浙江理工大学学报(自然科学版),第 35 卷,第 5 期,2016 年 9 月
Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences)
Vol. 35, No. 5, Sept. 2016

DOI:10.3969/j.issn.1673-3851.2016.09.017

电除尘器电流体动力学流动与极间干扰的数值模拟研究

周小颖,窦华书,陈小平

(浙江理工大学机械与自动控制学院,杭州 310018)

摘　要: 对单电极和多电极电除尘器内部流动建立了三维数值模型,研究了电流体动力学(EHD)流和极间干扰对电除尘器内部流动特性的影响。电场分布由泊松方程和电流连续性方程控制,气体流动由三维不可压缩的 Navier-Stokes 方程结合标准 k-ε 湍流模型来描述,气体流动和电场通过库仑力耦合计算。模拟结果显示:EHD 流使得电极前后分别形成两个对称的涡,随着气流进口速度的提高,上下涡核朝相反的方向移动;EHD 流通过同时提高湍流耗散率和湍动能的生成来影响湍流强度,其结果取决于哪个作用占优势。结果发现:电极之间会产生极间干扰,中间电极前后由于电势和空间电荷密度分布的挤压作用使得涡强度明显减小,并且结构更规则。

关键词: 电除尘器;收集效率;电流体力学;电场力

中图分类号: O442　　**文献标志码:** A　**文章编号:** 1673-3851 (2016) 05-0734-08　**引用页码:** 090404

0 引　言

电除尘器(electric precipitator, ESP)是一种使用广泛的高效除尘设备,通过对颗粒充电并使颗粒在电场力驱动下向收集板移动,以达到除尘的目的,其除尘效率可达 99.9%以上[1]。在电除尘器工作过程中,中性的气流也会与通道中的带电离子发生动量交换,产生电流体动力学(electro-hydrodynamics, EHD)流,影响流体的气流形态和运动特性[2]。

研究人员对 EHD 流进行了大量实验和数值方面的研究[3]。Farnoosh 等[4]利用混合有限元-通量修正输运法(FEM-FCT)模拟电场分布,采用有限体积法模拟气场分布,以此来建立 EHD 流的三维数值模型。Zhao 等[5]通过采用混合有限元-特征法(FEM-MOC)数值方法来分析 EHD 流动。Podlinski 等[6]和 Chang 等[7]先后采用 PIV(particle image velocimetry)技术测量了不同 EHD 数和雷诺数下的流场速度。Leonard 等[8]通过实验研究线-板型电除尘器内部的 EHD 二次流和湍流场,采用纹影显示法(schlieren visualization)和激光测速法(laser anemometry)来显示一个垂直于放电极的平面上非湍流的二次流。然而,由于 EHD 流具有复杂的随机性,关于其对电除尘器内部特性的影响作用,研究人员尚未达成一致的意见,一些研究人员甚至给出了相反的结论[9-10]。同时,大部分的研究集中在 EHD 流对气流形态和颗粒收集效率的直接关系上[11-13],对内部气动参数的定量分析较少,对于极间干扰现象也没有系统的研究,而这些研究对于深入了解 EHD 流的规律十分重要。

本文在已有研究基础上对 EHD 流进行数值研究,定量分析了 EHD 流对电除尘器内部速度分布、湍流强度、气流流线以及涡流特性的影响,并研究了多电极情况下,极间干扰下对电极附近气动特性的影响。

收稿日期:
基金项目:国家自然科学基金项目(51579224)
作者简介:周小颖(1991－),女,四川成都人,硕士研究生,主要从事流体机械方面的研究。
通信作者:窦华书,E-mail: huashudou@yahoo.com

1　数值计算方法

为了对电流体动力学流和极间干扰进行数值研究，需要对电场分布和气流场分布进行耦合计算。其中，电场控制方程为泊松方程和电流连续性方程，分别模拟电势分布和空间电荷密度分布；气场控制方程为不可压缩的 Navier-Stokes 方程，采用标准 k-ε 湍流模型来封闭方程组。通过对气流动量方程添加与电场库仑力有关的源项来表现 EHD 流。

1.1　电场模型

电场数值模型的建立基于以下假设：放电稳定，电场分布和空间电荷密度分布不随时间变化；带电离子电极单一，离子迁移率为常数。电场分布计算采用软件 FLUENT 14.5，通过编写用户自定义程序（user-defined function，UDF）嵌入软件的方式进行计算。电场分布的控制方程为电势泊松方程和电流连续性方程[14]：

泊松方程：

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_i}{\varepsilon_0} \tag{1}$$

$$\vec{E} = -\nabla V \tag{2}$$

电流连续性方程：

$$\nabla J = 0 \tag{3}$$

$$\vec{J} = \rho_i b \vec{E} \tag{4}$$

其中：V 为电压，V；ρ_i 为空间电荷密度，C/m^3；$\vec{E}$ 为电场强度，V/m；ε_0 为气体介电常数，8.85×10^{-12} C^2·N^{-1}·m^{-2}；$\vec{J}$ 为电流密度，A/m^2；b 为离子迁移率，1.6×10^{-4} m^2·V^{-1}·s^{-1}。

