

## 袋式除尘器滤料的计重和计数效率

余振辉, 柳静献, 李国栋, 吕超

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 袋式除尘器滤料计重和计数效率的关联研究较少, 导致其过滤性能无法得到准确评估. 通过搭建过滤性能测试平台, 对影响滤料计重和计数效率的2个因素进行分析. 结果表明, 过滤效率随过滤风速的增大而降低, 且低效滤料的过滤效率降幅比高效滤料的过滤效率降幅大; 相对于氧化铝粉, 滤料在大气尘源环境中的过滤效率更容易受过滤风速的影响; 低效滤料在两种尘源环境中的计重和计数效率相差较大; 滤料在氧化铝粉环境中的过滤效率明显高于其在大气尘源环境中的过滤效率; 尘源对高效滤料过滤效率的影响很小. 采用计重和计数效率共同表征滤料的过滤性能更加合理.

**关键词:** 滤料; 过滤性能; 评价指标; 计重效率; 计数效率

中图分类号: X 701.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)03-0123-07

## Weighting and Counting Efficiencies of Filter Media of Bag Dust Collector

YU Zhen-hui, LIU Jing-xian, LI Guo-dong, LYU Chao

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Jing-xian, E-mail: 82003@126.com)

**Abstract:** There are few studies on the correlation between the weighting and counting efficiencies of filter media of bag dust collector, which leads to the fact that its filtration performance cannot be accurately evaluated. Two factors that affect the weighting and counting efficiencies of the filter media were analyzed through building a filtration performance test platform. The results show that the filtration efficiency decreases with the increase of filtration velocity, and the filtration efficiency of low-efficiency filter media decreases more than that of high-efficiency filter media. Compared with alumina powder, the filtration efficiency of filter media under atmospheric dust source environment is more easily affected by the filtration velocity. The weighting and counting efficiencies of low-efficiency filter media under the two kinds of dust sources environment are quite different. The filtration efficiency of the filter media under alumina powder environment is significantly higher than its filtration efficiency under atmospheric dust source environment. The dust source has little effect on the filtration efficiency of high-efficiency filter media. It is more reasonable to use both the weighting and counting efficiencies to characterize the filtration performance of filter media.

**Key words:** filter media; filtration performance; evaluation index; weighting efficiency; counting efficiency

工业的快速发展在拉动经济高速增长的同时也带来了大量的工业烟尘, 尤其是钢铁、电力、水泥、冶金、化工等重污染行业向周围环境大量排放的工业烟尘极易造成严重的大气污染<sup>[1]</sup>, 最

常见的现象就是雾霾. 雾霾中的细颗粒物进入人体肺泡后会发生沉积, 甚至进入血液循环系统, 引起心肺功能疾病<sup>[2]</sup>. 控制微细粉尘的排放是治理大气污染、保障空气质量的重要举措之一<sup>[3]</sup>. 随

收稿日期: 2023-08-28

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项目(XLYC2002091); 辽宁省揭榜挂帅科技攻关专项(2021JH1/10400023).

作者简介: 余振辉(1991—), 男, 安徽淮南人, 东北大学博士研究生; 柳静献(1966—), 男, 河北元氏人, 东北大学教授, 博士生导师.

着国家对行业排放标准的提高以及人们环保意识的增强,袋式除尘技术得以迅速发展.由于袋式除尘器对细颗粒物具有过滤效率高、连续运行稳定、回收物料方便且不易受粉尘性质影响等优点而被广泛应用于工业烟尘治理<sup>[4-5]</sup>.滤料作为袋式除尘器的核心组成部分,其自身特性和品质将直接影响袋式除尘器整体的过滤性能、运行稳定性和使用寿命<sup>[6]</sup>.作为常见的袋式除尘器滤料,涤纶针刺毡常用于粮食加工和有色冶金行业;芳纶针刺毡和聚酰亚胺(P84)针刺毡多用于钢铁厂的高炉煤气净化;聚四氟乙烯(PTFE)覆膜针刺毡主要用于垃圾焚烧过程和燃煤锅炉中;覆膜玻纤机织布通常用于水泥行业<sup>[7-8]</sup>.

测试滤料的过滤性能是保证产品质量的必要措施和保障袋式除尘器稳定运行的前提,并且可以为袋式除尘器匹配适合的滤料提供参考依据<sup>[9]</sup>.考虑到完整的过滤性能测试属于破坏性实验,通常以滤料的初始效率来表征其过滤性能.在过滤性能测试实验中,多以计重或计数效率来简单地评价滤料的过滤性能,但对两者之间关联的研究很少<sup>[10-11]</sup>.文献[12]中对空气过滤器的过滤效率测试采用大气尘粒径分级计数法,但是随着粒径分级计重效率测试技术的普及,用分级计重和计数效率来共同表征滤料的过滤性能更有意义.考虑到袋式除尘器的排放质量浓度多以 $\text{mg}/\text{m}^3$ 为单位,与计重效率公式中的质量浓度相吻合,并且通过烟尘质量浓度还能预测滤料的使用寿命,因此对于滤料来说,计重效率更适合评估其过滤性能<sup>[13]</sup>.

