



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202303116

中图分类号 X513

文献标识码 A

谢彪, 郁静静. 环境相对湿度对颗粒物过滤性能的影响[J]. 环境工程学报, 2023, 17(7): 2267-2276. [XIE Biao, YU Jingjing. Effect of ambient relative humidity on particle filtration performance[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(7): 2267-2276.]

环境相对湿度对颗粒物过滤性能的影响

谢彪^{1,2,✉}, 郁静静¹

1. 太原理工大学 安全与应急管理工程学院, 太原 030024; 2. 中国矿业大学 安全工程学院, 徐州 221116

摘要 以吸湿性氯化钠 (NaCl) 颗粒和非吸湿性氧化铝 (Al₂O₃) 颗粒为实验对象, 使用纤维材料过滤介质, 引入纳米和微米两类颗粒物尺度, 考察不同相对湿度 (RH) 环境下颗粒物过滤性能的变化规律及内在机理。结果表明: 低湿度下 (RH20% 和 50%) 过滤吸湿性颗粒时, 压降呈线性增长趋势, 高湿度下 (\geq RH80%) 会出现压降的急剧升高; 非吸湿性颗粒受湿度变化的影响较小, 但在饱和湿度下 (RH100%) 压降增长较为显著; 滤料初始过滤效率对环境相对湿度的变化不敏感, 也不会受到颗粒吸湿性能差别的影响; 在颗粒加载过程中, 受滤料纤维表面颗粒物沉积的影响, 过滤效率持续缓慢增长, 但湿度超过颗粒潮解点后, 对吸湿性颗粒的过滤效率出现一定程度下降, 类似液体过滤机制; 此外, 环境湿度的变化对于纳米颗粒物过滤性能的影响远比微米颗粒更为显著。研究结果可为大气污染防治中颗粒物过滤技术的应用与改进提供参考。

关键词 相对湿度; 粉尘污染; 颗粒物; 过滤效率; 吸湿性

颗粒物过滤技术在环境保护、职业卫生、医疗健康等领域具有广泛应用^[1-4]。无论是在工业上用于处理废气的除尘滤袋, 还是在劳动保护中用于净化空气的防尘口罩, 纤维过滤材料在减少颗粒物排放及污染暴露中发挥着重要作用^[5-7]。颗粒物过滤效果容易受到纤维材料的本身特性及外在环境条件的影响^[8-9]。以往工程实践表明, 环境相对湿度 (RH) 是影响颗粒物过滤效果的主要因素之一, 影响程度的高低与湿度大小、粉尘成分、颗粒粒径、滤料性质等多方面的参数相关^[10-12]。

在工业除尘领域, 环境湿度过高往往容易引起过滤除尘效果出现衰减。王晓明^[13]测试了袋式除尘器在水泥厂的实际应用情况, 发现高湿度会导致粉尘黏附在滤料表面且无法通过脉冲清灰去除, 严重时会导致除尘器效率显著降低、能耗大幅增加。KHIROUNI 等^[14]分析了冶金行业过滤除尘器的使用情况, 发现环境湿度升高会引起金属氧化物颗粒沉积附着在滤料表面, 造成除尘器压降显著升高。王辉^[15]测试了不同相对湿度下过滤材料的强力特性变化, 发现环境湿度升高会使滤料的断裂伸长率增加。BOUDHAN 等^[16]比较了滤袋在干燥空气和潮湿空气下的除尘效果, 认为湿空气会引起清灰后残余粉尘量的大幅增加, 从而减少了过滤元件有效使用寿命。以上学者虽然在应用实践中认识到环境湿度能够对粉尘过滤产生较大影响, 但缺乏定量化的研究与系统化的分析, 没有得出相对湿度对颗粒物过滤性能的精确影响规律。

在实验研究领域, 由于忽视了颗粒物本身特性的影响, 研究人员暂未得出较为一致的结论。RIBEYRE 等^[17]通过研究纳米颗粒在加载过程中的过滤阻力受相对湿度的影响情况, 发现粉尘层的压降随着相对湿度的升高发生了增长, 而 JOUBERT 等^[18]却发现暴露在湿空气下的粉尘层会发生压降和比阻力的下降; 同样, 关于环境湿度对过滤效率的影响, 部分学者发现相对湿度对过滤效

收稿日期: 2023-03-20; 录用日期: 2023-05-23

基金项目: 山西省基础研究计划项目 (202103021223108)

第一作者: 谢彪 (1995—), 男, 博士, 讲师, xiebiaocumt@163.com; ✉通信作者

率的影响不明显,但湿度升高会使过滤效率出现增长^[19-20]。因此,湿度对过滤效果的影响是复杂的、多因素的,应更深入地开展精确实验与定量分析以得出较为明确的规律。更为重要的是,除了在实验现象上进行描述之外,对于环境湿度影响颗粒物过滤性能的内在作用机理也需要进一步探究。

本研究主要通过实验方法测试不同湿度等级下加载粉尘颗粒物时纤维过滤材料的过滤效率及阻力变化特性。分别采用纳米和微米级的颗粒以比较不同颗粒尺寸产生的性质差异,并且引入吸湿性与非吸湿性颗粒来使结果更具有代表性。为明确环境相对湿度对颗粒物过滤效果的影响,测试不同环境湿度下颗粒物的过滤阻力、过滤效率和容尘效率的变化规律,以期为大气污染防治中颗粒物过滤技术的应用与改进提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

选用了3种粉尘颗粒进行过滤测试,分别是纳米尺寸的氯化钠(NaCl)颗粒、纳米尺寸的氧化铝(Al_2O_3)颗粒,以及微米尺寸的氧化铝颗粒。其中,氯化钠颗粒是常见的吸湿性颗粒,能吸收空气中水蒸气,在湿空气中状态不稳定,相对湿度达到其自身潮解点(约为75%)之后会发生潮解液化的现象。而氧化铝颗粒是常见的非吸湿性颗粒,环境湿度变化对颗粒本身性质影响不明显。吸湿性和非吸湿性固体污染物均是空气中常见的粉尘物质,分别进行纳米与微米颗粒的测试则有助于揭示相对湿度对不同粒度粉尘颗粒物过滤性能的影响程度差异。