1.2　气流模型

EHD 流由荷电离子与气流的动量传递引起，本文通过对气流运动的动量方程添加源项来描述 EHD 流。气场分布由 FLUENT 14.5 计算，源项添加的方式为自主编程。气流运动的控制方程为雷诺平均的 Navier-Stokes 方程[15]：

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u}\cdot\nabla)\vec{u} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{\mu+\mu_t}{\rho}\nabla^2\vec{u} + \frac{\rho_i\vec{E}}{\rho} \tag{6}$$

其中：ρ 为气体密度，1.225 kg/m^3；u 为气流速度，m/s；μ 和 μ_t 分别为气体的动力粘性系数和湍流粘性系数，kg·m^{-1}·s^{-1}；p 为压力，Pa。$\rho_i\vec{E}/\rho$ 表示电场引起的附加质量力，即库仑力。

采用基于 Boussinesq 假设的标准 k-ε 湍流模型来封闭 Navier-Stokes 方程组，控制方程如下[15]：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon \tag{7}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{8}$$

其中：k 和 ε 分别为湍动能及其耗散率；G_k 和 G_b 为基于平均速度梯度、浮力产生的湍流动能；σ_k 和 σ_ε 分别是 k 和 ε 的湍流普朗特数；$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$、$C_{3\varepsilon}$、σ_k、σ_ε 及 G_μ 均为常数。湍流粘性系数由下式计算：

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{9}$$

2　结果与讨论

2.1　单电极电除尘器内 EHD 流的影响分析

2.1.1　几何模型与边界条件

为了研究单电极电除尘器内部 EHD 流对气动特性的影响，建立图 1 所示的几何模型。X、Y、Z 分别表示流向、收集壁面法向和沿放电极方向；原点坐标如图 1 所示；除尘器通道长度 L 为 0.5 m，入口宽和高（$W\times H$）为 0.1 m×0.1 m。放电极设置在通道中央，直径为 2 mm。网格划分采用 O 型网格，总网格数为 817600。

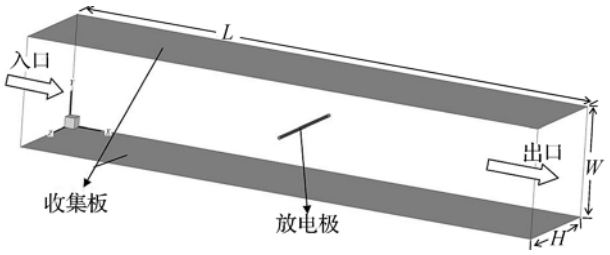


图 1　单电极电除尘器几何模型

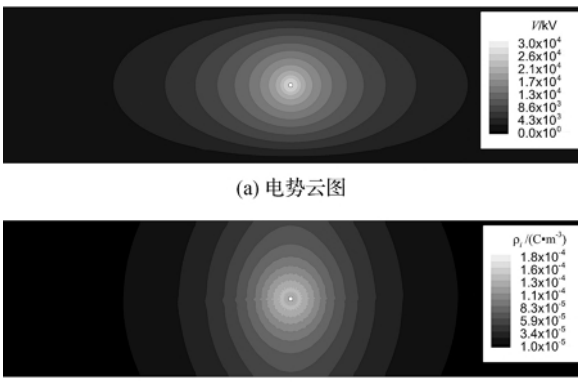
表 1 列出了完整的边界条件，设置数值与文献[10]一致。入口进气速度分别为 0、0.2、0.5、1.0 m/s，入口湍流强度设为 5%。

表 1　边界条件

边界	气场	电势	空间电荷密度
入口	速度入口	$\partial V/\partial n = 0$	$\partial \rho_i/\partial n = 0$
出口	自由出口	$\partial V/\partial n = 0$	$\partial \rho_i/\partial n = 0$
收集板	无滑移壁面	$V = 0$ kV	$\partial \rho_i/\partial n = 0$
绝缘壁面	无滑移壁面	$\partial V/\partial n = 0$	$\partial \rho_i/\partial n = 0$
放电极	无滑移壁面	$V = 30.0$ kV	$\rho_i = 108.0$ μC/m^3