与大气尘相比,人工尘具有尘源颗粒分散度易控制、尘源浓度波动小、测试结果重复性好等优点.在研究滤料过滤性能的实验中,使用的人工尘源不同,如:氧化铝粉,美国采暖、制冷与空调工程师学会(ASHRAE)指定的A2粉尘,固相氯化钾颗粒等,导致滤料在不同尘源环境中的过滤效率也不一样,使得无法准确地判断滤料过滤性能的优劣,因此通过对比研究滤料在相同测试条件下分级计重和计数效率的关系以及不同尘源对滤料过滤效率的影响是很有必要的.

本文通过改变实验尘源(大气尘源和氧化铝粉)和过滤风速(0.8, 1, 1.5 和 2  $\text{m}/\text{min}$ ),研究 5 种典型袋式除尘滤料(涤纶针刺毡、芳纶针刺毡、PTFE 覆膜针刺毡、覆膜玻纤机织布和 P84 针刺毡)对微细颗粒物的分级计重和计数效率的变化规律,以期为科研人员更加准确地评估滤料的过

滤性能提供参考依据.

## 1 实验方案

### 1.1 滤料样品

本文所选 5 种典型袋式除尘器滤料的扫描电镜照片及纤维平均直径如图 1 所示.滤料的纤维平均直径为扫描电镜照片中 100 根纤维直径的平均值.由图 1 可知,涤纶针刺毡、芳纶针刺毡和 P84 针刺毡滤料的纤维经针刺作用彼此相互缠绕,呈现明显的 3D 立体形态,孔径小且数量多;PTFE 覆膜滤料表面附着 1 层 PTFE 膜,并与相互绕结的扁平状纤维紧密相连,显著降低了滤料表面的孔径;覆膜玻纤机织布呈现明显的平纹组织,纤维表面存在薄膜,且经、纬纱线间孔径较大.就平均纤维直径而言,5 种滤料中覆膜玻纤机织布最细(5.71  $\mu\text{m}$ ),其次是 P84 针刺毡(8.96  $\mu\text{m}$ ),涤纶针刺毡(14.88  $\mu\text{m}$ )和芳纶针刺毡(13.92  $\mu\text{m}$ )接近,PTFE 覆膜针刺毡最粗(26.31  $\mu\text{m}$ ).

5 种滤料的特征参数如表 1 所示.由表 1 可知,在 1  $\text{m}/\text{min}$  过滤风速下各滤料受空气的阻力为覆膜玻纤机织布>PTFE 覆膜针刺毡>涤纶针刺毡>P84 针刺毡>芳纶针刺毡.5 种滤料的透气率与其阻力呈相反的变化趋势.由于 PTFE 覆膜针刺毡和覆膜玻纤机织布的滤料单重大、厚度小,因此滤料更加密实.此外,这 2 种滤料表面都附有薄膜,造成二者的孔隙率低、透气性差、运行阻力高.涤纶针刺毡、芳纶针刺毡和 P84 针刺毡 3 种滤料的厚度接近.由于涤纶针刺毡的滤料单重大导致其透气率低、阻力高.芳纶针刺毡和 P84 针刺毡的滤料单重十分接近,但是前者厚度略大于后者,造成芳纶针刺毡相对 P84 针刺毡更加蓬松,因此芳纶针刺毡的透气率更高,阻力更小<sup>[14]</sup>.

### 1.2 实验装置

图 2 为滤料过滤性能测试平台原理图.首先,将滤料样品固定在夹持装置内.然后,利用流量为 0.6  $\text{m}^3/\text{h}$  的压缩空气将发尘器输出的氧化铝粉充分分散,并在滤料上游形成稳定浓度的气溶胶.当含尘气流通过滤料时,大部分粉尘会被滤料捕集,穿透滤料的粉尘被下游的高效过滤器完全拦截.最后,利用激光粒径分析仪(GRIMM 11-A)和手持式数字压差计(Testo 512)分别测量滤料上、下游的粉尘浓度和压差,从而获得滤料在特定过滤风速下的过滤效率和阻力.滤料的过滤风速由阀门和气体流量计共同控制.风机为管路

内气体的流动提供动力.当使用大气尘源时,需关闭发尘器后方的阀门并拆下图2中环境空气下游的高效过滤器.

