

# 驻极体滤料的空气湿度和静电效应影响机理研究

李世航<sup>1,2,3</sup>, 温国祥<sup>1,3</sup>, 王路宇<sup>1,3</sup>, 吕伟鹏<sup>1,3</sup>, 刘凌好<sup>1,3</sup>

(1. 中国矿业大学 碳中和研究院, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 职业健康研究院, 江苏 徐州 221008;  
3. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 驻极体滤料越来越广泛的应用于空气净化领域, 在防疫期间也起到了重要作用, 但其空气湿度和静电效应影响机理研究不足。为此, 通过构建亚微米颗粒过滤加载实验系统, 研究空气湿度作用下初始状态、浸水处理、去静电处理、老化处理驻极体滤料过滤效率和压降的演变规律。结果表明: 空气湿度变化甚至浸水处理不会改变驻极体滤料的初始过滤效率和压降; 经去静电处理后驻极体滤料的压降不变, 但对于粒径大于 20 nm 的颗粒, 驻极体滤料的初始过滤效率大幅降低; 真实环境中使用了 5~7 个月后的驻极体滤料, 其单位面积加载质量和压降增长都较低, 但过滤效率出现了显著下降, 经去静电处理后过滤效率还会大幅下降, 即使用 5~7 个月后驻极体滤料所带电荷仍未完全消失; 加载相同质量颗粒条件下, 实验室中加载滤料的过滤效率高于真实环境中加载滤料的过滤效率, 这也表明驻极体滤料长时间暴露在真实环境中更易造成电荷衰减。

**关键词:** 空气净化; 驻极体滤料; 空气湿度; 过滤效率; 过滤阻力

中图分类号: TU 834.8

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)05-0734-08

## Study on influence mechanism of air relative humidity and electrostatic effect of electret filter media

LI Shihang<sup>1,2,3</sup>, WEN Guoxiang<sup>1,3</sup>, WANG Luyu<sup>1,3</sup>, LÜ Weipeng<sup>1,3</sup>, LIU Lingyu<sup>1,3</sup>

(1. Carbon Neutralization Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;  
2. Research Institute of Occupational Health, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;  
3. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Electret filter media is more and more widely used in the field of air purification, and also plays an important role in epidemic prevention, but the research on the influence mechanism of air humidity and electrostatic effect is insufficient. Therefore, a submicron particle filtration loading experimental system is constructed to study the evolution law of filtration efficiency and pressure drop of the initial state, immersion treatment, electrostatic removal treatment, and aging treatment electret filter media under air humidity. The results show that the initial filtration efficiency and pressure drop of electret filter media do not change with the change of air humidity or even immersion treatment. The pressure drop of the electret filter media remains unchanged after electrostatic removal treatment, nevertheless, the initial filtration efficiency of the electret filter media is greatly reduced for particles larger than 20 nm. The electret filter media used in the real environment for 5 ~ 7 months has a low loading mass per unit area and a low pressure drop growth, but the filtration efficiency has decreased significantly. After de-electrostatic treatment, the filtration efficiency will also decrease significantly, that is, the charge carried by electret filter media has not completely disappeared after 5-7 months of use. Under the condition of loading the same mass of particles, the filtration efficiency of the filter media loaded in the laboratory is higher than that in the real environment. This indicates that the electret filter media is more likely to cause the charge decay when exposed to the real environment for a long time.

**Key words:** air purification; electret filter media; air relative humidity; filtration efficiency; filtration resistance

收稿日期: 2021-10-11

修改稿日期: 2022-10-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52174215); 江苏省自然科学基金青年项目(BK20200642); 中央基本科研业务费项目(2021GJZPY06)

第一作者: 李世航(1990—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为空气净化与低碳技术. E-mail: shihangli@cumt.edu.cn

细颗粒物是空气污染的主要组成部分,与肺癌、其他呼吸系统疾病最相关<sup>[1]</sup>。统计数据显示,人们80%以上的时间在室内度过<sup>[2-3]</sup>,室内空气质量的好坏及室内空气的自净程度与人们的生命健康和生存质量密切相关<sup>[4]</sup>。空气过滤器被广泛应用于暖通空调与空气调节(HAVC)系统和室内空气净化系统,消除从室外渗入和室内产生的细颗粒物。过滤效率和压降是评价空气过滤器性能的两个重要指标<sup>[5]</sup>,一般来说,空气过滤器效率越高,压降越大,能耗就越高<sup>[6]</sup>。近年来,驻极体滤料比机械滤料具有更高的过滤效率而被广泛使用<sup>[7]</sup>。驻极体滤料捕获颗粒物是受机械和静电综合作用的结果,前者包括扩散、拦截、撞击和重力沉降,后者增加了库仑力和介电泳力<sup>[8]</sup>。

滤料的过滤性能受纤维直径、填充密度、滤料厚度、纤维电荷、颗粒电荷、颗粒尺寸、过滤速度和加载时间等因素的影响<sup>[9-11]</sup>,为了设计和开发更高效的滤料,大量学者研究了上述因素对滤料过滤性能的影响<sup>[7, 12-15]</sup>。此外,空气湿度也会影响滤料的过滤性能,一年内空气湿度不断变化,夏天空气湿度较高,冬天则较低,白天和夜晚的空气湿度也不尽相同,遇到降雨天气空气湿度会迅速升高,这些空气湿度变化都会影响滤料的过滤性能。

