

湿式电除尘器系统流场数值模拟分析

李立锋 叶兴联 杨 丁

(福建龙净环保股份有限公司实验研究中心,龙岩 364000)

摘要 为了应对越来越严格的粉尘排放标准及 $PM_{2.5}$ 的去除要求,湿式电除尘器越来越广泛应用于大气污染治理行业。湿式电除尘器内的流场分布对其性能有着非常重要的影响,为了研究湿式电除尘器内流场分布,以龙净环保为某电厂设计的湿式电除尘器为例,采用 FLUENT 软件对湿式电除尘器烟道及内部流场进行模拟分析,并对流场进行优化,最终的优化方案达到湿式电除尘器流场的相关设计要求,为湿式电除尘器的设计提供参考。

关键词 湿式电除尘器 数值模拟 流场优化 阻力

中图分类号 X511 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2015)10-4959-06

Numerical simulation and analysis for flow of W-ESP system

Li Lifeng Ye Xinglian Yang Ding

(Fujian Longking Co., Ltd, Longyan 364000, China)

Abstract In response to increasingly stringent emission standards and $PM_{2.5}$ dust removal requirements, the wet electrostatic precipitator is more and more widely used in the air pollution control industry. Flow field distribution of the W-ESP has a very important impact on its performance. In order to study the flow field distribution, taking the W-ESP which is designed for a power plant by Longking as an example, the flow field in the duct and W-ESP was modeled, analyzed and optimized using FLUENT software. The final optimum proposal meets the relevant design requirements of the W-ESP flow field and provides a design reference for the W-ESP.

Key words W-ESP; numerical simulation; flow optimizing; resistance(pressure drop)

当前,我国环境状况总体恶化的趋势尚未得到根本遏制,环境矛盾日益凸显,环保压力持续加大。部分区域和城市大气雾霾现象突出,许多地区主要污染物排放量超过环境容量。基于我国严峻的环境形式,国家出台的新标准对污染物排放提出更高的要求,对环境质量提出了新的要求。《火电厂大气污染物排放标准(GB13223-2011)》规定一般地区粉尘排放限值 30 mg/m^3 ,重点地区 20 mg/m^3 ;新修订的《环境空气质量标准(GB3095-2012)》将 $PM_{2.5}$ 纳入强制监测范畴。所以各地政府也出台多项措施来大力治理 $PM_{2.5}$,改善空气质量。

湿式电除尘器作为一种先进的烟气治理技术,在满足超低排放、治理 $PM_{2.5}$ 方面有明显效果,并得到业内专家一致认可,环保部在《环境空气细颗粒物污染综合防治技术政策》中明确指出:鼓励火电机组和大型燃煤锅炉采用湿式电除尘等新技术。

研究表明,湿式电除尘器的除尘效率不是取决于粉尘的湿润性,而是取决于所有达到液滴表面或

者进入并穿过液滴,或者粘附在液滴表面的尘粒数量,而气流分布和水雾状态对液滴与粉尘颗粒的接触有重要影响^[1,2]。因此,对于湿式电除尘器,特别是单电场湿式电除尘器,电场内的气流均匀性对湿式除尘器的除尘效率有直接影响。本研究以龙净环保为某电厂设计的湿式电除尘器为例,采用 CFD 数值模拟方法研究优化湿式电除尘器流场,并提出优化方案,为湿式电除尘器的设计提供参考依据。

1 湿式电除尘器结构

湿式电除尘器主要用于微细粉尘的收集,可使粉尘排放浓度达到 5 mg/m^3 以下,其基本结构包括:进出口烟箱、壳体、阴极系统、阳极系统、灰斗及喷淋和水收集系统等(如图1所示)。

资助项目:国家“863”高技术研究发展计划项目(2013AA065004)