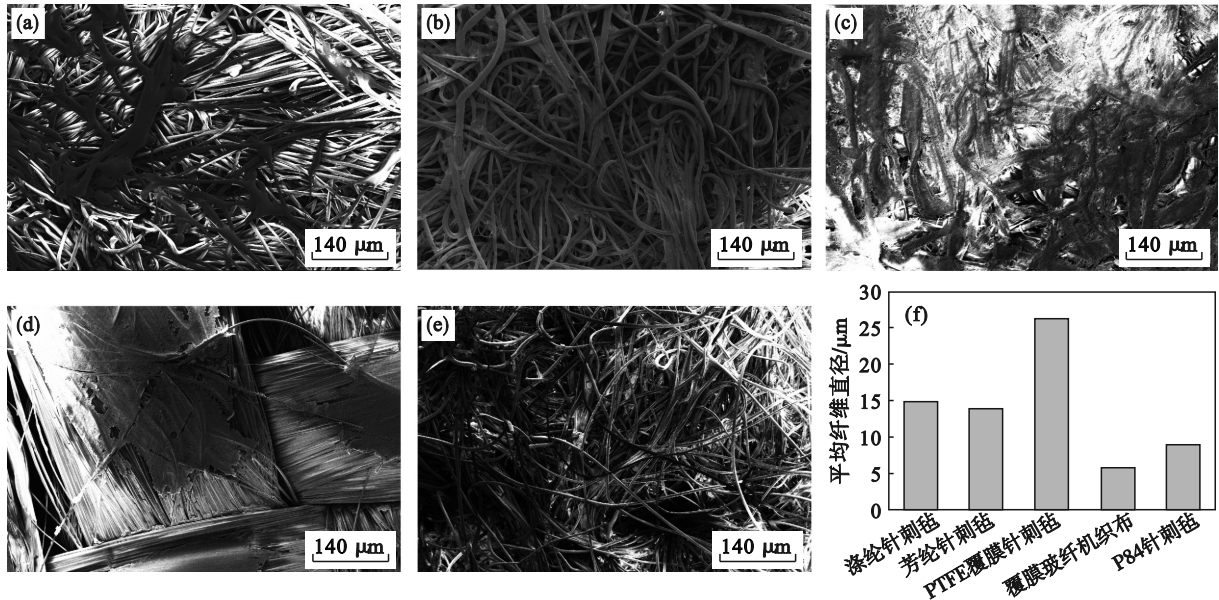


图 1 滤料的扫描电镜图像及纤维平均直径

Fig. 1 SEM image and fiber average diameter of the filter media

(a) —涤纶针刺毡; (b) —芳纶针刺毡; (c) —PTFE覆膜针刺毡; (d) —覆膜玻纤机织布; (e) —P84针刺毡; (f) —滤料的平均纤维直径.

表 1 滤料的特征参数

Table 1 Characteristic parameters of the filter media

滤料	单位面积质量/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$	厚度/mm	透气率/ $(\text{m}\cdot\text{min})$	阻力/Pa
涤纶针刺毡	668.79	2.27	10.33	36.00
芳纶针刺毡	559.73	2.20	15.80	24.00
PTFE覆膜针刺毡	817.80	0.99	2.90	139.33
覆膜玻纤机织布	844.59	0.84	1.87	178.00
P84针刺毡	551.59	2.10	11.63	33.67

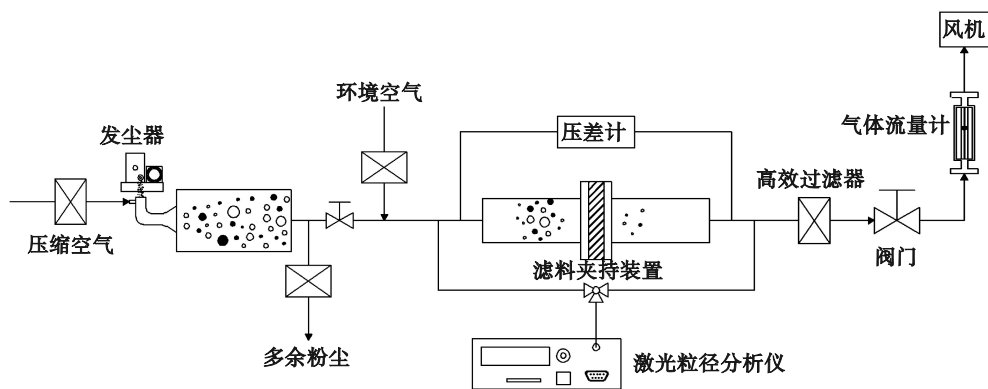


图 2 滤料过滤性能测试平台原理图

Fig. 2 Schematic diagram of filter media filtration performance test platform

1.3 实验尘源

本文所用 2 种尘源的粒径分布如图 3 所示, 大气尘源粒径比氧化铝粉粒径小约 1 个数量级. 大气尘源的粒径主要分布在  $0.25 \sim 0.58 \mu\text{m}$ , 中位数直径为  $0.33 \mu\text{m}$ , 氧化铝粉的粒径主要分布在

$1 \sim 5 \mu\text{m}$ , 中位数直径为  $2.89 \mu\text{m}$ .

1.4 测量方法

本文测量了 5 种滤料在洁净状态下对颗粒物直径  $\leq 1 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ), 颗粒物直径  $\leq 2.5 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) 和颗粒物直径  $\leq 10 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) 的计重和计数效率. 大

气尘源和氧化铝粉的发尘质量浓度分别为 0.1 和  $1.0 \times 10^3 \text{ mg/m}^3$ 。过滤风速设定为 0.8 m/min, 首先测量滤料的阻力, 然后测量滤料下游的粒子数浓度或质量浓度, 最后测量滤料上游的粒子数浓度或质量浓度。更换滤料后, 将风速分别调整为 1, 1.5 和 2 m/min, 重复上述步骤<sup>[15]</sup>。滤料在某一粒径范围内计数或计重效率计算公式<sup>[16]</sup>如下:

$$\eta(d) = \left( \frac{C_i(d) - C_o(d)}{C_i(d)} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $C_i(d)$  为滤料上游粒径是  $d$  的粒子数浓度或粒子质量浓度, 个/ $\text{m}^3$ ,  $\text{g/m}^3$ ;  $C_o(d)$  为滤料下游粒径是  $d$  的粒子数浓度或粒子质量浓度, 个/ $\text{m}^3$ ,  $\text{g/m}^3$ 。每组实验连续进行 3 次, 滤料的分级计重和计数效率均由平均值和标准差来共同表示。