相对湿度对滤料性能影响的研究主要集中在机械滤料上<sup>[15-17]</sup>。如,Gupta等<sup>[15]</sup>研究了加载NaCl颗粒时机械滤料的性能,当空气湿度低于NaCl颗粒潮解点( $\sim 75\%$  RH)时,随着相对湿度的增加,机械滤料压降的增长速率减小;在潮解点以上时,初期滤料压降增长较慢,当加载一定质量颗粒后,滤料压降呈加速增长趋势。该结论与Joubert, Pei等<sup>[16, 18]</sup>的研究结果一致。袁学玲等<sup>[19]</sup>研究了微米级颗粒物条件下湿度环境对机械滤料过滤阻力的影响,发现在一定湿度范围内,含尘气体湿度越高,机械滤料过滤阻力越小,除尘性能越好。

但迄今为止,只有少数研究试图探讨相对湿度对驻极体滤料过滤性能的影响。Yang等<sup>[20]</sup>研究了驻极体滤料在30%和70%相对湿度下的初始效率,发现初始效率随着相对湿度的增加而降低,并推测水分子可能会降低纤维的电荷。相反,其他研究人员发现在低相对湿度和高相对湿度条件下具有相同的过滤效率<sup>[10, 14, 21]</sup>。因此,相对湿度对驻极体滤料初始效率的影响存在争议。Montgomery等<sup>[22]</sup>通过实验发现空气湿度变化对NaCl

颗粒的过滤效率影响很小,甚至可以忽略不计,但实验中空气湿度都低于60%。作者认为,今后应研究相对湿度高于60%时驻极体滤料过滤效率的变化,以全面了解相对湿度对驻极体滤料过滤效率的影响。

Raynor等<sup>[23]</sup>研究了大型建筑物HVAC系统中驻极体滤料在真实环境中的过滤效率变化,观察到驻极体滤料运行19周后过滤效率显著降低(0.6  $\mu\text{m}$  颗粒的过滤效率从85%降低到45%),并归因于加载颗粒造成的滤料电荷消退;达到最大降幅后,由于颗粒加载效应,过滤效率开始提高。但是,这项研究没有记录19周内的相对湿度值。为了更好地理解加载过程中驻极体滤料静电的衰减,还需要进行更深入的研究。

驻极体滤料越来越广泛的应用于空气净化领域,但其受空气湿度影响的研究不足,多数研究集中在空气湿度对机械滤料过滤效率的影响,很少有人关注驻极体滤料。在真实环境中加载驻极体滤料虽然可以得到第一手数据,但存在测试周期长、成本昂贵且难以实现的现实问题。因此,本文搭建了相对湿度可精准调控的滤料过滤性能测试实验系统,实现了空气湿度场景模拟;系统研究了不同空气湿度条件下NaCl颗粒粒径分布特征,分析了空气湿度对初始状态、浸水处理、去静电处理和老化处理的驻极体滤料压降和过滤效率的影响规律;测试了真实环境加载驻极体滤料及其去静电处理后的过滤效率,并对比分析了驻极体滤料在真实环境和实验室环境加载后过滤性能的异同。

## 1 实验系统与方法

### 1.1 实验滤料选择

滤料过滤精度太高时,滤料过滤效率的变化不显著,滤料过滤精度太低时,需要加载较长时间滤料过滤阻力才会有显著变化,因此本实验选择了3种代表性驻极体滤料,分别为商用高效空气过滤器滤料#1(HEPA)、由粗纤维层和细纤维层组成的自制复合滤料#2(CM)和商用驻极体滤料#3(3M, MERV-13),3种滤料的扫描电镜如图1所示,具体参数见表1。

### 1.2 相对湿度调控

在初始过滤效率测试期间改变气流的空气湿度,用来研究空气湿度变化对滤料初始效率的影响。实验中,首先调节气流相对湿度为10%并测试滤料的分级过滤效率;其次调节气流相对湿度

到 60% 进行分级效率测试;之后,将相对湿度增加到 90% 进行分级效率测试;最后,将相对湿度再次调节到 10% 进行相同测试。本次测试使用同一个滤料有利于降低滤料不均匀性对实验结果造成的影响。实验中采用 TSI 3081 型号差分电迁移率分析仪(DMA, 颗粒粒径范围 10~1 000 nm, 粒径不确定性 <2%) 筛分的低浓度单分散 NaCl 颗粒,可以避免加载效应对初始过滤效率测试结果的影响。气流的相对湿度通过调节干燥压缩空气的流速和进入气泡加湿器的气流流速来控制。

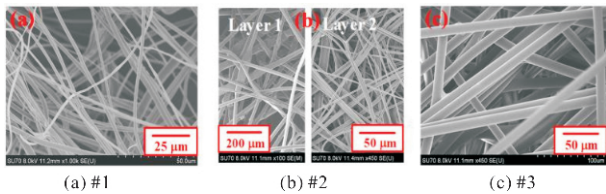


图 1 滤料 #1(a)、#2(b)和 #3(c)的扫描电镜图

Fig. 1 SEM image of test filter media #1(a), #2(b) and #3(c)

