

空气过滤材料静电衰减机理的实验研究

林忠平¹, 陈相玮¹, 夏建伟¹, 徐斌²

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 采用不同形态、不同荷电特性的气溶胶对静电纤维过滤材料进行积尘实验, 观测滤料积尘过程中的表面电势、过滤效率和纤维形态的变化。结果表明不同荷电特性 KCl(氯化钾)气溶胶积尘的滤料表面电势随积尘量增加的变化趋势不同, 但滤料的效率不随积尘增加而变化; 液态 DEHS(癸二酸二辛酯)气溶胶容尘实验发现, 滤料表面电势和效率都急剧衰减。实验结果以及不同形态气溶胶积尘滤料的扫描电镜表明造成滤料静电衰减的机理主要是屏蔽作用。

关键词: 空气过滤材料; 静电; 衰减; 实验验证

中图分类号: TU834.8

文献标志码: A

Experimental Study on Mechanism of Static Electricity Attenuation for Fibrous Filter Medium

LIN Zhongping¹, CHEN Xiangwei¹, XIA Jianwei¹, XU Bin²

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A series of experiments with different charge aerosols were carried out to investigate the mechanism of static electricity attenuation for fibrous filter medium. DEHS and three different charge characters of KCl were used to challenge electrostatic fibrous filter medium. The surface potential and filtration efficiency were tested and morphology of medium was observed through scanning electron microscope (SEM) for different dust loading periods. The results of experiments show that surface potential of filter mediums challenged with charge KCl (Potassium chloride) has different variation trends with dust collection, however, the efficiency does not change obviously. Surface potential and efficiency of filter mediums challenged with diethyl hexyl sebacate (DEHS) decrease sharply. Both experimental results and SEM of medium challenged with different morphology show that the mechanism of electrostatic attenuation for filter medium is mainly due to electrostatic shielding effect.

Key words: air filter medium; static electricity; attenuation; experimental verification

静电纤维滤料与传统纤维滤料阻力相近, 但凭借静电作用大幅提高过滤效率^[1-2], 因而得到了较广泛的应用, 其缺点在于使用后积尘导致静电作用衰减^[3-4], 过滤效率下降。

对于静电纤维滤料的静电衰减机理存在两种描述: 静电中和作用和静电屏蔽作用。Baumgartner基于中和理论建立了简单模型并用计算机模拟, 但结果与实际相差较大^[5]。目前尚未以屏蔽机理为基础建立滤料静电衰减模型。Walsh 根据实验结果推断静电过滤器效率下降是颗粒物的屏蔽作用引起的^[6], 但没有直接针对中和作用或屏蔽作用展开实验。魏学孟认为大气尘对驻极体的屏蔽作用导致静电过滤器效率下降^[7]。冀忠宝的研究表明, 高湿度下化纤材料表面电荷发生了大量的衰减^[8], 可能导致其过滤性能下降。

当前对静电增强纤维过滤器初始性能的研究较为成熟, 难点在于无法明确纤维表面静电的衰减机理, 继而无法从理论上对过滤效率衰减进行建模分析, 静电过滤器的理论研究没有突破性进展^[9], 导致当前的研究一直处于实验阶段, 理论与实际脱节较为严重。

本文以汽车空调滤清器实验台为基础^[10], 增加电晕荷电装置对气溶胶进行荷电, 使用 DEHS 气溶胶和不同荷电特性的 KCl 气溶胶对静电纤维滤料积尘, 测量积尘过程中滤料的过滤效率和表面电势, 观察尘粒的沉积结构, 判断静电纤维材料在积尘过程中效率衰减的内在机理。

1 静电衰减机理实验

1.1 实验装置原理

实验装置的原理如图 1 所示. 气溶胶发生器产生的多分散相固体 KCl 颗粒进入风管, 与洁净空气混合形成均匀的两相流气流. 气流经过荷电器时, KCl 颗粒经电晕外区荷上相应的电荷. 通过调整荷电器的电源电压以改变电晕电压, 可使 KCl 颗粒得到不同电性和电量的电荷. 受试滤料上下游不同粒径的气溶胶数量浓度由激光粒子计数器测量从而计算得到过滤效率, 滤料阻力由压差传感器测量, 风量采用喷嘴流量计测量.

