

# 基于数值模拟的电袋复合除尘器入口流速和管道结构优化\*

郝欢 闫东杰<sup>#</sup> 张仕鼎 黄学敏 罗应博 高梦涵

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要** 利用计算流体力学(CFD)软件对电袋复合除尘器进行数值模拟,通过改变气流入口流速、调整电凝并区前水平管道长度和增设入口管道内导流板等方法进行优化。结果表明,气流入口流速对改善电袋复合除尘器的除尘效果影响不大,而入口管道增设导流板影响很大。当气流入口流速为 18.00 m/s、电凝并区前水平管道长度为 0.50 m、入口管道后一弯管处增设 3 块导流板时,电凝并区入口断面、电除尘区入口断面气流分布均匀,相对均方根分别为 0.17、0.14,涡流区域基本消失。

**关键词** 电袋复合除尘器 流速 管道结构 数值模拟 气流分布

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2017.12.012

**Optimization of the inlet velocity and pipe structure of electrostatic fabric integrated precipitator based on numerical simulation** HAO Huan, YAN Dongjie, ZHANG Shiding, HUANG Xuemin, LUO Yingbo, GAO Menghan. (College of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055)

**Abstract:** Optimization of the inlet velocity and pipe structure of electrostatic fabric integrated precipitator was numerically simulated by computational fluid dynamic (CFD) software through changing the inlet velocity, increasing the length before the electric coagulator, and adding flow deflectors in the last elbows of inlet pipe. Results showed that inlet velocity had little influence on the dust removal efficiency but adding flow deflectors had great influence. When the inlet velocity was 18.00 m/s, the length before the electric coagulator was 0.50 m, and 3 flow deflectors were added, the velocity distribution of both electric coagulator and electrostatic precipitator tended to be uniform. The mean square root were 0.17 and 0.14, respectively. Vortex was almost disappeared.

**Keywords:** electrostatic fabric integrated precipitator; velocity; pipe structure; numerical simulation; velocity distribution

近年来,雾霾天气频繁出现,大气颗粒物污染问题日益突出,研发新型除尘技术尤为重要。电袋复合除尘器作为新型除尘技术,将成为控制颗粒物的主要方法之一。电袋复合除尘器是一种基于电除尘和袋除尘两种成熟的除尘理论而提出的一种除尘技术,具有结构紧凑、除尘效率高、运行稳定、成本低等优势。影响电袋复合除尘器性能的因素很多<sup>[1]67</sup>,其中气流分布是关键因素之一,而入口管道的结构会直接影响烟尘在除尘器中的分布。特别是电袋复合除尘器管道结构中存在直角弯管,造成管道内电凝并区前存在严重积灰,使得电凝并器升压困难,除尘效果不佳。因此,研究电袋复合除尘器管道结构对改善气流分布具有重要意义<sup>[2-3]</sup>。

物理实验方法<sup>[4-5]</sup>与数值模拟方法<sup>[6-9]</sup>是研究除尘器管道内气流分布的主要方法。数值模拟方法具

有准确、快速、经济、可靠等诸多优点,随着计算机技术发展,其优势愈发明显。陶克轩等<sup>[10]</sup>采用数值模拟方法分析除尘器入口管道内气流分布不均的原因,并对入口管道结构做出相应改造,通过安装管道分配室、改变导流板、安装导灰板等措施达到灰量分布偏差由 19.00% 降到 7.00% 的效果。郑民等<sup>[11]</sup>采用数值模拟方法对中原冶炼厂袋式除尘器的入口管道进行优化设计,改造后除尘效果显著提升。齐晓娟等<sup>[12]404</sup>采用数值模拟方法分析电除尘器入口管道内气流分布情况,多次改变管道内导流板数量、位置和尺寸等参数,使得改造后管道内流速偏差降到±2.00% 以内,气流分布均匀。时培章等<sup>[13]</sup>采用数值模拟与实验相结合的方法对气流分布和管道结构进行研究,调整了入口管道喇叭内的气流分布板及导流板位置和尺寸、出口管道尺寸,使得除尘器内气流