表 1 滤料参数

Tab. 1 Specification of filter media

类型	#1 (HEPA)	#2 (复合滤料)	#3 (MERV-13)
纤维直径/ $\mu\text{m}$	2.0 $\pm$ 0.5	22.3 $\pm$ 3.9 (粗纤维层) 4.1 $\pm$ 1.1 (细纤维层)	13.1 $\pm$ 0.9
厚度/mm	0.11 $\pm$ 0.01	0.95 $\pm$ 0.05	0.45 $\pm$ 0.02
电荷密度/ (C/m <sup>2</sup> )	8.5 $\times$ 10 <sup>-5</sup>	4.0 $\times$ 10 <sup>-5</sup>	7.0 $\times$ 10 <sup>-5</sup>
过滤效率/%	99.9 $\pm$ 0.02	97.7 $\pm$ 0.11	86.6 $\pm$ 0.23
初始压降/Pa	90.9 $\pm$ 2.2	49.3 $\pm$ 1.5	7.9 $\pm$ 0.3

### 1.3 滤料处理方法

(1)浸水处理。在暴雨大风的恶劣天气下,滤料可能会被淋湿,高相对湿度条件下(如长时间降雨)水分也会在驻极体滤料表面和纤维间凝结和积聚形成水膜。因此,为了测试滤料与水长时间完全接触后纤维所带电荷是否消退,将滤料淹没沉浸在水中 24 h,之后在干燥室内干燥 24 h,通过分级过滤效率测试分析水分对滤料过滤性能和静电效应的影响。

(2)去静电处理。Tang 等<sup>[7]</sup>的研究表明,IPA(异丙醇,浓度大于 99.5%)饱和蒸汽浸泡法能彻底去除滤料纤维所带静电。因此,实验中根据 ISO

168904:2016<sup>[24]</sup>选择 IPA 饱和蒸汽浸泡法去除滤料纤维所带电荷,处理时间为 24 h,之后在干燥室内干燥 24 h,用来与浸水处理滤料对比。

(3)老化处理。滤料 #3-1、#3-2 和 #3-3 分别为滤料 #3 在真实环境中使用了 5、6 和 7 个月,首先测试滤料 #3-1、#3-2 和 #3-3 的分级过滤效率;之后对滤料 #3-1、#3-2 和 #3-3 做去静电处理并再次进行分级过滤效率测试,用以研究老化处理对滤料过滤效率和静电效应的影响。

### 1.4 初始效率测试

实验装置示意图如图 2 所示,在过滤风速 10 cm/s、相对湿度 30% 情况下,采用去静电单分散 NaCl 颗粒(粒径范围为 15~500 nm),测试初始滤料 #1、#2 和 #3 在湿度变化(10%-60%-90%-10% RH)环境中的初始过滤效率。之后,测试初始状态、浸水处理和去静电处理后滤料 #1、#2 和 #3 的初始过滤效率,研究浸水能否减少滤料所带电荷。为了研究滤料的老化特性,在过滤风速为 10 cm/s 和空气湿度为 30% 条件下,测量了初始滤料 #3-0、使用过的滤料 #3-1、#3-2 和 #3-3 对去静电单分散 NaCl 颗粒的初始过滤效率。

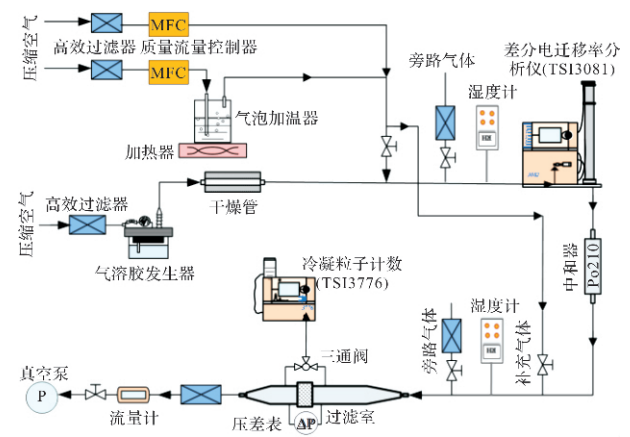


图 2 初始效率测试系统示意图

Fig. 2 Experimental setup of initial efficiency measurement

使用 TSI 9302 型气溶胶发生器(精度 0.01  $\mu\text{m}$ )从溶液中生成颗粒,选择压力为 10 psi 的压缩空气雾化溶液。管路中添加一个高效过滤器与外界环境相通,形成旁路气体平衡实验系统压力,采用 TSI 4100 流量计(测量范围 0.01~20 L/min,测量误差  $\pm$ 2%)控制实验系统流量大小,使用 DMA 对颗粒进行筛选,并用筛选后的颗粒进行过滤。为了尽量减少水分和静电对实验的影响,分别用扩散干燥管和静电中和器对雾化颗粒进行干燥和静电中和。通过将清洁空气鼓入气泡加湿器

