

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2021.06.007

扩缩板对静电除尘器颗粒脱除影响

柳林^{1,2}, 顾晓奕¹, 杨璇¹, 屈松正¹, 张琳^{1,2}, 许伟刚^{1,2}, 卜诗^{1,2}

(1. 常州大学机械与轨道交通学院, 江苏常州 213164; 2. 江苏省绿色过程装备重点实验室(常州大学), 江苏常州 213164)

摘要:提出了一种具有扩缩板结构的线板式静电除尘器,并运用数值模拟方法研究了在不同电压、进口气速和颗粒粒径条件下,扩缩板不同排列方式对电场强度分布、气流场、颗粒轨迹和收尘率的影响,并与平行板式静电除尘器进行比较。结果表明,扩缩板扩展了收尘极的表面积,增强了收尘极附近电场强度,并随其高度的增加,电场强度和影响范围随之增大,因其产生的低速涡旋有助于延长颗粒的滞留时间,利于颗粒脱除。总体上,带有扩缩板结构的静电除尘器收尘率优于平行板式静电除尘器。

关键词:静电除尘器;扩缩板;收尘率;数值模拟;电场强度;颗粒轨迹

中图分类号:X 701.2

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2021)06-0043-08

Effect of Expanded-Contracted Plate on Particle Removal of Electrostatic Precipitator

LIU Lin^{1,2}, GU Xiaoyi¹, YANG Xuan¹, QU Songzheng¹, ZHANG Lin^{1,2}, XU Weigang^{1,2}, BU Shi^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Green Process Equipment, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: In this paper, a wire-plate electrostatic precipitator with expanded-contracted plates (ESP-ECP) was proposed. A numerical method was adopted to investigate the influences of different arrangements of ECP on the electric field intensity, airflow field, particle trajectory and collection efficiency under different voltages, inlet gas velocities and particle sizes. Furthermore, it was compared with the traditional ESP with parallel plates (ESP-PP). The results indicated that the ECP expands the surface area of the collecting electrode, and effectively enhances the electric field intensity near the collecting electrode. With the increase of the ECP height, the electric field intensity and influence

收稿日期:2021-07-26。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51606014);江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(SJ CX20_0996);常州大学学生课外创新创业基金资助项目(2020-B-13)。

作者简介:柳林(1984—),男,辽宁鞍山人,博士,讲师。E-mail: linliu@cczu.edu.cn

引用本文:柳林,顾晓奕,杨璇,等.扩缩板对静电除尘器颗粒脱除影响[J].常州大学学报(自然科学版),2021,33(6):43-50.

range increase. The low-velocity vortices generated by the ECP help to prolong the retention time of particles, which is conducive to particle removal. In general, the collection efficiency of the ESP-ECP is superior to the ESP-PP.

Key words: electrostatic precipitator; expanded-contracted plate; collection efficiency; numerical simulation; electric field intensity; particle trajectory

近年来,随着工业的高速发展,空气污染日趋严重且备受关注。其中,工业废气中所携带的大量粉尘颗粒是重要的污染物之一,危害人体健康^[1]。因此,众多气体净化设备应运而生,而静电除尘器(Electrostatic precipitator,简称 ESP)由于其具有脱尘效率高、处理量大和压力损失小等优点被广泛应用。线板式静电除尘器是最为典型的结构,对于较大粒径颗粒($> 1 \mu\text{m}$),99%以上可脱除,相反细颗粒则大量逃逸^[2]。为解决这一问题,必须探明颗粒脱除过程的机理。

由于实验难度大且精密观察仪器昂贵,因此,数值模拟研究得到极大发展。例如具有尖锐几何特征的放电电极更易产生电场强度峰值^[3];大量漂浮颗粒形成的二次电场,可以极大地扭曲静电场,降低颗粒脱除效率^[4];高温可以削弱起晕电场强度和电场平均强度,以及除曳力以外的库仑力、萨夫曼升力和布朗力等对颗粒的影响^[5]。另外,研究表明在高电压和低气量条件下,离子风对细颗粒的脱除有显著影响^[6-7]。但这种影响可能是正面的,有助于气体中颗粒的脱除,例如在具有蜂窝状收尘极的线板式静电除尘器中的表现^[8],也可能呈现负面作用,如在带有波纹板状收尘极的线板式静电除尘器中的行为^[6]。上述现象表明线板式静电除尘器的颗粒脱除性能与收尘极的结构密切相关。