2.1.2　计算结果分析

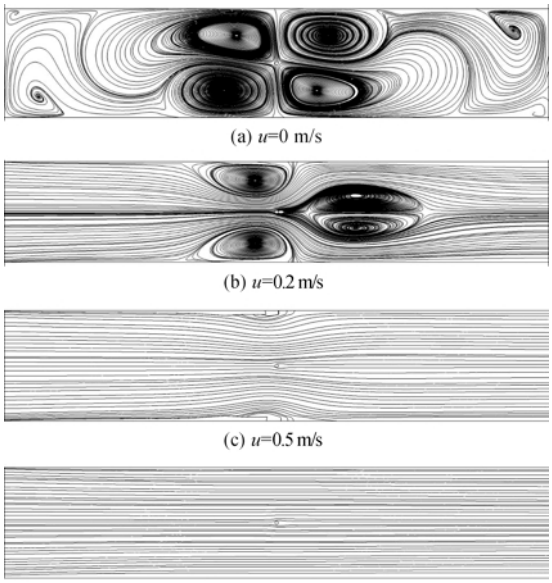
图 2 给出了 $Z = 0$ m 截面上的电势分布和空间电荷密度分布。可以看到，电势呈横向椭圆形分布，纵向梯度值大于横向梯度值，而空间电荷密度呈椭圆形分布，横向梯度值高于纵向梯度值。



(a) 电势云图

(b) 空间电荷密度云图

图 2 单电极除尘器中心截面电势云图与空间电荷密度云图



(a) u=0 m/s

(b) u=0.2 m/s

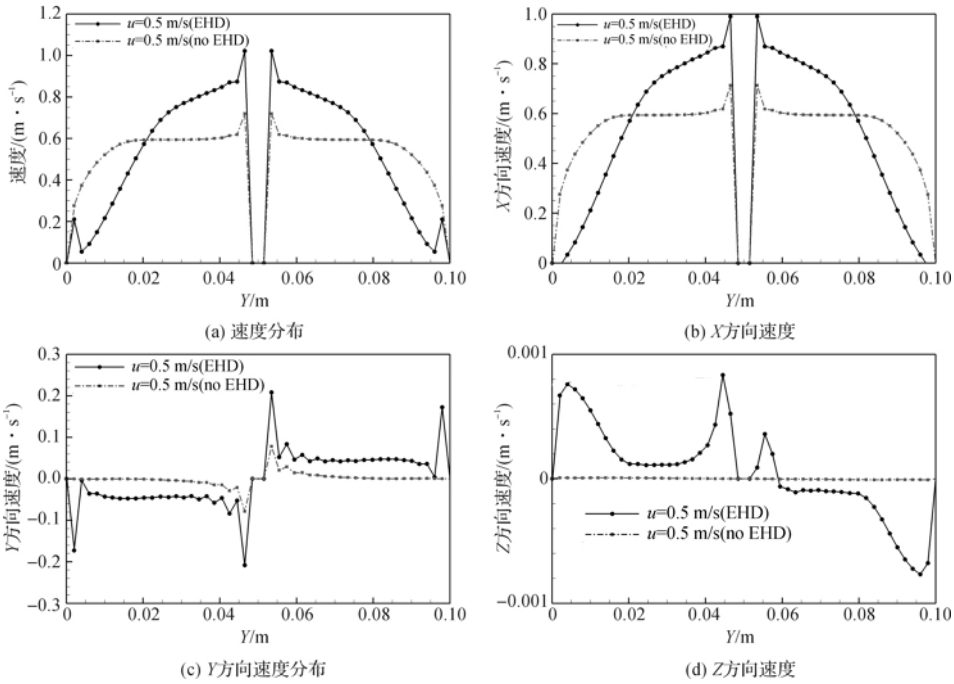
(c) u=0.5 m/s

(d) u=1.0 m/s

图 3 不同入口速度下中心横截面上的气流流线

图 3 给出了入口气流速度为 0、0.2、0.4、0.5、1.0 m/s 条件下，中心横截面上的流线图，流线形状与文献[10]计算一致。从图 3(a) 观察到，没有气流进入除尘器时，即 $u=0$ m/s 时，整个通道区域形成 4 个大涡，4 个大涡成中心对称分布，几乎占据整个通道区域，进出口处有回流产生。当入口气流速度增大到 0.2 m/s，涡的尺寸变小，上游涡向两边分散，下游涡向中心集中。当速度到达 0.5 m/s 时，下游的涡先消失，上游的涡粘附在收集壁面上。速度继续增大，涡完全消失。可以发现，随着速度的增加，上游涡的涡核向靠近收集板的方向移动，而下游涡的涡核朝靠近放电极的方向移动。

为定量观察内部流场特性，对放电极截面的中心线($Z=0$，$X=0.25$ m) 上的数据进行分析。图 4 给出了 $u=0.5$ m/s 时，有无 EHD 流情况下，气流场内各向速度、湍流强度、静压、湍流耗散率和 k 值增量的分布。由图 4(a) 可以发现，有 EHD 流时，放电极与收集板之间的速度梯度明显增大，放电极处的速度提高 50% 左右，近收集板处的速度降低，有速度波动。由图 4(c) 和(d) 看到，EHD 流使得 Y 方向和 Z 方向的速度提高，其中 Y 方向的速度有利于气流向收集壁面流动，Z 方向的速度决定涡的纵向方向。由图 4(e)—(g) 可以发现，EHD 能同时提高湍流耗散率和湍动能的生成，两者综合决定了 *EHD* 流对湍流强度的影响是增强还是减弱。此工况下 EHD 流对湍流强度有增强作用，特别是在收集板附近，湍流强度提高了 2 ～ 3 倍。此外，由图 4(h) 可以发现，近收集壁面处静压值几乎无变化，但放电极处静压降低，分布呈 V 型。