中产生水蒸气, 并与含尘气体混合, 将含尘气体增湿到所需的相对湿度. 初始过滤效率由滤料的上游、下游颗粒浓度确定, 颗粒浓度通过 TSI 3776 型超细冷凝颗粒计数器 (UCPC, 检测粒径范围 3~5 000 nm) 测量, 滤料的过滤效率计算公式如下:

$$E(d_x)=1-C_{\text{down}}(d_x)/C_{\text{up}}(d_x) \tag{1}$$

式中:  $E(d_x)$  为不同粒径颗粒过滤效率;  $C_{\text{down}}(d_x)$  为下游颗粒浓度,  $\text{mg}/\text{cm}^3$ ;  $C_{\text{up}}(d_x)$  为上游颗粒浓度,  $\text{mg}/\text{cm}^3$ ;  $x$  为 20、30、50、80、100、200、300、400、500、600 and 700 nm.

2 实验结果与讨论

2.1 相对湿度对 NaCl 颗粒的影响

实验过程中相对湿度发生变化时, NaCl 颗粒的粒径分布可能因颗粒的吸湿性而发生变化. 图 3 为 30%、60% 和 80% 相对湿度条件下 NaCl 颗粒的归一化尺寸分布.

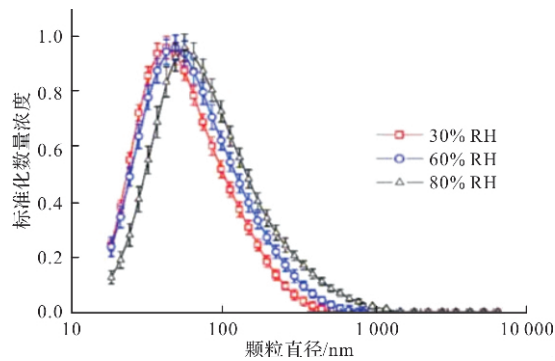


图 3 三种相对湿度下 NaCl 颗粒粒径的归一化分布  
Fig. 3 Normalized number distribution of NaCl particles under three different RHs

由图 3 可见, 当相对湿度从 30% 提高到 60% 时, NaCl 颗粒的尺寸变化很小; 在 80% 相对湿度时颗粒的尺寸有明显增大, 其平均粒径较相对湿度 30% 时增大约 1.4 倍. 这可能是因为相对湿度较高(80% RH)时, NaCl 颗粒吸收水分导致颗粒变大, 此外水分可能增加颗粒之间的黏结性, 更多的小颗粒结合成大颗粒, Pei 等<sup>[16]</sup>通过微观观测实验也得到类似结论.

2.2 滤料处理对压降的影响

初始状态、浸水和去静电滤料 #1、#2 和 #3 的压降如表 2 所示. 由表 2 可得, 初始状态、浸水和去静电滤料 #1、#2 和 #3 的压降几乎保持不变. 此外, Chang 等<sup>[13]</sup>的研究也曾指出, IPA 饱和蒸汽浸泡和浸水处理后的滤料压降变化极小、

结构没有损坏.

表 2 初始状态、浸水和去静电滤料 #1、#2 和 #3 的压降  
Tab. 2 Pressure drop of original, water immersed and discharged filter media #1, #2 and #3

序号	滤料状态	压降/Pa
#1	初始状态	89.6±1.2
	浸水处理	89.9±1.2
	去静电处理	88.6±1.4
#2	初始状态	49.8±0.5
	浸水处理	50.0±0.7
	去静电处理	49.8±0.7
#3	初始状态	9.0±0.3
	浸水处理	9.0±0.4
	去静电处理	8.9±0.4

未使用过的滤料 #3 和真实环境中使用过的滤料 #3 的实物图如图 4 所示, 通过称重可得, 滤料 #3-1、#3-2 和 #3-3 的质量较未使用滤料分别增加 3.55、3.96 和 4.76  $\text{g}/\text{m}^2$ , 可以求得滤料 #3-1、#3-2 和 #3-3 每个月平均加载质量分别为 0.71、0.66 和 0.68  $\text{g}/\text{m}^2$ . 滤料 #3-1、#3-2 和 #3-3 的压降分别从滤料 #3-0 的 7.47 Pa 增加为 10.07、10.44 和 11.03 Pa, 相应的, 滤料 #3-1、#3-2 和 #3-3 每个月的平均压降增量分别为 0.52、0.50 和 0.51 Pa.



图 4 未使用过的滤料 #3(a)和真实环境中使用过的滤料 #3(b)的实物图

Fig. 4 Physical picture of unused filter media #3 (a) and used filter media #3 (b) in real environment

综上可得, 滤料 #3-1、#3-2 和 #3-3 每个月平均加载质量和平均压降增量并不相同, 原因可能是滤料加载的时间段不同, 在真实环境中颗粒物浓度随时间的变化会发生变化; 另一个原因是滤料过滤效率随着时间的变化也会发生变化, 上述原因造成滤料的质量和压降增长的无规律性.



