

电除尘器中离子风对除尘效果的影响

胡建华, 潘洋洋

(海军工程大学 动力工程学院, 武汉 430033)

摘要: **目的** 研究电除尘器中离子风对除尘过程的影响。**方法** 分析电除尘器中离子风对除尘效果的影响, 建立完整的颗粒荷电模型, 在 Fluent 软件平台上进行计算。**结果** 离子风在电极线附近呈双螺旋结构, 正对电极线位置的离子风速度最大, 在远离电极线的方向上逐渐变小, 越靠近电极线, 速度下降的梯度越大, 对流场有扰动作用, 随流速增加, 离子风效应被逐渐削弱。当主流速小于等于 0.5 m/s 时, 离子风体现为增大驱进速度, 颗粒更快到达极板, 有利于改善除尘效率。**结论** 电极线的偏置可以提高除尘效率, 当电极线置于电场宽度方向 1/4 处时, 可以获得最佳除尘效果。

关键词: 离子风; 电除尘器; 电极线偏置; Fluent

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.03.016

中图分类号: X702.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)03-0076-05

Influences of Ion Wind in Electrostatic Precipitator on Dust Removal Effect

HU Jian-hua, PAN Yang-yang

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

ABSTRACT: Objective To study the effect of ionic wind on dust removal process in electrostatic precipitators. **Methods** Effects of ion wind in the electrostatic precipitator on the dust removal effect were analyzed. A complete particle charge model was established and calculated on the Fluent software platform. **Results** The ion wind had a double helix structure near the electrode line. The ion wind velocity at the opposite position of the electrode line was the largest. And it gradually decreased in the direction away from the electrode line. The closer to the electrode line, the greater the gradient of the velocity drop is. The ion wind effect was gradually weakened. When the main velocity was less than or equal to 0.5 m/s, the ion wind body was to increase the drive speed, the particles reached the plate faster. It was conducive to improving the efficiency of dust. **Conclusion** Electrode line of the bias can improve the efficiency of dust removal. When the electrode line is in the direction of the electric field width of a quarter, the best dust removal effect could be achieved.

KEY WORDS: ionic wind; electrostatic precipitator; bias of electrode line; Fluent

静电除尘是一种高效的颗粒捕集技术,也是大气污染控制的主要手段^[1]。随着国家排放标准的提高,对电除尘的研究也越来越受到关注。文中应用数值分析来研究离子风对除尘过程的影响。

离子风的本质是带电粒子在电场力作用下对流场的扰动。现有研究文献表明,离子风既利于提高驱进速度,也增加了气流不均匀性,易于引起二次扬尘,

形态方面,在电极线周围呈双螺旋结构。李庆^[2]等人通过实验和数值模拟得到了运行电压与电晕电流、电晕风风速之间的关系,分析了场强分布与离子风风速变化的联系,即在由放电电极向收尘极的小范围内,风速衰减梯度很大,随后近似于线性减小。沈欣军^[3]等人采用 PIV 技术分别比较了正负电晕放电下的流场变化,发现示踪粒子的运动明显受到离子风的影响,

收稿日期: 2017-10-28; 修订日期: 2017-11-30

作者简介: 胡建华(1990—),男,硕士,主要研究方向为静电除尘技术。

对层流有增速作用。随着电压的增加,原来的层流变为了湍流,最后出现了对称的旋涡,正负压下的运动状态差异不大,线电极间距增大后,由于干扰变小,旋涡更均匀。Longnan Li^[4]等人建立针—管式实验模型,考察了运行电压、极间距、管直径与离子风风速的相关性,发现电压越高,风速越大;放电尖端到圆管端面存在最佳距离使得离子风速最大;管径越大,风速越小。由此,可以考虑优化除尘器中电极的布置来抑制离子风造成的二次扬尘。

目前学者对电除尘器流场优化研究得比较多^[5],离子风也仅局限于本体的研究^[6],颗粒荷电往往采用简化模型。因此,文中完全考虑颗粒的电场荷电与扩散荷电,建立随时间变化的荷电模型,结合收尘效率来研究离子风对流场、对颗粒运动的影响。