(a) 速度分布

(b) X方向速度

(c) Y方向速度分布

(d) Z方向速度

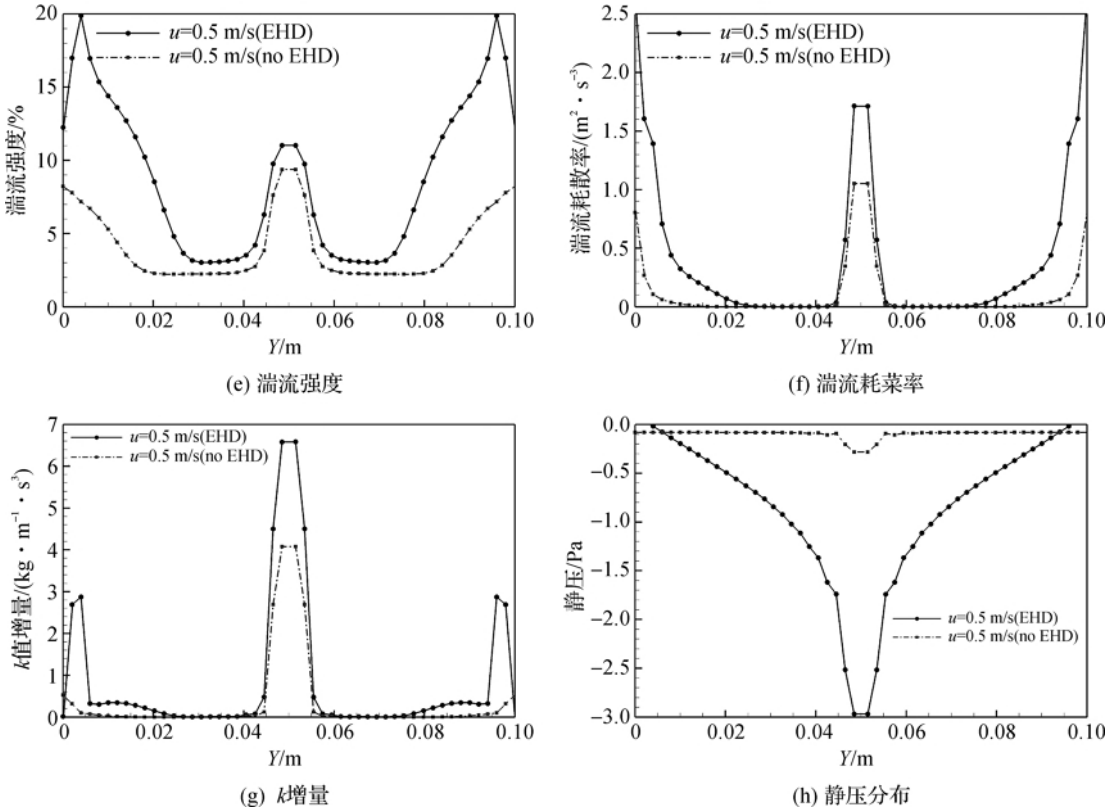


图 4　$u = 0.5$ m/s，放电极处截面的中心线（$Z = 0$ m，$X = 0.25$ m）上的速度分布、X 方向速度、Y 方向速度、Z 方向速度、湍流强度分布、湍流耗散率、k 增量分布、静压分布

2.2　多电极除尘器极间干扰研究

在图 1 所示的单电极干式电除尘器的几何模型基础上，建立相同入口面积、放电极直径、极间距、极-板间距的多电极干式电除尘器几何模型。出口与入口部分长度不变，保持 0.25 m，放电极数量增加到 3 个，通道总长度 L 为 0.7 m。

图 5 给出了三电极电除尘器 $Z = 0$ 横截面上电势与空间电荷密度分布云图（$X = -0.23 \sim 0.23$ m）。由图 5(a) 发现放电极周围椭圆形电势分布连成一片，两电极中点处电势最低。从放电极到收集板，电势在 Y 方向呈层状递减分布，靠近收集板处分层明显。由图 5(b) 发现放电极之间空间电荷密度分布呈相抵的状态，电极周围空间电荷密度的环状分布被压缩，椭圆分布横向直径减小，特别是第二个放电极，分布云图压缩明显。放电极连线的中点位置，空间电荷密度几乎为零。