因此,文章提出了一种具有扩缩板结构的线板式静电除尘器,并运用数值模拟方法研究在不同电压和进口气流条件下,扩缩板不同排列方式对静电除尘器中的电场强度分布、颗粒轨迹、气流场和收尘率的影响。进而与传统带有平行板结构的静电除尘器进行收尘率比较。

1 模型构建与网格划分

根据研究对象的几何特征,构建 3 种三维模型。每种模型内由 3 根放电电极、2 个平行板和 7 对扩缩板组成。平行板与扩缩板共同构成收尘极。3 根放电电极均匀布置在静电除尘器的 X 轴上。另外,各模型中每侧扩缩板的高度总和相同(即 210 mm),但布置形式不同,如图 1 所示。具体表现为:①均布了高度相同的扩缩板(简称 M1-ESP);②高度由进风口依次降低的扩缩板(简称 M2-ESP);③高低交错布置的扩缩板(简称 M3-ESP)。另外,引入典型平行板式静电除尘器作为比较对象。每种模型长(X 方向)450 mm,宽(Z 方向)200 mm,高(Y 方向)200 mm。本文选取 XY 面($Z = 0 \text{ mm}$)作为表面呈现结果。图 2 给出了各模型的 XY 面的关键几何尺寸(单位:mm)。

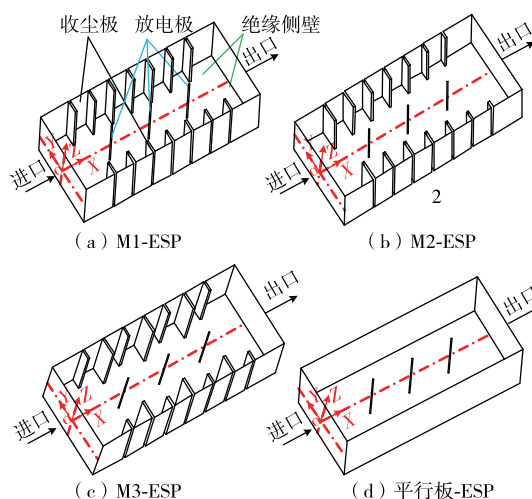


图 1 4 种静电除尘器三维模型

Fig.1 The 3D models of four ESPs

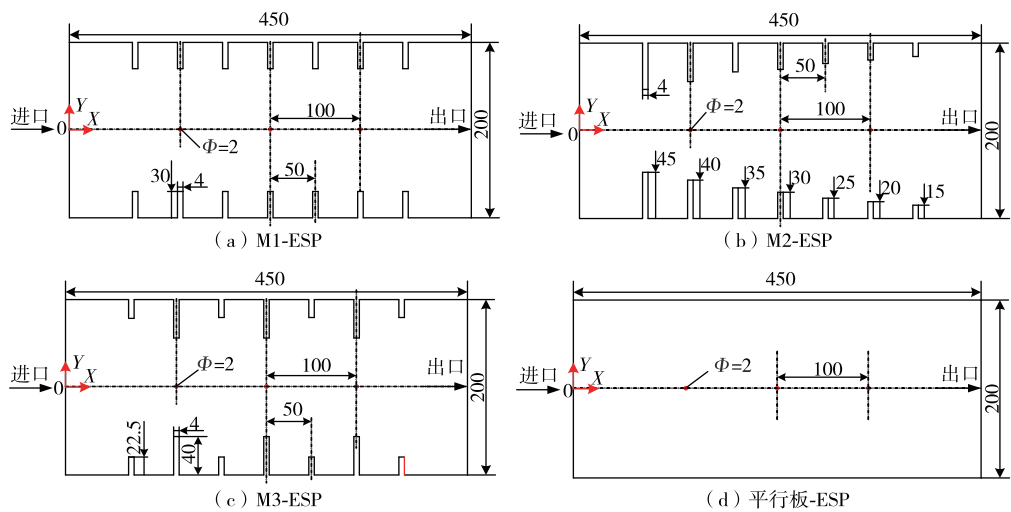


图 2 4 种模型在 XY 表征面的具体几何尺寸

Fig.2 Specific geometrical dimensions of the four models on the representation plane XY

在网格形成过程中,利用 ANSYS ICEM 软件生成结构化网格。而放电极附近区域运用 O-block划分。为了提高电晕放电的求解精度,对放电极附近区域进行了网格加密处理。例如, M1-ESP 的网格划分如图 3 所示。