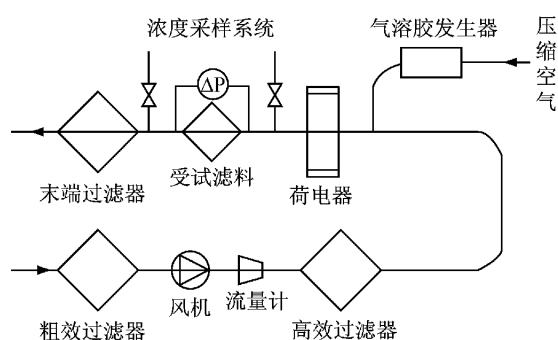


图 1 实验装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

荷电材料也称为驻极体材料, 材料在生产过程中通过电晕荷电、摩擦荷电等工艺获得静电. 通常材料所带电荷越多, 其过滤效率也越高, 但带电量高于一定值后, 过滤效率不再显著上升. 直接评价滤料荷电程度的方法是测量其表面电势或电量. 本实验采用静电测试仪测量滤料表面 8~10 个点的电势, 取各点平均值作为滤料表面电势.

1.2 空态下滤料表面电荷随时间的变化

电晕荷电过滤材料在纤维成型后进行充电驻极, 电荷往往与纤维表面分子结合、与空气直接接触. 若驻极效果不好, 材料与空气进行电荷交换或中和, 在空态下亦有可能发生静电衰减.

大气气溶胶与人工气溶胶的粒径分布和化学成分相差较大, 两种气溶胶对滤材的静电衰减作用不同. 为研究静电滤料的静电衰减机理, 要保证滤料表面静电在空态下不随时间发生衰减或衰减量相对较小, 确保滤料在实验阶段的静电衰减由人工气溶胶引起.

将聚丙烯(PP)静电滤料置于储藏柜内存储不同的时间, 测量滤料表面电势变化, 以此了解静电滤料在空态下电荷的衰减. 滤料放置 0, 2, 10 d 后测得其正面(迎风面)电势分别为 -224 V, -192 V, -221 V. 由于滤料表面电场不均匀, 而且积尘过程中无法预料滤料表面电场的变化规律, 造成滤料表面各点电势的初始值和积尘过程中的变化规律也不同. 考

虑到现有的技术设备条件和实验方法, 随机选取滤料表面的 8~10 个点, 以这些点的电势平均值作为滤料表面电势. 滤料放置 2 d 后测得电势比初始电势稍低, 这是由于不同测点之间电势不均匀的误差造成的. 滤料初始电势和放置 10 d 后电势相近, 表明在 10 d 时间内滤料表面电荷基本没有发生衰减, 可以保证滤料在实验阶段(滤料的过滤效率实验在 10 d 内完成)产生的静电衰减不是自然放电造成的.

1.3 实验方法

实验采用 PP 静电滤料, 分别在 DEHS 气溶胶和不同荷电特性的 KCl 气溶胶积尘后, 测量滤料的表面电势和过滤效率随积尘量的变化. 一方面, 采用不同形态的气溶胶对滤料积尘以检验屏蔽作用: 固态 KCl 气溶胶颗粒粘附在纤维表面后可能形成树枝状结构^[11], 难以将滤料纤维完整地包裹起来, 电场线很容易穿过颗粒间的缝隙继续发挥作用; 而 DEHS 气溶胶属液态气溶胶, 被滤料捕获后较固态 KCl 气溶胶颗粒更容易在滤料纤维表面展开、包裹纤维表面. 另一方面, 用不同荷电特性的气溶胶来检验中和作用: DEHS 气溶胶表面不荷电; 而 KCl 气溶胶可荷正电、负电或不荷电. 本实验用到的不同形态、不同荷电特性气溶胶包括: 不荷电的 KCl 气溶胶、分别经 +7.0 kV, -8.0 kV 电晕荷电的 KCl 气溶胶和 DEHS 气溶胶共 4 种, 分别对应 4 组实验. 为行文方便, 4 组实验分别称为不荷电 KCl 组、+7.0 kV 实验组、-8.0 kV 实验组和 DEHS 实验组.