3种颗粒物的粒度分布如图1所示,其中测量纳米颗粒所用仪器为扫描电迁移率粒径谱仪(型号:GRIMM 5416-based),微米颗粒测试仪器为激光粒度分析仪(型号为Microtrac S3500),纳米氯

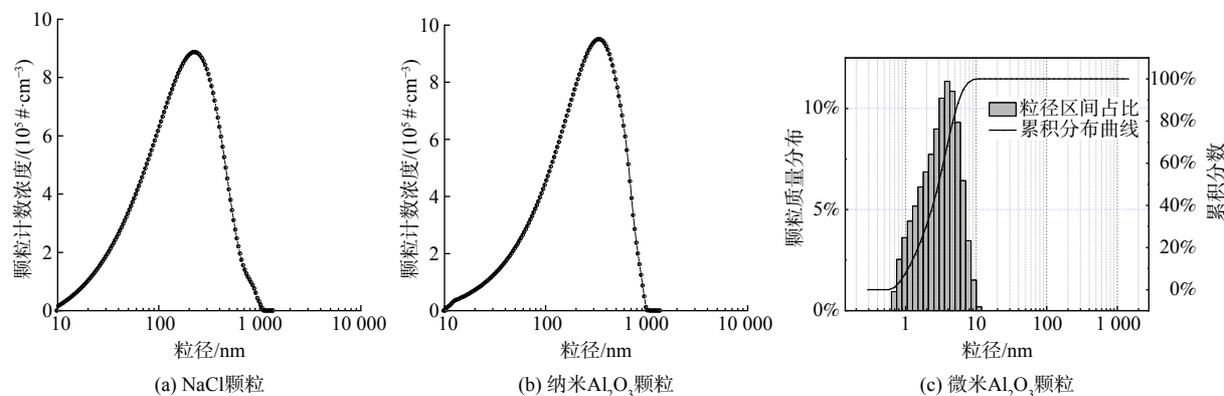


图1 粉尘颗粒的粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of the dust

化钠和氧化铝颗粒的粒径范围为10~1 000 nm。两者浓度峰值所处的粒径范围存在微小差异,微米氧化铝颗粒的中值粒径为2.87 μm 。图2展示了这几种颗粒的微观形态。

实验中所用的过滤介质是常见的聚酯纤维滤料,其各项参数如表1所示。聚酯纤维滤料是使用最为广泛的过滤材料之一,常用于工业通风及空气净化系统,也是制造各类滤袋及滤筒的基础材料之一。为了更好地体现出过滤阻力与效率的变化规律,所选用的

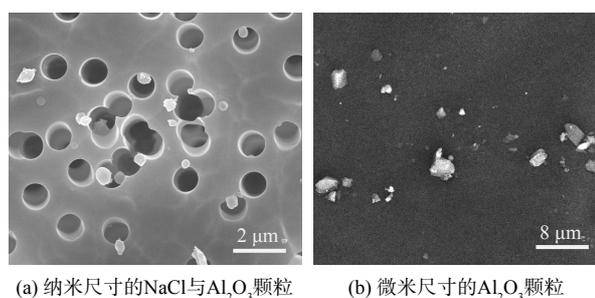


图2 粉尘颗粒的扫描电镜图像

Fig. 2 Scanning electron microscope photographs of dust particles

滤料过滤精度适中且透气性良好。

1.2 实验装置

图 3 展示了颗粒物过滤性能测试系统，主要包括颗粒发生与分散装置、含湿空气供给装置、滤料测试装置，以及浓度和压降检测装置等。其中，高效过滤器 (HEPA) 用来过滤进入系统的气体中的颗粒物，消除空气中的粉尘对实验结果的影响，调节阀用来调节各条支路上的气体流量。

系统涉及的主要仪器装置包括：气溶胶发生器 (德国 Palas AGK-2000)，用于产生粒径在 $0.005\sim 15\ \mu\text{m}$ 范围内的颗粒物；粉尘颗粒扩

表 1 测试所用滤料的性能参数

Table 1 Properties and parameters of the filter media

项目	参数
滤料材质	聚酯纤维
厚度	0.75 mm
平均纤维直径	14.5 μm
滤料基重	208 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$
过滤精度	0.3~2 μm
断裂强力	经向：750 N/5*20 cm 纬向：980 N/5*20 cm
允许最高使用温度	150 $^{\circ}\text{C}$
允许连续使用温度	120 $^{\circ}\text{C}$

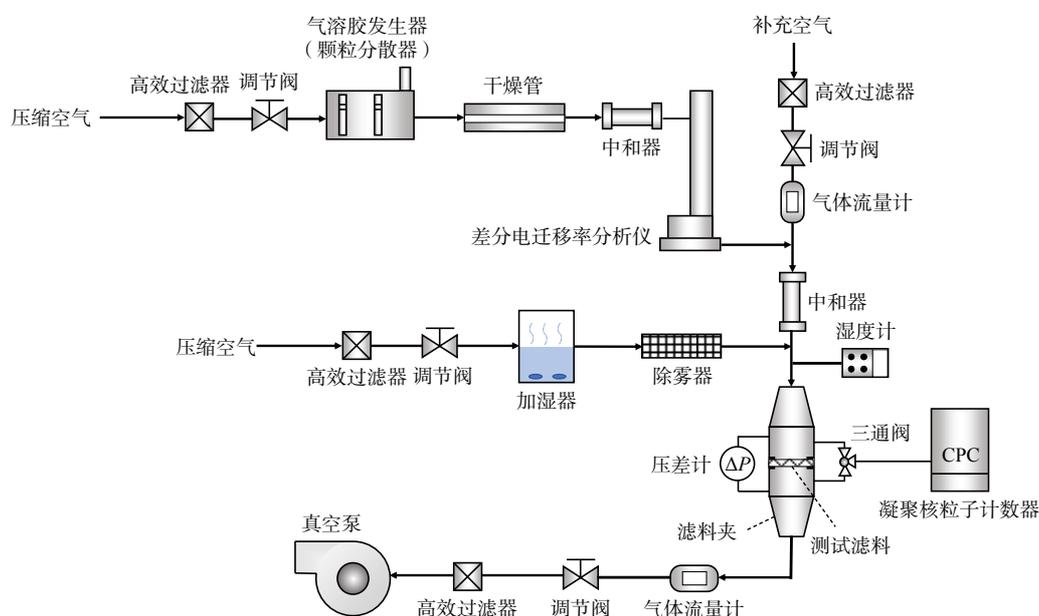


图 3 颗粒物过滤性能测试系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental system for the filtration performance test

