

LNE - CFD 数值模拟技术的研究与应用

Research on LNE - CFD numerical simulation technology and its application

李立锋, 黄三明, 叶兴联, 刘栋栋

(福建龙净环保股份有限公司实验研究中心, 福建 龙岩 364000)

摘要: 采用从微观到宏观的多尺度方法, 对电除尘器的关键部件进行了深入研究, 成功开发出一种新的电除尘器数值模拟技术 LNE - CFD。应用结果表明, 对于现有结构及布置方式的电除尘器, LNE - CFD 模拟结果准确, 可代替物模试验。LNE - CFD 模拟技术对电除尘器的优化设计和机理研究具有重要意义。

关键词: LNE - CFD; 多尺度方法; 电除尘器; 孔板

Abstract: Adopting the multi - scale method from micro to macro, the key components of ESP is studied in - depth. The new technology of ESP simulation (LNE - CFD) is developed successfully. The practical application is indicated that the simulation results are accurate for the ESP of structure and arrangement in existence. The LNE - CFD simulation technology can replace the physical model experiments. It has important significance to optimization design and mechanism study of ESP.

Key words: LNE - CFD; multi - scale method; ESP; perforated - plate

中图分类号: X701.2

文献标识码: B

文章编号: 1674 - 8069(2011)04 - 024 - 04

0 引言

气流分布的均匀性是影响电除尘器性能的重要因素之一, 传统方法是根据流体相似性原理, 通过物模试验来确定电除尘器气流分布装置的设计参数, 这种方法时间长, 费用高, 而且受限条件多。

CFD 是研究各种流体流动问题的数值计算方法, 其模拟结果可以清晰显示流体的流动状态, 近年来已广泛应用于电除尘器气流分布的研究。CFD 能有效地克服物模试验存在的不足, 为电除尘器的设计和研究提供依据。在这方面, 国内外已做过大量研究, 如 Groves 等^[1]研究了气流分布对电除尘器性能的影响; Gallimberti^[2]对电厂电除尘器的数值模拟方法进行了探索; 涂建华等^[3]提出了一种电除尘模拟的简易方法; 党小庆等^[4]对电除尘器模拟的计算流体动力学方法进行了研究, 并将研究结果应用于电除尘器气流分布模拟; Niels 等^[5]对全尺寸电除尘器内的气流分布进行了模拟。潘民兴等^[6]对电除尘器气流分布进行了模拟研究, 并将模拟结果与试验进行了对比。但是, 到目前为止, 对电除尘器 CFD 模拟大多是在二维或三维的简单模型条件下进行, 更未见有对电除尘器关键部件(如孔板、槽型板等)的简化等效模型进行深入研究的相关文献。

龙净公司与澳大利亚新南威尔士大学合作, 采用从微观到宏观的多尺度方法, 通过建立合理的数学模型和三维几何模型, 并经过大量试验对比修正模型的相关参数, 成功开发出 LNE - CFD 模拟技术^[7]。数十台工业电除尘器的应用结果表明, LNE - CFD 技术的模拟结果与物模试验结果一致, 对现有结构和布置方式的电除尘器, LNE - CFD 技术可以代替物模试验。

1 LNE - CFD 模拟技术的理论基础

目前, CFD 模拟技术均采用离散化方法来建立数学模型, 通过计算机模拟获得流体在特定条件下的信息。CFD 模拟技术是在流动基本方程(质量守恒方程、动量守恒方程)控制下对流体流动的数值模拟, 通过控制方程对这些守恒定律加以数学描述, 以便适合数值模拟计算。在 CFD 模拟中, 主要的控制及数学方程^[8-10]如下:

质量守恒方程(连续性方程):

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \text{div}(\rho u) = 0$$

式中: ρ 为流体密度; t 为时间; u 为速度矢量; div 表示散度。

动量守恒方程:

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho u_i) + \frac{\delta}{\delta x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\delta \rho}{\delta x_i} + \frac{\delta}{\delta x_j} \left(u \frac{\delta u_i}{\delta x_j} - \rho u_i' u_j' \right) + S_i$$

式中: ρ 为流体微元体上的压力; u 为动力粘度; S_i 为广义源项。

k 方程(湍流动能方程):

$$\frac{\delta}{\delta t}(pk) + \frac{\delta}{\delta x_i}(pku_i) = \frac{\delta}{\delta x_i} \left[\left(u + \frac{u_i}{\sigma_k} \right) \frac{\delta K}{\delta x_j} \right] + G_K + G_B - \rho \varepsilon - Y_M + S_K$$