经 +7.0 kV 电晕荷电的 KCl 气溶胶(+7.0 kV 实验组)对滤料积尘实验步骤如下:

(1) 测量滤料的阻力. 将过滤材料称重后安装于如图 1 所示的实验台, 启动风机并调整到所需风量, 记录滤料阻力.

(2) 测量滤料的过滤效率. 开启气溶胶发生器(采用质量分数为 5% 的 KCl 溶液, 压缩空气流量为 $2.8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 压力为 0.36 MPa), 待滤料上游气溶胶数量浓度稳定后, 测量上下游 KCl 气溶胶数量浓度并计算滤料过滤效率. 为保证测量精度, 每次测量 3 组效率, 并保证 3 组测量结果的偏差不超过 1%, 效率取 3 组的平均值. 测量过滤效率时关闭荷电器.

(3) 开启荷电器, 调整荷电器的电源电压, 使电晕电压为 +7.0 kV.

(4) 滤料容尘. 气溶胶发生器所用溶液切换至质量分数为 15% 的 KCl 溶液, 调节压缩空气的流量与压力, 使气溶胶发生量满足实际容尘需求, 通过称量滤料确定每个阶段的实际积尘量.

重复步骤(1)–(4),直到完成 8 个阶段容尘. 不荷电 KCl 组的整个实验过程不开启荷电器; -8.0 kV 组在步骤 3 调整电晕电压为 -8.0 kV,其他步骤与 +7.0 kV 组相同. 与 KCl 气溶胶积尘实验过程相似,DEHS 气溶胶对滤料积尘实验同样经历 8 个阶段的滤料阻力测量—过滤效率测量—容尘—称重过程,所不同的是:①DEHS 气溶胶不荷电,所以实验过程不开启荷电器;②测量效率和对滤料容尘时均使用 DEHS 气溶胶. 所有实验组均分别在滤料初始状态、容尘阶段 2,4,6 和 8 结束后测量滤料的表面电势,并通过扫描电子显微镜观察滤料纤维表面.

2 结果与讨论

2.1 尘粒电性的影响

由于滤料正面(滤料迎风面)带负电,假如滤料静电衰减是由中和作用造成的,分别使用荷正电、荷负电和不荷电 KCl 颗粒积尘后,滤料的静电衰减表现应有较大不同:

(1) 荷正电 KCl 颗粒积尘之滤料的电量衰减应大于不荷电 KCl 与荷负电 KCl 颗粒积尘之滤料,且过滤效率的关系应为:负电积尘滤料 > 不荷电积尘滤料 > 正电积尘滤料.

(2) 荷正电 KCl 颗粒被捕获后与滤料纤维产生电荷中和,纤维表面电荷的不断衰减将导致滤料的效率持续下降(假设静电为主要捕集作用,不考虑拦截与惯性效应因积尘量增加导致效率增加的因素).

(3) 不荷电 KCl 颗粒与纤维粘附后,纤维与颗粒间的电势差使纤维表面电荷传导至 KCl 颗粒,滤料发生静电衰减,但衰减程度小于正电 KCl 颗粒积尘的滤料.

(4) 荷负电 KCl 颗粒受到库伦力排斥而较难被纤维捕获,但由于其他过滤机理(如拦截、扩散效应)被捕集、沉积在纤维表面后与纤维发生电荷交换,滤料达到电势平衡、静电衰减程度最小.

假如滤料静电衰减的机理主要是屏蔽作用,那么 3 种电性的 KCl 颗粒在纤维表面沉积后与纤维间没有(或很少)电荷交换,纤维表面被颗粒覆盖无法发挥静电作用,3 种电性的 KCl 颗粒使滤料静电衰减、过滤效率下降的程度应无显著差别.

图 2—图 4 为不同积尘量下,不荷电 KCl 组、+7.0 kV, -8.0 kV 实验组滤料分别对 0.3~0.5 μm,0.5~0.7 μm,1.0~2.0 μm 和 2.0~5.0 μm 粒径范围气溶胶颗粒的过滤效率. 根据这 3 组实验结果可知,滤料在整个容尘过程中对各粒径 KCl 气溶

胶颗粒的过滤效率并无明显变化. 例如,3 组滤料对 0.3~0.5 μm 粒径气溶胶的过滤效率变化均不超过 1%. 考虑实验系统误差、粒子计数器精度等因素,可认为上述 3 组实验滤料的过滤效率并不随积尘发生较大变化.