散器 (德国 Topas SAG-410)，用于产生分散相的粉尘颗粒，颗粒粒径 $\leq 100\ \mu\text{m}$ ，气源供给压力 $\geq 0.6\ \text{MPa}$ ；气溶胶中和器 (德国 GRIMM 5520)，用于向电荷分布未知的气溶胶施加平衡电荷分布；差分电迁移率分析仪 (德国 GRIMM 55-900)，用于在线测量颗粒迁移率大小，筛分出具有特定粒径大小的颗粒，以测试滤料过滤效率随颗粒粒径大小的变化情况；凝结核颗粒计数器 (德国 GRIMM 5416)，用于测量颗粒物的浓度，其浓度检测上限为 $10^7\ \#\cdot\text{cm}^{-3}$ ，粒径检测下限为 $4\ \text{nm}$ ，响应时间 $\leq 3\ \text{s}$ ；滤料夹用于固定过滤介质，同时提供压降和颗粒浓度的测量接口；真空泵 (中国上海 SHZ-S)，用于向实验系统提供负压与动力，其极限真空度为 $0.098\ \text{MPa}$ ，最大流量为 $90\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

1.3 实验方法

过滤效率的测试包括初始过滤效率测试及容尘阶段过滤效率测试 2 个方面。初始过滤效率需要测量分级效率，即测量洁净滤料对于不同粒径粉尘颗粒的过滤效率。具体是通过差分电迁移率分析仪分别筛分出不同粒径的颗粒，然后用凝结核颗粒计数器分别测量过滤介质上下游的浓度，并根据式 (1) 计算出效率数值。

$$E(d_i) = 1 - \frac{C_{\text{down}}(d_i)}{C_{\text{up}}(d_i)} \quad (1)$$

式中： $E(d_i)$ 为对某一粒径或粒径范围为 d_i 的颗粒物的过滤效率，无量纲； $C_{\text{down}}(d_i)$ 为经过过滤材料分离后的该类颗粒物的计数浓度， $\#\cdot\text{cm}^{-3}$ ； $C_{\text{up}}(d_i)$ 为未经滤材处理的上游颗粒物的原始计数浓度， $\#\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

实验中筛分出了6种不同粒径的颗粒，粒径分别为50、100、300、400、500、600 nm。测试时的过滤风速稳定在 $10\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，在测试中设置了不同的环境湿度，用于研究初始过滤效率受环境湿度的影响程度。

容尘阶段过滤效率测试的是所有颗粒的总过滤效率，即是在粉尘沉积过程中测量过滤效率随滤料表面粉尘沉积量的变化情况，其测试方法与初始效率测试方法稍有区别，主要是颗粒供给支路上省去了差分电迁移率分析仪的筛分作用，并将其与颗粒计数器联用以测量上下游的粒谱变化情况。在实验测试中，气流温度始终稳定在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ ，并通过调整加湿器功率与气体流量，设置了4个不同的相对湿度等级，分别为20%（误差 $\pm 2\%$ ）、50%（误差 $\pm 2\%$ ）、80%（误差 $\pm 2\%$ ）、100%（误差 $\pm 3\%$ ）。在颗粒加载开始前和结束后，分别称量了测试滤料，以得到单位面积滤料表面的颗粒沉积质量，并通过式(2)计算在颗粒加载过程某一时刻的沉积质量^[21]。

$$m_i = \frac{\sum_{j=0}^i (c_{\text{up}, j} - c_{\text{down}, j}) \times (t_j - t_{j-1})}{\sum_{j=0}^n (c_{\text{up}, j} - c_{\text{con}, j}) \times (t_j - t_{j-1})} \cdot M \quad (2)$$

式中： m_i 为第 i 次测试时的颗粒沉积质量， $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ； $c_{\text{up}, j}$ 为第 j 次测试时的上游颗粒物浓度， $\#\cdot\text{cm}^{-3}$ ； $c_{\text{down}, j}$ 为第 j 次测试时的下游颗粒物浓度， $\#\cdot\text{cm}^{-3}$ ； t_j 为第 j 次测试时颗粒加载已进行的时间，s； M 为测试结束后滤料单位表面的颗粒沉积质量， $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

除了测量过滤效率之外，同时比较了不同湿度下颗粒在加载过程中过滤阻力的变化情况，其中滤料和粉尘层的总阻力可用式(3)表示^[22]。

$$\Delta P = R \cdot \mu \cdot v_f + K_c \cdot \mu \cdot \frac{m_s}{S_f} \cdot v_f \quad (3)$$

式中： ΔP 为滤料和粉尘层的总阻力，Pa； R 为滤料的阻力系数， m^{-1} ； μ 为空气的动力粘度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； v_f 为过滤风速， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； K_c 为粉尘层的比阻系数， $\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$ ； m_s 为滤料表面的颗粒沉积质量，kg； S_f 为滤料的有效过滤面积， m^2 。

其中粉尘层的比阻系数 K_c 与其自身的孔隙率的关系如式(4)所示。

$$K_c = 180(1 - \varepsilon) \cdot \varepsilon^{-3} \cdot (\rho_p \phi_s^2 d_s^2)^{-1} \quad (4)$$

式中： ε 为粉尘层孔隙率； ρ_p 为粉尘层密度， $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ； ϕ_s 为球形度； d_s 为索尔平均粒径， μm 。

