增大。随着最大孔径及平均孔径值的减小,水刺毡滤料的 PM 2.5 过滤效率随之增大。

4) 3 种类型滤料的分级计数效率均随着孔径减小而增大。

5) 水刺毡滤料的孔径分布较针刺毡滤料而言相对集中,分布更加均匀,且孔径分散范围越窄、分布程度更加集中,则过滤效率越高。

#### 参考文献:

- [1] 陈芳.我国城市环境污染现状及治理措施[J].皮革制作与环保科技,2022,3(9):117-119.  
(Chen Fang. Current situation and treatment measures of urban environmental pollution in China [J]. *Leather Manufacture and Environmental Technology*, 2022, 3 (9) : 117-119.)
- [2] Neidell M J. Air pollution, health, and socio-economic status: the effect of outdoor air quality on childhood asthma [J]. *Journal of Health Economics*, 2004, 23 (6) : 1209-1236.
- [3] Vlachokostas C, Achillas C, Moussiopoulos N, et al. Health effects and social costs of particulate and photochemical urban air pollution: a case study for Thessaloniki, Greece [J]. *Air Quality Atmosphere and Health*, 2010, 5(3):325-334.
- [4] 刘造芳,张得昆,张星.芳纶针刺毡在高温下的孔径分布变化[J].西安工程大学学报,2017,31(3):315-321.  
(Liu Zao-fang, Zhang De-kun, Zhang Xing. Pore size distribution changes of aramid needle-punched felt in high temperature [J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2017, 31(3):315-321.)
- [5] 赖艳,张得昆.纤维混合比对针刺滤材孔径及透气性的影响[J].现代纺织技术,2020,28(4):14-18.  
(Lai Yan, Zhang De-kun. Effect of fiber mixing ratio on pore size and air permeability of needled filter material [J]. *Advanced Textile Technology*, 2020, 28(4):14-18.)
- [6] Bao L, Musadiq M, Kijima T, et al. Influence of fibers on the dust dislodgement efficiency of bag filters [J]. *Textile Research Journal*, 2014, 84(7):764-771.
- [7] Niedziela M, Sasiadek M, Woźniak W. Pore size, shape and orientation analysis with respect to tensile tests in nonwoven spun-lace textiles using image processing [J]. *Journal of the Textile Institute*, 2022, 114:420-432.
- [8] Rawal A. Structural analysis of pore size distribution of nonwovens [J]. *Journal of the Textile Institute*, 2010, 101: 350-359.
- [9] Li X W, Kong H Y, He J H. Study on highly filtration efficiency of electrospun polyvinyl alcohol micro-porous webs [J]. *Indian Journal of Physics*, 2014, 89(2):175-179.
- [10] Nakamura K, Suda T, Matsumoto K. Characterization of pore size distribution of non-woven fibrous filter by inscribed sphere within 3D filter model [J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 197:289-294.
- [11] Seok J, Chun K M, Song S, et al. Study on the filtration behavior of a metal fiber filter as a function of filter pore size and fiber diameter [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2015, 81:47-61.
- [12] Nakao S I. Determination of pore size and pore size distribution [J]. *Journal of Membrane Science*, 1994, 96 (1/2):131-165.
- [13] Cabasso I, Robert K Q, Klein E, et al. Porosity and pore size determination in polysulfone hollow fibers [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1977, 21(7):1883-1900.
- [14] Germic L, Ebert K, Bouma R H B, et al. Characterization of polyacrylonitrile ultrafiltration membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 1997, 132(1):131-145.
- [15] Zhao C S, Zhou X S, Yue Y L. Determination of pore size and pore size distribution on the surface of hollow-fiber filtration membranes: a review of methods [J]. *Desalination*, 2000, 129(2):107-123.
- [16] Chung T S, Qin J J, Huan A, et al. Visualization of the effect of die shear rate on the outer surface morphology of ultrafiltration membranes by AFM [J]. *Journal of Membrane Science*, 2002, 196(2):251-266.
- [17] Calvo J I, Bottino A, Capannelli G, et al. Comparison of liquid-liquid displacement porosimetry and scanning electron microscopy image analysis to characterise ultrafiltration track-etched membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2004, 239(2):189-197.
- [18] Hernández A, Calvo J I, Prádanos P, et al. Pore size distributions of track-etched membranes; comparison of surface and bulk porosities [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1998, 138 (2) : 391-401.
- [19] Jena A, Gupta K. An innovative technique for pore structure analysis of fuel cell and battery components using flow porometry [J]. *Journal of Power Sources*, 2001, 96(1):214-219.
- [20] Hung C H, Leung W W F. Filtration of nano-aerosol using nanofiber filter under low Peclet number and transitional flow regime [J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, 79(1):34-42.
- [21] Chen F, Ji Z L, Qi Q Q. Effect of pore size and layers on filtration performance of coalescing filters with different wettabilities [J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 201:71-78.
- [22] 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):247-265.
- [23] Soo J C, Monaghan K, Lee T, et al. Air sampling filtration media: collection efficiency for respirable size-selective sampling [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2016, 50(1):76-87.
- [24] 周荣菲,张文阁,许潇.滤膜孔径分析常用方法[J].中国计量,2019(6):64-68.  
(Zhou Rong-fei, Zhang Wen-ge, Xu Xiao. Common analysis methods of filter membrane pore size [J]. *China Metrology*, 2019(6):64-68.)
- [25] 李杨.低比例海岛纤维与棉混纺对棉织物服用性能影响的研究[D].西安:西安工程大学,2011.  
(Li Yang. Study on the influence of low proportion of sea-island fiber blended with cotton on the wearability of cotton fabric [D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2011.)
- [26] 蔡伟龙.滤料的孔径及分布对过滤性能的影响[J].中国环保产业,2017(6):55-57.  
(Cai Wei-long. Effect of pore size and distribution of filter materials on filtration performance [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2017 (6) :55-57.)
- [27] 武松梅,袁传刚.非织造材料孔径与过滤性能关系的研究[J].产业用纺织品,2010,28(1):12-14.  
(Wu Song-mei, Yuan Chuan-gang. Study on relation between pore size of nonwovens and filtration characteristic [J]. *Technical Textiles*, 2010, 28(1):12-14.)