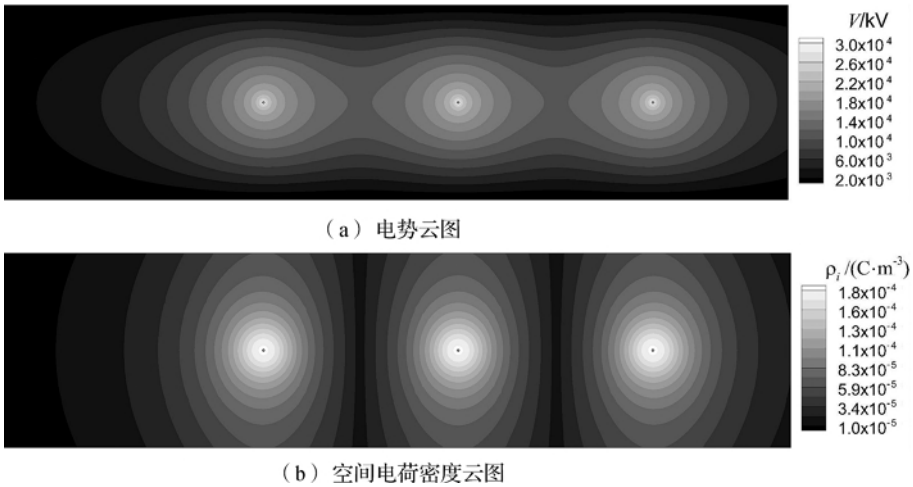


图 5　三电极电除尘器内部电势与空间电荷密度分布云图

图 6 给出了在 0.2、0.5、1.0 m/s 速度条件下，$Z=0$ 平面上的气体流线图（$X=-0.25\sim0.25$ m）。由图 6(a) 发现在低速情况下（$u=0.2$ m/s），每个电极上下游形成对称的四个涡。其中，上游涡比下游涡尺寸大，上游涡核靠近收集板，而下游涡核靠近放电极。在顺气流方向，对于电极上游的涡：涡尺寸越来越小，涡核越来越靠近收集板。对于电极下游的涡：第一个电极后的尺寸最大，第三个电极后次之，中间电极后的最小；第二个电极后的涡最靠近放电极，第三个次之，第一个最远。发现电极间的涡被压缩，形状更规则，接近圆形。由图 6(b) 可以看到，随着速度增加到 0.5 m/s，下游的涡先消失，上游的涡移动并附在收集板上。

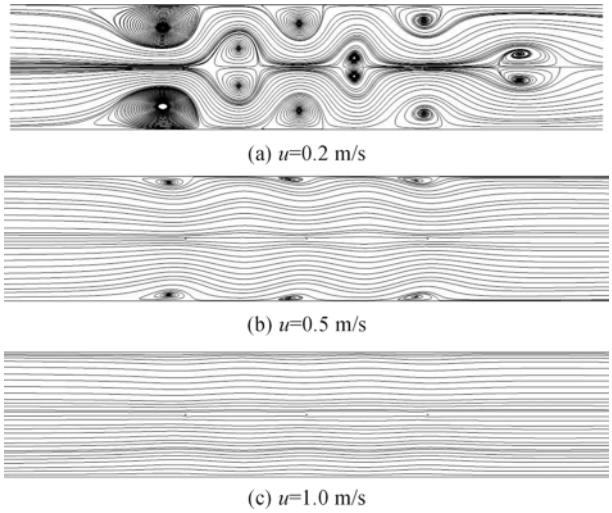


图 6 不同速度下 $Z=0$ m 平面上的气体流线

图 7 给出了 $u=0.5$ m/s 时，中心截面（$Z=0$ m）上的静压云图和速度云图。由图 7(a)，静压分布与电势分布相似，整体呈环状，近电极处静压分布为环形。由图 7(b) 观察到：速度分布在第二、三个电极处形成两个对称的环分布，中间电极的分布更规则，成蝶状；近收集板处形成六个低速区域，对应图 6(b) 中的涡区域。

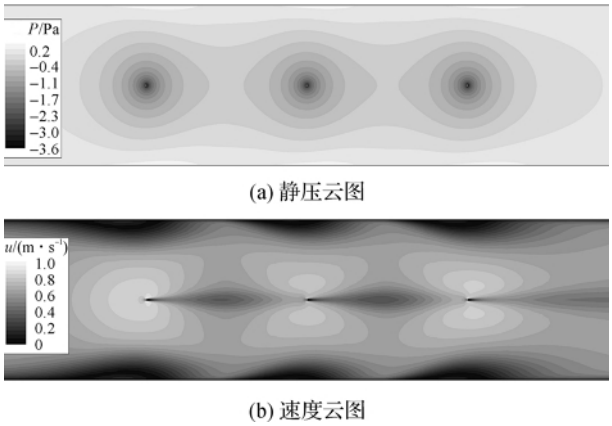


图 7 当 $u=0.5$ m/s 时三电极电除尘器 $Z=0$ 截面静压云图和速度云图

图 8 和图 9 分别给出了 0.5 m/s 时，有无 EHD 流条件下，截面 $X=-0.15$、-0.10、-0.05、0、0.05、0.10、0.15 m 上的速度云图。比较发现，EHD 流的存在使得速度整体提高，近收集板的低速区范围扩大。从图 8 可以观察到：电极之间近上下壁面处，形成了环状的低速区域，这在图 9 中没有发现；中间电极截面上，壁面法向方向速度梯度（$\partial u/\partial y$）更低。