2 结果与讨论

2.1 相对湿度对过滤阻力的影响

图4展示了滤料在 $10\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的恒定过滤风速下加载不同颗粒时的压降变化情况。对于研究中任意颗粒物，滤料的压降始终都会随着粉尘沉积质量的增加而不断增长，只是相对湿度会对压降增长的变化率产生影响。对于氯化钠颗粒，在相对湿度为20%和50%时，滤料在颗粒加载过程中的压降基本上呈现线性增长的趋势。在较高的湿度环境下，压降增长更为缓慢。在20%的相对湿度下，滤料单位表面的颗粒沉积质量浓度为 $18.15\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 时，滤料的压降增长到391 Pa，而在相对湿度提升至50%后，处于相近的压降水平(387 Pa)，滤料单位表面的颗粒沉积质量浓度达到了 $37.73\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。由此可见，相对湿度对于氯化钠颗粒加载过程的压降变化产生的影响较为显著。

而在相对湿度为80%和100%的环境下，压降增长的趋势却发生了明显改变，不再具有线性

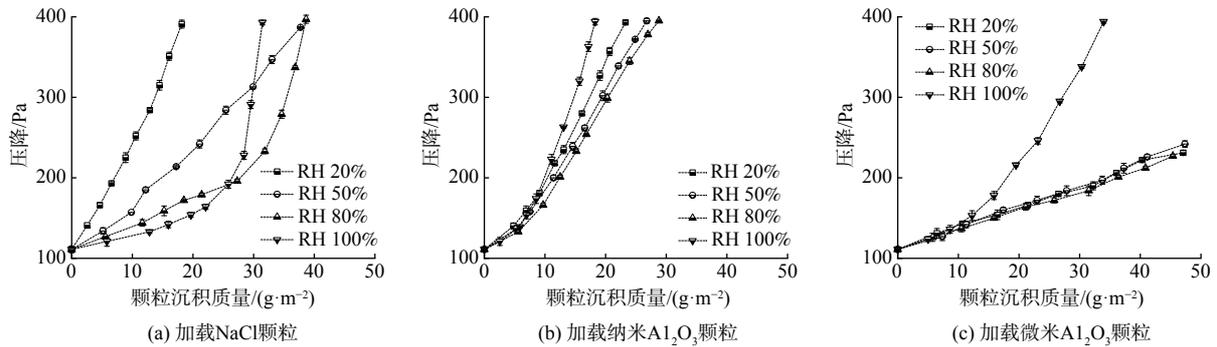


图 4 颗粒加载过程中的压降受相对湿度变化的影响情况

Fig. 4 Influence of relative humidity on pressure drop during particle loading

增长的趋势。在一段时间的颗粒沉积过后，压降突然出现大幅提升，且增长速率十分迅速。其原因是由于氯化钠颗粒本身作为吸湿性粉尘，在环境相对湿度超过其自身潮解点之后，会发生潮解现象，不再保持完整的固体颗粒状态。因此，压降的大幅增加是由于在高湿度情况下，过滤状态由固体气溶胶的过滤转换成了液体过滤所导致的，原本沉积在滤料表面的颗粒潮解后转化为小液滴覆盖在滤料纤维表面并逐渐形成了液膜。另外，滤料在初始阶段依然经历了一段时间的线性增长，这可能是由于部分氯化钠颗粒尚未完全潮解，或者是颗粒潮解量不足，还没有引起纤维之间液膜的完全形成。

纳米氧化铝颗粒作为非吸湿性粉尘，在颗粒加载过程中没有出现颗粒物潮解或形变的情况，整体的压降增长速率变化也不明显，但是在不同相对湿度下还是能看出一定程度的区分。在 3 种相对湿度 (20%、50% 和 80%) 下，压降增长的速率随着相对湿度的增高而逐渐降低，但是相差的并不是很大，滤料单位表面颗粒沉积质量浓度分别为 19.07、19.53 和 20.29 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 时，压降分别为 327、302 和 299 Pa，三者之间的差距不足 30 Pa。因此，相对于吸湿性的氯化钠颗粒而言，非吸湿性的纳米氧化铝颗粒受相对湿度的影响要小的多。然而，在相对湿度达到 100% 后，滤料压降的增长速率并未出现预料中的继续下降，反而出现了一定程度的增加，同样的现象也出现在了微米氧化铝颗粒的加载过程中。如图 4 (c) 所示，饱和湿度下的压降增长率明显高于其余湿度等级下的增长率。此外，对比微米级和纳米级氧化铝颗粒加载过程中的压降增长特征发现，微米级氧化铝颗粒的压降增长更为平缓，且除饱和湿度外，其余测试湿度环境下的压降增长几乎没有明显区别，增长速率也十分接近。由此推测，相对湿度对于纳米氧化铝颗粒的影响比微米氧化铝颗粒更为显著。

由式 (4) 可知，粉尘层比阻系数与粉尘层的孔隙率密切相关，且比阻系数越高，代表孔隙率越低。因此，从以上比阻系数的计算结果可得出：除去饱和湿度这一特殊情况，对于纳米颗粒构成的粉尘层，无论颗粒是吸湿性或者非吸湿性，粉尘层的孔隙率均随着相对湿度的升高而升高。但在本研究中，对于微米级颗粒形成的粉尘层，其孔隙率受相对湿度影响不明显，且微米级颗粒粉尘层的孔隙率要明显大于纳米级颗粒粉尘层的孔隙率。这也意味着尺寸更大的微米级颗粒在滤料表面沉积的过程中，形成的粉尘层更加疏松、透气性更好。然而，在 100% 相对湿度的环境下，微米和纳米氧化铝颗粒层均出现了孔隙率突然下降的现象，实际上如果将氯化钠颗粒潮解，形成液膜后压降骤然上升的情况考虑在内，孔隙率在高湿度的环境下也同样是在下降的。因此，推测高湿度必然会影响颗粒在滤料表面的沉积方式和沉积形态，进而导致粉尘层孔隙率发生改变。

为进一步探究相对湿度对于颗粒物加载特征的影响，根据公式 (3) 计算不同相对湿度下各颗粒物构成的粉尘层比阻系数，结果如图 5 所示。对于氯化钠颗粒 (注：因为该状态下不属于严格意义上的颗粒层，未将高湿度下液膜形成后的结果包括在内，即非线性增长阶段的数据)，粉尘层比阻系数随着相对湿度的增长在不断下降。同样，对于纳米氧化铝颗粒，除了饱和湿度外，比阻系数