ε 方程(扩散方程):

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho \varepsilon) + \frac{\delta}{\delta x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\left(u + \frac{u_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\delta \varepsilon}{\delta x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_K + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} + S_\varepsilon$$

式中: G_K 表示由平均速度梯度而产生的湍流动能; G_b 是由浮力产生的湍流动能; Y_M 代表可压缩湍流中的脉动扩张; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 是经验常数; σ_k 和 σ_ε 是湍流动能方程和扩散方程对应的湍流 Prandtl 数; S_k 和 S_ε 为自定义源项。

2 LNE - CFD 模拟技术研究

在电除尘器的 CFD 模拟中,孔板简化是关键的技术,孔板参数的准确性直接关系到模拟结果的准确性。LNE - CFD 模拟技术采用的是一种由微观到宏观的多尺度研究方法,通过建立不同尺度孔板模型进行详细研究来确定孔板参数。

2.1 孔板简化处理

由于孔板结构复杂和现有计算机水平的限制,在 CFD 模拟中,必须对孔板进行简化处理。LNE - CFD 模拟技术,对孔板研究采用的是由微观到宏观的方法,即建立微观孔板单元模型并进行模拟,对得到的数据进行回归分析确定简化模型的相关参数,并通过试验对参数进行修正。模拟结果及参数回归分析如图 1~3 所示。

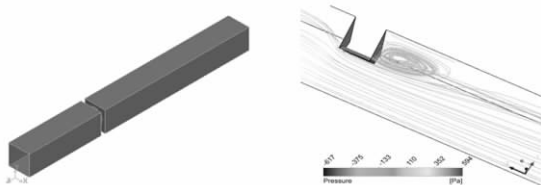


图 1 孔板单元及流线示意

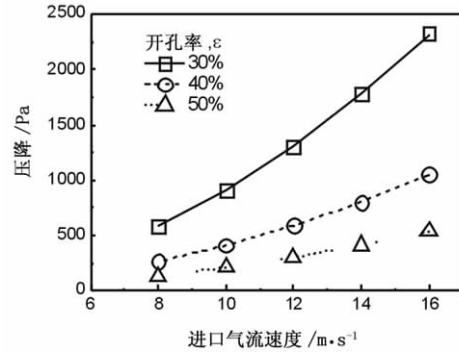


图 2 不同开孔率的孔板压力降和速度的关系

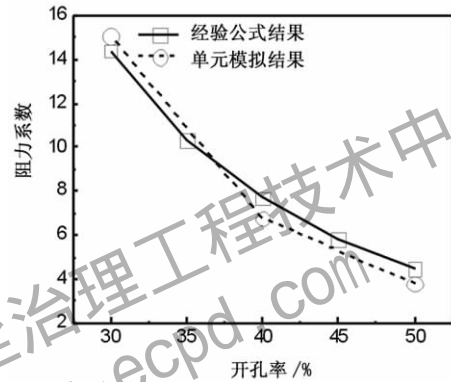


图 3 孔板阻力系数和开孔率的关系

2.2 孔板简化模型的验证

为了验证孔板单元模拟所确定参数的准确性,将基准模型 CFD 模拟所得到的模型第一、第二电场测试断面的速度分布与试验结果进行对比,结果如图 4 所示。

图 4 可以看出,在采用 porous - jump 模型时,模拟结果与试验结果基本吻合,考虑横向阻力系数时,模拟结果与实验结果的吻合性更好。可见,考虑气流经过孔板时的横向阻力系数会使数值模拟结果更加准确。在此之前的电除尘器 CFD 模拟研究中,未见有考虑孔板的横向阻力系数的相关文献。