收稿日期:2015-04-14;修订日期:2015-05-30

作者简介:李立锋(1980—),男,硕士,工程师,主要从事大气污染防治技术方面的研究。E-mail: lilifeng116@163.com

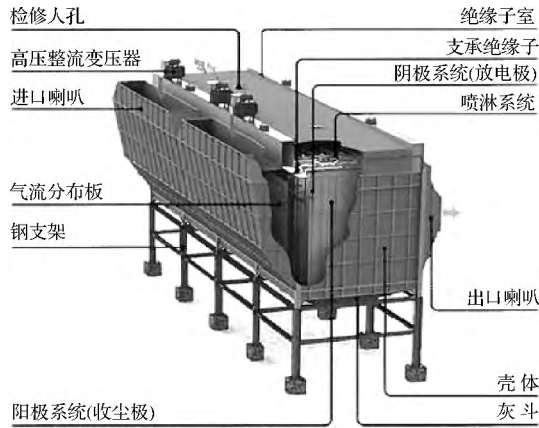


图1 湿式电除尘器结构示意图
Fig.1 Structural sketch of W-ESP

2 CFD 简介及数学模型

计算流体力学(CFD)是建立在经典流体力学与数值计算方法基础之上的一门独立学科,兼有理论性和实践性的双重特点,通过计算机数值计算和图像显示,在时间和空间上定量描述流场的数值解,并以此预测流体运动规律。其过程包括建立几何模型、划分网格、定义边界条件、确定计算模型、计算求解和后处理,如图2所示。

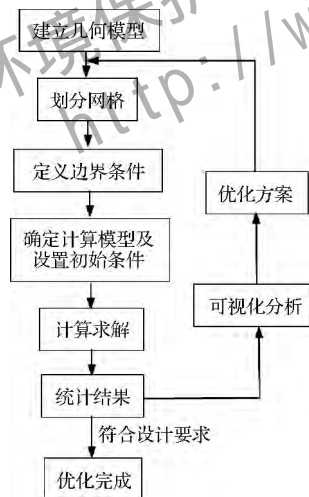


图2 数值模拟优化流程图
Fig.2 Flow chart of simulation and optimization

进行数值计算时,正确选择数学模型是一个非常重要的步骤,本项目中选用如下数学模型^[3,4]:

连续性方程(质量守恒方程):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) + S_i \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度, u_i 、 u_j 为空气速度, μ 为空气的粘性, p 为压力, S_i 为源项。

湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型,湍动能方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

扩散方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (4)$$

式中: G_k 为层流速度梯度而产生的湍流动能; G_b 为浮力产生的湍流动能; Y_M 为可压缩湍流中的脉动扩张; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 为常量; σ_k 和 σ_ϵ 为 Prandtl 数; S_k 和 S_ϵ 为自定义源项。

除雾器简化为多孔介质模型,其压降方程为:

$$\Delta P = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \Delta m \quad (5)$$

式中: α 为渗透因子; C_2 为内部阻力因子; Δm 为多孔介质厚度。

3 湿式电除尘器的 CFD 模拟分析

3.1 几何模型及网格划分

根据湿式电除尘器的设计结构,建立数值模拟几何模型,模拟范围从吸收塔出口到净烟道总管进口,包括吸收塔出口、进出口烟道、进出口喇叭、壳体和灰斗等,如图3和4所示。几何模型建立后,对其计算空间进行离散,即网格划分,网格如图5所示。

3.2 边界条件设置^[5-45]

(1) 进口边界条件

进口边界采用 Velocity-inlet,假设进口断面气流均匀分布,方向与进口断面垂直。

(2) 出口边界条件

出口采用充分发展的自由流动边界 Outflow。

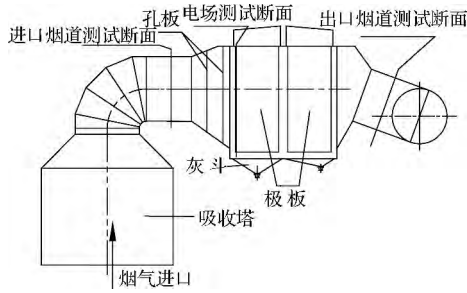


图 3 湿式电除尘器系统布置

Fig. 3 Wet-ESP system arrangement

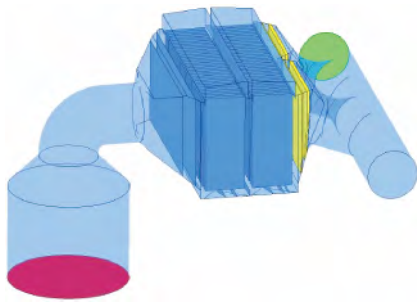


图 4 湿式电除尘器几何模型图

Fig. 4 Geometry of W-ESP



图 5 几何模型网格划分

Fig. 5 Mesh of W-ESP

(3) 孔板设置

限于计算机的能力,孔板直接建模计算,因此,孔板采用多孔跳跃边界,参数根据不同的开孔率进行计算得到。

(4) 除雾器设置

除雾器采用多孔介质边界,参数根据运行阻力计算得到。

(5) 壁面边界

固体壁面、阻流板、极板等均采用无滑移壁面 (wall) 边界。

3.3 评判标准

对电除尘器流场的评判,采用相对均方根差,公式如下:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i - \bar{v}}{\bar{v}} \right)^2}{n - 1}} \quad (6)$$

