双阴极静电除尘器仿真优化模型与试验验证

刘云辉[1]，杨廷方[1]，罗屹豪[1]，刘寒遥[2]，周西杰[1]
（1. 长沙理工大学 电气与信息工程学院，湖南 长沙 410114；2. 湖南省计量检测研究院，湖南 长沙 410004）

摘要：为改善线板式静电除尘器对 $PM_{2.5}$ 细颗粒物存在穿透窗口问题，提高其对超细颗粒物的收集效率，本文采用有限元法分析和模拟双阴极静电除尘器内流场、电场、颗粒荷电及颗粒运动等物理场的耦合过程；使用泊松方程、偏微分方程描述电场，利用标准 k-ε 湍流模型描述流场，采用 Lawless 模型描述颗粒荷电方式，并用拉格朗日模型描述颗粒运动状态；在 Comsol 仿真平台上搭建双阴极除尘器模型，进行双阴极提高静电除尘效率研究。数值模拟结果表明：在同一放电极电压下，随着颗粒入射速度的升高，电致离子风对流场里的颗粒总体速度影响逐渐变弱，这使得流场里的颗粒的速度差异变小；随着辅助阴极电压的上升，不同入口速度的各种粒子到达集尘板所需的水平位移逐渐变少；当粒子入射速度为 0.5 m/s 时，对比无辅助极板增加辅助阴极电压至 −25 kV，可以使 0.1 ~ 1.0 μm细颗粒物的集尘效率达到 98.5%；当粒子入射速度为 0.5 m/s 时，在同一辅助阴极电压下，放电极电压从 −20 kV 增加到 −25 kV，可提高 0.1 ~ 1.0 μm 细颗粒物的集尘效率达 25%。

关键词：静电除尘器；双阴极；流场；电场；细颗粒物
中图分类号：X701.2 **文献标识码**：A **文章编号**：1000 − 8764(2024)02 − 0123 − 09
doi：10.13403/j.sjqt.2024.02.033

Simulation optimization model and experimental verification of double cathode electrostatic precipitator

LIU Yunhui[1], YANG Tingfang[1], LUO Yihao[1], LIU Hanyao[2], ZHOU Xijie[1]
(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 2. Hunan Institute of Metrology and Test, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: In order to improve the penetration window of $PM_{2.5}$ fine particulate matter in the line-plate electrostatic precipitator and improve its collection efficiency of ultrafine particulate matter, the finite element method is used to analyze and simulate the coupling process of the physical fields such as flow field, electric field, particle charge and particle motion in the double cathode electrostatic precipitator. The Poisson equation and partial differential equation are used to describe the electric field, the standard k-ε turbulence model is used to describe the flow field, the Lawless model is used to describe the charge mode of the particles, and the Lagrangian model is used to describe the motion state of the particles. A model of a dual cathode precipitator is built on the Comsol simulation platform, and the dual cathode is studied to improve the efficiency of electrostatic precipitator. The numerical simulation results show that under the same discharge electrode voltage, with the increase of the incident velocity of the particles, the influence of the electroionic wind on the overall velocity of the particles in the flow field gradually weakens, which makes the velocity difference of the particles in the flow field smaller; with the increase of the auxiliary cathode voltage, the horizontal displacement required for various particles with different inlet velocities to reach the dust collection plate gradually decreases; when the incident velocity of the

收稿日期：2022 − 11 − 04；**修回日期**：2023 − 02 − 21
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51777015)
作者简介：刘云辉(1996—)，男，硕士研究生，从事高压电力设备、静电除尘器方面的研究。
通信作者：杨廷方(1975—)，男，副教授，从事高压电力设备、防雷接地方面的研究。

particles is 0.5 m/s, the auxiliary cathode voltage can be increased to −25 kV compared with the non-auxiliary plate, which can make the dust collection efficiency of 0.1 ~ 1.0 μm fine particulate matter can reach 98.5%; When the incident velocity of particles is 0.5 m/s, the discharge electrode voltage increases from −20 kV to −25 kV under the same auxiliary cathode voltage, which can increase the dust collection efficiency of 0.1 ~ 1.0 μm fine particulate matter by 25%.

Key words: electrostatic precipitator; double cathode; flow field; electric field; $PM_{2.5}$

《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)已执行十余年，各地火力电厂排放废气对大气的污染得到很大缓和，但目前我国能源特征仍呈现“多煤、少气、少油”的特征，因此在相当长的一段时间内，燃煤火力发电厂仍然是我国最主要的电力来源，其也是我国工业领域主要的烟尘排放源[1]。为了降低烟尘对环境的影响，提高静电除尘器(electrostatic precipitator, ESP)的集尘效率至关重要。传统单阴极 ESP 结构简单、处理烟气量大，其在大、中型火力发电厂得到普遍应用[2-3]。但由于内部电流体的作用，受二次扬尘的影响，单阴极 ESP 对小粒径颗粒的捕集效果较低[4]。特别是对 0.1 ~ 1.0 μm 的小颗粒物的捕集效率不足 85%，而且在逃逸的粉尘中 $PM_{2.5}$ 的占比很高[5]。国内已有研究人员开始使用数值模拟与试验相结合的方式研究静电除尘器的电流场分布。周砚江等[6]利用电流体动力学原理对与静电除尘器原理相似的空气泵进行了多物理场建模，并使用 Comsol Multiphsysics 软件对空气泵的多物理场耦合情况进行模拟仿真分析，得出了比较满意的结果。