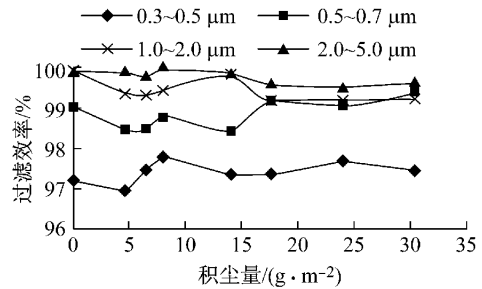


图 2 不荷电 KCl 组滤料对不同粒径颗粒物的过滤效率与积尘量的关系

Fig. 2 Relationship between filtration efficiency and collected mass when particles of different sizes being filtered with uncharged KCl aerosol

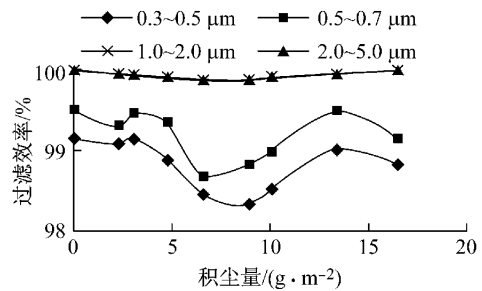


图 3 +7.0 kV 实验组滤料对不同粒径颗粒物的过滤效率与积尘量的关系

Fig. 3 Relationship between filtration efficiency and collected mass when particles of different sizes being filtered with +7.0 kV the charged KCl aerosol

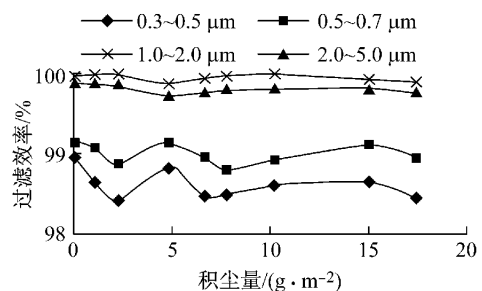


图 4 -8.0 kV 实验组滤料对不同粒径颗粒物的过滤效率与积尘量的关系

Fig. 4 Relationship between filtration efficiency and collected mass when particles of different sizes being filtered with -8.0 kV the charged KCl aerosol

从图 5 可知,在 $0\sim 15\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 积尘阶段, $+7.0\text{ kV}$ 实验组滤料正面电势(绝对值,下同)随积尘增加略有减小,变化幅度为 25 V ;而 -8.0 kV 实验组滤料正面电势先增大后减小,变化幅度为 60 V . 该组由于颗粒和滤料正面均带负电,积尘前期颗粒表面的电荷增强了滤料表面的电势;后来沉积的颗粒越来越多,对纤维所带电荷产生了屏蔽作用,滤料表面总电势下降. 测量滤料反面电势,其量级和变化趋势均与正面相同. 在达到 $15\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 积尘量时, $+7.0\text{ kV}$ 组和 -8.0 kV 组滤料的正面电势分别为 -90 V 和 -140 V . 整个积尘过程中 $+7.0\text{ kV}$ 组滤料表面电势小于同等积尘量下 -8.0 kV 组的表面电势,这说明颗粒表面电荷与滤料表面电荷的电性相异时,颗粒促进了滤料表面电势的衰减. 一方面,部分颗粒的电荷会与纤维表面电荷中和;另一方面,纤维产生的电场线会向未被中和的颗粒集中.

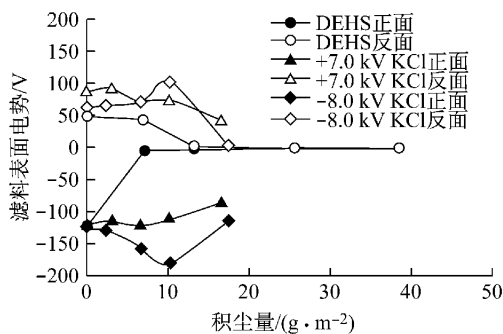


图 5 积尘过程中各实验组滤料的表面电势

Fig.5 Relationship between medium surface electric potential and collected mass for different aerosols

3 组实验结果说明,带不同电性的气溶胶会对滤料表面电势产生一定影响,但对过滤效率没有显著影响;带异性电荷颗粒与滤料发生了一定的静电中和,导致滤料表面电势下降更快.