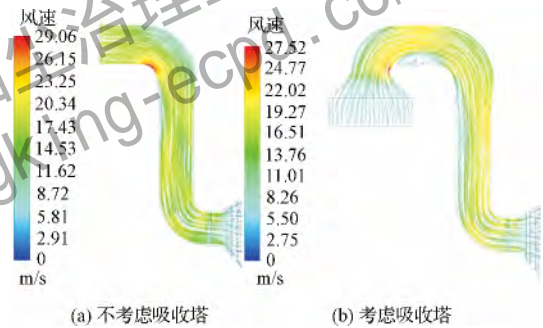
式中: σ_r 为气流分布相对均方根差; v_i 为测点风速, m/s; \bar{v} 为平均风速, m/s; n 为截面测点数。

本台湿式电除尘器电场断面气流分布均匀性要求为: $\sigma_r \leq 0.2$ 。

3.4 模拟结果及分析

3.4.1 吸收塔的影响

图 6 所示为在模拟时未考虑吸收塔和考虑吸收塔时进口烟道流场分布,从图中可以看出,烟气在吸收塔出口处的分布不均匀,在弯头下游存在涡流,涡流是产生阻力的一个重要因素,所以在进行模拟分析时,吸收塔不能忽略。



(a) 不考虑吸收塔 (b) 考虑吸收塔

图 6 进口烟道流线图

Fig. 6 Streamline of inlet duct

3.4.2 系统阻力模拟优化

本项目湿式电除尘器有两种布置方式,如图 7 所示,对这两种布置方式的系统阻力进行了模拟分析,结果如表 1 和图 8、9 所示,在进行统计时,为了便于比较,将位置 1 处的压力设为 0。结果显示:模拟位置对系统阻力有明显的影响,即在模拟时考虑吸收塔会更实际;低位布置时不仅进出口烟道阻力高,由于流场分布均匀性较差,其本体阻力也较大;除尘器高位布置则有明显改善,因此,最终采用高位布置方式。

安装完成后,对本项目湿式电除尘器进行了现场测试,本体阻力为 296 Pa,而模拟得到的本体阻力

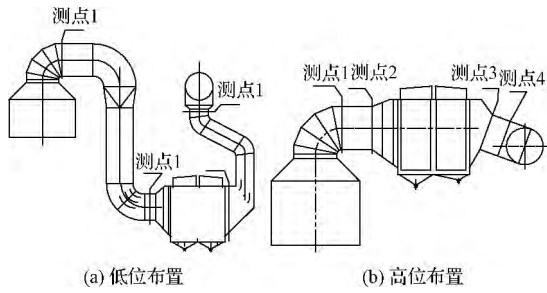


图7 湿式电除尘器布置方式

Fig.7 Arrangement form of W-ESP

为 302 Pa ,两者吻合性很好 ,说明模拟中所采用的模型合理准确。

表1 系统各部分阻力统计表

Table 1 Pressure drop of system (Pa)

		进口烟道	本体	出口烟道	总阻力
低位布置	无吸收塔	106	394	82	582
	有吸收塔	167	394	82	643
高位布置	42	302	39	382	

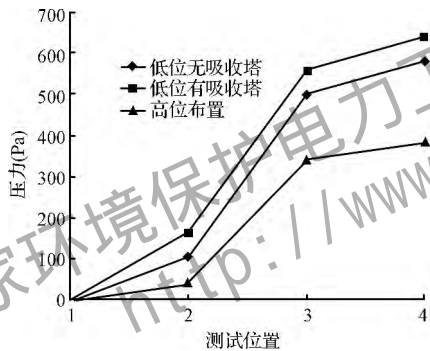


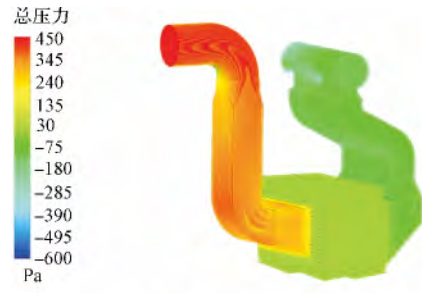
图8 不同布置方式压力分布图

Fig.8 Pressure distribution for different arrangements of W-ESP

3.4.3 气流分布模拟优化

本台湿式电除尘器进口烟道流场模拟结果如图 10 所示。从图中可以看出 ,在脱硫吸收塔出口弯头后存在涡流 ,此涡流会增加进口烟道的阻力 ,虽然此处为圆管道 ,但还是建议在吸收塔出口处设置导流板。