为此，本文通过增加辅助阴极(双阴极 ESP)提升对小颗粒物的去除率，建立双阴极静电除尘器仿真模型，利用流体力学、粒子动力学和静电学相互耦合的原理，借助系统的静电接口、粒子追踪接口、流体流动接口对双阴极静电除尘器的除尘效果进行模拟仿真；根据模拟结果分析双阴极 ESP 内部空间的电荷密度分布、流场与颗粒运动轨迹、颗粒荷电特性曲线、颗粒落尘位置、不同极板电压和放电极电压下的除尘效率，以期可为一般线板式静电除尘器的建模仿真、结构优化提供理论基础及改进建议。

1 模型定义与建立

1.1 物理模型及边界条件

1.1.1 流场模型

已有研究表明，除尘器内部流体处于完全发展的湍流状态。本文湍流模型采用 k-ε 模型，控制方程采用时均方程 Navier-Stokes 方程和雷诺应力标准湍流模型进行求解[7]。该方程如下所示。

$$\nabla \cdot u = 0 \tag{1}$$

$$\rho(u \cdot \nabla u) = -\nabla p + (\mu + \mu_t)\nabla^2 u + F_c \tag{2}$$

式中：∇ 为哈密顿算子；u 为气体流动速度 m/s；ρ 为流体密度，kg/m^3；p 为气体压强，kPa；μ 为层流黏性系数，Pa·s；μ_t 为湍流黏性系数 Pa·s；F_c 为空间电荷引起的体积力，N/m^3。其中，$F_c = \rho_{el}E$(ρ_{el} 为空间电荷密度，C/m^3；E 为电场强度，N/C)。

本文采用标准的 k-ε 方程[8]如下所示。

k 方程：

$$\rho\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{c_\mu}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + \mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \rho\varepsilon \tag{3}$$

ε 方程：

$$\rho\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\eta}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \frac{c_1\varepsilon}{k}\mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - c_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

式中：k 为湍流动能，m^2/s^2；t 为时间，s；x_i、x_j 为坐标分量；u_i、u_j 为各方向的速度分量，m/s；c_μ 是脉动动能，取值为 0.09；ε 为湍流耗散率，m^2/s^3，c_1、c_2、η 为模型中的经验常数，取值分别为 1.44、1.92、1.3。

方程从左到右五项分别为非稳态项、对流项、扩散项、产生项、消失项。在模型中需要设定的边界条件主要包括入口的速度 u_{in}(m/s)、出口的压力 P_{out}(kPa)以及无滑移的标准壁面函数。

1.1.2 电场模型

电晕放电致使气体被电离，进而在放电极周围形成电场。根据麦克斯韦方程，推导得到电除尘器模型中的电势和离子电荷密度分布满足泊松方程和电流连续性方程[9-11]：

$$\nabla^2 \cdot U = -\frac{\rho_{el}}{\varepsilon_0} \tag{5}$$

$$\overrightarrow{E} = -\nabla U \tag{6}$$

$$\overrightarrow{J} \cdot \nabla = 0 \tag{7}$$

$$\overrightarrow{J} = \rho_{el}(\overrightarrow{w} + b\overrightarrow{E}) - D_c \nabla \rho_{el} \tag{8}$$

式中：U 为电势，V；ε_0 为真空介电常数，F/m；E 为电场强度，N/C；J 为电流密度，A/m^2；w 为速度场；b 为离子迁移率，cm^2/(V·s)；D_c 为扩散常数，m^2/s。

忽略除尘器气体扩散和对流效应得偏微分方程：

$$E\nabla\rho_{el} = -\frac{\rho_{el}^2}{\varepsilon_0} \tag{9}$$

电晕电极上的电场法向分量作为泊松方程的边界条件：

$$n \cdot E = E_0 \tag{10}$$

式中：n 为法向量；E_0 为击穿电场，N/C。

式(8)根据皮克定律[12-14]可得

$$E_0 = 3 \times 10^6 \delta\left(1 + \frac{0.0309}{\sqrt{\delta r_i}}\right) \tag{11}$$

式中：δ 为标准大气压、常温条件下气体密度相对值；r_i 为电晕电极的半径，mm。

对于双阴极静电除尘器，另一电极电场则由辅助阴极与集尘极板产生的电场为

$$E_2 = -\Delta V_2 \tag{12}$$

式中：E_2 为不均匀电场，N/C；V_2 为辅助阴极电势，V；Δ 为电场中与辅助阴极的距离，m。

1.1.3　颗粒分布和荷电模型

为了研究除尘器内部颗粒的运动状态，本文没有采用传统的用于描述颗粒宏观运动状态的欧拉模型，而是采用反映单颗粒运动状态的拉格朗日模型。由于电晕放电会产生大量的带电离子，使得颗粒进入除尘器后在电场与扩散的作用下荷电[15]。颗粒受到电场库仑力与流体曳力的作用，由牛顿第二定律可得颗粒的受力方程[16]：

$$m_p \frac{du_p}{dt} = \overrightarrow{F_D} + \overrightarrow{F_e} + \overrightarrow{F_{e2}} \tag{13}$$

式中：m_p为颗粒质量，kg；u_p 为颗粒速度，m/s；F_D 为颗粒受到的曳力，N；F_e 为作用在颗粒上的电晕放电产生的电场力，N；F_{e2}为作用在颗粒上的辅助阴极极板产生的电场作用力，N。