2 控制方程

考虑到过程中涉及非均匀电场、气体电离、气流场、带电粒子的湍流运输、粒子的扩散和场电荷等复杂高耦合的物理过程,因此控制方程中包含电场、气相(连续相)、颗粒相(离散项)和颗粒荷电的控制方程^[3,6]。其中,电场由泊松方程和电流连续性方程控制,而放电极上的起晕电场强度由 Peek 定律获得^[6]。通常静电除尘器中的气流属于湍流流动,由连续性方程和动量方程控制,并采用 RNG $k-\epsilon$ 模型表征流场中的涡旋运动。而颗粒(离散相)采用拉格朗日方法跟踪颗粒轨迹^[3]。

3 边界条件

模拟过程中,施加电压为 30,50 kV,进口气流速度为 0.1,0.5,1 m/s 的工况,环境温度为常温。入射颗粒假设为球形,粒径为 1,5 μm ,其他重要参数见表 1,相关边界条件见表 2。

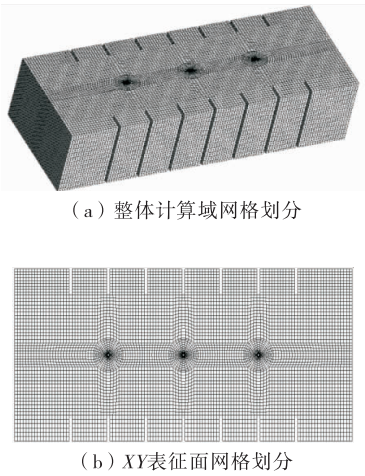


图 3 计算域网格划分

Fig.3 The meshing of computational domain

表 1 气相和颗粒相参数		
Table 1 Gas phase and particle phase parameters		
状态	参数	数值
气相	气流密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.205
	气流黏度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	1.73×10^{-5}
	气体压力/Pa	1.013×10^5
	入口颗粒密度/($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	1
颗粒相	相对介电常数	4
	颗粒进口速度	与气流进口速度相同
	颗粒密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 100

表 2 边界条件
Table 2 Boundary conditions

位置	电势	荷电密度	气速	颗粒
进口	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \rho_{ion}}{\partial n} = 0$	$u_y = u_{inl}, u_x = u_z = 0 \text{ m/s}$	逃逸
出口	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \rho_{ion}}{\partial n} = 0$	压力出口	逃逸
收尘极	$\phi = 0$	$\frac{\partial \rho_{ion}}{\partial n} = 0$	无滑移	捕捉
放电极	$\phi = \phi_{s0}$	Peek 定律	无滑移	反射
绝缘侧壁	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \rho_{ion}}{\partial n} = 0$	无滑移	反射

4 结果与分析

4.1 网格独立性和模型有效性验证

为了验证模型的有效性,依据文献[6]中具有平行板的线板式静电除尘器的结构尺寸,运用文中的数值模拟方法获取电压和电流密度关系,并与文献数据进行对比,模拟采用了 4 种网格数量(75 350, 102 700,184 700,278 500),结果如图 4 所示。结果发现,当网格数量为 184 700 时所获结果不再随网格数量的增加而显著变动,具有网格独立性的特点,并且此时与文献[6]数据的最大差值仅 1.8%。因此,文中模拟过程选用的网格数量不少于 184 700 个。

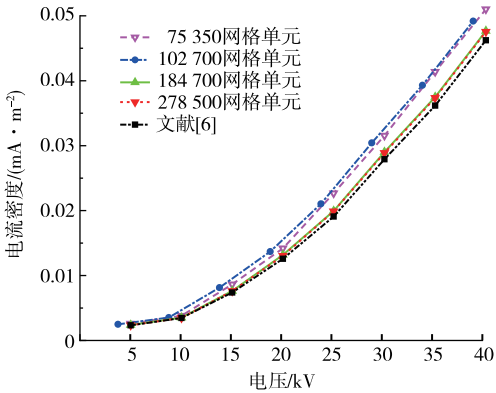


图 4 电压和电流特性比较
Fig.4 Comparison of voltage and current density characteristics

4.2 电场分布

由图 5 可知,电场强度以 X 轴呈上下对称分布,放电极附近的电场强度分布形状类似椭圆。放电极附近的电场强度最强,随后以放电极为中心向四周迅速减弱,而进出口附近的电场强度最弱,但收尘极近壁面区域的电场强度反而出现增强。相邻放电极之间由于极性相同,在静电场屏蔽的作用下,形成低电场强度区。针对 M1-ESP, M2-ESP 和 M3-ESP,扩缩板在近壁区域的电场强度明显增强,其顶端对电场强度增强的作用显著大于根部,并随扩缩板高度的增加,影响范围扩大。同时,随电压的增大,与平行板-ESP 相比,扩缩板的设置使得整个计算域的平均电场强度明显提升,并压缩相邻放电极之前的低电场强度区域。另外,图 5 中 A 区域内扩缩板与放电极形成了狭