也是随着相对湿度增加在降低,而对于微米氧化铝颗粒,比阻系数变化却不明显,但在饱和湿度下同样出现了显著增长。

图6对比了低湿度(RH20%)和高湿度(RH100%)环境下滤料表面颗粒沉积的表面形态。低湿度下氯化钠颗粒以树枝状团簇的形态附着在滤料纤维上,虽然颗粒簇交叉在一起,缩小了纤维之间的孔隙,但滤料依然具有一定通气孔道,保持着良好的透气性。并且,低湿度下吸湿性氯化钠颗粒与非吸湿性氧化铝颗粒两者在滤料表面沉积状态的差异也不明显。这与实验测量的数据情况基本上是吻合的,两者在低湿度下的压降上升曲线

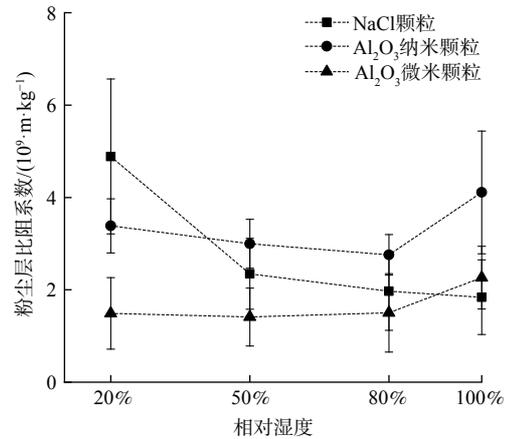
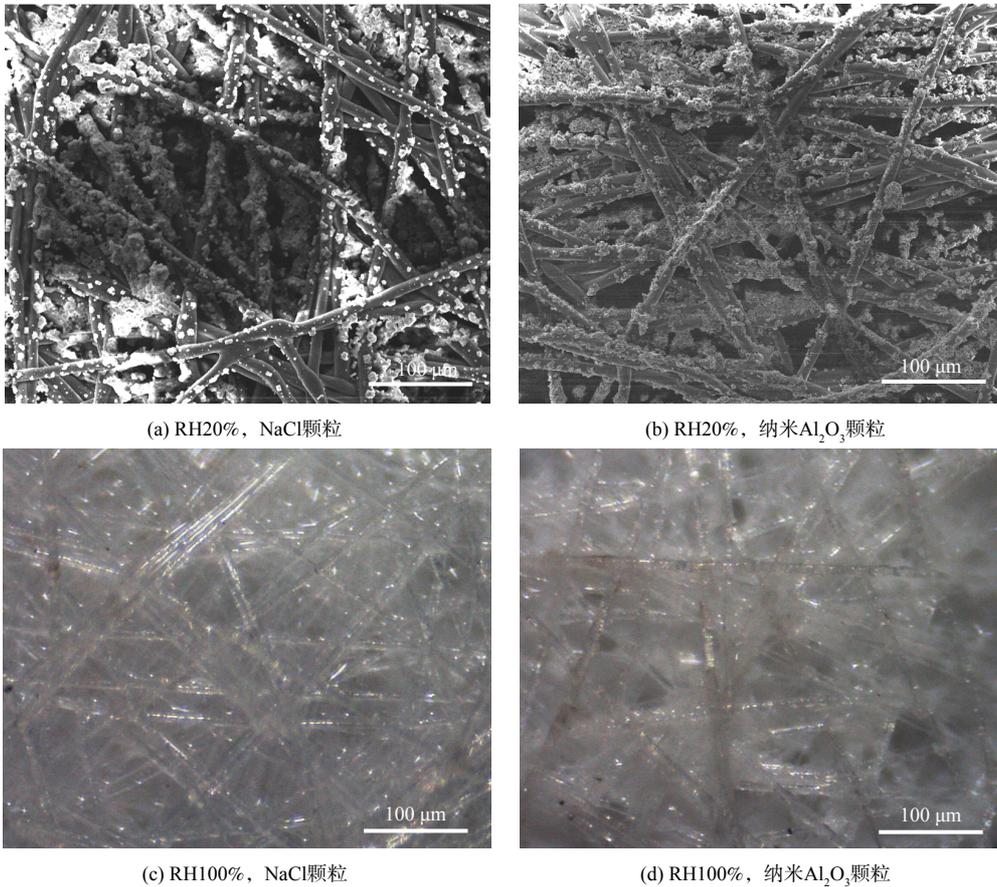


图5 不同颗粒粉尘层的比阻系数随相对湿度的变化

Fig. 5 The change of specific resistance coefficients of different particle dust layers with relative humidity



(a) RH20%, NaCl颗粒

(b) RH20%, 纳米 Al_2O_3 颗粒

(c) RH100%, NaCl颗粒

(d) RH100%, 纳米 Al_2O_3 颗粒

图6 低湿度和高湿度下滤料表面的颗粒沉积形态比较

Fig. 6 Comparison of particle deposition morphology on the filter media surface under low and high humidity

也具有一定程度相似性。而在高湿度情况下,沉积在纤维表面的氯化钠因为潮解已转化为了液滴状,并且随着颗粒的不断积累,在后期已形成了覆盖在滤料表层的液膜,完全堵塞住了纤维之间的孔隙。因此,在颗粒沉积后期,监测到压降突然升高亦为正常现象。

值得注意的是,对于氧化铝颗粒,滤料表面同样也出现了部分液膜,且还夹杂着部分粉尘颗

粒的团聚体。这一情况可能与饱和湿度下水蒸汽的凝结有关。在湿度达到或者接近 100% 时，空气中的水蒸气会处于一种不稳定的状态，湿空气在流经纤维间的孔隙时，由于发生气流扰动，水蒸气本身便容易发生凝结和液化，并且滤料纤维和纤维上的沉积颗粒在一定程度上能充当凝结核的作用，促进凝结作用的形成以降低空气中的饱和度。PEI 等^[23]指出，颗粒沉积在过滤介质表面后，相邻颗粒间形成的间隙是水蒸气发生凝结的理想场所，即便在低湿度的环境下，也会发生一定程度的蒸汽凝结现象。而这些以颗粒为中心凝结成的液滴随即会附着在颗粒表面，并随着沉积颗粒和凝结液滴的增多，最终颗粒的团聚体和铺展开来的液滴将会混合在一起覆盖在滤料表层，堵塞住表面的网孔。这一过程也是滤料压降快速提升的阶段。