由于颗粒的粒径非常小，因此曳力必须考虑稀薄效应的影响。故本文对曳力 F_D 采用 Cunningham-Millikan-Davis 模型进行求解[17]：

$$F_D = \frac{1}{\tau_p S} m_p (u - v) \tag{14}$$

式中：τ_p 为颗粒速度响应时间，s；S 为曳力校正系数(无量纲)；v 为颗粒速度，m/s。

$$\tau_p = \frac{4\rho_p d_p^2}{3(\mu + \mu_t) C_D Re_r} \tag{15}$$

式中：ρ_p 为颗粒的密度，kg/m^3；d_p 为粒径，mm；Re_r 为颗粒雷诺系数；C_D 为曳力系数。

Re_r 可定义为

$$Re_r = \frac{\rho \parallel u - v \parallel d_p}{\mu_t} \tag{16}$$

C_D 可表示为

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_r} + \frac{a_3}{Re_r^2} \tag{17}$$

式中：a_1、a_2、a_3 为常数。由于颗粒半径小于 10 μm，所以取 $a_1 = 0$、$a_2 = 24$、$a_3 = 0$。C_D 的值与颗粒的雷诺系数 Re_r 有关。

而作用在颗粒上的电晕放电产生的电场力 F_e 为

$$F_e = eZE \tag{18}$$

式中：e 为元电荷，C；Z 为颗粒的累积电荷数。由于颗粒粒径范围较广，采用 Lawless 模型能够有效反应颗粒的具体荷电情况[18-21]：

$$\tau_x \frac{dZ}{dt} = \begin{cases} R_f + f_a & |v_e| \leqslant |v_s| \\ R_d f_a & |v_e| \geqslant |v_s| \end{cases} \tag{19}$$

$$\tau_x = \frac{e^2}{4\pi d_p \rho_{el} b k_c T_j} \tag{20}$$

式中：τ_x 为根据颗粒的特性所产生的充电时间，s；R_f 和 R_d 分别为由电场和扩散传输引起的充电速率(无量纲)；k_c 为玻尔兹曼常数，取值为 1.380 649 × 10^{-23} J/K；T_j 为离子温度，K；v_e 为颗粒荷电量，C、v_s 为饱和荷电量，C；f_a 是将 R_f 和 R_d 相结合的函数。

f_a 可表示为

$$f_a = \begin{cases} \dfrac{1}{(w_e + 0.475)^{0.575}}, w_e \geqslant 0.525 \\ 1, w_e < 0.525 \end{cases} \tag{21}$$

其中

$$w_e = \frac{ed_p E}{k_c T_j} \tag{22}$$

式中：w_e 为与颗粒所在位置电场强度有关的参数，C^{-1}。作用在颗粒上的辅助阴极极板产生的电场作用力 F_{e2} 为

$$F_{e2} = eZE_2 \tag{23}$$

综上所述，物理模型的边界条件设置如表 1 所示。

表 1 模型边界条件

Table 1 Boundary conditions of dimensional

边界	静电场	空间电荷密度	流体动力	粒子运动
电晕线电极	$V=U$	$q=\rho_{el}$	无滑移 $u=0$	反弹
集尘极板	$V=0$	$q=0$	无滑移 $u=0$	黏附
直流极板	$V=V_2$	$\partial q/\partial n=0$	无滑移 $u=0$	反弹
入口	$\partial V/\partial n=0$	$\partial q/\partial n=0$	$u=u_0$	消失
出口	$\partial V/\partial n=0$	$\partial q/\partial n=0$	$P_0=101.3$ kPa	粒子计数
壁	$\partial V/\partial n=0$	$\partial q/\partial n=0$	无滑移 $u=0$	反弹

注：V 为各边界的电压，V；q 为空间电荷密度，C/m^3。

1.2 模型构建

1.2.1 除尘器数值模型

双阴极静电除尘器的三维结构如图 1 所示。该结构主要由放电极、收尘极板（集尘板）和辅助阴极三部分构成。其中，在放电极加负电压，使空气电离放电，这些电子使灰尘颗粒带负电；收尘极板为阳极，吸收带负电的灰尘颗粒；辅助阴极是额外加的另一个带负电的电极，其进一步使传统静电除尘器捕捉 0.1 ~ 1.0 μm 的小颗粒物，使其更快附着在收尘极板上，从而提高该类小颗粒物的收集效率。

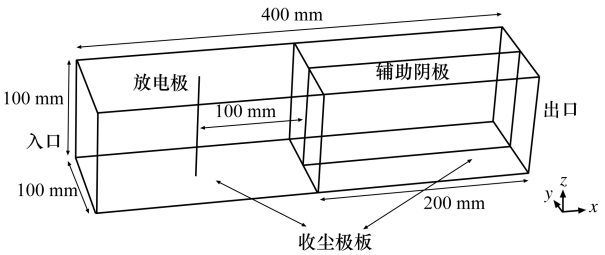


图 1 双阴极静电除尘器三维模型

Fig. 1 3-dimensional model of the electrostatic precipitator

出于对称性与计算时间的考虑，从图 1 中间截取剖面，简化为二维等效模型如图 2 所示。由图 2 可见，放电极是半径（r）为 0.5 mm 的电极线，将其接 −25 kV 或 −20 kV 的高压。辅助阴极是厚度为 1 mm、长度和宽度为 200 mm × 100 mm 的极板，接负直流高压电源。收尘极板接地，其对应极板间距为 100 mm。