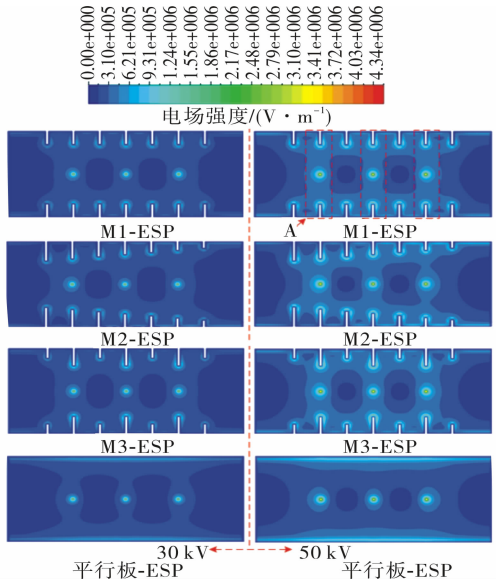


图 5 不同电压下的电场强度分布
Fig.5 Distribution of electric field intensity with different voltages

长的高电场强度区,该区域的电场强度明显高于平行板-ESP对应区域。高电场强度区的范围随着扩缩板高度和数量的增加而扩大,增强程度随电压的增大而增强。上述现象产生的原因为增设扩缩板后,缩短了放电极与收尘极之间的距离并形成强电场,同时增强了计算域内的平均场强。

4.3 流场分布

不同电压和进口流速条件下的流场分布如图6所示。由图6可知,当进口风速 $u = 0.1$ m/s 时,流场以放电极所在中轴线呈上下对称分布,每一根放电极下游均出现一对涡旋,X轴上方的涡旋按顺时针旋转,下方的涡旋逆时针旋转。上述涡旋的出现是由于放电极产生的离子风作用而形成。但当 $u = 1$ m/s 时,放电极后的涡旋全部消失,此时离子风的影响在较高风速下全部消失。图6中B区域内涡旋上游流速显著快于下游,并且随电压的增大而增强。这是因为B区域正处于图5中A区域内,强电场区产生的离子风更显著。与平行板-ESP相比,M1-ESP,M2-ESP和M3-ESP由于扩缩板的设置,压缩了气体主流区域空间,致使区内风速更快。这造成放电极下游涡旋范围被压缩。另外,近收尘极区域存在大量低速涡旋,上部涡旋为逆时针旋转,下部涡旋为顺时针旋转。

对于M1-ESP和M2-ESP,每一个扩缩板的背风侧均有涡旋产生,并且涡旋的大小与其对应的扩缩板高度正相关,与进口风速负相关,但与施加电压大小无关;而涡旋的强度与扩缩板的高度负相关,与进口风速正相关,同样与施加电压大小无关。针对M1-ESP,由于扩缩板高度相同,因此除下游最后一对扩缩板背风侧涡旋形状扁平以外,其余扩缩板背风侧的涡旋形状基本一致。对于M2-ESP,由于扩缩板从上游至下游高度依次递减,因此扩缩板背风侧涡旋范围同步缩小,并且当 $u = 1$ m/s 时,高度较低的扩缩板背风侧涡旋消失或逐渐脱离收尘极区域向气体主流区域靠拢。对于M3-ESP,扩缩板高低交错排列,当 $u = 0.1$ m/s 时,扩缩板背风侧涡旋大小基本一致,但当 $u = 1$ m/s 时,较高扩缩板背风侧的涡旋明显缩小并且也出现逐渐脱离收尘极区域向气体主流区域靠拢的现象。