第一作者:郝欢,女,1992年生,硕士研究生,研究方向为大气污染控制。<sup>#</sup>通讯作者。

\* 国家自然科学基金资助项目(No.51408455);陕西省教育厅科研计划项目(No.17JK0465)。

分布均匀性提高。GROVES 等<sup>[14]</sup>采用数值模拟方法对电除尘器入口管道内的气流分布进行研究,结果表明导流板的设置有利于改善管道内气流分布均匀性、降低烟道阻力。BHASKER<sup>[15]</sup>采用数值模拟方法,在除尘器入口管道中设置多块导流板,发现能有效改善气流分布的均匀性,同时发现导流板型式也会影响气流分布均匀性。

本研究利用计算流体动力学(CFD)软件对电袋复合除尘器内气流进行了数值模拟,通过增加除尘器气流入口流速,增加电凝并区前水平管道长度、入口管道内增设导流板的方法进行优化,研究结果对提高电袋复合除尘器除尘效率有一定指导意义。

## 1 电袋复合除尘器数值模拟

### 1.1 几何模型

本研究的电袋复合除尘器几何模型如图 1 所示。入口与出口管道直径相等为 0.41 m;电凝并区前水平管道长度为 0.21 m;电凝并区长 0.86 m、宽 0.60 m、高 0.50 m,有 2 个通道,其后有 5 根导流柱;电除尘区长 1.84 m、宽 1.56 m、高 1.92 m,有 3 个通道;布袋除尘区长 2.67 m、宽 1.56 m、高 2.35 m,共有 66 条布袋,其中 30 条长 1.90 m、36 条长 2.10 m。

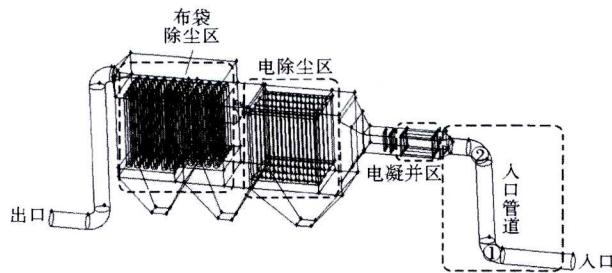


图 1 电袋复合除尘器几何模型

Fig.1 Geometry model of electrostatic fabric integrated precipitator

### 1.2 网格划分

由于几何模型尺寸较大可能导致局部扭曲度较大,为了使气流数值模拟结果接近实际状态,提高收敛稳定性,采用结构化和非结构化混合网格技术进行网格划分。其中导流板、气流分布板、电除尘器入口喇叭、布袋等局部区域选取四面体网格并进行加密处理;其余各部分选取六面体网格,同时采用节点松弛法进行光滑处理。

### 1.3 控制方程

假设气流为绝热、稳态、不可压缩的牛顿流体,在电袋复合除尘器内呈湍流状态。采用笛卡尔坐标系的三维 N-S 方程作为基本控制方程,包含连续性方

程、动量守恒方程和标准  $\kappa-\epsilon$  湍流模型方程。利用有限体积法离散控制方程,其中扩散项采用中心差分,非线性的对流项采用二阶迎风格式,用压力-速度耦合的 SIMPLE 算法求解离散后的方程<sup>[16]</sup>。