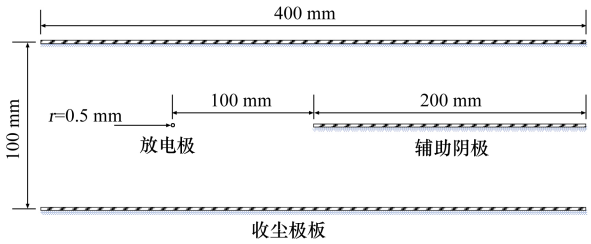


图 2 双阴极静电除尘器二维模型

Fig. 2 2-dimensional model diagram of a dual cathode electrostatic precipitator

1.2.2 模型网格划分

通过编辑物理场的引导序列控制双阴极静电除尘器模型生成为三角形网格，对放电极和辅助阴极网格进行加密处理，使得网格平均单元质量达到 0.938 6。具体的网格划分如图 3 所示。

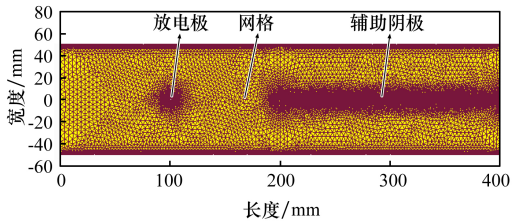


图 3 模型网格划分示意

Fig. 3 Schematic of model meshing

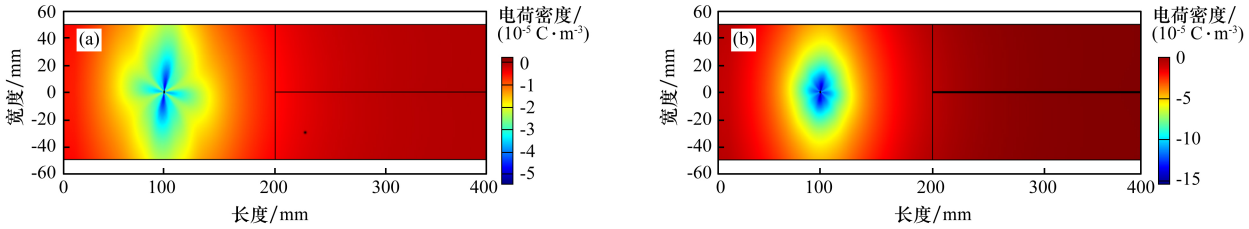
2 数值模拟结果与讨论

2.1 空间电荷密度分布

采用 Comsol Multiphysics 软件及其附加的 CFD 模块，得到在不同放电极电压下空间电荷密度分布的仿真结果如图 4 所示。由图 4 可知：当除尘器放电极电压为 −25 kV 时，得到空间最高电荷密度为 -1.52×10^{-4} C/m^3；当放电极电压为 −20 kV 时，空间最高电荷密度为 -5.41×10^{-6} C/m^3。可知，放电极附近的空间电荷密度最高，并向外扩散快速变弱。其中，放电极电压数值越高，电场强度越高，空间电荷密度越高，其对颗粒的荷电和粉尘去除更有利。

2.2 颗粒荷电特性

设定辅助阴极电压为 −25 kV，灰尘颗粒射速

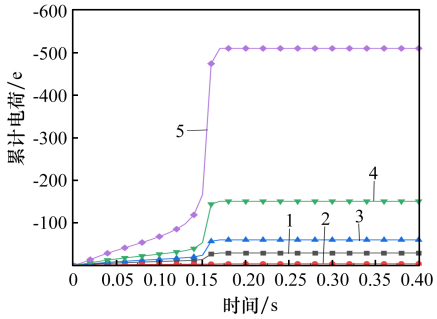


放电极电压/kV：(a) －20；(b) －25

图 4　空间电荷密度分布

Fig. 4　Spatial charge density distribution

度为 0.5 m/s，通过仿真得到不同粒径颗粒荷电量随时间的变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知：颗粒的荷电量在极短时间内迅速增加，4 种颗粒一般都仅需 0.17 s 便可达到饱和；1 μm 颗粒的饱和荷电量最高，其次是 0.5 μm 颗粒，而 0.1 μm 颗粒的饱和荷电量要高于 0.2 μm 颗粒的饱和荷电量，但是低于 0.3 μm 颗粒的饱和荷电量。仿真结果表明，对于粒径较大颗粒，可以增加放电极的电压以提高颗粒物的饱和荷电量，从而提高此类颗粒的集尘效率；但是，0.2 μm 以下的颗粒，增加放电极电压对饱和荷电量的增益较低。