4.4 颗粒轨迹

不同电压和速度条件下的颗粒轨迹如图7所示。由图7可知,当 $u = 0.1$ m/s,电压(V)为30,50 kV时,5 μm 颗粒均被捕获,并随电压的增大,所有静电除尘器的捕获距离均缩短。此外,设置扩缩板的静电除尘器的捕获距离小于平行板-ESP。然而,对于1 μm 颗粒,当 $V = 30$ kV 时,所有静电除尘器均出现了少部分颗粒逃逸的现象,随着电压增大到50 kV 时,所有颗粒才均被捕获,并且与5 μm 颗粒捕获距离相比,1 μm 颗粒捕获距离明显过大。当 $u = 1$ m/s 且 $V = 50$ kV 时,1 μm 和5 μm 颗粒均有大量逃逸现象,并且1 μm 颗粒的逃逸量显著高于5 μm 颗粒。

上述现象表明,电压的提升对于颗粒捕捉有促进作用,相反进口速度的提高对于颗粒捕捉有负面效应;当风速较低时,大粒径颗粒(5 μm)表面积大,电荷量大,所受到的电场力更强,当靠近放电极后,在强电场强度区内迅速偏转向收尘极移动并被捕捉,而小粒径颗粒(1 μm)荷电容量受其粒径限制,虽然进入高电场强度区,但电荷数的改善并不明显,因而需要更长的充电过程,导致捕捉距离更长;当风速较

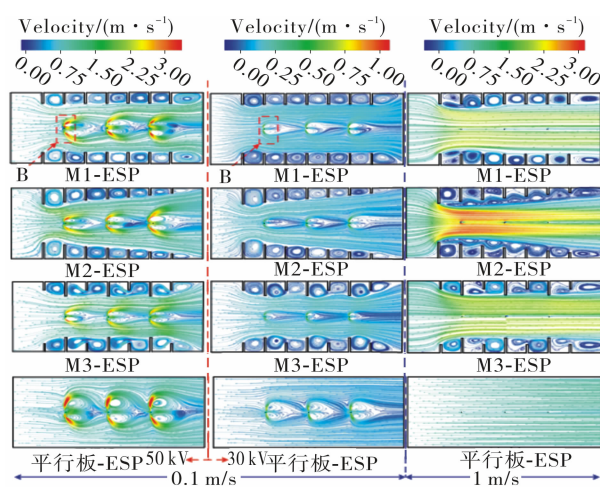


图6 不同电压和进口流速条件下的流场分布

Fig.6 Flow field distribution with different voltages and inlet velocities

大时,颗粒受到的曳力大幅增加,对于小粒径颗粒尤为显著,颗粒在计算域内停留时间极短,在有限的电场力下,大量颗粒来不及被捕捉即已逃逸。

此外,对于 $5\ \mu\text{m}$ 粒径颗粒,当 $u = 0.1\ \text{m/s}$ 且 $V = 30\ \text{kV}$ 时,M1-ESP,M2-ESP 和 M3-ESP 捕捉距离均小于平行板-ESP,这说明在较低流速和电压条件下,扩缩板的设置对颗粒的捕捉有促进作用。当 $u = 0.1\ \text{m/s}$ 且 $V = 50\ \text{kV}$ 时,对于 $1\ \mu\text{m}$ 颗粒,M1-ESP,M2-ESP 和 M3-ESP 捕捉距离相同,都明显小于平行板-ESP 的捕捉距离。但是,对于 $5\ \mu\text{m}$ 颗粒,不但 M1-ESP,M2-ESP 和 M3-ESP 捕捉距离相同,而且与平行板-ESP 的捕捉距离也几乎一致,这说明在低流速高电压条件下,扩缩板对小粒径颗粒的捕捉仍然有促进作用,但对于大粒径的颗粒的捕捉未见促进作用。这种现象的原因可能是近收尘极区域的低速涡旋使得小粒径颗粒在曳力的作用下,延长了停留时间,增大了它们进入扩缩板附近电场强度增强区,进而提升了被捕捉的机会;而大粒径颗粒由于在强电场力作用下,忽略了低速涡旋的影响。