### 2.3 相对湿度对滤料初始过滤效率的影响

大量研究表明:相对湿度的升高会使纤维表面的颗粒沉积形态发生重组,即发生坍塌,但他们的研究并没有指出空气湿度是否对带电纤维的过滤性能和静电效应影响<sup>[15, 22]</sup>.为了验证相对湿度对驻极体滤料过滤性能的影响,分别在“干-湿-干条件下”(首先在含尘气体相对湿度为10%的条件下进行测试,之后相继将含尘气体湿度调节为60%和90%进行测试,再将含尘气体湿度调节为10%进行测试)测量初始滤料#1、#2和#3的初始过滤效率,测试结果如图5所示.图5表明,空气湿度的改变几乎不会改变驻极体滤料的初始过滤效率,这表明水蒸气对带电纤维的静电效应没有不利影响.

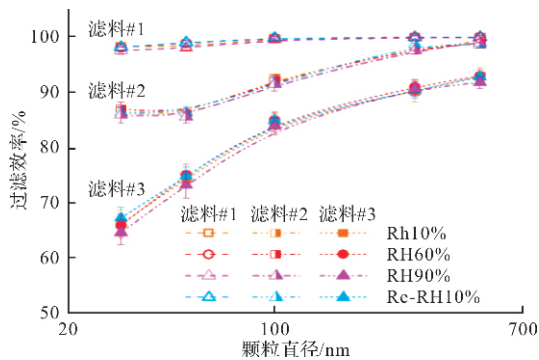


图5 初始滤料#1、#2和#3在“干-湿-干条件下”的过滤效率

Fig. 5 Filtration efficiency of initial filter media #1, #2 and #3 under dry-wet-dry conditions

为了验证相对湿度极限条件下驻极体滤料过滤性能的变化,分别测试了去静电单分散NaCl颗粒对滤料#1、#2和#3(滤料均有三种状态:初始状态、浸水处理和去静电处理)的初始过滤效率,测试结果如图6所示.

由图6可得,去静电处理滤料#1、#2和#3与初始状态、浸水处理滤料相比,初始过滤效率大幅降低(尤其是当颗粒粒径大于20 nm时),这是由于在IPA饱和蒸汽作用下纤维所带电荷被消除所致.实验结果与Tang等<sup>[7]</sup>的结论相同,这表明纤维电荷在滤料的过滤中起着重要作用.此外,去静电处理后,三种滤料的最大穿透颗粒粒径都移动到200~300 nm,符合机械滤料的特征.尽管滤料#1、#2和#3被浸水处理,但浸水后滤料的初始过滤效率几乎和初始滤料的过滤效率相同.这证明,浸水处理并不能削减纤维所带电荷,对滤料过滤性能的影响很小.

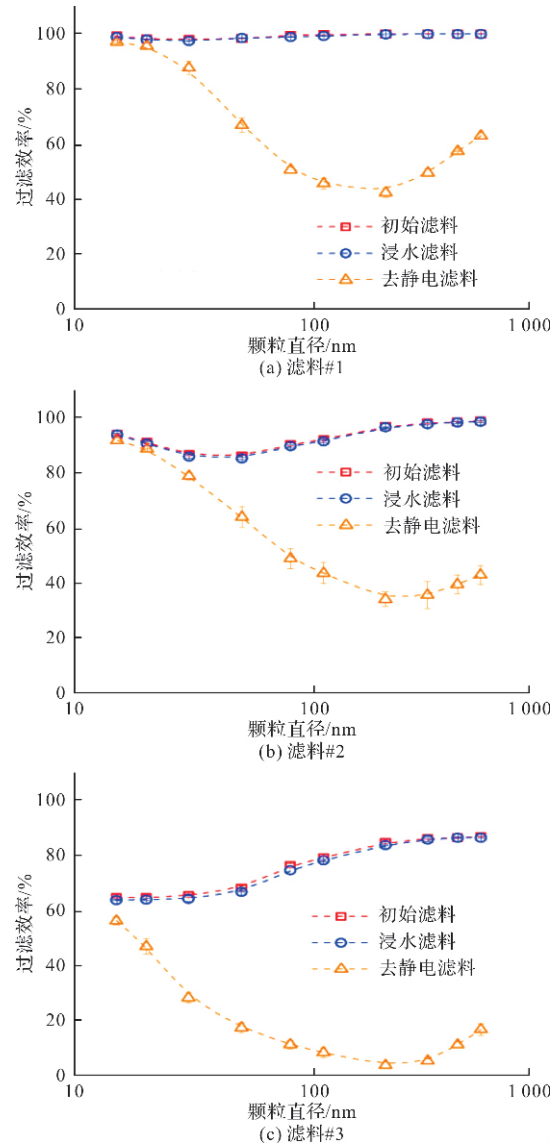


图6 单分散NaCl颗粒对初始状态、浸水和去静电滤料#1(a)、#2(b)和#3(c)的过滤效率

Fig. 6 Filtration efficiency of monodisperse NaCl particles on initial, water immersed and discharged filter media #1(a), #2(b) and #3(c)