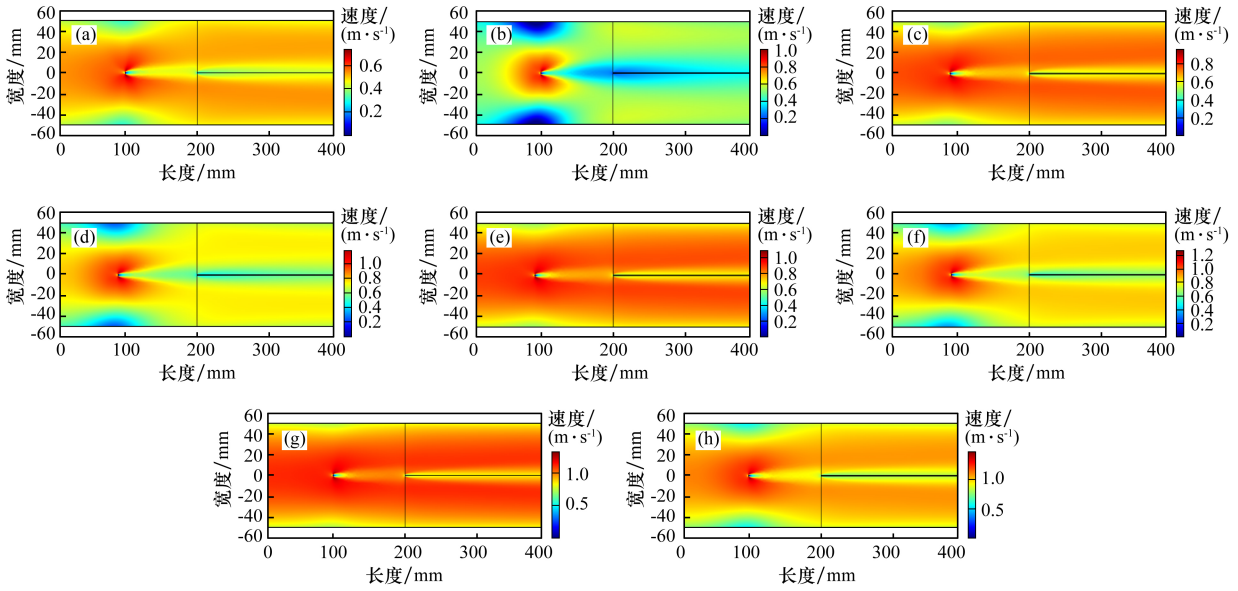
颗粒粒径/μm：1—0.1；2—0.2；3—0.3；4—0.5；5—1.0。

图 5　颗粒荷电曲线

Fig. 5　Particle charge curve

2.3　流场对颗粒运动轨迹的影响

在放电极电压分别为 －25 kV 和 －20 kV 的条件下，得到粒子在流场中的速度分布如图 6 所示。由图 6 可知：当辅助阴极电压为 －25 kV 时，粒子的入口速度分别为 0.5、1.0 m/s。由于放电导致离子风(electrohy drodynamic，EHD)的影响，放电极附近的流场速度瞬间变大，辅助阴极附近流场速度变低。放电极电压数值越高，颗粒的速度越



粒子入口速度/(m·s^{-1})、放电极电压/kV：(a) 0.5、－20；(b) 0.5、－25；(c) 0.7、－20；(d) 0.7、－25；(e) 0.8、－20；(f) 0.8、－25；(g) 1.0、－20；(h) 1.0、－25

图 6　流场中粒子速度的分布情况

Fig. 6　Flow field situation

大。在放电极电压相同时，随着颗粒在入口处速度的升高，EHD 对流场里颗粒速度的影响逐渐变弱，流场里颗粒的速度差异变小。由于 EHD 会影响颗粒的运动轨迹，改变颗粒的运动方向，故在除尘器前半区靠近收尘极板处存在速度波动，易造成二次扬尘；在后半区增加辅助阴极使流场颗粒分布均匀，可以避免二次扬尘。

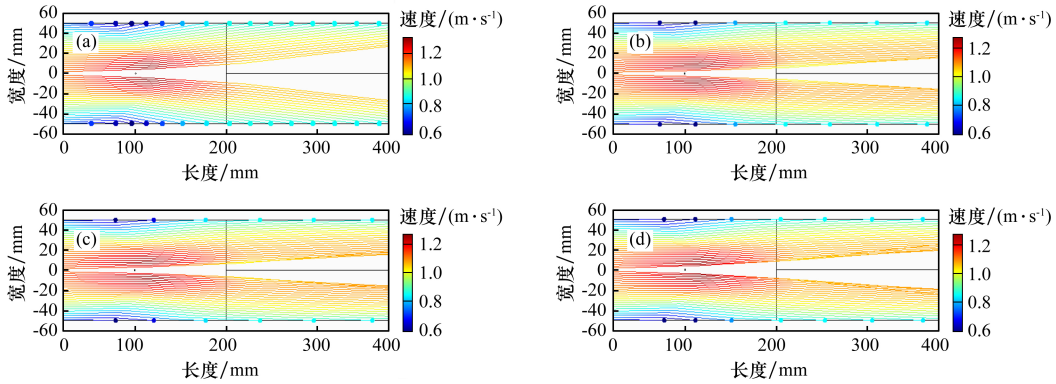
当辅助阴极电压为 -25 kV 时，不同粒径颗粒的运动轨迹如图 7 所示。由图 7 可知：前半区的颗粒受到流体曳力、放电极强电场以及辅助阴极产生的电场力，在收尘极板两侧的颗粒速度变大。受辅助阴极电场力的作用，进入后半区的颗粒荷电量基本稳定，而该区域颗粒受到辅助阴极的电场力恒定垂直并指向极板，颗粒的运动轨迹近似斜直线。粒径大于 0.2 μm 的颗粒累积的电荷数量较多，受电场力较大所以大粒径颗粒快速移向收尘极板。由于受到流场的曳力较小，粒径小于 0.2 μm的颗粒更容易附着在收尘极板上。中位粒径为 0.2 μm 的颗粒受流体曳力的影响最大，但其荷电量少，从而最难附着在收尘极板上。

2.4 落尘位置

通过改变辅助阴极电压的大小，使中部位置射入粒径为 0.05、0.50、1.00 μm 的颗粒落在收尘极板上。在不同电压下，对不同入口速度、粒径大小的颗粒到达集尘板时的水平位移如图 8 所示。由图 8 可知，当粒子水平位移超过 400 mm 时，粒子就会穿过集尘器，出现逃逸；在除尘器后半区(图 3 横坐标 200 ~ 400 mm 区域)，随着辅助阴极电压的上升，不同入口速度粒子到达集尘板所需的水平位移逐渐变小，因此要使灰尘颗粒附着在除尘器集尘极板上，需要大幅度增加辅助阴极电压。