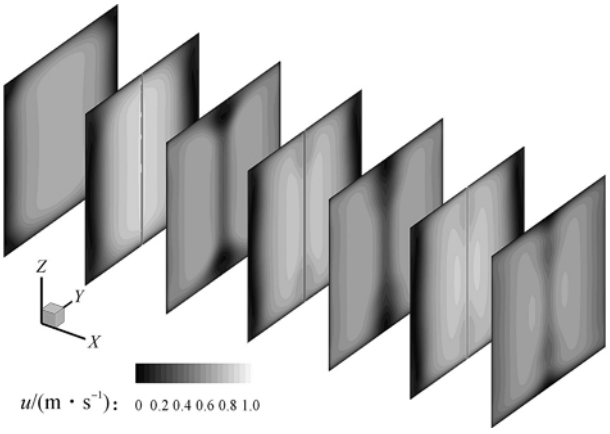


图 8 EHD 流下，$X=-0.15$、-0.10、-0.05、0、0.05、0.10、0.15 m 截面速度云图（$u=0.5$ m/s）

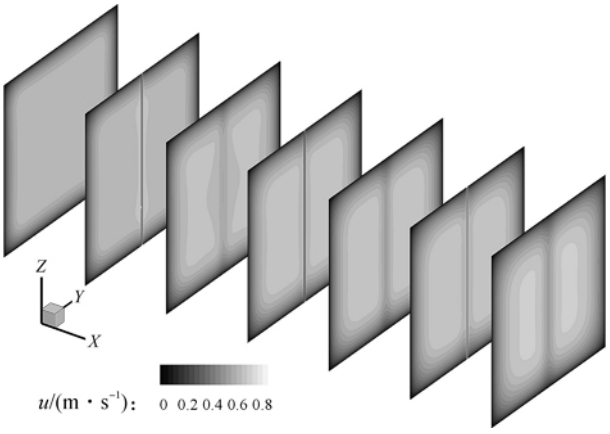


图 9 无 EHD 流下，$X=-0.15$、-0.10、-0.05、0、0.05、0.10、0.15 m 截面速度云图（$u=0.5$ m/s）

图 10 和图 11 分别给出了有 EHD 流情况下，上述 7 个截面的中心线（$Z=0$）上的速度分布和静压分布。从图 10 发现：EHD 流使得放电极附近的速度明显增大，收集板附近的速度明显减小；电极间截面上，中心部分速度下降，速度分布整体呈 M 形。从图 11 可以发现，在三个放电极截面上，静压分布呈弧线形，与图 4(h) 中单电极的情况一致。而在非放电极截面上，静压分布曲线有一个小幅度的下凹，受 EHD 流影响较小。

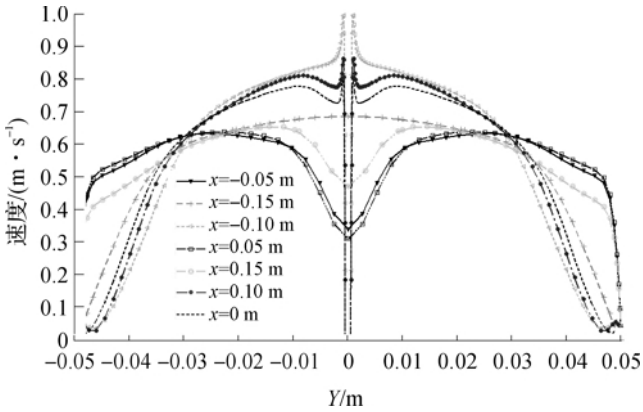


图 10　EHD 流下，$X=-0.15$、-0.10、-0.05、0、0.05、0.10、0.15 m 截面中心线($Z=0$)上的速度分布($u=0.5$ m/s)

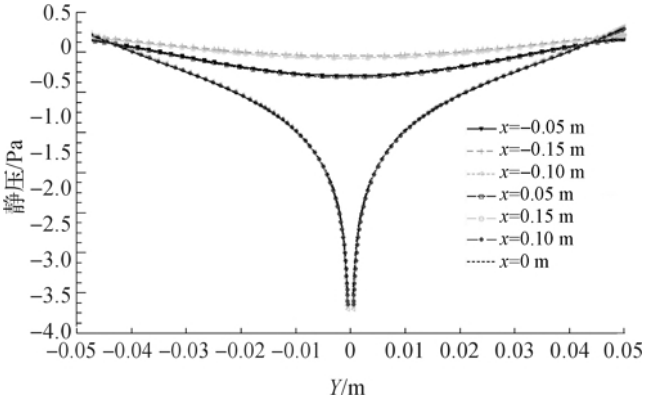


图 11　EHD 流下，$X=-0.15$、-0.10、-0.05、0、0.05、0.10、0.15 m 截面中心线($Z=0$)上的静压分布($u=0.5$ m/s)