### 2.4 滤料老化特性研究

带电纤维通过吸引带相反电荷的粒子、加速中性带电粒子向纤维表面移动来提高过滤效率.然而,在真实环境中,滤料使用一段时间后过滤效率会发生变化:随着加载时间的增加,过滤效率首先出现降低,达到最小值后又开始增加<sup>[10]</sup>.为了探讨滤料在真实环境中的性能变化及其原因,将滤料#3作为过滤元件在真实环境中进行连续长时间使用.之后,在过滤风速为10 cm/s、相对湿度为30%的条件下,测量初始状态和IPA饱和蒸汽浸泡处理的滤料#3-0、#3-1、#3-2和#3-3对单分散NaCl颗粒的初始过滤效率,测试结果如图7所示.由图7可得,在未经人为去静电处理的情

况下: 颗粒粒径小于 $\sim 30$  nm 时, 滤料 # 3-0、# 3-1、# 3-2 和 # 3-3 的过滤效率差异较小, 这是因为粒径小于 30 nm 的颗粒的过滤主要受机械扩散机制决定, 这些粒径小于 30 nm 的颗粒具有较高的迁移率, 很难被滤料电荷极化捕集; 颗粒粒径大于 $\sim 30$  nm 时, 滤料 # 3-1、# 3-2 和 # 3-3 的过滤效率显著低于初始滤料 # 3-0 的过滤效率, 这是因为对于粒径大于 $\sim 30$  nm 的颗粒, 其捕集效率主要受静电效应影响, 对于真实环境中使用过的滤料, 其表面被沉积颗粒覆盖, 降低了纤维电荷对后续颗粒的捕集作用<sup>[10]</sup>, 此外, 滤料纤维所带电荷也会因为颗粒电荷中和、气流摩擦等原因而衰减。上述原因的综合作用造成驻极体滤料静电衰减, 导致最大穿透粒径(MMPS)由滤料 # 3-0 的 $\sim 20$  nm 增加为滤料 # 3-1、# 3-2 和 # 3-3 的 $\sim 300$  nm。

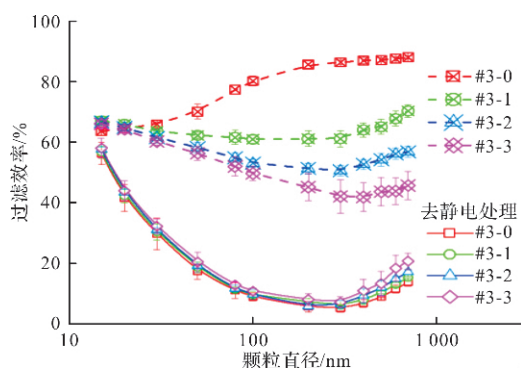


图7 单分散 NaCl 颗粒对未经处理和去静电处理的滤料的过滤效率

Fig. 7 Filtration efficiency of monodisperse NaCl particles on untreated and discharged filter media

结合 2.2 节测试结果可知, 在真实环境中加载 5、6 和 7 个月的驻极体滤料单位面积加载质量和压降增长都较低, 分别增加了  $3.55 \sim 4.76$  g/m<sup>2</sup> 和  $2.6 \sim 3.56$  Pa, 然而, 所有滤料的过滤效率都出现了显著下降。因此, 驻极体滤料的更换要同时考虑压降和过滤效率。

如图 7 所示, 滤料 # 3-1(使用 5 个月)的过滤效率依次高于滤料 # 3-2(使用 6 个月)和滤料 # 3-3(使用 7 个月), 即在本实验中, 使用过的滤料的过滤效率随着使用时间的增加而降低。然而, 一些研究<sup>[10, 23]</sup>指出, 滤料的过滤效率随着过滤时间的增加先降低后增加, 过滤效率的降低是由于纤维所带电荷随着过滤时间的增加而衰减, 在随后的加载中滤料的过滤效率增加是由于沉积在滤料上的颗粒将滤料纤维间隙堵塞, 增加了碰撞和拦截

作用, 能够捕获更多的颗粒<sup>[23]</sup>。在本实验中, 可能因为滤料捕获的颗粒还不足以弥补滤料纤维所带静电的衰减, 因此过滤效率未出现增加现象。

IPA 饱和蒸汽能够在不破坏滤料表面沉积颗粒的情况下去除滤料纤维所带电荷<sup>[7, 13]</sup>, 因此, 实验中采用 IPA 饱和蒸汽去除滤料 # 3-1、# 3-2 和 # 3-3 纤维上的电荷。由图 7 可知, 与未经 IPA 处理的滤料相比, 采用 IPA 饱和蒸汽浸泡过的滤料 # 3-1、# 3-2 和 # 3-3 的过滤效率大幅降低, 这表明在真实环境中使用过的滤料其纤维上的静电并没有被完全消除, 即使使用时间超过 7 个月纤维电荷的静电效应依然存在。滤料自身带有荷电性, 但 IPA 饱和蒸汽能够完全去除滤料纤维所带电荷, 因此, 在存储和使用过程中应该远离异丙醇等醇类, 以防纤维上的电荷被消除。

## 2.5 加载环境对过滤效率的影响研究

真实环境中空气相对湿度是时刻变化的, 为了比较驻极体滤料在真实环境和实验室环境中过滤效率的异同, 首先, 在过滤风速 10 cm/s、相对湿度 30% 时, 测试滤料加载到 0、1.1、2.1、3.8、6.0、8.0、9.0 和 10.0 g/m<sup>2</sup> 时的过滤效率, 测试结果如图 8 所示。