2.5 辅助阴极电压变化对集尘效率的影响

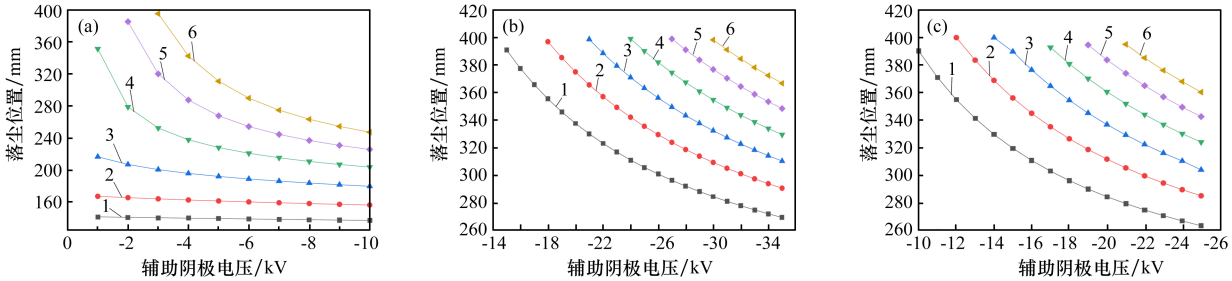
在辅助阴极电压为 0、-15、-25 kV 条件下，采用 Comsol 平台自带的出口粒子计数器统计得到不同速度、粒径灰尘颗粒的集尘效率如图9所示。



颗粒粒径/μm：(a) 0.05；(b) 0.20；(c) 0.50；(d) 1.00

图 7 不同粒径的颗粒轨迹

Fig. 7 Particle trajectories of different particle sizes

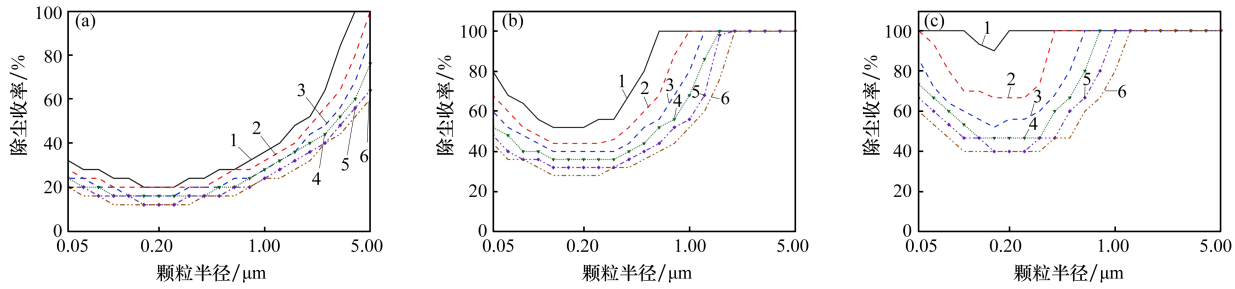


颗粒粒径/μm：(a) 0.05；(b) 0.50；(c) 1.00

入口速度/(m·s⁻¹)：1—0.5；2—0.6；3—0.7；4—0.8；5—0.9；6—1.0。

图 8 不同粒径颗粒落尘位置

Fig. 8 Dust locations with different particle sizes



辅助阴极电压/kV：（a）0；（b）－15；（c）－25

入口速度/（m·s^{-1}）：1—0.5；2—0.6；3—0.7；4—0.8；5—0.9；6—1.0。

图 9　不同辅助阴极电压集尘效率

Fig. 9　Dust collection efficiency of different plate voltages

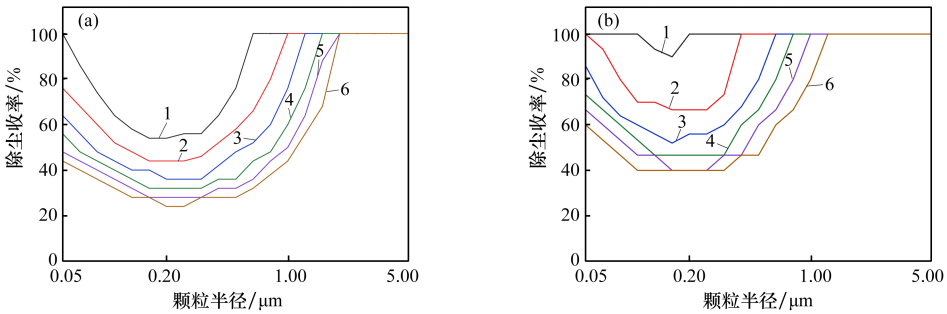
由图 9 可知，集尘效率随颗粒入口速度变大而快速变小；当颗粒入口速度为 0.5 m/s，且辅助阴极电压从 0 kV 变化到 －25 kV 时，0.1 ~ 1.0 μm 颗粒物集尘效率从 25.5% 提升至 98.5%，增大了约 3.9 倍，而粒径大于 1 μm 颗粒的集尘效率从 65.5% 提升至 100%，增大了约 1.5 倍；当颗粒入口速度为 1.0 m/s，且辅助阴极电压从 0 kV 变化到 －25 kV 时，0.1 ~ 1.0 μm 颗粒物集尘效率从 14.95% 提升至 49.5%，而粒径大于 1.0 μm 颗粒的集尘效率从 38% 提升至 97.5%。