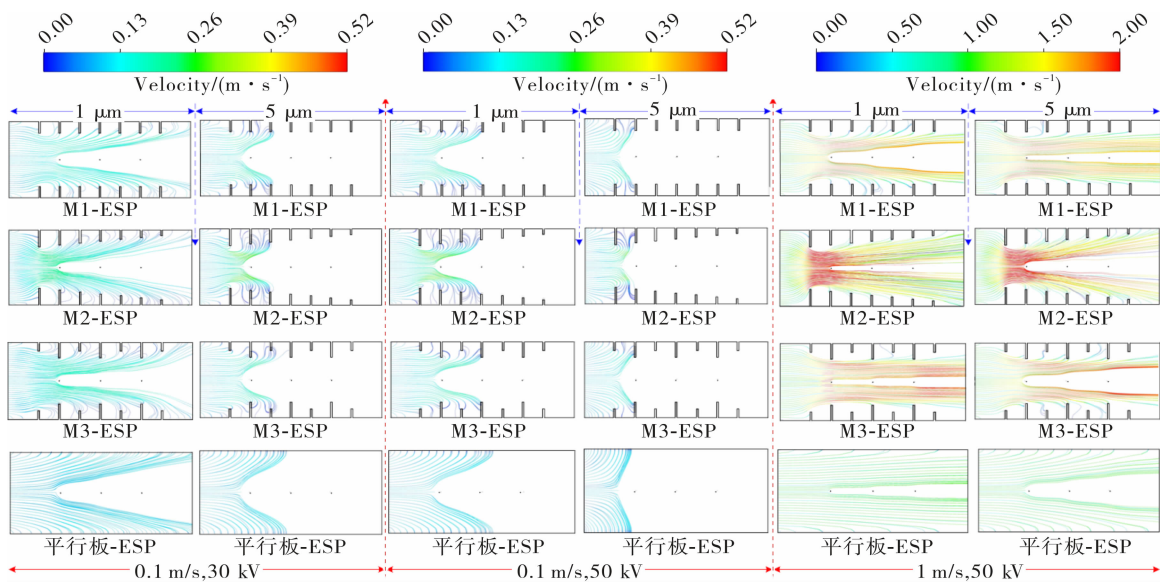


图 7 不同电压和速度条件下的颗粒轨迹

Fig.7 Particle trajectories with different voltages and inlet velocities

4.5 收尘率

30 kV 电压条件下 $5\ \mu\text{m}$ 颗粒的收尘率随气流速度的变化如图 8 所示。由图 8 可知,对于 $5\ \mu\text{m}$ 颗粒,随进口风速的增大,所有静电除尘器的收尘率随之快速降低。特别地,当 $u = 0.1\ \text{m/s}$ 时,收尘率均达到 100%,颗粒全被捕捉;而随着风速的进一步增大,收尘率按由高到低排序依次为 M3-ESP,M1-ESP,M2-ESP,平行板-ESP。其中,M3-ESP 的收尘率与 M1-ESP 接近,M2-ESP 的收尘率略高于平行板-ESP。这是因为在低进口风速情况下,增设扩缩板强化了电场,增强了颗粒的荷电能力,有助于提高捕捉颗粒的能力。但设置扩缩板后,主体气道流动空间被缩窄,风速加快,该现象在高进口风速以及设置扩缩板高度较

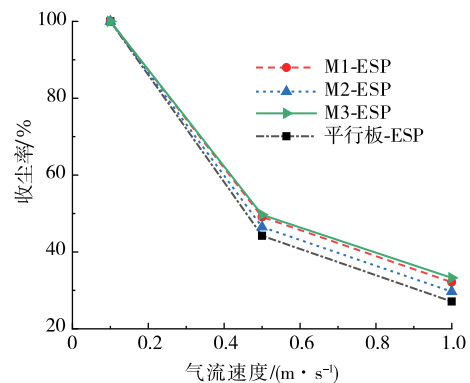


图 8 30 kV 电压条件下 $5\ \mu\text{m}$ 颗粒的收尘率

Fig.8 The collection efficiency for $5\ \mu\text{m}$ particles under 30 kV

大的情况下更加突出,主气流对携带的颗粒曳力作用增强,增大了颗粒从通道内逃逸的机率。而M2-ESP正是由于扩缩板从进口到出口,由高到底的布置,且前两对扩缩板高度过高,造成主体流道的气速及携带的颗粒速度均高于其他种静电除尘器,导致颗粒从其内逃逸几率增大。

50 kV 电压条件下 $5\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒的收尘率随气流速度的变化如图 9 所示。对于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒,当 $u = 0.1\text{ m/s}$ 时,所有除尘器的收尘率均达 100%。当 $u = 0.5\text{ m/s}$ 时,M1-ESP, M2-ESP 和 M3-ESP 的收尘率仍保持 100%。平行板-ESP 的收尘率出现小幅度的下降,收尘率为 97.5%。当 $u = 1\text{ m/s}$ 时,收尘率均小于 80%,收尘率按从高到低的顺序排序为 M3-ESP, M1-ESP, M2-ESP, 平行板-ESP, 此时 M3-ESP 的收尘率最高。这可能是因为高电压下,M3-ESP 每对较高的扩缩板附近区域的增强电场区(A 区域)较其他种静电除尘器平均电场强度更强,因此大粒径颗粒可多次短时间内充电加快,表面荷电量激增,所受到的电场力持续增强,从而具有更强的抵抗因流速过大导致的收尘率下降的能力。