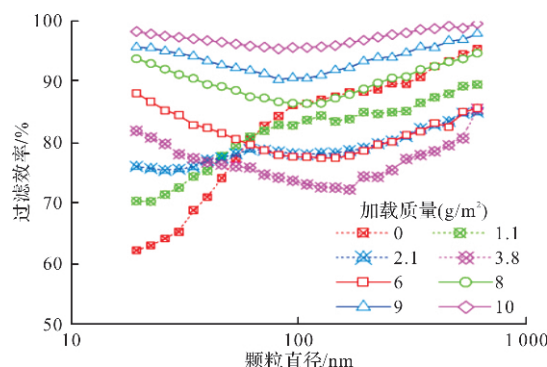


图8 滤料 # 3 在实验室加载到 0、1.1、2.1、3.8、6、8、9 和 10 g/m<sup>2</sup> 时的过滤效率

Fig. 8 Filtration efficiency of filter media #3 loaded to 0, 1.1, 2.1, 3.8, 6, 8, 9 and 10 g/m<sup>2</sup> in the laboratory environment

由图 8 可知, 驻极体滤料的过滤效率并不都是随着滤料表面沉积颗粒质量的增加而增加。对于粒径小于 $\sim 40$  nm 的颗粒, 滤料 # 3 的过滤效率随着加载质量的增加而增加, 未出现降低现象, 过滤效率的增加是因为粉尘颗粒堵塞滤料孔隙, 造成机械扩散作用增强而捕集更多的微细颗粒; 并且, 相对于机械扩散作用, 静电作用对微细颗粒的影响小, 即纤维所带静电的消耗对微细颗粒捕集效率的影响较小, 不足以降低机械扩散作用引起的过滤效率增加<sup>[13]</sup>。但是, 对于粒径大于 $\sim 40$

nm 的颗粒,当加载质量小于  $3.8 \text{ g/m}^2$  时,滤料 #3 的过滤效率降低,当加载质量大于  $3.8 \text{ g/m}^2$  时,滤料 #3 的过滤效率增加,过滤效率降低是因为纤维的静电效应由于沉积颗粒的覆盖而减弱,过滤效率增加是因为沉积颗粒增加了滤料的机械扩散作用,且增加程度大于静电效应的衰减程度。

通过图 7 和图 8 对真实环境和实验室中加载的驻极体滤料进行综合对比,滤料 #3-1、#3-2 和 #3-3 在真实环境中捕集的颗粒物质量分别为  $3.55$ 、 $3.96$  和  $4.76 \text{ g/m}^2$ ,其过滤效率变化趋势与滤料在实验室中加载到  $3.8$  和  $6 \text{ g/m}^2$  相似。然而,在相似的加载质量下,实验室中加载滤料的过滤效率明显高于真实环境中加载滤料的过滤效率。这可能是因为真实环境中加载滤料的时间大于 5 个月,显著长于实验室中加载时间(相对湿度 30% 时加载时间小于 1 天),滤料长时间暴露在真实环境中导致滤料老化,静电效应减弱。因此,在实验室中加载的滤料难以准确预测真实环境中加载滤料的性能变化,但仍有一定的指导意义。

### 3 结论

本文构建了亚微米颗粒过滤加载实验系统,系统研究了空气湿度作用下初始状态、浸水处理、去静电处理、老化处理驻极体滤料的过滤效率和压降,并对驻极体滤料的空气湿度和静电效应影响机理进行了深入研究,主要结论如下:

(1)空气湿度变化甚至浸水处理不改变驻极体滤料的压降和初始过滤效率,证明空气湿度变化甚至浸水处理并不能削减纤维所带电荷;

(2)驻极体滤料经去静电处理后,对于粒径大于  $20 \text{ nm}$  的颗粒,其初始过滤效率大幅降低,最大穿透粒径由  $20 \sim 50 \text{ nm}$  移动到  $200 \sim 300 \text{ nm}$ ,符合机械滤料特征,证明 IPA 饱和蒸汽作用下纤维所带电荷被消除;

(3)分别对真实环境中使用了 5、6 和 7 个月后的滤料 #3 进行测试,发现滤料单位面积加载质量和压降增长都较低,然而,加载后滤料的过滤效率都出现了显著下降。因此,驻极体滤料的更换要同时考虑压降和过滤效率;

(4)在真实环境中使用过的滤料经去静电处理后过滤效率大幅降低,表明使用过的滤料其纤维上的静电并没有被完全消除;加载相同质量颗粒时,实验室中加载滤料的过滤效率高于真实环境中的过滤效率,表明驻极体滤料长时间暴露在真