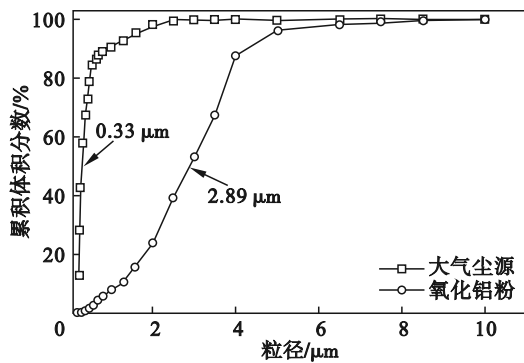


图3 实验尘源的粒径分布

Fig. 3 Particle size distribution of the experimental dust source

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{PM}_{10}$ 计重和计数效率

5 种滤料在 2 种尘源环境中和 4 种过滤风速下的  $\text{PM}_{10}$  计重和计数效率如图 4 所示。PTFE 覆膜针刺毡、覆膜玻纤机织布和 P84 针刺毡的  $\text{PM}_{10}$  计重和计数效率为 85.75% ~ 99.54%, 涤纶针刺毡和芳纶针刺毡的  $\text{PM}_{10}$  计重和计数效率为 26.57% ~ 73.67%。在相同实验条件下, 随着过滤风速的增大, 5 种滤料的  $\text{PM}_{10}$  计重和计数效率均呈下降趋势, 且降幅因滤料种类和尘源不同而有所差异。尘源相同时, 涤纶针刺毡、芳纶针刺毡和覆膜玻纤机织布的  $\text{PM}_{10}$  计重和计数效率平均降幅较大, 分别为 10.40%, 6.51%, 6.03% (大气尘源) 和 5.47%, 9.06%, 5.63% (氧化铝粉); PTFE 覆膜针刺毡和 P84 针刺毡的  $\text{PM}_{10}$  计重和计数效率平均降幅较小, 分别为 2.46%, 2.16% (大气尘源) 和 0.73%, 0.96% (氧化铝粉)。

当过滤风速相同时, 5 种滤料在大气尘源环境中所测  $\text{PM}_{10}$  计重和计数效率十分接近, 相差仅 0.17% ~ 2.24%; 在氧化铝粉环境中所测  $\text{PM}_{10}$  计重和计数效率相差较大, 为 0.50% ~ 7.71%。对于涤纶针刺毡和芳纶针刺毡滤料而言, 在氧化铝粉环境中测得的  $\text{PM}_{10}$  计重效率明显高于其在大气尘源环境中测得的  $\text{PM}_{10}$  计重效率, 分别增加了 33.99% 和 19.58%。相比之下, 尘源对其他 3 种滤料的  $\text{PM}_{10}$  计重效率影响较小, 仅增加 1.54% ~ 4.65%。对于涤纶针刺毡和芳纶针刺毡滤料而言, 在氧化铝粉环境中测得的  $\text{PM}_{10}$  计数效率明显高于其在大气尘源环境中测得的  $\text{PM}_{10}$  计数效率, 分别增加了 29.40% 和 13.85%; 尘源对其他 3 种滤料的  $\text{PM}_{10}$  计数效率影响较小, 仅增加 0.5% ~ 2.49%。

### 2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 计重和计数效率

5 种滤料在 2 种尘源环境中和 4 种过滤风速下的  $\text{PM}_{2.5}$  计重和计数效率如图 5 所示。PTFE 覆膜针刺毡、覆膜玻纤机织布和 P84 针刺毡的  $\text{PM}_{2.5}$  计重和计数效率为 86.27% ~ 99.88%, 涤纶针刺毡和芳纶针刺毡的  $\text{PM}_{2.5}$  计重和计数效率为 26.64% ~ 93.11%。在相同实验条件下, 随着过滤风速的增大, 5 种滤料的  $\text{PM}_{2.5}$  计重和计数效率均呈下降趋势, 且降幅与滤料种类和尘源有关。在相同尘源环境中, 涤纶针刺毡、芳纶针刺毡和覆膜玻纤机织布的  $\text{PM}_{2.5}$  计重和计数效率的平均降幅较大, 分别为 14.85%, 7.45%, 4.7% (大气尘源) 和 6.25%, 9.00%, 4.46% (氧化铝粉); PTFE 覆膜针刺毡和 P84 针刺毡的  $\text{PM}_{2.5}$  计重和计数效率平均降幅较小, 分别为 2.48%, 1.98% (大气尘源) 和 0.64%, 0.68% (氧化铝粉)。