上文已经阐述，在较高相对湿度下，尤其是在接近饱和湿度后，水蒸气凝结形成的液膜是影响滤料阻力特性的一个重要因素，而对于其他未达到饱和状态下的湿度等级，滤料的孔隙率会随着相对湿度的增加而增加，从而延缓阻力增长的速度。这一现象可从颗粒间液桥力作用的角度进行分析，液桥力是颗粒间重要作用力之一。液桥力会随着相对湿度的增加而变得更加显著，从而增大颗粒间粘附作用，因此在较高湿度下，被捕集的颗粒倾向于粘附在已沉积的颗粒上，形成结构更加开放的颗粒层，而不是滑移至纤维间的孔隙造成严重的堵塞，但这一作用对于微米级及以上尺寸颗粒的影响不明显^[20,24]；另一方面，纤维上沉积的颗粒团聚形态在湿度升高后也会发生明显转变(图7)，树枝状的团簇会发生结构收缩，进一步粘附在介质纤维的表面，减少了颗粒团聚体的表面积，也产生了更加通畅的风流通道。这一过程也被 MONTGOMERY 等^[25]通过荧光显微镜观察到，并在颗粒迁移率测试中得到证实。总之，相对湿度的升高改变了微观上的颗粒沉积模式，并导致加载过程中压降增长率发生变化。这一过程根据颗粒尺寸和环境相对湿度的不同，造成的影响程度也不尽相同。

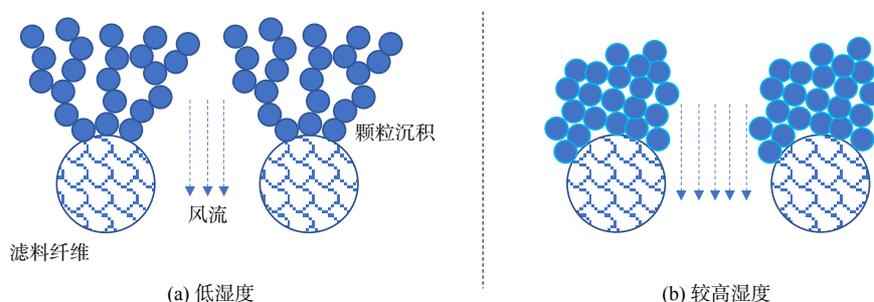


图7 湿度提升后纤维表面颗粒团聚形态重构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of particle agglomeration reconstruction on the fiber surface after humidity increase

2.2 相对湿度对初始过滤效率的影响

首先测试了不同相对湿度下滤料的初始过滤效率值，所用的测试气溶胶分别为吸湿性的氯化钠颗粒和非吸湿性的纳米氧化铝颗粒，测试结果如图8所示。不同相对湿度下的过滤效率随颗粒粒径的变化曲线并未发生显著变化。不仅如此，同一粒径大小的氯化钠颗粒和氧化铝颗粒测得的过滤效率值也非常接近。这说明初始过滤效率对环境中相对湿度的变化不敏感，也不会受到颗粒吸湿性能差别的影响。由于初始效率的测试时间较为短暂，滤料表面尚未形成有效的颗粒沉积，且在较短时间内颗粒本身也无法发生潮解，因此在本研究中，初始效率只受到了滤料自身结构和颗粒粒径大小的影响，并且随着粒径的增大呈现出先下降后升高的趋势。在粒径大小为 100 nm 时，所测得过滤效率达到了最低值，约为 (0.665 ± 0.01) 。这一规律也与机械过滤机制相吻合，对于粒径较小的颗粒，扩散效应起到主导作用，而随着粒径的不断增大，扩散效应会逐渐减弱，惯性碰撞和拦截筛分等作用机制会逐渐增强。而其中存在一段粒径范围，扩散效应已经明显减弱，惯

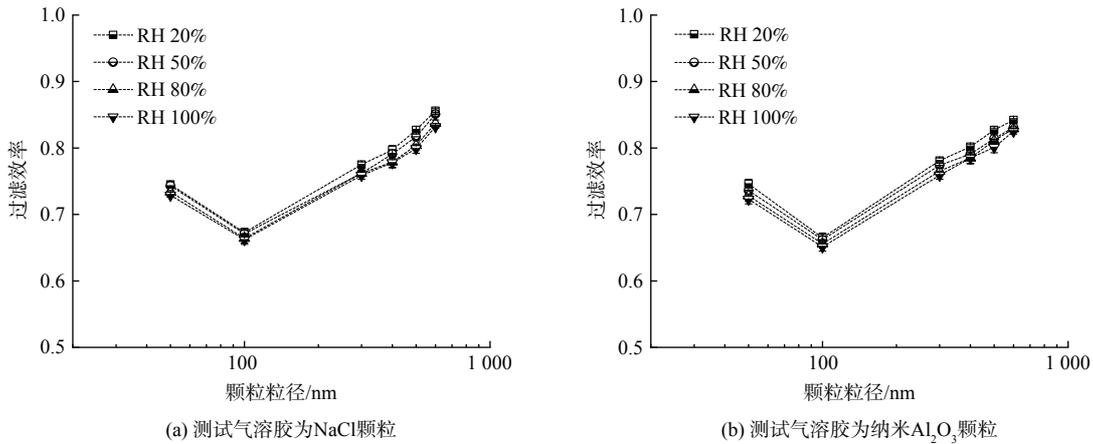


图8 不同相对湿度下的颗粒初始过滤效率

Fig. 8 Initial filtration efficiencies for different types of particles at different relative humidity