为了直观分析速度分布不均匀情况，以及静压分布对于气流运动的直接影响，图 12 给出了在有 EHD 流下，上述 7 个截面上的流线图。从图 12(b)、(d)、(f)可以看到，前两个电极截面上的流线主要沿放电极表面向两边壁面法向方向，第三个电极截面上的流线则较为复杂。由图 12(c)、(e)发现，在电极间截面上，流线主要沿收集板壁面法向方向，且流线的起始点集中在截面的上下壁面处，对应图 8 中上下壁面处的低速区域。随着 X 的增大，截面流线越来越复杂，流线型越来越紊乱，但中间电极截面($X=0$ m)上，流线却非常规则：靠近上下壁面中心处形成两个小涡，流线水平地沿着放电极向收集板。综合图 5 和图 7 中的电场、速度、静压分布，中间电极受到前后电极压力、速度、电势的挤压，因此中间电极处涡形状规则，规模削弱，速度分布均匀。

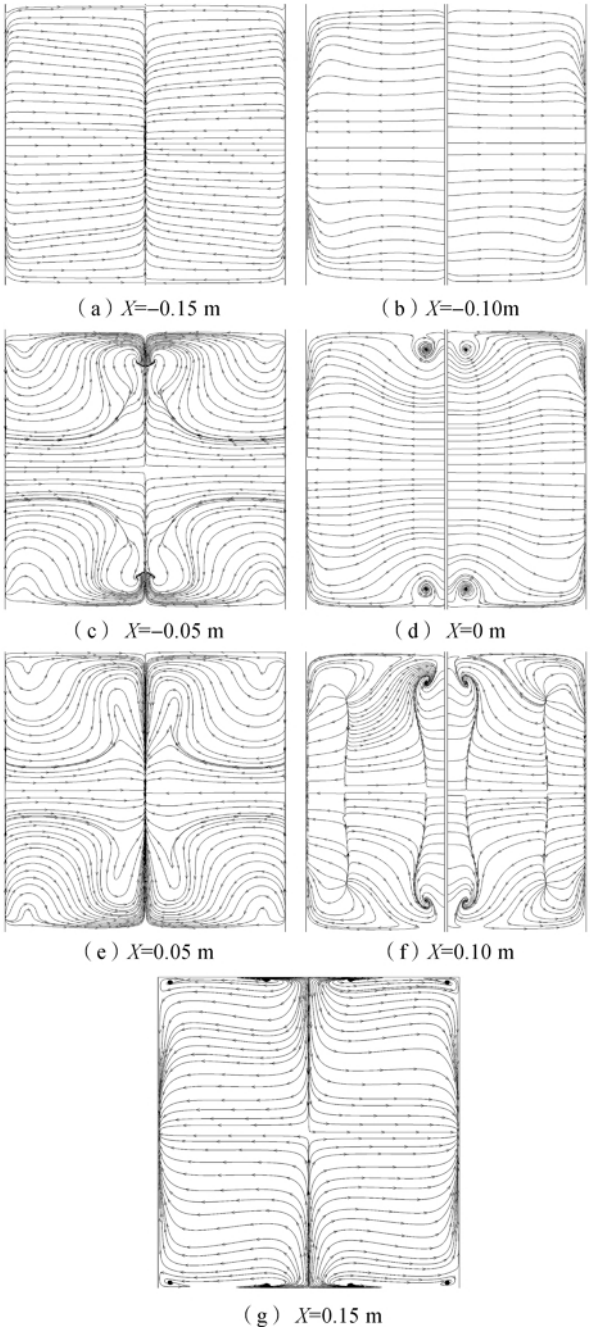


图 12　EHD 流下，$X=-0.15$、-0.10、-0.05、0、0.05、0.10、0.15 m 截面流线图($u=0.5$ m/s)

3　结　论

本文通过建立三维单电极和多电极电除尘器的几何与数值模型，对电除尘器内 EHD 流气动特性和极间干扰进了行分析，结论如下：

a)EHD 流使得放电极上下游形成对称的四个涡，随着来流速度的增大，涡的尺寸减小，上游的涡核逐渐向收集板靠拢直到附在壁面上，下游的涡核向通道中心移动直至消失，下游涡比上游的涡先消失。

b)EHD 流使靠近放电极处的速度增大,整体速度梯度提高,同时使两放电极连线中点处速度减小,沿 Y 方向呈“M”形。EHD 的存在同时提高了湍流耗散率和湍动能的生成,两者综合考虑可以判断 EHD 流对湍流的影响。此外,EHD 流使放电极截面上静压的水平分布变化为“V”形分布。

c)多电极电除尘器的电极间会产生极间干扰,电极周围电势的环形分布连成一片,而空间电荷密度分布区域被压缩,在两个放电极连线中点位置处,空间电荷密度几乎为零。同时,电极之间靠近上下壁面的位置,形成低速区。

d)在 EHD 流的影响下,中间电极受到前后电极的电场、速度、静压分布的影响,在前后电极的挤压作用下,中间电极处速度分布均匀,流线规则。同时,中间电极上下游涡的形状变得比较规则,但涡的区域变小。

参考文献:

[1] GUO B Y, YANG S Y, XING M, et al. Toward the development of an integrated multiscale model for electrostatic precipitation [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2013, 52(33): 11282-11293.