2.2 气溶胶形态的影响

图 6 为 DEHS 组的实验结果,从该图可知滤料对 DEHS 气溶胶的过滤效率随积尘量的增加迅速下降,且小粒径颗粒过滤效率所受到的影响大于大粒径颗粒. 滤料正面电势变化,如图 5 所示与小粒径颗粒效率变化相一致,积尘量达一定程度 ($13.2\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) 后,滤料表面电势和小颗粒的过滤效率同时接近最低值. 滤料反面电势的变化滞后于正面,如图 5,这是因为在积尘前期,滤料的过滤效率较高,大部分气溶胶被滤料正面捕获,导致滤料正面的电势急剧下降,过滤效率随之下降,而滤料反面沉积的气溶胶相对较少,电势变化较小. 随积尘的增加,气溶胶颗粒穿透滤料正面在滤料内部沉积,滤料内

部电势和效率也发生下降. 当大量小颗粒气溶胶穿透滤料正面和内部、在滤料反面沉积后,滤料反面电势发生急剧衰减.

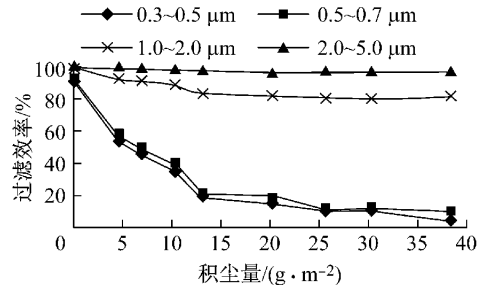


图 6 DEHS 实验组滤料对不同粒径颗粒物的过滤效率与积尘量的关系

Fig.6 Relationship between filtration efficiency and collected mass when particles of different sizes being filtered with DEHS aerosol

比较 $+7.0\text{ kV}$ 实验组与 DEHS 实验组滤料的过滤效率和表面电势变化分别如图 7、图 8 所示. 随积尘量增加, $+7.0\text{ kV}$ 实验组滤料对 $0.3\sim 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.0\sim 2.0\text{ }\mu\text{m}$ 粒径范围颗粒的过滤效率基本不变,正面电势缓慢衰减;DEHS 实验组滤料的过滤效率和表面电势都发生急剧衰减. 这表明液态 DEHS 气溶胶颗粒比固态 KCl 气溶胶颗粒有更强的静电衰减作用,液态气溶胶在滤料纤维表面形成严密包裹并限制表面电荷发挥静电作用,造成滤料效率的急剧衰减. KCl 气溶胶颗粒在纤维表面沉积,虽然也干扰纤维表面电荷的静电作用,但不能形成严密的包围,所以对效率的影响较小. 这两组实验表明,静电中和作用对滤料表面电势有一定的影响;DEHS 对滤料纤维的包裹使静电无法发挥作用,是滤料静电衰减的主要原因.

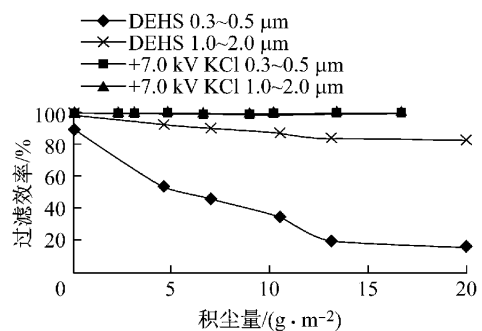


图 7 $+7.0\text{ kV}$ 实验组和 DEHS 实验组滤料对不同粒径颗粒物的过滤效率

Fig.7 Evolution of filtration efficiency when particles of different sizes being filtered with $+7.0\text{ kV}$ the charged KCl aerosol and DEHS aerosol