1 模型描述与数值分析方法

1.1 模型描述

构建线板式单通道几何模型,基本参数:收尘极板长度为 600 mm、极板间距为 200 mm,电晕极直径为 5 mm。电极线之间相距 125 mm,最左侧 Inlet 为烟尘进口,最右侧 Outlet 为出口,中间两根电极线通直流高压,与电极线相对的是收尘极板,结构如图 1 所示。

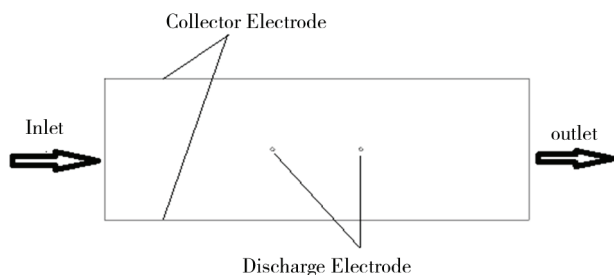


图 1 几何模型

基本工况:烟尘流速为 1 m/s,空气密度为 1.225 kg/m³,空气黏度为 1.7894×10⁻⁴ kg/(m·s),环境温度为 300 K;颗粒直径为 0.005 mm,从进口沿法线方向释放的速率为 1 m/s,密度为 1550 kg/m³,运行电压为 70 000 V,假设颗粒运动到极板处被捕集。

1.2 气相控制方程

实际的电除尘器内部烟尘流动处于紊流状态,其主流控制方程如下。

质量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho U_k) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\rho U_i U_k - (\mu + \mu_i) \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right] = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + f_{D_i} + \rho_{ion} E_i \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度; U_k 为气体速度分量; μ_i 为湍流黏度; f_{D_i} 为单位体积曳力; ρ_{ion} 为离子电荷密度; E_i 表示电场强度分量; P 为气体压强; μ 为空气动力黏度。

1.3 固相控制方程

在除尘通道中,颗粒的受力情况复杂,包括电场力、曳力、重力、热泳力等,文中只考虑最主要的电场力和曳力。颗粒的运动方程为:

$$\frac{dx_i}{dt} = v_{p_i} \quad (3)$$

$$m_p \frac{dv_{p_i}}{dt} = f_{D_i} + q_p E_i \quad (4)$$

式中: v_{p_i} 为颗粒的速度分量; m_p 表示颗粒质量; q_p 表示颗粒的荷电量。

颗粒的荷电分为电场荷电和扩散荷电,文中将两者完全考虑来实现颗粒的荷电。

1.3.1 电场荷电

颗粒进入电场,离子就会在电场力作用下与颗粒发生碰撞,实现荷电,一定条件下的饱和电量为:

$$q_s = \frac{3\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} \pi \varepsilon_0 d_p^2 E \quad (5)$$

荷电量随时间的变化为:

$$q_{t_1} = q_s \frac{1}{1 + \frac{\tau}{t}} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{4\varepsilon_0}{\rho_{ion} k_{ion}} \quad (7)$$

式中: q_s 为饱和电量; ε_0 为真空介电常数, $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}/(\text{V} \cdot \text{m})$; ε_r 表示颗粒介电常数; d_p 表示颗粒直径; E 表示荷电场强; t 表示颗粒在电场中停留的时间; τ 是一个时间常数,表示荷电快慢。

1.3.2 扩散荷电

扩散荷电源于无序的热运动,因为离子热能在不断积累,所以扩散荷电可以一直进行。荷电量随时间的变化为:

$$q_{t_2} = \frac{2\pi \varepsilon_0 d_p kT}{e} \ln \left(1 + \frac{ed_p \rho_{ion} \bar{v}}{8\varepsilon_0 kT} t \right) \quad (8)$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{m\pi}} \quad (9)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T 为气体温度; e 为单位电荷, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; \bar{v} 为离子的均方根速度; m 为离子质量, $m = 5.3 \times 10^{-26} \text{ kg}$ 。