### 1.4 边界条件与参数设置

(1) 进口设在除尘器管道入口,采用速度进口边界条件,气流均匀法向流入。

(2) 出口设在除尘器管道出口,采用压力出口边界条件。

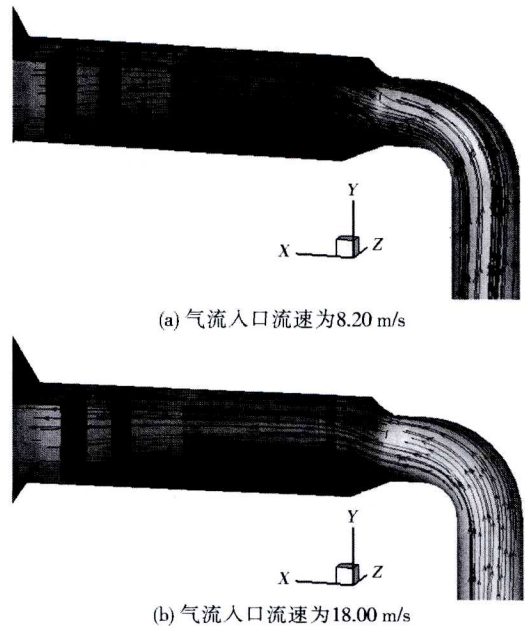
(3) 气流分布板采用多孔介质模型,孔隙率为 0.45;滤袋采用多孔介质阶跃模型。

(4) 导流板及管道壁面采用无滑移边界条件。

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 改变气流入口流速前后的数值模拟结果

采用数值模拟方法研究气流入口流速分别为 8.20、18.00 m/s 时电凝并区内流线及其入口断面的流速等值线,分别见图 2 和图 3。

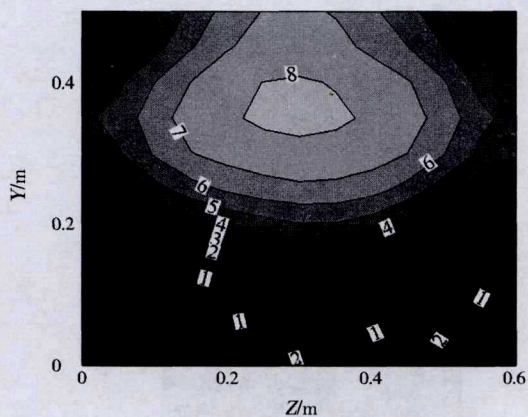


注: X、Y、Z 为空间坐标系,方向如图所示,下同,对于不同区域绘图时坐标原点视具体情况确定。

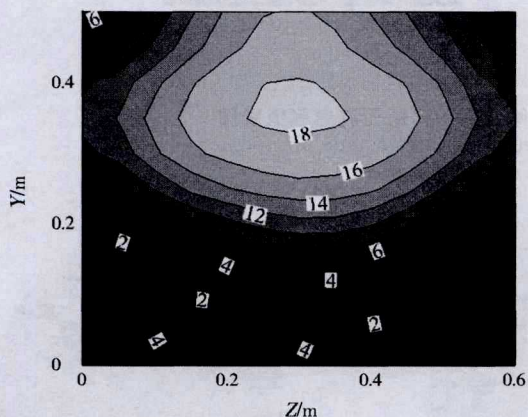
图 2 不同气流入口流速下的电凝并区内流线图

Fig.2 Flow track in the electric coagulator under different inlet velocity

从图 2(a)可以看出,当气流入口流速为 8.20 m/s 时,电凝并区管道内存在严重的涡流现象,流动阻力较大,且流线分布不均匀,管道下部气流发生偏向。从图 3(a)来看,电凝并区入口断面中心部位流速最大,从中心向四周呈递减趋势,且上部大于下部,造成下部边界层分离、管道积灰。



(a) 气流入口流速为8.20 m/s



(b) 气流入口流速为18.00 m/s

注:图中等值线上标记的数值为流速,单位为m/s,下同。

图3 不同气流入口流速下的电凝并区入口断面流速等值线图

Fig.3 Velocity distribution at the inlet section of the electric coagulator under different inlet velocity

从图 2(b)可见,增加气流入口流速至 18.00 m/s,管道内涡流现象有所改善,但效果不佳,说明除尘器入口管道流速不是改善管道涡流现象的主要影响因素。比较图 3(a)和图 3(b)发现,气流入口流速增至 18.00 m/s,下部的流速虽有所增加,但并无太大差别。这说明仅改变气流入口流速对改善电袋复合除尘器的除尘效果影响不大。因此,也不再考察其他区域的数值模拟情况,下面的模拟中气流入口流速设定为 18.00 m/s。