当过滤风速相同时, PTFE 覆膜针刺毡和 P84 针刺毡滤料在大气尘源环境中所测  $\text{PM}_{2.5}$  计重和计数效率十分接近, 分别相差 1.21% 和 0.52%, 并且在氧化铝粉环境中所测  $\text{PM}_{2.5}$  计重和计数效率的差异较小, 分别为 3.37% 和 1.02%。对于涤纶针刺毡、芳纶针刺毡和覆膜玻纤机织布 3 种滤料, 使用大气尘源所测  $\text{PM}_{2.5}$  计重和计数效率的差异较大, 分别为 13.51%, 7.56% 和 4.28%, 并且在氧化铝粉环境中所测  $\text{PM}_{2.5}$  计重和计数效率存在明显差异, 分别为 24.98%, 23.54% 和 8.08%。对于涤纶针刺毡和芳纶针刺毡滤料而言, 在氧化铝粉环境中测得的  $\text{PM}_{2.5}$  计重效率明显高于其在大气尘源环境中测得的  $\text{PM}_{2.5}$  计重效率, 分别增加了 42.97% 和 31.07%; 尘源对其他 3 种滤料的  $\text{PM}_{2.5}$  计重效率影响较小, 仅增加 1.66% ~ 4.95%。对于

涤纶针刺毡和芳纶针刺毡滤料,在氧化铝粉环境中测得的  $PM_{2.5}$  计数效率明显高于其在大气尘源环境中测得的  $PM_{2.5}$  计数效率,分别增加了

31.50% 和 15.10%;尘源对其他 3 种滤料的  $PM_{2.5}$  计数效率影响较小,仅增加 0.31% ~ 2.80%.

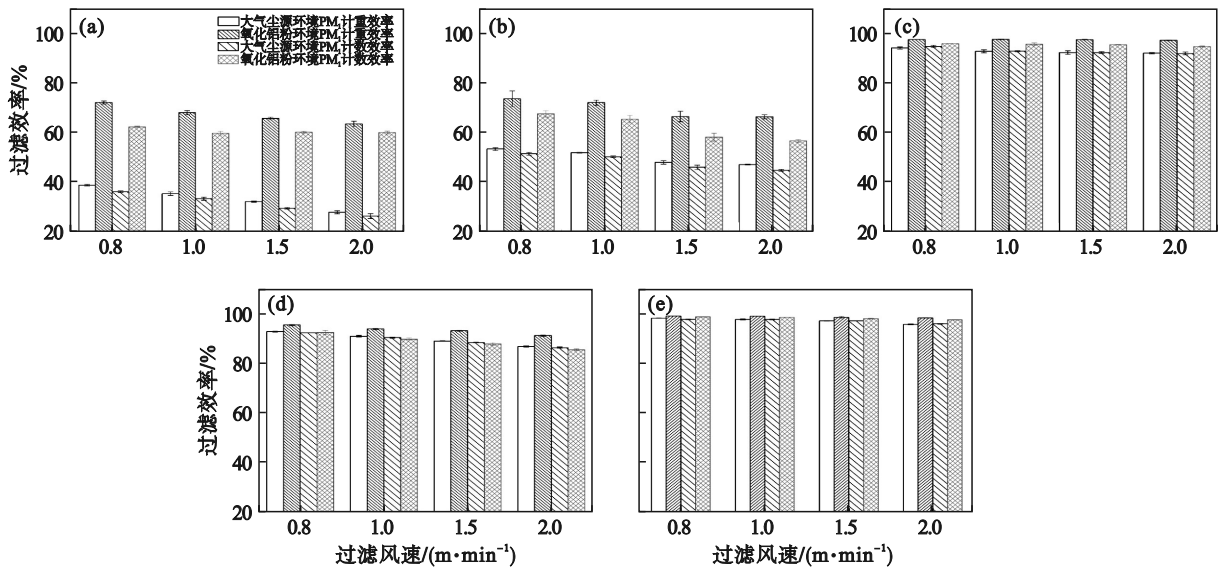


图 4 滤料的  $PM_{10}$  计重和计数效率

Fig. 4  $PM_{10}$  weighting and counting efficiencies of filter media

(a)—涤纶针刺毡; (b)—芳纶针刺毡; (c)—PTFE 覆膜针刺毡; (d)—覆膜玻纤机织布; (e)—P84 针刺毡.