1.3.3 总荷电量

对于颗粒的荷电理论,在研究的过程中,很多学者都对其进行了简化处理。大颗粒时考虑电场荷电,忽略扩散荷电;细微颗粒时考虑扩散荷电,忽略电场荷电。M.Robinson 提出颗粒一进入电场,电场荷电就达到饱和,再考虑颗粒的扩散荷电,建立了综合荷电模型。文中的研究将颗粒的荷电过程概括为与时间相关的函数:

$$q_t = q_{t_1} + q_{t_2} \quad (10)$$

1.4 电场控制方程

电场由泊松方程和电流连续性方程表达。

1) 泊松方程:

$$-\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_k^2} = \frac{\rho_{ion}}{\epsilon_0} \quad (11)$$

如果忽略空间电荷对电势分布的影响,则可以去掉源项,得到:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_k^2} = 0 \quad (12)$$

对电势求梯度得到场强分布:

$$E_k = -\frac{\partial \phi}{\partial x_k} \quad (13)$$

2) 电流连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\rho_{ion} (k_{ion} E_k + \mu_k) - D_e \frac{\partial \rho_{ion}}{\partial x_k} \right] = 0 \quad (14)$$

式中: ϕ 为电势; E_k 为场强在 x_k 方向的分量; k_{ion} 为离子迁移率, $k_{ion}=2.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{s}\cdot\text{V})$; D_e 为离子有效扩散系数^[7], $D_e=10 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

2 结果与讨论

数值计算在 Fluent 平台上进行,电势、场强的分布以及电流连续性方程通过用户自定义函数来完成求解。在电除尘器的通道里,Choi B S 等学者发现 RNG $k-\epsilon$ 模型更能合理反映除尘的低雷诺数的情况。

由半经验公式^[8]得到电极线表面的离子电荷密度:

$$\rho_{wire} = \frac{l J_p}{\pi k_{ion} R f \left[30\delta + 0.9(\delta/R)^{1/2} \right]} \times 10^{-5} \quad (15)$$

式中: l 为电极线间距; J_p 表示收尘板的初始电流密度;参考文献中的公式计算,标准大气压下 $\delta=1$; R 为电极线半径; f 为极线表面粗糙系数。电流密度、临界电压与临界场强参考《除尘设备》^[9]、《高压静电除尘》^[10]中的公式计算得到。

在基本工况下,运行电压为 60 000 V,入口流速

为 0 时,考察离子在电场力作用下对流场的影响。由图 2 可知,高电势范围仅分布在电极线附近,电势变化的梯度沿径向越来越小,即空气电离集中发生在电极线表面的电晕区。由图 3 可知,因为电极线左右的场强方向不同,所以分布着的是两对反向的旋涡结构,与 Leonard^[11-12]得到的结论相同。离子的运动显著地改变了原来流线的状态,说明离子风效应的存在增强了流场的湍流效应。

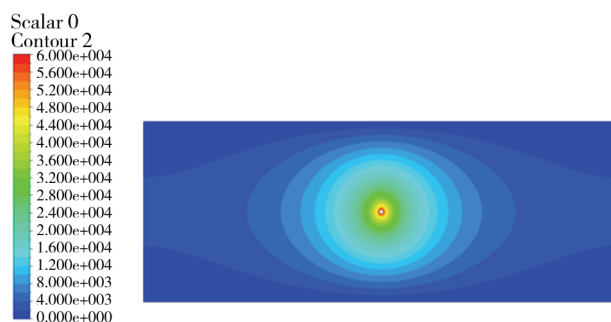


图 2 电势分布

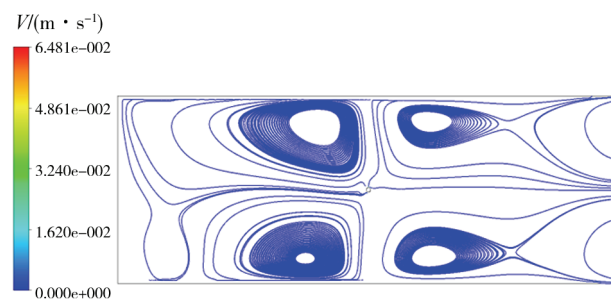


图 3 离子风效应

2.1 离子风对流场的影响

流场的分布直接影响除尘效率,不稳定的流动一般存在高速区和低速区。在低速区里,颗粒的沉积量过大,高速区则会将已沉降颗粒重新带回到电场中,降低除尘效率。不同流速下,离子风效应的气流分布情况如图 4 所示。针对湍流扩散,参考 Gosman 等^[13]人给出的 Random Walk Model; 针对离子风,则引用 Robinson 提出的离子电荷密度与场强之积加载到连续相的源项。