实环境中会减弱静电效应。

### 参考文献 References

- [1] HAMRA G B, GUHA N, COHEN A, et al. Outdoor particulate matter exposure and lung cancer: A systematic review and meta-analysis [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2014, 122: 906-911.
- [2] MUJAN I, ANDELKOVIC A S, MUNCAN V, et al. Influence of indoor environmental quality on human health and productivity: A review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 217(20): 646-657.
- [3] 杨秀峰,夏利梅,周雪涵.空气净化器性能的实测与分析[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 51(5): 757-762.  
YANG Xiufeng, XIA Limei, ZHOU Xuehan. Measurement and analysis of the performance of air cleaner [J]. *J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2019, 51(5): 757-762.
- [4] 于竞宇,於蓉,张琦,等.基于机器学习的养老机构室内环境质量满意度评价模型[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 52(4): 587-593.  
YU Jingyu, YU Rong, ZHANG Qi, et al. Evaluation model of indoor environment quality satisfaction for nursing homes based on machine learning [J]. *J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2020, 52(4): 587-593.
- [5] LI S, XIN J, XIE B, et al. Experimental investigation of the optimization of nozzles under an injection pipe in a pulse-jet cartridge filter [J]. *Powder Technology*, 2019, 345(1): 363-369.
- [6] CHIEN C H, ZHOU C, WEI H C, et al. Feasibility test of cellulose filter for collection of sulfuric acid mists [J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 195: 398-403.
- [7] TANG M, THOMPSON D, CHEN S C, et al. Evaluation of different discharging methods on HVAC electret filter media [J]. *Building and Environment*, 2018, 141: 206-214.
- [8] 赫伟东,郭颖赫,常德强,等.袋除尘滤料电晕驻极强化研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(10): 1469-1473.  
HE Weidong, GUO Yinghe, CHANG Deqiang, et al. Enhancement of baghouse filter with corona electret [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2018, 39(10): 1469-1473.
- [9] MOTYL E, LOWKIS B. Effect of air humidity on charge decay and lifetime of PP electret nonwovens [J]. *Fibres Text East Eur*, 2006, 14(5): 39-42.

- [10] WALSH D C, STENHOUSE J I T. Parameters affecting the loading behavior and degradation of electrically active filter materials [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1998, 29(5): 419-432.
- [11] 王利平, 张世华, 王峰慧, 等. 均质石英砂滤料过滤性能的试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 1996, 28(1): 65-69.  
WANG Liping, ZHANG Shihua, WANG Fenghui, et al. Study on the performance of filtration by uniform quarta sand media [J]. *J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 1996, 28(1): 65-69.
- [12] LEE M, OTANI Y, NAMIKI N, et al. Prediction of collection efficiency of high-performance electret filters [J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2002, 35(1): 57-62.
- [13] CHANG D, CHEN S C, PUI D Y H. Capture of sub-500 nm particles using residential electret HVAC filter media-experiments and modeling [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, 16(12): 3349-3357.
- [14] OTANI Y, EMI H, MORI J. Initial collection efficiency of electret filter and its durability for solid and liquid particles [J]. *Kagaku Kōgaku Ronbunshū*, 1992, 18(2): 240-247.
- [15] GUPTA A, NOVICK V J, BISWAS P, et al. Effect of humidity and particle hygroscopicity on the mass loading capacity of high efficiency particulate air (HEPA) filters [J]. *Aerosol Science & Technology*, 1993, 19(1): 94-107.
- [16] PEI C, OU Q, PUI D Y H. Effect of relative humidity on loading characteristics of cellulose filter media by submicrometer potassium chloride, ammonium sulfate, and ammonium nitrate particles [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 212: 75-83.
- [17] 陈相玮, 林忠平, 刘鸿洋. 湿度对 ePTFE 高效空气过滤材料阻力的影响[J]. *建筑热能通风空调*, 2015, 34(3): 26-28.  
CHEN Xiangwei, LIN Zhongping, LIU Hongyang. Influence of humidity on resistance of ePTFE high efficiency air (HEPA) filter media [J]. *Building Energy & Environment*, 2015, 34(3): 26-28.
- [18] JOUBERT A, LABORDE J C, BOUILLLOUX L, et al. Influence of Humidity on Clogging of Flat and Pleated HEPA Filters [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2010, 44(12): 1065-1076.
- [19] 袁学玲, 陈晓春, 杨正羽, 等. 湿度对袋式除尘性能的强化研究[J]. *高校化学工程学报*, 2019, 33(4): 965-971.  
YUAN Xueling, CHEN Xiaochun, YANG Zhengyu, et al. Effects of humidity on dust removal intensification of bag filters [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2019, 33(4): 965-971.
- [20] YANG S, LEE W M G, HUANG H L, et al. Aerosol penetration properties of an electret filter with sub-micron aerosols with various operating factors [J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 2007, 42(1): 51-57.
- [21] MYERS D L, ARNOLD B D. Electret media for HVAC filtration applications [J]. *International Non-wovens Journal*, 2003, 4: 43-54.
- [22] MONTGOMERY J F, GREEN S I, ROGAK S N. Impact of relative humidity on HVAC filters loaded with hygroscopic and non-hygroscopic particles [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2015, 49(5): 322-331.
- [23] RAYNOR P C, CHAE S J. The long-term performance of electrically charged filters in a ventilation system [J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2004, 1(7): 463-471.
- [24] ISO. Air filters for general ventilation-part 4: conditioning method to determine the minimum fractional test efficiency: ISO16890-16894[S]. International Organization for Geneva, Switzerland; Standardization, 2016.

(编辑 桂智刚)