30 kV 电压条件下 $1\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒的收尘率随气流速度的变化如图 10 所示。由图 10 可知,对于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒,当 $V = 30\text{ kV}$ 时,随着进口气速的增大,所有静电除尘器的收尘率随之显著降低。当 $u = 0.1\text{ m/s}$ 时,所有静电除尘器均有颗粒逃逸现象,收尘率从高到底排序分别为 M3-ESP, M1-ESP, M2-ESP, 平行板-ESP。当 $u = 0.5\text{ m/s}$ 时,收尘率从高到底排序分别为平行板-ESP, M3-ESP, M1-ESP, M2-ESP, 其中 M3-ESP 和 M1-ESP 的收尘率几乎一致,且所有静电除尘器的收尘率均未超过 40%。当 $u = 1\text{ m/s}$ 时,收尘率从高到底排序与当 $u = 0.5\text{ m/s}$ 时的情况一致,并且所有静电除尘器的收尘率均低于 30%。上述现象说明,对于小粒径颗粒而言,因受粒径限制,表面所携带的最大电荷数少,在较低电压和较大进口气速条件下,导致由扩缩板所形成的增强电场区提供的增强电场力极其有限,反而因扩缩板压缩了主体流道空间致使其内的气速大增,小粒径颗粒所受到的曳力显著增大,促使颗粒逃逸率提高。这暗示扩缩板的设置在低电压高流速条件下,对于小粒径颗粒的捕捉没有促进作用,相反还低于平行板-ESP 的收尘率。然而,在较低电压和流速(0.1 m/s)条件下,M1-ESP, M2-ESP 和 M3-ESP 的收尘率均高于平行板-ESP,这可能是因为低流速下,主体气道空间因扩缩板压缩导致的气流增大不明显,并且扩缩板附近区域产生了很多低速涡旋,同时扩缩板本身也是对收尘极表面积的二次扩展,这些都促进了小粒径颗粒在收尘极附近的滞留时间延长和被捕捉的概率增大。这说明扩缩板的设置在低电压低流速条件下,对于小粒径颗粒的捕捉有促进作用。

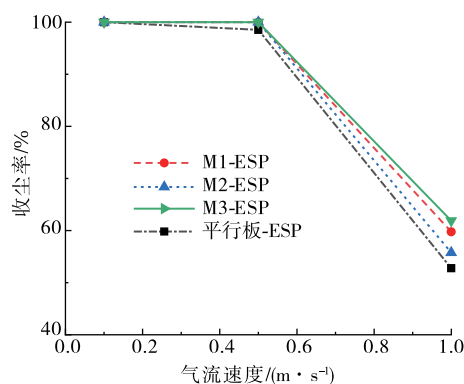


图 9 50 kV 电压条件下 $5\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒的收尘率

Fig.9 The collection efficiency for $5\text{ }\mu\text{m}$ particles under 50 kV

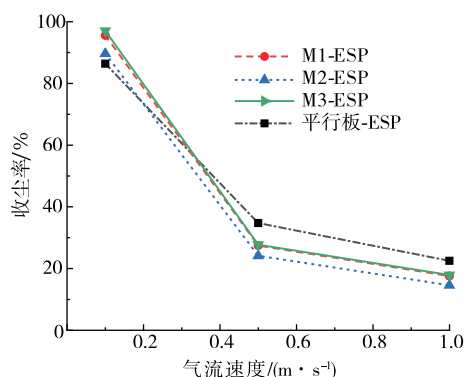


图 10 30 kV 电压条件下 $1\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒的收尘率

Fig.10 The collection efficiency for $1\text{ }\mu\text{m}$ particles under 30 kV