图 3 的运行电压是 60 000 V,图 4 是 70 000 V,展现了电场对连续相的作用。可以发现,不同电压下离子风的形态与结构分布相同,由后处理软件得到图 3、图 4 流场平均速度分别为 1.12×10^{-4} , $8.04 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 。高的电压获得大的场强,空气电离程度大,形成的离子风效应更强。随着入口流速的增加,离子风效应被削弱,流线趋于平稳,旋涡依次消散。图 4b, c 分别在电极线后面出现了速度空腔,不利于荷电颗粒向极板沉降。

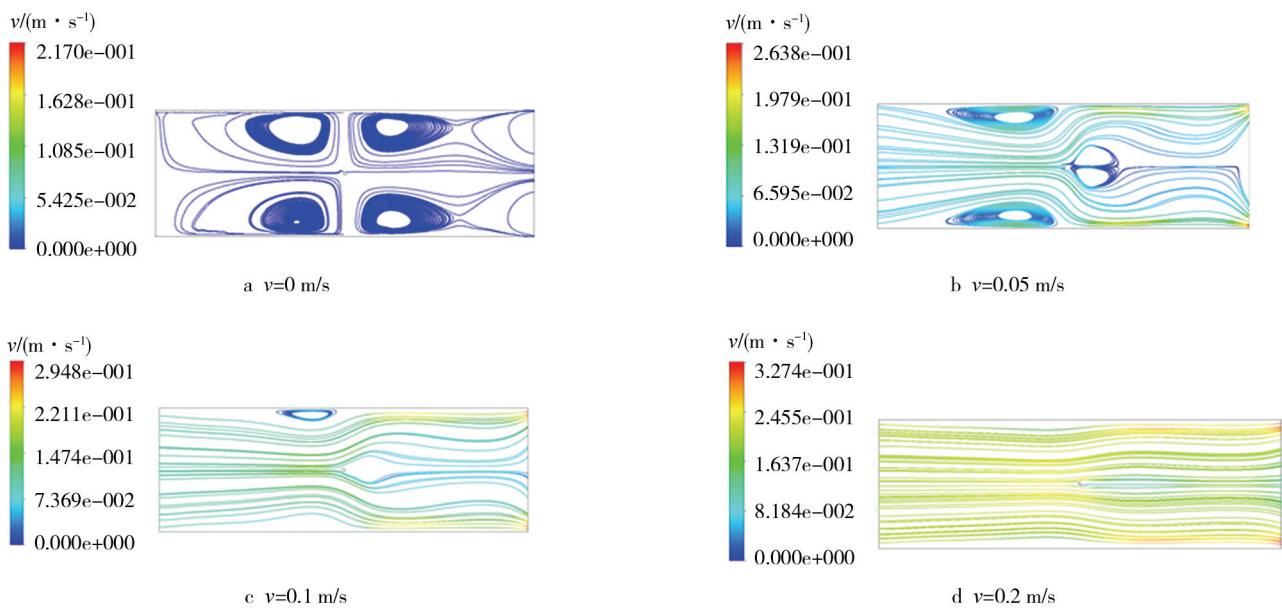


图 4 气流分布情况

2.2 离子风对颗粒运动的影响

颗粒的运动主要取决于电场力和电力的作用，受到离子风效应的影响。在基本工况下，结合除尘效率，考察离子风效应对颗粒运动的干扰情况。不考虑离子风作用时，主流速度为 0.2, 0.5, 0.8 m/s，对应的除尘效率为：100%，30.03%，17.06%；引入离子风作用时，各流速对应的除尘效率为：100%，32.23%，15.00%。可以发现，流速越大，除尘效率越低。流速为 0.5 m/s 时，离子风效应使得除尘效率提高，该流速下的颗粒轨迹如图 5 所示。可以看出，离子风促进了颗粒向极板靠近，表现为增大了驱进速度。流速为 0.8 m/s 时，离子风的加入使得除尘效率下降，表现为离子风对颗粒的扰动，让主流带走更多颗粒。