对湿式电除尘器电场内部的优化 ,采用在电场及灰斗内设置阻流板 ,并调整进口喇叭内孔板开孔率的方法进行 ,阻流板设置及孔板开孔率布置如图 11 ~ 13 所示。



(a) 低位无吸收塔



(b) 低位有吸收塔



(c) 高位布置

图9 系统阻力云图

Fig.9 Contour of system pressure drop

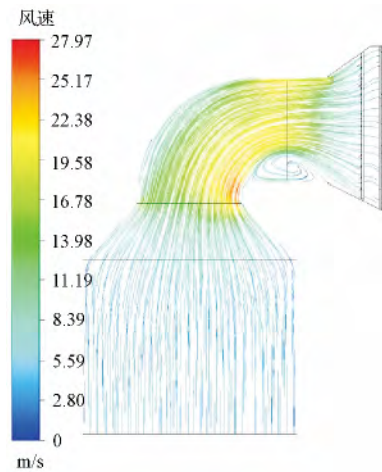


图10 进口烟道流场流线图(主视图)

Fig.10 Streamline of inlet duct(front view)

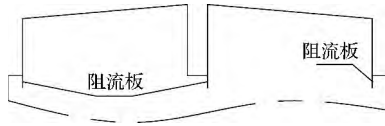


图 11 顶梁阻流板
Fig. 11 Spoilers of top beam

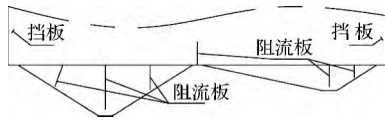


图 12 灰斗阻流板
Fig. 12 Spoilers in hopper

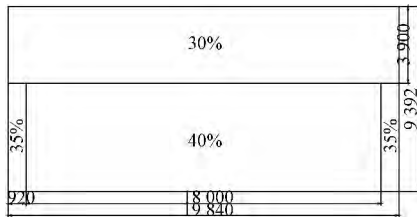


图 13 第二层孔板开孔率布置
Fig. 13 Porosity arrangement of secondary perforated plate

图 14 和 15 为湿式电除尘器内部流场,从图中可以看出,在湿式电除尘器内部,尤其是顶梁及灰斗中有涡流存在,这对湿式电除尘器性能不利,而且还会产生烟气带水问题,因此在除尘器内及灰斗中设置阻流板,虽然还有气流,但其流速明显降低,其流速均在 1 m/s 以下。

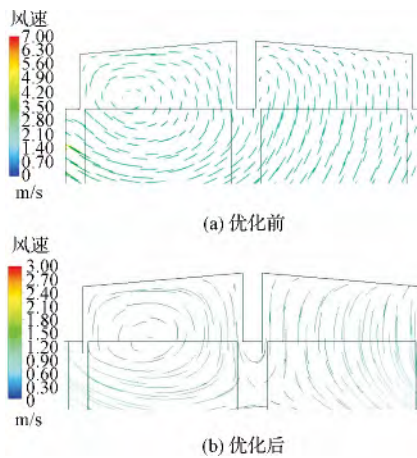


图 14 顶梁流场分布
Fig. 14 Flow distribution of top beam

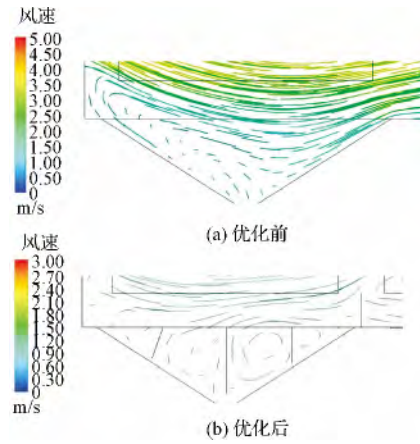


图 15 灰斗中流场分布
Fig. 15 Flow distribution of hopper

湿式电除尘器电场断面气流分布均匀性的模拟结果和测试结果如图 16 所示,其中(a)为优化前电场断面气流分布云图,流场均匀性很差,均方根差值达到 0.433; (b)为经过对孔板开孔率的调整优化后气流分布云图,流场均匀性有了明显改善,均方根差值为 0.172; (c)为现场测试结果的气流分布云图,均匀性很好,气流分布均方根差值为 0.167。结果显示,优化后模拟结果与实验结果均可达到设计要求,而且模拟结果与实验结果吻合性良好。