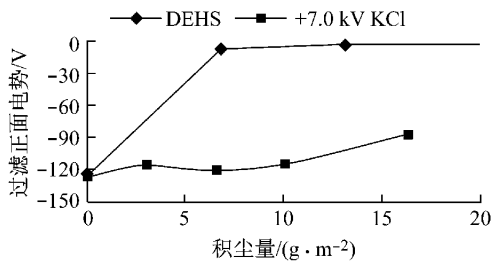


图 8 +7.0 kV 实验组和 DEHS 实验组滤料的正面电势与积尘量的关系

Fig. 8 Evolution of medium surface electric potential and the collected mass when being filtered with +7.0 kV charged KCl aerosol and DEHS aerosol

2.3 滤料静电衰减机理的探讨

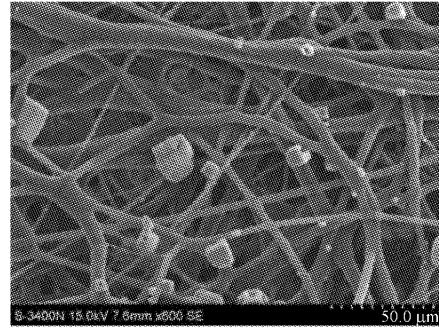
滤料过滤不同荷电特性的 KCl 气溶胶时,表面电势产生变化,过滤效率不变;过滤电中性的 DEHS 气溶胶时,滤料表面电势和过滤效率衰减较快。

一方面,试用中和机理解释:荷电器对 KCl 气溶胶的荷电量较小,经 KCl 气溶胶积尘后滤料纤维带电量变化不大,因此过滤效率无显著变化;滤料过滤 DEHS 液态气溶胶时,DEHS 覆盖在纤维表面,电荷从纤维表面传导至 DEHS,使得滤料电荷分布更均匀,所以电场强度下降,效率下降。

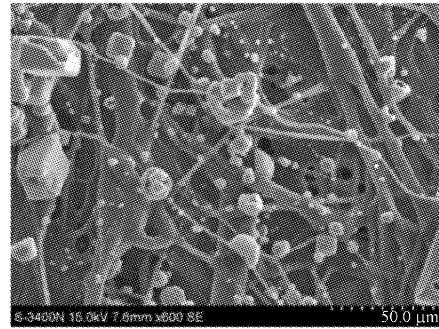
另一方面,尝试从静电屏蔽的角度解释并与中和机理对比。实验结果表明,滤料被不同电性 KCl 气溶胶积尘后表面电势发生了变化,但过滤效率变化较小,因此不可能是静电中和作用导致过滤效率下降。KCl 固态颗粒在纤维表面粘附后无法将纤维表面完整地包围,虽然纤维表面电场分布发生变化、场强稍有下降,但是静电作用仍然较强,滤料过滤效率不变。DEHS 组实验结果表明,在积尘较少的情况下,滤料正面的电势急剧衰减,效率急剧下降。若是中和作用,则滤料表面荷电量变化应与积尘量线性相关,过滤效率亦应与积尘量线性相关,效率和电势应当缓慢下降;若是屏蔽作用,则 DEHS 不断沉积以至将纤维表面覆盖、将表面电荷屏蔽,导致滤料表面电势迅速降低,效率亦急剧下降。

为进一步印证滤料静电的衰减是由于屏蔽作用,在滤料容尘过程中的不同阶段,用扫描电子显微镜拍摄容尘滤料以观察颗粒物与纤维的形态。如图 9a 所示,少量 KCl 大颗粒粘附在纤维表面,对纤维有一定的包裹;随着 KCl 积尘量的增加,纤维表面聚集大量颗粒物(图 9b),滤料正面电势下降,但过滤效率不发生变化。从图 9c 所示的 DEHS 容尘滤料上观察不到气溶胶颗粒,但实际上滤料正面电势和效率已急剧下降,这说明 DEHS 粘附在纤维表面后形成

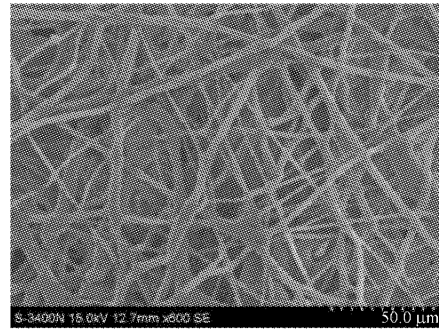
一层薄膜,将纤维严密包裹。而图 9d 的电镜照片显示 DEHS 围绕滤料纤维的覆膜已发展成椭球状结构,这种结构将带电纤维包围在内部,使纤维静电无法发挥作用。