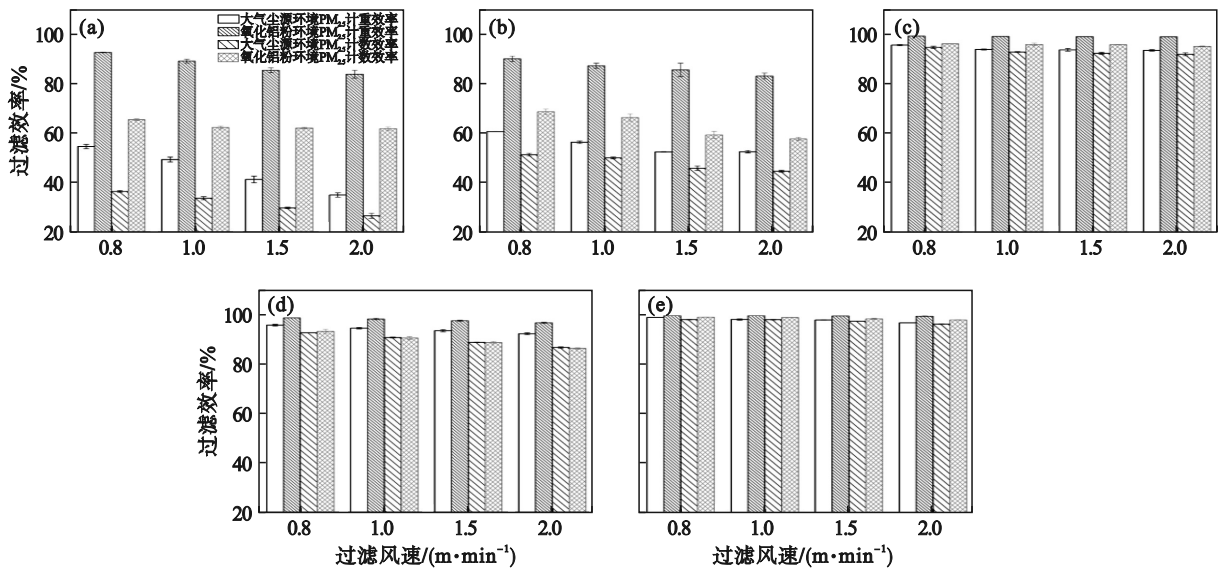


图 5 滤料的  $PM_{2.5}$  计重和计数效率

Fig. 5  $PM_{2.5}$  weighting and counting efficiencies of filter media

(a)—涤纶针刺毡; (b)—芳纶针刺毡; (c)—PTFE 覆膜针刺毡; (d)—覆膜玻纤机织布; (e)—P84 针刺毡.

### 2.3 $PM_{10}$ 计重和计数效率

5 种滤料在 2 种尘源环境中 4 种过滤风速下的  $PM_{10}$  计重和计数效率如图 6 所示. PTFE 覆膜针刺毡、覆膜玻纤机织布和 P84 针刺毡的  $PM_{10}$  计重和计数效率为 86.35% ~ 99.83%, 而涤纶针刺毡和芳纶针刺毡的  $PM_{10}$  计重和计数效率为 26.05% ~ 95.91%. 随着风速的增大, 5 种滤料的  $PM_{10}$  计重和计数效率均呈下降趋势, 且降幅因滤料种类和

尘源的不同而不同. 使用相同尘源, 涤纶针刺毡、芳纶针刺毡和覆膜玻纤机织布的  $PM_{10}$  计重和计数效率的平均降幅较大, 分别为 21.50%, 8.15%, 3.55% (大气尘源) 和 5.31%, 7.84%, 4.26% (氧化铝粉); PTFE 覆膜针刺毡和 P84 针刺毡的  $PM_{10}$  计重和计数效率的平均降幅较小, 仅为 2.51%, 1.54% (大气尘源) 和 0.69%, 0.64% (氧化铝粉).

相同过滤风速下, PTFE 覆膜针刺毡和 P84 针

刺毡滤料在大气尘源环境中所测  $PM_{10}$  计重和计数效率十分接近,分别相差 2.91% 和 1.31%,在氧化铝粉下所测  $PM_{10}$  计重和计数效率相差较小,分别为 3.26% 和 0.99%。对于涤纶针刺毡、芳纶针刺毡和覆膜玻纤机织布 3 种滤料,在大气尘源环境中所测  $PM_{10}$  计重和计数效率相差较大,分别为 24.69%, 12.33% 和 6.25%,并且在氧化铝粉环境中所测  $PM_{10}$  计重和计数效率差异明显,分别为 28.54%, 27.74% 和 8.37%。对于涤纶针刺毡和芳纶针刺毡滤料,在氧化铝粉环境中测得的  $PM_{10}$  计重效率要明显高于其在大气尘源环境测得的  $PM_{10}$  计重效率,分别增加了 35.98% 和 30.86%;尘源对其他 3 种滤料的  $PM_{10}$  计重效率影响较小,仅增加 0.85% ~ 3.19%。对于涤纶针刺毡和芳纶针刺

毡滤料而言,使用氧化铝粉测得的  $PM_{10}$  计数效率也明显高于其在大气尘源环境测得的  $PM_{10}$  计数效率,分别增加了 32.13% 和 15.46%;尘源对其他 3 种滤料的  $PM_{10}$  计数效率影响较小,仅增加 0.27% ~ 2.85%。使用大气尘源时,5 种滤料在 4 种过滤风速下  $PM_1$ 、 $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的计重和计数效率的差异均随着粒径增大而增加,并且涤纶针刺毡和芳纶针刺毡滤料的平均增幅(分别为 13.48% 和 7.29%)明显大于其他 3 种滤料的平均增幅(3.68% ~ 0.67%)。使用氧化铝粉也出现了相似的规律,并且涤纶针刺毡和芳纶针刺毡滤料的平均增幅(分别为 20.12% 和 19.66%)明显大于其他 3 种滤料的平均增幅(7.01% ~ 0.83%)。