50 kV 电压条件下 $1\ \mu\text{m}$ 颗粒的收尘率随气流速度的变化如图 11 所示。由图 11 可知,对于 $1\ \mu\text{m}$ 颗粒,当 $V = 50\ \text{kV}$ 且 $u = 0.1\ \text{m/s}$ 时,除尘器收尘率均达到 100%。当 $u = 0.5\ \text{m/s}$ 时,M3-ESP 的收尘率达到 53%,M1-ESP、M2-ESP 和平行板-ESP 的收尘率接近,均低于 50%。当 $u = 1\ \text{m/s}$ 时大部分颗粒从除尘器内逃逸,所有静电除尘器的收尘率均低于 40%。收尘率按从高到低的顺序排序为 M3-ESP, M1-ESP, M2-ESP, 平行板-ESP。总体上,M3-ESP 具有最好的捕捉性能。

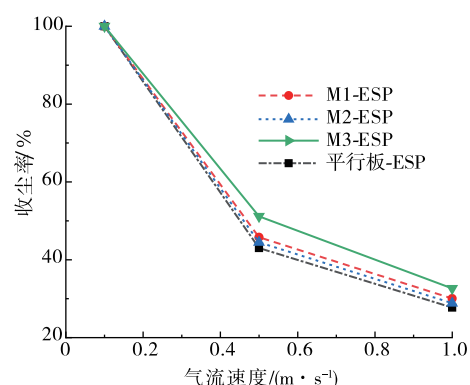


图 11 50 kV 电压条件下 $1\ \mu\text{m}$ 颗粒的收尘率

Fig.11 The collection efficiency for $1\ \mu\text{m}$ particles under 50 kV

5 结 论

通过数值模拟方法探索了扩缩板结构对线板式静电除尘器脱除颗粒过程的影响,研究发现扩缩板式静电除尘器的收尘率随电压的增加而增大,而随着进口气速的加快而降低,并且大颗粒相较小颗粒更易脱除。对于 $5\ \mu\text{m}$ 颗粒,扩缩板式静电除尘器的脱除效率优于传统平行板式静电除尘器。对于 $1\ \mu\text{m}$ 颗粒,当 $V = 50\ \text{kV}$ 时,扩缩板式静电除尘器的收尘率依然高于平行板式静电除尘器;当 $V = 30\ \text{kV}$ 且 $u = 0.1\ \text{m/s}$ 时,扩缩板式静电除尘器对颗粒的脱除仍有促进作用,但效果不明显;然而当 $u \geq 0.5\ \text{m/s}$ 时,反而起了抑制效果,甚至不及传统的平行板静电除尘器。3 种扩缩板式静电除尘器中,M3-ESP 总体脱除颗粒的性能最好,其次是 M1-ESP,最后是 M2-ESP。相对而言,扩缩板愈高相应的静电除尘器捕捉颗粒能力愈强,但也与其布置的位置密切相关,相对均匀布置要比集中于某一端更优。另外,过高的扩缩板会引起气流速度过快,反而对颗粒脱除起到抑制作用。因此,合理的设计扩缩板高度和布置位置是发挥扩缩板式静电除尘器优势的关键。

参考文献:

- [1]DAVIDSON C I, PHALEN R F, SOLOMON P A. Airborne particulate matter and human health;a review[J]. Aerosol Science and Technology, 2005, 39(8): 737-749.
- [2]WANG X, CHANG J C, XU C Y, et al. Collection and charging characteristics of particles in an electrostatic precipitator with a wet membrane collecting electrode[J]. Journal of Electrostatics, 2016, 83: 28-34.
- [3]GAO W C, WANG Y F, ZHANG H, et al. Numerical simulation of particle migration in electrostatic precipitator with different electrode configurations[J]. Powder Technology, 2020, 361: 238-247.
- [4]ZHENG C H, ZHANG X F, YANG Z D, et al. Numerical simulation of corona discharge and particle transport behavior with the particle space charge effect[J]. Journal of Aerosol Science, 2018, 118: 22-33.
- [5]LUO K, LI Y, ZHENG C H, et al. Numerical simulation of temperature effect on particles behavior via electrostatic precipitators[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 88: 127-139.
- [6]ZHU Y, GAO M X, CHEN M X, et al. Numerical simulation of capture process of fine particles in electrostatic precipitators under consideration of electrohydrodynamics flow[J]. Powder Technology, 2019, 354: 653-675.
- [7]靳星. 静电除尘器内细颗粒物脱除特性的技术基础研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [8]WANG Y F, GAO W C, ZHANG H, et al. Insights into the role of ionic wind in honeycomb electrostatic precipitators[J]. Journal of Aerosol Science, 2019, 133: 83-95.

(责任编辑:谭晓荷)