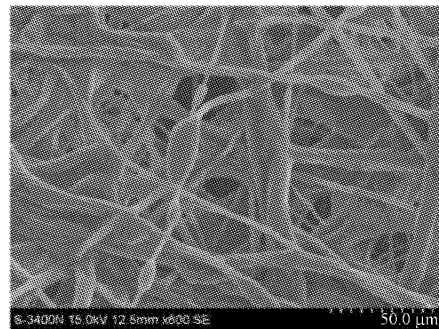
a +7.0 kV 实验组积尘 3.1 g · m⁻²



b +7.0 kV 实验组积尘 16.6 g · m⁻²



c DEHS 实验组积尘 7.0 g · m⁻²



d DEHS 实验组积尘 38.4 g · m⁻²

图 9 在不同积尘量下的纤维表面形态

Fig. 9 Surface morphology of medium fiber at different collected mass

3 结语

分别采用不带电 KCl 气溶胶, +7.0 kV, -8.0 kV 电晕荷电的 KCl 气溶胶和 DEHS 气溶胶对静电滤料积尘, 测量滤料的表面电势和过滤效率, 拍摄不同积尘量下滤料的扫描电镜, 通过不同实验组的对比, 从荷电量、气溶胶形态和颗粒在纤维表面的沉积形态等不同方面, 可以证明静电滤料效率衰减机理中, 中和作用影响较微弱, 屏蔽作用起主要作用。

参考文献:

- [1] 谢小军. 功能性驻极体空气过滤材料的静电过滤机理与实验研究[D]. 西安: 西安工程科技学院. 2003.
XIE Xiaojun. The theory and experiment of the static filtration of the multifunctional electret air filtration material [D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University. 2003.
- [2] 王玉佳. 预荷电与静电增强对颗粒层过滤的影响研究[D]. 长春: 东北师范大学. 2005.
WANG Yujia. The investigation about the technology of filtration in particle layer accelerating by electrostatic charge and percharge[D]. Changchun: Northeast Normal University 2005.
- [3] Raynor P C, Chae S J. Dust loading on electrostatically charged filters in a standard test and a real HVAC system[J]. Filtration & Separation, 2003, 40(2): 35.
- [4] Lehtimäki M. Development of test methods for electret filters [J]. Journal of Aerosol Science, 1995, 26: 737.
- [5] Baumgartner H, Löffler F. Particle collection in electret fibres filters: a basic theoretical and experimental study [J]. Filtration & Separation, 1987, 24(5): 346.
- [6] 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.
- [7] 魏学孟, 叶海. 带静电过滤器与驻极体[J]. 通风除尘, 1998, 17(4): 1.
WEI Xuemeng, YE Hai. Electrostatic filter and electret [J]. Ventilation & Dust Control. 1998, 17(4): 1.
- [8] 冀忠宝, 夏钟福, 沈莉莉, 等. 电晕充电的聚丙烯无纺布空气过滤膜的电荷储存及稳定性[J]. 物理学报, 2005, 54(8): 3799.
JI Zhongbao, XIA Zhongfu, SHEN Lili, et al. The charge storage and its stability in corona charged polypropylene non-woven fabrics used as air filters [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(8): 3799.
- [9] 汪锋泳, 周建华. 静电增强纤维动态过滤的理论研究[J]. 中国粉体技术, 2006, 12(4): 27.
WANG Fengyong, ZHOU Jianhua. Efficiency and pressure of non-steady state filtration by fibrous filters in presence of electric field [J]. China Powder Science and Technology, 2006, 12(4): 27.
- [10] 林忠平, 吴昌甫, 李钊. 空气滤清器性能试验台气溶胶特性 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(5): 717.
LIN Zhongping, WU Changfu, LI Zhao. Aerosol characteristics in test rig for air cleaner performance [J]. Journal of Tongji University, Natural Science, 2012, 40(5): 717.
- [11] Thomas D, Penicot P, Contal P, et al. Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles experimental and modelling study [J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(11): 3549.