### 2.2 改造电凝并区前水平管道长度前后的数值模拟结果

采用数值模拟方法比较了电凝并区前水平管道长度分别为 0.21、0.50 m 时电凝并区内流线图、电凝并区入口断面流速等值线图 and 电除尘区入口断面流速等值线图。

电凝并区前水平管道长度为 0.21 m 时,电凝并区内流线图及其入口断面的流速等值线图分别同图 2(b)和图 3(b)。前已述及,涡流现象比较严重,这

与电凝并区前水平管道长度小有关,气流没有缓冲至均匀状态而直接进入电凝并区,在管径突然扩大时管壁与管中心部位速度差较大产生涡流,进而影响除尘器工作特性<sup>[12]407</sup>。

增加电凝并区前水平管道长度至 0.50 m,电凝并区内流线及其入口断面的流速等值线分别如图 4 和图 5 所示,可见涡流区域已明显缩小,说明下部区域流动阻力减小,气流分布趋于均匀,烟尘随气流动,积灰减少,除尘效率提高。

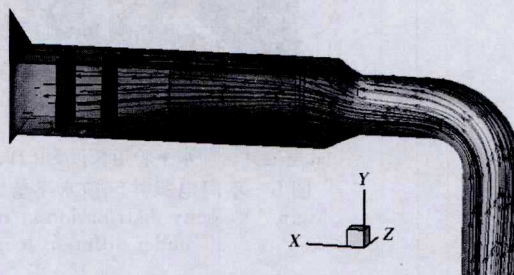


图4 电凝并区前水平管道长度为 0.50 m 时电凝并区内流线图

Fig.4 Flow track in the electric coagulator under the length before the electric coagulator of 0.50 m

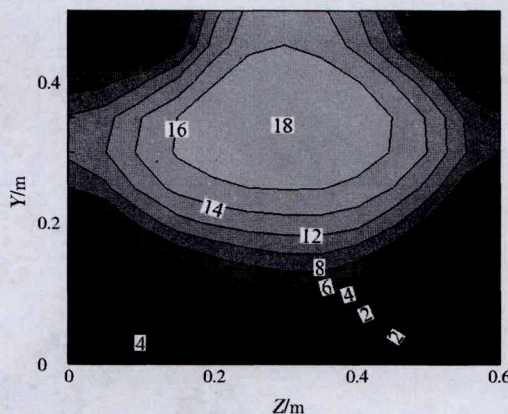


图5 电凝并区前水平管道长度为 0.50 m 时电凝并区入口断面流速等值线图

Fig.5 Velocity distribution at the inlet section of the electric coagulator under the length before the electric coagulator of 0.50 m

进一步分析电凝并区前水平管道长度分别为 0.21、0.50 m 时电除尘区入口断面的流速等值线(见图 6)发现,电凝并区前水平管道长度为 0.21 m 时,电除尘区入口断面气流分布均匀性差,相对均方根较大,严重影响除尘效率;增加电凝并区前水平管道长度至 0.50 m,气流分布均匀性明显变好,相对均方根为 0.24,刚好达到除尘器气流均匀分布评价标准的合格值<sup>[1]327</sup>,入口管道内增设导流板可能可以进一步改善除尘器内的气流流动状态。