2.3 电极线偏置对离子风的影响

对于结构的研究，常见于极间距、电极形状^[14]和气流均布^[15]装置。在本节提出电极线偏置的研究点，考察该结构对离子风的影响。在图 3 工况的基础上偏置电极线，分别从中心向下偏离 25, 50, 75 mm，得到在基本工况下，流速为 0、无颗粒释放时的流线如图 6 所示。结合图 3 可以发现，随着放电电极偏离中心越来越远，上半部分的旋涡结构逐渐消失；当流速为 0.2 m/s，从入口释放颗粒时，计算得到电极线偏置 0, 25, 50, 75 mm 的除尘效率为：14.09%，15.86%，22.62%，14.59%。电极线偏置 50 mm，即位于电场宽度方向 1/4 处获得最好的除尘效果。由 2.2 节的分析可知，当流速小于 0.5 m/s 时，离子风效应有利于

促进颗粒沉降。当电极线过于靠近下极板时，沿电场线运动的空气分子会带走极板附近的颗粒，使得颗粒随主流逃离除尘通道，降低了除尘效率。另一方面，在图 6b 的工况下，以点 (0, 1), (600, 1) 建立沿底板的直线，提取该直线上的速度分布，如图 7 所示。可以发现，正对电极线位置的速度最大，在远离电极线的方向上逐渐变小，越靠近电极线，速度下降的梯度越大，与李庆^[16]等人的实验结果一致。