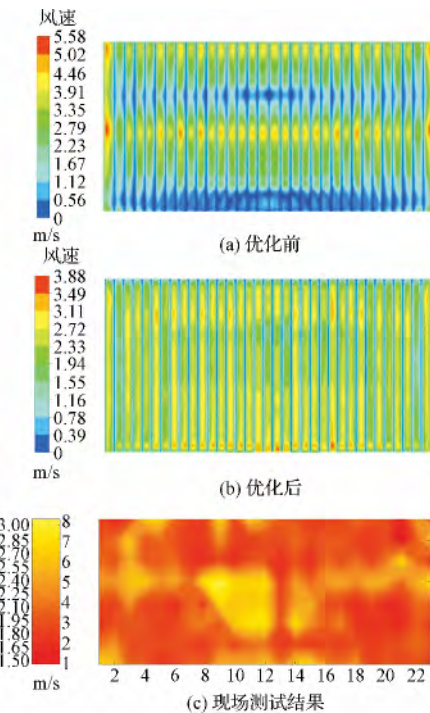


图 16 第一电场测试断面气流分布云图
Fig. 16 Contour of flow distribution in first electric field

4 结 论

(1) 采用 FLUENT 软件 $k-\varepsilon$ 标准方程对湿式电除尘器内部流场进行模拟分析, 计算结果与现场测试结果吻合。

(2) 进口喇叭内孔板采用多孔跳跃模型, 经过模拟阻力与现场测试阻力对比, 所采用的简化模型参数设置合理准确。

(3) 采用 FLUENT 软件, 可方便地对湿式电除尘器内流场进行调整优化, 并得到合理的优化结果。

(4) 电场断面气流分布可直观反映湿式电除尘器内的流场分布情况, 为提高除尘效率、优化湿电性能提供设计参考。

(5) 与物模实验相比, CFD 模拟方法具有重复性好、周期短、节省试验费用、可视化等优点。

参 考 文 献

- [1] 张殿印, 王纯. 除尘器手册. 北京: 化学工业出版社 2005
- [2] 魏娟. 湿式电除尘器进气段气流分布的模拟研究. 石家庄: 河北科技大学硕士学位论文 2013
Wei Juan. Simulation and experimental studies on the flue gas distribution in inlet of wet electrostatic precipitator. Shijiazhuang: Master Dissertation of Hebei University of Science & Technology 2013 (in Chinese)
- [3] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用. 北京: 清华大学出版社 2005
- [4] Fluent 6.3 User's Guide Fluent Inc
- [5] 涂建华, 袁伟峰, 朱培君. 电除尘器气流分布的等效阻力法模拟计算. 环境工程 2004 22(5): 37-39
Tu Jianhua, Yuan Weifeng, Zhu Peijun. Computation of flow field distribution in electrostatic precipitator by equal resistance simulation. Environmental Engineering 2004 22(5): 37-39 (in Chinese)
- [6] 李立锋, 黄三明, 叶兴联, 等. LNE-CFD 数值模拟技术的研究与应用. 电力科技与环保 2011 27(4): 24-27
Li Lifeng, Huang Sanming, Ye Xinglian, et al. Research on LNE-CFD numerical simulation technology and its application. Electric Power Environmental Protection, 2011, 27(4): 24-27 (in Chinese)
- [7] Guo B. Y., Hou Q. F., Yu A. B., et al. Numerical modeling of the gas flow through perforated plates. Chemical Engineering Research and Design 2013 91(3): 403-408
- [8] Guo Baoyu, Ye Xinglian, Liu Dongdong, et al. Application of multi-scale approach in the gas flow simulation through electrostatic precipitators. Melbourne, Australia: Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO 2012
- [9] Hou Q. F., Guo B. Y., Li L. F., et al. Numerical simulation of gas flow in an electrostatic precipitator. Melbourne, Australia: Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO 2009
- [10] Groves J. F., Smith C. R. Gas-flow distribution effects in electrostatic precipitators. Journal of Electrostatics 1980 8(4): 343-353
- [11] 叶兴联, 郭宝玉, 杨丁, 等. 电除尘器气流分布多尺度数值模拟方法应用. 苏州: 2014 ANSYS 中国科技大会 2014
- [12] Swaminathan M. R., Mahalakshmi N. V. Numerical modelling of flow through perforated plates applied to electrostatic precipitator. Journal of Applied Sciences 2010 10(20): 2426-2432
- [13] 潘民兴, 袁伟峰. 电除尘器气流分布数值模拟试验研究//第十三届中国电除尘学术会议论文集. 湖北: 中国环境保护产业协会电除尘委员会 2009
- [14] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用. 北京: 北京理工大学出版社 2005
- [15] Idelchik I. E. Handbook of Hydraulic Resistance (3rd ed). New York: Begell House Inc. 1996