性碰撞和拦截筛分作用尚未有效增强,从而导致过滤效率发生一定程度下降。尽管对于不同的机械过滤材料,其过滤效率出现下降时所处的粒径范围存在一定差别,但该规律与之前学者的研究结果也基本一致^[26-27]。

2.3 相对湿度对容尘过滤效率的影响

相比于初始过滤效率,氯化钠颗粒在沉积过程中过滤效率的变化体现出较大的差异性(图9)。在相对湿度低于其自身潮解点时,过滤效率呈现出缓慢但持续增加的趋势。这表明颗粒物在滤料纤维上的堆积,进一步减小了纤维之间的孔隙,增强了对微小颗粒的捕集作用,并且20%相对湿度下过滤效率的增长要高于50%相对湿度下的增长速率。这可能是由于较低湿度下形成的颗粒层孔隙率更低,对各项过滤机制作用效果的提升也更加显著。而对于相对湿度超过氯化钠潮解点的情况,过滤效率则展现出了截然相反的变化趋势,随着颗粒沉积在不断下降。这一现象明显区别于固体颗粒物的过滤机制,却与液体过滤的情况相吻合。在氯化钠颗粒完全潮解后,会转变为液滴附着在纤维表面;在液膜还未完全成型之前,液滴会在自身毛细力的作用下润湿整个纤维,造成纤维的实际直径增大。而纤维直径是影响滤料过滤效率的重要因素,纤维直径的增大通常会使得过滤效率发生下降^[21]。此外,由于颗粒液化后更容易随风流穿透滤料,过滤效率下降的原因也可能与部分液滴逃逸至过滤器下游有关。

对于非吸湿性的纳米氧化铝颗粒,相对湿度对其过滤效率所造成的影响并不明显,整体过滤效率缓慢增长的趋势也符合机械过滤的机制,如图9(b)所示。尽管效率增长差异比较小,但仍可发现在不同相对湿度下存在细微区分。对于20%、50%和80%3个湿度等级,过滤效率的增长率随

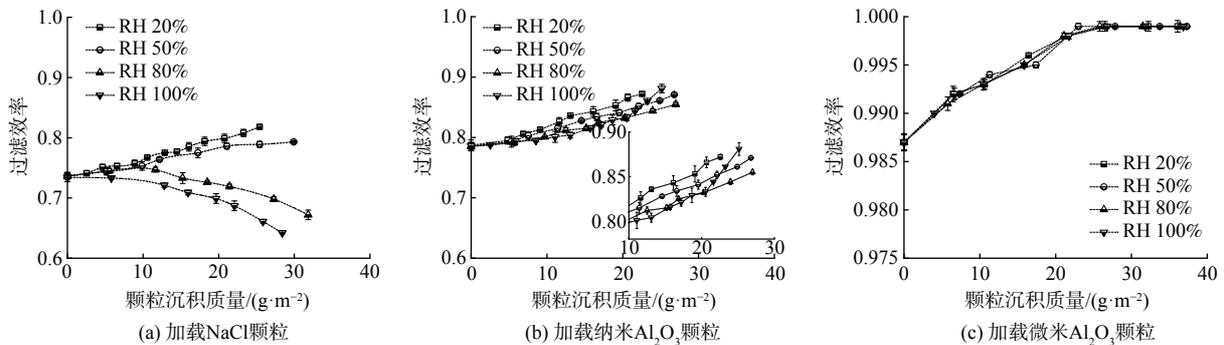


图9 不同相对湿度下颗粒加载过程中的过滤效率变化

Fig. 9 Changes of filtration efficiencies during particles loading at different relative humidity

着湿度的增加在不断下降,在颗粒沉积初期时(约在沉积质量浓度达到 $15\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 之前),100%相对湿度下的效率增长也符合这一规律。但是在此之后,饱和湿度下效率增长的速度开始快速提升,效率值逐渐超过了其他湿度下的数值。结合压降增长曲线可发现,压降值快速升高的阶段也同样出现在这一时期。由此可推测,该时期滤料纤维或者颗粒层的孔隙产生了堵塞加剧情况,导致压降和过滤效率都出现了一定程度的升高。

微米氧化铝颗粒也出现了类似的情况,饱和湿度下的效率增长较为显著,而其余湿度等级下的效率增长曲线不存在明显的区分度(如图9(c)所示)。事实上,在颗粒沉积的后期,对微米颗粒的过滤效率已接近了100%,这或许也是无法看出区分度的一个实验因素。但可确定的是,对于非吸湿性颗粒,过高的湿度(尤其是在接近饱和时)在一定程度上加快了颗粒沉积过程中过滤效率的提升。当然这种提升效果也相对有限。

3 结论

1) 吸湿性颗粒与非吸湿性颗粒加载过程中的阻力增长特性受相对湿度的影响程度不同。对于吸湿性颗粒,相对湿度为20%和50%时,压降呈现线性增长趋势,相对湿度升高至颗粒潮解点后,压降增长速度大幅提升。非吸湿性颗粒受相对湿度影响较小,压降增长速率变化不明显,在3种相对湿度(20%、50%和80%)下,颗粒沉积质量浓度为 19.07 、 19.53 和 $20.29\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,对应压降分别达到 327 、 302 和 299 Pa 。

2) 滤料初始过滤效率对环境中的相对湿度的变化不敏感,也不会受到颗粒吸湿性能差别的影响,同一粒径大小的氯化钠颗粒和氧化铝颗粒在不同湿度下测得的过滤效率值较为接近;并且滤料初始效率会随着粒径的增大呈现出先下降后升高的趋势,在粒径大小为 100 nm 时,实验测得的过滤效率达到最低值,为 (0.665 ± 0.01) 。

3) 吸湿性颗粒在沉积过程中过滤效率的变化受相对湿度影响较大。在湿度低于其自身潮解点时,过滤效率缓慢持续的增加;在湿度超过潮解点后,过滤效率会随着颗粒沉积不断下降。对于非吸湿性颗粒,不同相对湿度下其容尘过滤效率呈现缓慢增长趋势。在颗粒沉积质量浓度达到 $15\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 后,100%相对湿度下的效率增长速度出现了较大提升。