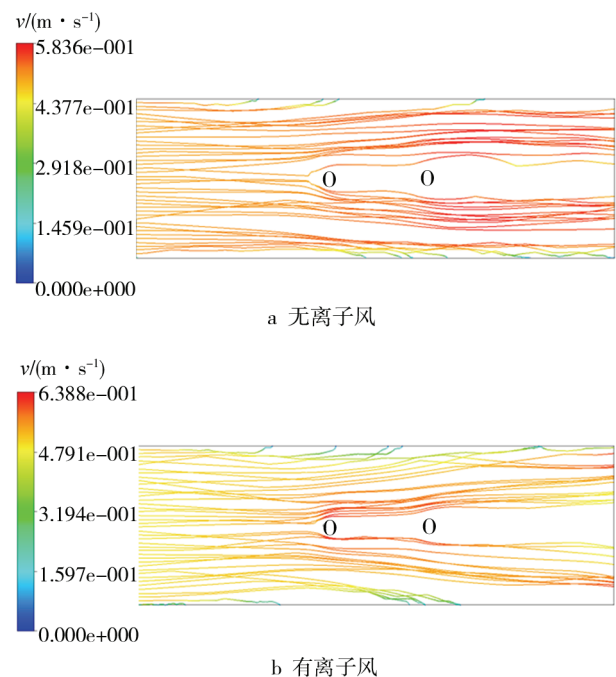


图 5 颗粒轨迹

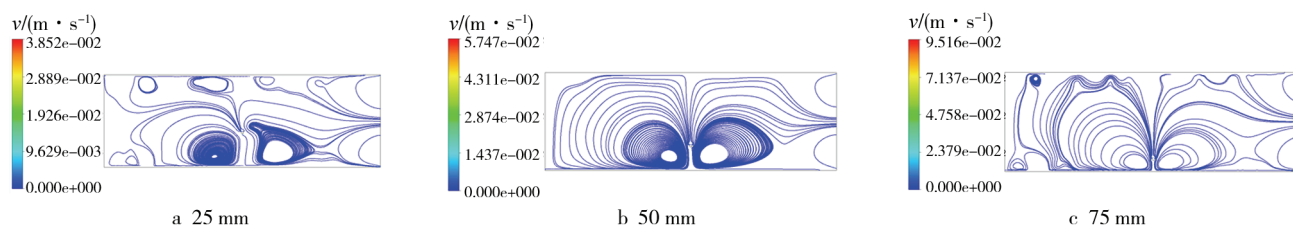


图6 偏置电极线后的气流分布情况

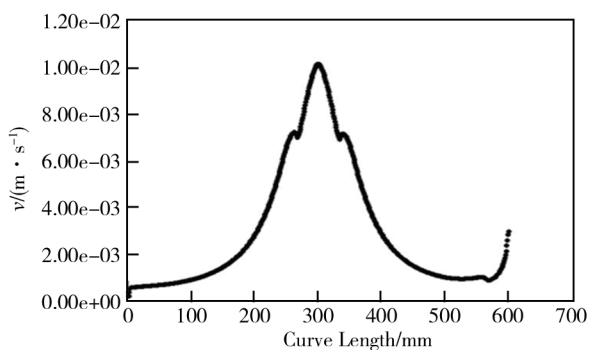


图7 壁面速度

3 结论

1) 离子风的形态呈双螺旋结构, 依附在电极线四周, 电压提高, 强化离子风效应。主流速度对离子风有抑制作用, 随流速增加, 旋涡结构慢慢消失。

2) 离子风的速度分布与李庆的实验结果一致, 正对电极线位置的速度最大, 在远离电极线的方向上逐渐变小。

3) 离子风对颗粒的捕集存在双面性作用。在该模型中, 当流速为 0.5 m/s 时, 表现为提高驱进速度, 促进颗粒收集; 当流速为 0.8 m/s 时, 旋涡扰动使更多颗粒被主流带走。

4) 电极线偏置使得几何上半部分的旋涡消失, 流速为 0.2 m/s, 离子风表现为有利于提高除尘效率。当电极线偏置到电场宽度方向 1/4 处时, 效果最好, 除尘效率最高。

参考文献:

- [1] 闫克平, 李树然, 郑钦臻, 等. 电除尘技术发展与应用[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 476-487.
- [2] 李庆, 李海凤, 孙晓荣, 等. 电晕放电电流体状态实验研究与数值模拟[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2739-2744.
- [3] 沈欣军, 曾宇翮, 郑钦臻, 等. 基于粒子成像测速法的正、负电晕放电下线板式电除尘器内流场测试[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2757-2763.
- [4] LONGNAN L, SEUNG J L, WONJUNG K, et al. An

Empirical Model for Ionic Wind Generation by a Needle-to-Cylinder dc Corona Discharge[J]. Journal of Electrostatics, 2015, 73: 125-130.

- [5] 王珍, 曹文广, 彭维明. 电除尘器上下游烟道流场分析及优化设计[J]. 环境工程学报, 2016, 10(12): 7183-7187.
- [6] 曾宇翮, 沈欣军, 章旭明, 等. 电除尘器中离子风的实验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(12): 2208-2211.
- [7] SKODRAS G, KALDIS S P, SOFIALIDIS D, et al. Particulate Removal via Electrostatic Precipitators- CFD Simulation[J]. Fuel Processing Technology, 2006, 87 (7): 623-631.
- [8] 沈恒, 钟方川, 亢燕铭, 等. 两种实际板型下电除尘器中的电流体动力学流动[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 541-546.
- [9] 金国森. 除尘设备[M]. 第一版. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [10] 解广润, 陈慈萱. 高压静电除尘[M]. 第一版. 北京: 水利电力出版社出版, 1993.
- [11] LEONARD G L, MITCHNER M, SELF S A. Experimental Study of the Effect of Turbulent Diffusion on Precipitator Efficiency[J]. Journal of Aerosol Science, 1982, 13(4): 271-284.
- [12] LEONARD G L, MITCHNER M, SELF S A. An Experimental Study of the Electrohydrodynamic Flow in Electrostatic Precipitators[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 127(1): 123-140.
- [13] GOSMAN A D, IOANNIDES E. Aspects of Computer Simulation of Liquid Fuelled Combustors[J]. J Energy, 1983, 7: 482-490.
- [14] 郭尹亮, 向晓东, 盖龄童. 芒刺电除尘器板电流密度分布及芒刺间距优化[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 1021-1025.
- [15] ANANDKUMAR S M, VIJAYKUMAR V N. Numerical Simulation of an Electrostatic Precipitator [J]. International Journal of Engineering Research & Technology, 2014, 3(9): 291-295.
- [16] 李庆, 孙玉荣, 刘志强, 等. 静电除尘器离子风研究[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2007, 27(5): 483-485.