2.6　放电极电压变化对集尘效率的影响

设定辅助阴极电压为 －25 kV，放电极电压为 －20、－25kV 时，在不同入口速度下各种颗粒的集尘效率分别如图 10 所示。由图 10 可知，当入口速度为 0.5 m/s 时，0.1 ~ 1.0 μm 颗粒物集尘效率从 72% 提升至 98.5%，1 μm 以上颗粒集尘效率均达到 100%；当入口速度为 1 m/s 时，0.1 ~ 1.0 μm颗粒物集尘效率从 30.35% 提升至 49.5%，1 μm 以上颗粒集尘效率从 83.5% 提升至 97.5%。因此，在放电极产生电晕放电范围内适当提高放电极电压，增加电场强度可以有效提升细颗粒物去除效率。

3　试验验证

根据双阴极静电除尘器模型构建的试验装置如图 11 所示。设定辅助阴极电压分别为 0、－15、－25 kV，通过采样系统采集除尘器进出口的烟气样品来计算出不同粒径颗粒除尘效率；根据试验装置的输气速度在数值模型中设定相同的入口速度，并设置出口粒子计数器统计逃逸颗粒与入射粒子总数计算除尘效率的仿真值。试验得到测试值与仿真值的对比结果如表 2 所示。由表 2 可见，在辅助阴极电压分别为 0、－15、－25 kV 条件下，不同粒径的颗粒去除率的仿真值与测试值均相差不超过 2%。本文的除尘器数值模型模拟结果与测试值基本一致。



放电极电压/kV：（a）－20；（b）－25

入口速度/（m·s^{-1}）：1—0.5；2—0.6；3—0.7；4—0.8；5—0.9；6—1.0。

图 10　不同放电极电压集尘效率

Fig. 10　Dust collection efficiency of different plate voltages

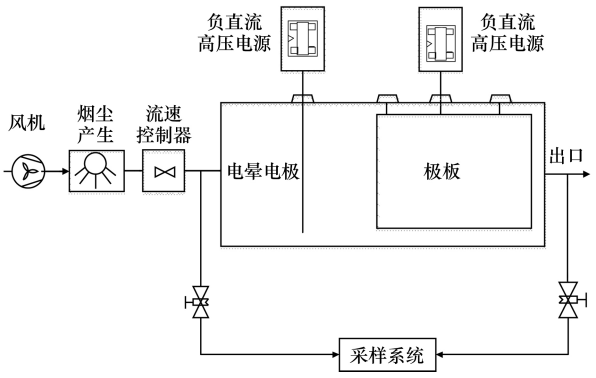


图 11 双阴极除尘器试验装置

Fig. 11 Schematic diagram of the experimental apparatus of the dual cathode dust collector

表 2 试验测试值与仿真模拟值对比(除尘效率)(质量分数)

Table 2 Experimental test values are compared with simulated values %

辅助阴极电压/kV	项目	颗粒粒径/μm				
		0.05	0.20	0.50	1.00	5.00
0	仿真值	32.0	20.0	28.0	36.0	100.0
	测试值	32.4	19.7	27.7	36.6	99.7
-15	仿真值	80.0	52.0	80.0	100	100
	测试值	78.4	52.2	79.6	99.2	99.7
-25	-仿真值	100.0	98.5	100.0	100.0	100
	测试值	99.2	96.2	99.5	99.1	99.8

4 结 论

(1) 大于 0.2 μm 的颗粒粒径越大，饱和荷电量越大；小于 0.2 μm 颗粒粒径越小，饱和荷电量越大 。通过改变放电极电压增加电场强度可以提升颗粒饱和荷电量。

(2) 双阴极 ESP 可分为前半区和后半区。前半区主要为颗粒荷电发生区域，此区域内废气颗粒在流体曳力、放电极强电场力以及辅助阴极电场力的共同作用下向收尘极板运动，而在后半区内颗粒完全由辅助阴极产生的电场力主导。

(3) 除尘效率与颗粒粒径基本呈“U”字形，中位粒径为 0.1 ~ 0.2 μm 的集尘效率最低。增加辅助阴极电压能有效提升除尘效率，适当增加放电极电压可以提高颗粒饱和荷电量进而提高除尘效率。当入射速度为 0.5 m/s、放电电压为 -25 kV、辅助阴极为 -25 kV 时，除尘器对 0.1 ~ 1.0 μm 细颗粒物的捕集效率可以达到 98.5% 。

(4) 根据双阴极静电除尘器数值模型构建的试验装置验证结果表明，不同粒径颗粒的除尘效率模拟值均与试验值相一致。

参考文献:

[1] 杜云鹏 . 高压静电除尘器中电极结构对微细粉尘收集效果影响的研究[D]. 保定:河北大学,2020.
DU Yunpen. Research on the influence of electrodestructure on the collection of fine dustin high-voltage electrostatic precipitator[D]. Baoding: Hebei University,2020.

[2] 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.
JIN Xing. Research on the capture technology of fine particles in electrostatic precipitator[D]. Beijing: Tsinghua University,2013.

[3] 张立莹,雷洪,牛宏,等 . 线板型静电除尘器的电场、流场与颗粒浓度分布的数值模拟[J]. 高电压技术,2021,47(11):4144 - 4151.
ZHANG Liying, LEI Hong, NIU Hong, et al. Numerical simulation for electric field, flow field and particle concentration distribution in wire-plate electrostatic precipitator[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11):4144 - 4151.