### 2.3 入口管道内增设导流板前后的数值模拟结果

为使气流分布更加均匀,在气流入口流速为

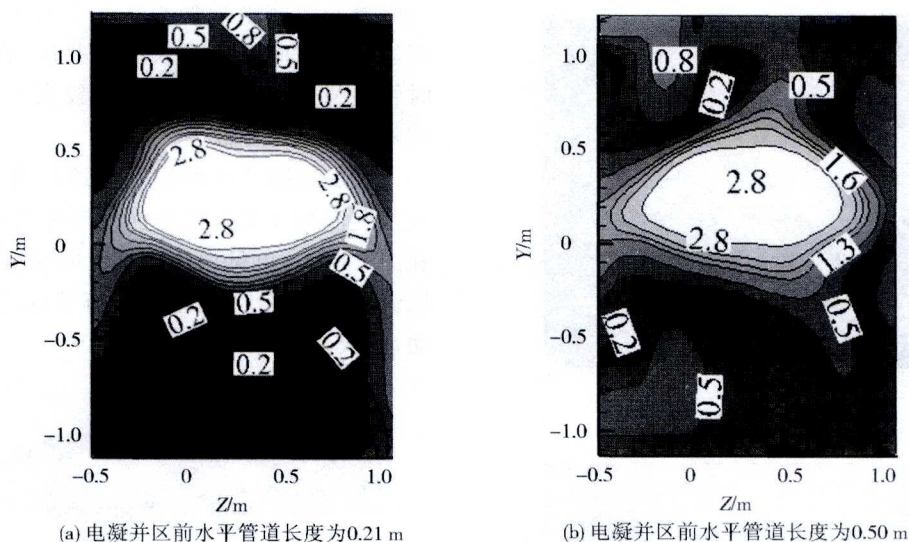


图 6 不同电凝并区前水平管道长度下的电除尘区入口断面流速等值线图  
 Fig.6 Velocity distribution at the inlet section of the electrostatic precipitator under different length before the electric coagulator