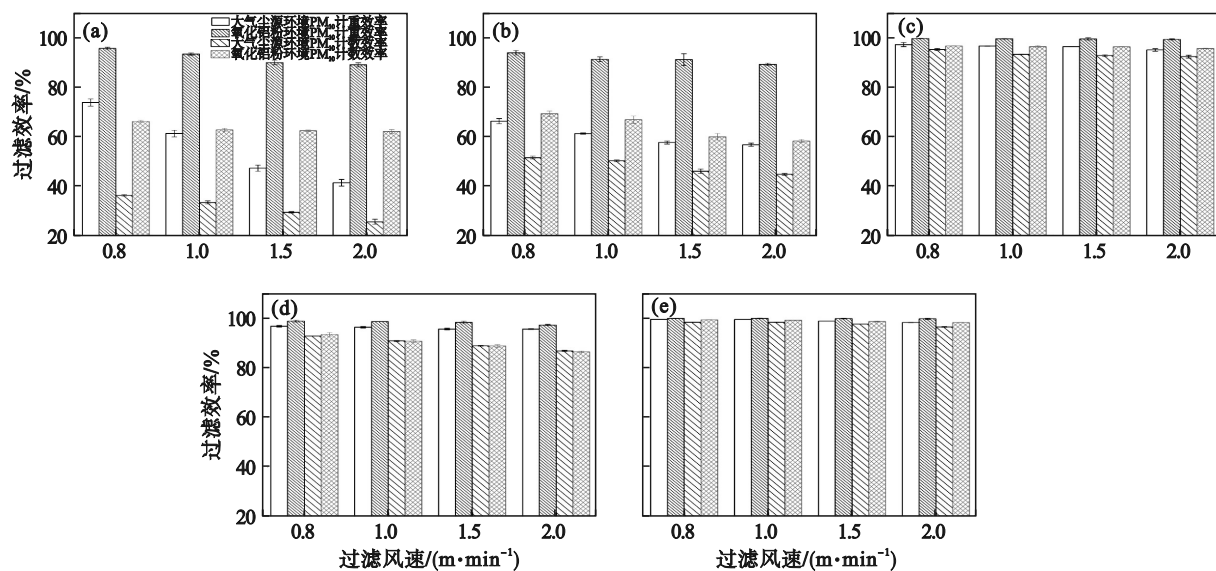


图 6 滤料的  $PM_{10}$  计重和计数效率

Fig. 6  $PM_{10}$  weighting and counting efficiency of filter media

(a)—涤纶针刺毡; (b)—芳纶针刺毡; (c)—PTFE覆膜针刺毡; (d)—覆膜玻纤机织布; (e)—P84针刺毡。

对于 5 种滤料在 4 种过滤风速下  $PM_1$ 、 $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的平均计重效率而言,使用氧化铝粉测得的数值要高于其在大气尘源环境中所测数值。涤纶针刺毡和芳纶针刺毡滤料的  $PM_1$ 、 $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  计重效率的平均增幅为 27.17% ~ 37.65%,明显高于其他 3 种滤料的  $PM_1$ 、 $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  计重效率的平均增幅(1.35% ~ 4.27%)。而 5 种滤料在 4 种过滤风速下  $PM_1$ 、 $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的平均计数效率也具有相似的变化规律。涤纶针刺毡和芳纶针刺毡滤料的  $PM_1$ 、 $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的计数效率平均增幅分别为 31.01% 和 14.8%,明显大于其他 3 种滤料的  $PM_1$ 、 $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的计数效率平均增幅(0.37% ~ 2.71%)。这是因为涤纶针刺毡和芳纶针刺毡滤料的过滤效率很低,再加上大气尘源中绝大部分是

小粒径颗粒,其数量虽多但质量很小;氧化铝粉粒径分布更广,除了大量的小粒径颗粒外,还包含大粒径颗粒,其数量虽少但质量较大。在使用大气尘源时,小粒径粒子大部分穿过滤料,被滤料捕集下来的颗粒很少,氧化铝粉中大粒径的粉尘更容易被滤料捕集,因此上述 2 种滤料的计重和计数效率有了明显增加。其他 3 种滤料对微细颗粒物的过滤效率很高,2 种尘源中的大、小粒径颗粒更容易被滤料捕集,因此其计重和计数效率变化较小。随着颗粒物粒径的不断增大,由尘源粒径分布不同所导致的计重和计数效率差异也愈加显著。

PTFE覆膜针刺毡和覆膜玻纤机织布表面经覆膜工艺处理可以有效减少粒子的穿透。P84 针

刺毡不仅纤维直径小而且厚度大,从而有效提高了滤料捕获粒子的概率.因此,上述3种滤料在2种尘源和4种过滤风速下的 $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ 和 $PM_1$ 计重和计数效率均较高.对于涤纶针刺毡和芳纶针刺毡而言,2种滤料的纤维直径和孔隙尺寸较大,并不利于捕集微细粒子.因此,在相同实验条件下,这2种滤料的 $PM_1$ , $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 计重和计数效率均较低.上述5种滤料主要依靠布朗扩散、拦截和惯性碰撞来捕集气流中的粒子.增加过滤风速会减小粒子在滤料内部的停留时间,从而降低纤维捕获粒子的概率,导致计重和计数效率降低.在高过滤风速下,粒子更容易从涤纶针刺毡和芳纶针刺毡的大尺寸孔隙穿透到下游,但难以穿透PTFE覆膜针刺毡和覆膜玻纤机织布表面的薄膜微孔.此外,由细纤维组成的加厚P84针刺毡可以有效减少粒子渗透.