[4] 张建平,丁权飞,戴咏夏,等 . 多场耦合作用下静电除尘器粉尘颗粒运动轨迹模拟[J]. 煤炭学报,2011,36(2):298 - 303.
ZHANG Jianping, DING Quanfei, DAI Yongxia, et al. Simulation of particle trajectory in electrostatic precipitator under multi-field coupling[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(2):298 - 303.

[5] HAUTANEN J, KILPELAINEN M, KAUPPINEN E I, et al. Electrical agglomeration of aerosol-particles in an alternating electric field[J]. Aerosol Science and Technology,1995,22(2):181 - 189.

[6] 周砚江,毛晓靖,胡一枫,等 . EHD 空气泵气流加速分析[J]. 机电工程,2010,27(2):61 - 63;67.
ZHOU Yangjiang,MAO Xiaojing,HU Yifeng,et al. EHD air pump airflow acceleration analysis[J]. Mechatronic Engineering,2010,27(2):61 - 63;67.

[7] 王军锋,张姚文,孟令鹏 . 静电喷雾旋风除尘器荷电特性及细颗粒物的脱除[J]. 高电压技术,2019,45(2):637 - 642.

WANG Junfeng, ZHANG Yaowen, MENG Lingpeng, et al. Charged droplet characteristics and fine particle removal efficiency by electrostatic spray cyclone[J]. High Voltage Engineering,2019,45(2):637 – 642.

[8] 龙正伟,姚强. 细颗粒物在静电除尘器中的沉积规律研究[C]//中国工程热物理学会燃烧学学术年会. 北京:中国工程热物理学会,2012.
LONG Zhengwei, YAO Qiang. Study on the deposition of fine particulate matter in electrostatic precipitator[C]// Annual Conference of Combustion Science of Chinese Society of Engineering Thermophysics. Beijing: Chinese Society of Engineering Thermophysics,2012.

[9] ARIF S, BRANKEN D J, EVERSON C, et al. CFD modeling of particle charging and collection in electrostatic precipitator[J]. Journal of Electrostatics, 2016,84:10 – 22.

[10] ADAMIAK K, ATTEN P. Simulation of corona discharges in point-plane configuration[J]. Journal of Electrostatics, 2004,61(2):8 5 – 98.

[11] 郭俊一. 偶极荷电收集微细颗粒物的机理及实验研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2008.
GUO Junyi. Mechanism and experimental study of collecting fine particles by bipolar charging[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology,2008.

[12] 李良,张相,刘茂省,等. 高温旋风除尘器单体气固分离性能的冷态试验研究[J]. 烧结球团,2018,43(4):64 – 68.
LI Liang, ZHANG Xiang, LIU Maosheng, et al. Cold-state experimental study on gas-solid separation performance of single tube for high temperature cyclone separator[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(4):64 – 68.

[13] 庞海龙,俞妍,董中天,等. 静电除尘效率的影响因素研究[J]. 高压电器,2021,57(9):125 – 130.
PANG Hailong, YU Yan, DONG Zhongtian, et al. Study on the influence factors of efficiency of electrostatic precipitation [J]. High Voltage Engineering, 2021, 57(9):125 – 130.

[14] 侯雪超. 电除尘器电极结构设计及流场 CFD 模拟[D]. 保定:河北大学,2021.
HOU Xuechao. Electrode structure design and flow field CFD simulation of electrostatic precipitator[D]. Baoding: Hebei University,2021.

[15] 高韬深. 湿式电除尘器的数值模拟研究[D]. 北京:华北电力大学,2019.
GAO Taoshen. Numerical simulation of wet electrostatic precipitator [D]. Beijing: North China Electric Power University,2019.

[16] 朱林,刘树林,刘柏清,等. 离子风静电除尘器集尘效率数值仿真研究[J]. 能源与环保,2021,43(10):55 – 60.
ZHU Lin, LIU SHU lin, LIU Boqing, et al. Research on numerical simulation of dust collection efficiency of ion wind electrostatic precipitator [J]. China Energy and Environmental Protection,2021,43(10):55 – 60.

[17] 段超龙,乐文毅,刘贵云,等. 气力输送系统中袋式除尘器的模拟研究[J]. 烧结球团,2018,43(2):54 – 58.
DUAN Chaolong, YUE Wenyi, LIU Guiyun, et al. Simulation research of bag filters in pneumatic-conveying system[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(2):54 – 58.

[18] 张思平,苏道. 一种新型生石灰消化及除尘装置的研究与应用[J]. 烧结球团,2017,42(5):57 – 61.
ZHANG Siping, SU Dao. Research and optimization of quicklime digestion technology in sintering plant[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(5):57 – 61.

[19] LAWLESS P A. Particle charging bounds, symmetry relations and analytic charging rate model for the continuum regime[J]. Journal of Aerosol Science,1996, 27(2):191 – 215.

[20] PREGER C, OVERGAARD N C, MESSING M E, et al. Predicting the deposition spot radius and the nanoparticle concentration distribution in an electrostatic precipitator [J]. Aerosol Science and Technology,2020,54(6):1 – 18.

[21] SCHMID H J, VOGEL L. On the modelling of the particle dynamics in electro-hydrodvnamic flow-fields: II. Influences of inhomogeneities on electrostatic precipitation [J]. Powder Technology,2003,135:136 – 149.