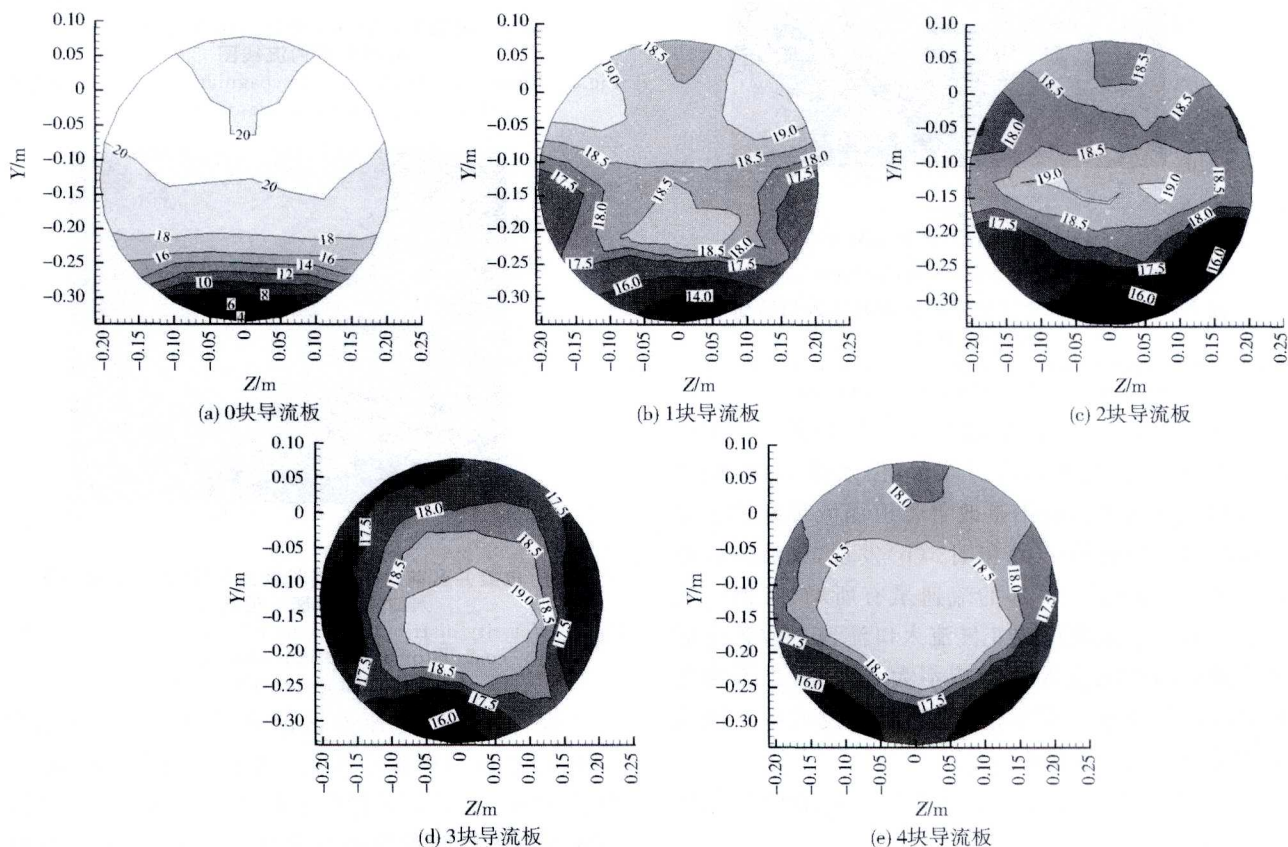


图 7 增设不同导流板数量下的电凝并区前水平管道入口断面流速等值线图  
 Fig.7 Velocity distribution at the inlet section of the pipe before the electric coagulator under different number of flow deflectors

18.00 m/s、电凝并区前水平管道长度为 0.50 m 的情况下，在入口管道第②个弯管处增设导流板，增设多块导流板时，按照管道设计要求等间距设置<sup>[17]</sup>。因为增加导流板对气流的影响在电凝并区前就很大，因此考察了电凝并区前水平管道入口

断面的流速等值线图。从图 7 可以看出，0 块导流板时，气流分布不均，与气流入口流速的最大偏差达 66.67%；设置 1 块导流板时，气流分布趋于均匀，与气流入口流速的最大偏差缩小到 33.33%；当导流板数量增至 3 块时，气流分布已基本均匀，

整个截面的流速基本与气流入口流速 18.00 m/s 相差不大,平均偏差小于 0.60%,相对均方根为 0.06;而设置 4 块导流板时,相对均方根为 0.08,较设置 3 块导流板时仅略有增加,没有必要。由此说明,增设导流板有利于管道内气流分布均匀<sup>[18-19]</sup>。最终确定设置 3 块导流板。

图 8 为气流入口流速为 18.00 m/s、电凝并区前水平管道长度为 0.50 m、入口管道第②个弯管处增设 3 块导流板后的电凝并区入口断面流速等值线图,与 0 块导流板(见图 5)时相比,电凝并区入口断面涡流区域消失,气流分布均匀,相对均方根为 0.17。同时,增设 3 块导流板后的电除尘区入口断面流速等值线图(见图 9)与 0 块导流板时(见图 6(b))相比,气流分布均匀性也明显改善,相对均方根为 0.14。

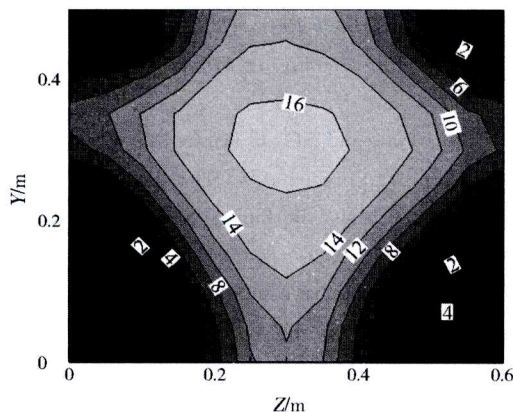


图 8 增设 3 块导流板后电凝并区入口断面流速等值线图  
Fig.8 Velocity distribution at the inlet section of the electric coagulator after adding 3 flow deflectors