### 3 结 论

1) 使用相同尘源时,5种滤料的分级计重和计数效率随着过滤风速的增大均呈下降趋势.过滤风速对低效滤料的过滤效率影响较大,而对高效滤料的过滤效率影响较小,并且机织滤料的过滤效率要比针刺毡滤料的过滤效率更易受过滤风速的影响.

2) 与氧化铝粉相比,在大气尘源环境中测得滤料的过滤效率随过滤风速的增大明显降低.

3) 在相同过滤风速下,高效滤料在2种尘源下测得的计重和计数效率接近,而低效滤料的计重和计数效率相差较大.低效滤料使用氧化铝粉测得的计重和计数效率均明显高于其在大气尘源环境中测得的计重和计数效率.

4) 使用相同尘源时,5种滤料在不同过滤风速下的计重和计数效率的差异均随粉尘粒径的增大而增加,且低效滤料的增幅要明显大于高效滤料的增幅.

#### 参考文献:

- [1] 王润芳,马大卫,姜少毅,等.超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征[J].环境科学,2020,41(1):98-105.  
(Wang Run-fang, Ma Da-wei, Jiang Shao-yi, et al. Fine particulate emission characteristics of an ultra-low emission coal-fired power plant [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(1): 98-105.)
- [2] Liu K, Lin B. Research on influencing factors of environmental pollution in China: a spatial econometric analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 206: 356-364.
- [3] 余振辉,柳静献,初砚昊,等.滤网对颗粒捕集过程的微观实验[J].东北大学学报(自然科学版),2019,40(3):430-434.  
(Yu Zhen-hui, Liu Jing-xian, Chu Yan-hao, et al. Microscopic experiment of particle trapping process for filter screen [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, 40(3): 430-434.)
- [4] Qian Y, Bi Y, Zhang M, et al. Effect of filtration operation and surface treatment on pulse-jet cleaning performance of filter bags [J]. *Powder technology*, 2015, 277: 82-88.
- [5] Kim J U, Hwang J, Choi H J, et al. Effective filtration area of a pleated filter bag in a pulse-jet bag house [J]. *Powder Technology*, 2017, 311: 522-527.
- [6] 张珈旗,董忠红.基于流场特性数值模拟的袋式除尘器关键结构设计研究综述[J].中国环境科学,2022,42(6):2530-2540.  
(Zhang Jia-qi, Dong Zhong-hong. Review on key structure design of bag filter based on numerical simulation of flow field characteristics [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(6): 2530-2540.)
- [7] Xu Q, Wang G, Xiang C, et al. Preparation of a novel poly(ether ether ketone) nonwoven filter and its application in harsh conditions for dust removal [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 253: 117555.
- [8] Rozy M I F, Ueda M, Fukasawa T, et al. Direct numerical simulation and experimental validation of flow resistivity of nonwoven fabric filter [J]. *Aiche Journal*, 2020, 66(2): e16832.
- [9] 柳静献,毛宁,孙熙,等.我国除尘滤料历史,现状与发展趋势综述[J].中国环保产业,2020(11):6-18.  
(Liu Jing-xian, Mao Ning, Sun Xi, et al. Review of the history, current situation and development trend of filter materials for dust removal in China [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2020(11): 6-18.)
- [10] Boudhan R, Joubert A, Durecu S, et al. Influence of air humidity on particle filtration performance of a pulse-jet bag filter [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2019, 130: 1-9.
- [11] Chauhan V K, Singh J P, Debnath S. Investigation on filtration properties of polyester needle-punched dust filter [J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2020, 111(6): 897-905.
- [12] 涂有,涂光备,张鑫.国内外通风用空气过滤器的测试、分级及比照[J].暖通空调,2015,45(8):53-61.  
(Tu You, Tu Guang-bei, Zhang Xin. Test, classification and comparison of foreign and domestic ventilating air filters [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2015, 45(8): 53-61.)
- [13] Kurtz O, Meyer J, Kasper G. The contribution of small leaks in a baghouse filter to dust emission in the  $PM_{2.5}$  range: a system approach [J]. *Particuology*, 2017, 30: 40-52.
- [14] Fukasawa T, Kanaoka C, Kimura I, et al. Distributions of fiber mass, air permeability, and filter efficiency in nonwoven fabric bag filters [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2021, 44(3): 535-541.
- [15] Park S, Joe Y H, Shim J, et al. Non-uniform filtration velocity of process gas passing through a long bag filter [J]. *Journal of hazardous materials*, 2019, 365: 440-447.
- [16] Yu Z, Liu J, Shen R, et al. An efficient thumbtack-cylinder type wet electrostatic precipitator for moxa smoke aerosol control [J]. *Powder Technology*, 2023, 424: 11856.