[2] LIU Q, ZHANG S S, CHEN J P. Numerical analysis of charged particle collection in wire-plate ESP [J]. Journal of Electrostatics, 2015, 74: 56-65.

[3] ADAMIAK K. Numerical models in simulating wire-plate electrostatic precipitators: a review [J]. Journal of Electrostatic, 2013, 71: 673-680.

[4] FARNOOSH N, ADAMIAK K, CASTLE G S P. Three-dimensional analysis of electrohydrodynamic flow in a spiked electrode-plate electrostatic precipitator [J]. Journal of Electrostatics, 2011, 69(5): 419-428.

[5] ZHAO L, ADAMIAK K. Effects of EHD and external air flows on electric corona discharge in pin-plate configuration [C]// 2005 IEEE Industry Applications Conference. Hong Kong: IAS, 2005: 2584-2589.

[6] PODLINSKI J, NIEWULIS A, MIZERACZYK J, et al. ESP performance for various dust densities [J]. Journal of Electrostatic, 2008, 66(5/6): 246-253

[7] CHANG J S, DEKOWSKI J, PODLINSKI J, et al. Electrohydrodynamic gas flow regime map in a wire-plate electrostatic precipitator [C]//2005 IEEE Industry Applications Conference. IEEE, 2005: 2597-2600.

[8] LEONARD G L, MITCHNERA M, SELF S A. An experimental study of the electrohydrodynamic flow in electrostatic precipitators [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 127: 123-140

[9] BOTTNER C U. The role of the space charge density in particulate processes in the example of the electrostatic precipitator [J]. Powder Technology, 2003, 135/136: 285-294.

[10] FARNOOSH N, ADAMIAK K, CASTLE G S P. 3-D numerical analysis of EHD turbulent flow and mono-disperse charged particle transport and collection in a wire-plate ESP [J]. Journal of Electrostatics, 2010, 68(6): 513-522.

[11] GAJBHIRA N, ESWARAN V, SAHA A K, et al. Numerical calculation of particle collection efficiency in an electrostatic precipitator [J]. Indian Academy of Sciences, 2015, 40(3): 863-873.

[12] AIT S H, NOURI H, ZEBBOUDJ Y. Effect of air flow on corona discharge in wire-to-plate electrostatic precipitator [J]. Journal of Electrostatics, 2015, 73: 19-25.

[13] NIEWULIS A, BERENDT A, PODLINSKI J, et al. Electrohydrodynamic flow patterns and collection efficiency in narrow wire-cylinder type electrostatic precipitator [J]. Journal of Electrostatics, 2013, 71(4): 808-814.

[14] CHUDINOV A V, MARTYNOVICH Y G, SULIMENKOV I V, et al. Study of electrospray ion mobility dependence on the ion bunch drift velocity in the radio frequency quadrupole [J]. Journal of Analytical Chemistry, 2014, 69(13): 1220-1228.

[15] WHITE F M. Viscous Fluid Flow [M]. Boston: McGraw Hill, Third Edition, 2006: 62-64.

Numerical Simulation Research on Electro-Hydrodynamics Flow and Interelectrode Interference of Electric Precipitator

ZHOU Xiaoying, *DOU Huashu*, *CHEN Xiaoping*
(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: 3D numerical model was established for internal flow of single-electrode and multi- electrode electric precipitators, and the effects of electro-hydrodynamics (EHD) flow and interelectrode interference on internal flow characteristics of electric precipitators were studied. Poisson's equation and electric current conservation equation were used to model the electric field, and the incompressible Navier-Stokes equation and standard k-ε model were employed to describe the electric field distribution. Gas flow and electric field were worked out through coulomb force coupling. It is found that EHD flow makes the electrode form two symmetrical vortexes. With the increase in airflow inlet velocity, the two vortex cores moves to opposite directions. The EHD flow influences the turbulent intensity by both increasing the turbulent dissipation and production turbulent kinetic energy. The result depends on the dominant function. The results show that electrodes will generate interelectrode interference. Due to the squeezing action of potential and space charge distribution in the middle electrode, vortex strength reduces significantly, and the structure is more regular.

Key words: electric precipitator; collection efficiency; electrohydrodynamics; electric field force

(责任编辑:康　锋)