参考文献

- [1] 朱芬芬,王欢,徐智敏,等.有机固废燃烧烟气中PM2.5的过滤比较研究[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(9): 4193-4203.
- [2] LIN F, CHEN P, HUANG T, et al. 3D in-situ simulation and particle tracing of gas filtration process for ultrafine particles removal using a hollow fiber membrane[J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 632: 119380.
- [3] 吕超,柳静献.高炉除尘灰细颗粒物单/双预荷电强化滤袋过滤特性[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(1): 180-187.
- [4] MONJEZI M, JAMAATI H. The effects of face mask specifications on work of breathing and particle filtration efficiency[J]. *Medical Engineering & Physics*, 2021, 98: 36-43.
- [5] 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(06): 2530-2540.
- [6] 邢奕,王聰,路培,等.有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物[J]. *环境科学*, 2016, 37(12): 4538-4544.
- [7] ZHANG L, ZHENG Q, GE X, et al. Preparation of Nylon-6 micro-nanofiber composite membranes with 3D uniform gradient structure for high-efficiency air filtration of ultrafine particles[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 308: 122921.
- [8] 朱辉,杨会,付海明,等.椭圆纤维过滤压降与惯性捕集效率数值分析[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(2): 565-573.
- [9] 付群飞,房杰,时杰,等.纤维种类对纤维束过滤器除尘性能的影响[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(3): 701-707.
- [10] WANG L, YU L E, CHUNG T. Effects of relative humidity, particle hygroscopicity, and filter hydrophilicity on filtration performance of hollow fiber air filters[J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 595: 117561.
- [11] YANG S, LEE W M G, HUANG H L, et al. Aerosol penetration properties of an electret filter with submicron aerosols with various operating factors[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2007, 42(1): 51-57.
- [12] YANG Y, LI M, HOU S, et al. Hybridization of activated carbon fiber cloth with electrospun nanofibers for particle filtration[J]. *New Carbon Materials*, 2022, 37(4): 716-723.
- [13] 王晓明.烟气温度和湿度对水泥磨袋式除尘器的影响[J]. *广东化工*, 2019, 46(17): 75-77.
- [14] KHIROUNI N, CHARVET A, THOMAS D, et al. Regeneration of dust

- filters challenged with metallic nanoparticles: Influence of atmospheric aging[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 138: 1-8.
- [15] 王辉. PPS滤料老化与耐久性实验研究[D]. 长春: 东北大学, 2011.
- [16] BOUDHAN R, JOUBERT A, DURÉCU 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.
- [17] RIBEYRE Q, CHARVET A, VALLIÈRES C, et al. Impact of relative humidity on a nanostructured filter cake-Experimental and modelling approaches[J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 161: 109-116.
- [18] JOUBERT A, LABORDE J C, BOUILLOUX L, et al. Modelling the pressure drop across HEPA filters during cake filtration in the presence of humidity[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 166(2): 616-623.
- [19] KIM C S, BAO L, OKUYAMA K, et al. Filtration efficiency of a fibrous filter for nanoparticles[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2006, 8(2): 215-221.
- [20] MIGUEL A F. Effect of air humidity on the evolution of permeability and performance of a fibrous filter during loading with hygroscopic and non-hygroscopic particles[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2003, 34(6): 783-799.
- [21] TANG M, CHEN S, CHANG D, et al. Filtration efficiency and loading characteristics of PM_{2.5} through composite filter media consisting of commercial HVAC electret media and nanofiber layer[J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 198: 137-145.
- [22] NOVICK V J, MONSON P R, ELLISON P E. The effect of solid particle mass loading on the pressure drop of HEPA filters[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1992, 23(6): 657-665.
- [23] 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.
- [24] JOUBERT A, LABORDE J C, BOUILLOUX L, et al. Influence of humidity on clogging of flat and pleated HEPA filters[J]. *Aerosol Science & Technology*, 2010, 44(12): 1065-1076.
- [25] MONTGOMERY J F, ROGAK S N, GREEN S I, et al. Structural change of aerosol particle aggregates with exposure to elevated relative humidity[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(20): 12054-12061.
- [26] LIU J, PUI D Y H, WANG J. Removal of airborne nanoparticles by membrane coated filters[J]. *Science of The Total Environment*, 2011, 409(22): 4868-4874.
- [27] CHANG D, CHEN S, FOX A R, et al. Penetration of Sub-50 nm nanoparticles through electret HVAC filters used in residence[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2015, 49(10): 966-976.

(责任编辑: 靳炜)

Effect of ambient relative humidity on particle filtration performance

XIE Biao^{1,2,*}, YU Jingjing¹

1. College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

*Corresponding author, E-mail: xiebiaocumt@163.com

Abstract This article investigated the variation pattern and intrinsic mechanism of particle filtration performance with different ambient relative humidity (RH). Hygroscopic sodium chloride (NaCl) particles and non-hygroscopic alumina (Al₂O₃) particles were used as experimental objects. Two types of particulate matter scales, nano and micron, were introduced in the experiments and fibrous materials were selected as filtration media. The results indicated that the pressure drop increased linearly in filtering hygroscopic particles at low humidity (RH20% and 50%), and a sharp elevation in pressure drop occurred at high humidity (\geq RH80%). Non-hygroscopic particles were less affected by variations of humidity, but the growth in pressure drop was more significant at saturation humidity (RH100%). The initial filtration efficiency of the filter media was insensitive to variations in ambient relative humidity and was hardly affected by differences in the hygroscopic properties of the particles. During particle loading, the filtration efficiency continued to increase slowly due to the influence of particle deposition on the surface of the filter media fiber, but when the humidity exceeded the particle delimiting point, the filtration efficiency of hygroscopic particles decreased to a certain extent, similar to the liquid filtration mechanism. In addition, variations in ambient humidity had a more significant effect on the filtration performance of nanoparticles than microparticles. The results of this research could provide guidance for the application and improvement of particulate matter filtration technology in air pollution control.

Keywords relative humidity; dust pollution; particulate matter; filtration efficiency; hygroscopicity