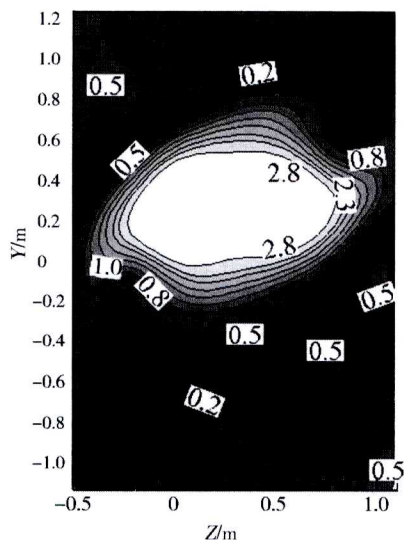


图 9 增设 3 块导流板后电除尘区入口断面流速等值线图  
Fig.9 Velocity distribution at the inlet section of the electrostatic precipitator after adding 3 flow deflectors

### 3 结 论

数值模拟结果显示,气流入口流速对改善电袋复合除尘器的除尘效果影响不大,而在入口管道第②个弯管处增设导流板影响很大。模型优化的结果为气流入口流速 18.00 m/s、电凝并区前水平管道长度 0.50 m、入口管道第②个弯管处增设 3 块导流板,此时电凝并区入口断面与电除尘区入口断面的气流分布均匀,相对均方根分别为 0.17、0.14,涡流区域基本消失。

### 参考文献:

- [1] WHITE H J.工业电除尘[M].王成汉,译.北京:冶金工业出版社,1984.
- [2] 闫东杰,玉亚,黄学敏,等.双室电除尘器流量分配数值计算[J].环境工程学报,2016,10(7):3722-3726.
- [3] 郭伶俐.气流分布试验研究[R].张家口:宣化冶金环保设备制造(安装)有限责任公司,2011.
- [4] 于兴鲁.电袋复合除尘特性的实验及三维模拟[D].广州:华南理工大学,2013.
- [5] LIU Z B, LI Z X, HOU G C, et al. Experimental research for high concentration ESP gas flow distribution[J]. Fundamental of Chemical Engineering, 2011, 233(10): 848-853.
- [6] 陈杰,陈剑佩,章嵩松.电除尘器烟道内气流分布的数值模拟[J].华东理工大学学报(自然科学版),2013,39(4):383-389.
- [7] 党小庆,闫东杰,马广大.大型电除尘器气流分布数值计算的研究和应用[J].重型机械,2007(1):26-29.
- [8] GHAZIAN O, ADAMI AK K, CASTLE G S P. Numerical simulation of electrically deformed droplets less conductive than ambient fluid[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2013, 423: 27-34.
- [9] 李庆,杨振亚,甘罕,等.静电除尘器烟道进口处流场的数值模拟[J].环境污染与防治,2012,34(1):1-4.
- [10] 陶克轩,常毅君,张波,等.电厂除尘器入口烟道数值模拟及改造[J].热力发电,2011,40(1):52-54.
- [11] 郑民,轩慎英.除尘器的改造及管道优化[J].机电与自动控制,2010,31(8):32-34.
- [12] 齐晓娟,李凤瑞,周晓耘.电除尘器进口矩形烟道气流分布改进的 CFD 模拟[J].环境工程学报,2011,5(2).
- [13] 时培章,贺桂林.电除尘器气流分布改造模拟实验研究[J].华北电力技术,2014,36(10):36-47.
- [14] GROVES J F, SMITH C R. Gas-flow distribution effects in electrostatic precipitators[J]. Journal of Electrostatics, 1980, 8(4): 343-353.
- [15] BHASKER C. Flow simulation in Electro-Static-Precipitator (ESP) ducts with turning vanes[J]. Advances in Engineering Software, 2011, 42(7): 501-512.
- [16] 闫东杰,党小庆,黄学敏,等.电除尘器气流分布试验研究和数值模拟[J].环境工程学报,2008,2(3):383-386.
- [17] DL/T 5121-2000,火力发电厂烟风煤粉管道设计技术规程[S].
- [18] 李立峰.CFD 技术在电除尘器烟道流场优化中的应用[J].电力科技与环保,2016,32(6):23-26.
- [19] 吴舒星,张凯,周炜,等.CFD 仿真的湿式除尘器流场均匀性的优化设计[J].中国计量大学学报,2016,27(3):301-305.