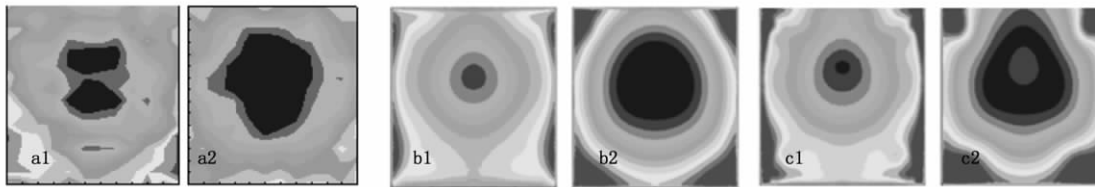
3 LNE - CFD 技术应用

为了验证 LNE - CFD 技术对电除尘器模拟结果的准确性,下面以 1 台 600 MW 机组配套电除尘器为模拟对象,将数值模拟结果与试验结果作比较。

3.1 流量分配模拟

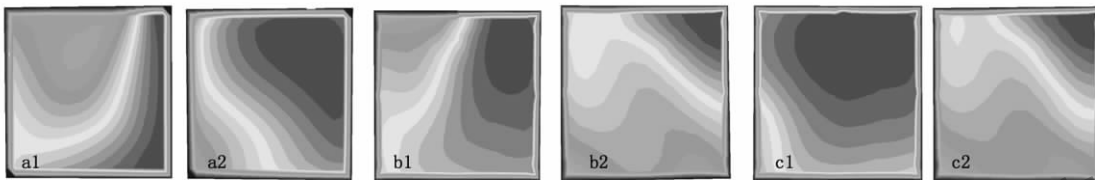
电除尘器的流量分配是影响除尘效率的重要因素,同时还影响电除尘器的安全稳定运行。在 CFD 模拟中,通过设置和调整烟道内的导流板使各室的流量分配均衡,满足设计要求。对该电除尘器流量

分配的 CFD 模拟结果如图 5 和图 6 所示。



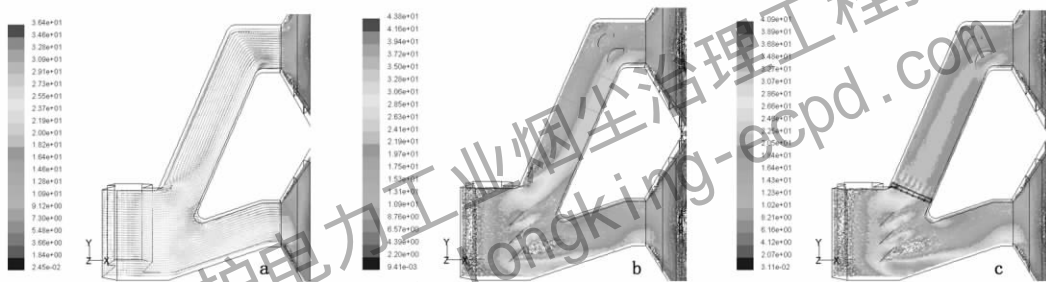
a- 试验结果; b- porous-jump 边界条件; c- porous-zone 边界条件, 横向阻力为 400 1/m

图4 电除尘器第一、第二电场测试面上的速度分布对比分析



a- 未加导流板; b- 管道分叉及弯头处加导流板; c- 左侧管道处加蜂窝状导流板

图5 不同导流板情况下电除尘器两室进口烟道测试断面上的气流速度分布示意



a- 未加导流板; b- 管道分叉及弯头处加导流板; c- 左侧管道处加蜂窝状导流板

图6 不同导流板情况下各个管道矢量

从以上模拟结果来看,在烟道内加导流装置,可以调整电除尘器各室的流量分配及管道内的气流分布均匀性,使之满足设计要求。数值模拟结果与物模测试对比如表 1 所示。表中,导流板布置方案 1 为无导流板;方案 2 为分叉和弯头处加导流板方案;3 为分叉、弯头处加导流板,左侧管道蜂窝状整流板。

表 1 CFD 模拟结果与试验结果对比统计

导流板布置方案	模拟方式	左室流量 /m ³ ·h ⁻¹	右室流量 /m ³ ·h ⁻¹	流量偏差
1	物理模拟	3892	7234	±30.0
	CFD 模拟	4022	7101	±27.7
2	物理模拟	6014	5777	±2.0
	CFD 模拟	6108	5667	±3.7
3	物理模拟	6025	5895	±1.1
	CFD 模拟	6031	5889	±1.2

从表 1 中可以看出, LNE - CFD 数值模拟结果与物模测试二者结果一致。

3.2 气流分布模拟

电除尘器电场内的气流分布主要受孔板开孔率的影响,通常都是通过调整孔板开孔率使电场测试断面上的气流速度分布满足设计要求(见图 7、8)。

图 7 为初始开孔时电场测试断面气流速度分布,图 8 为将第三层孔板中部开孔率由 40% 调整为 45% 后电场气流速度。从图 7 和图 8 对比可以看出,调整第三层孔板的开孔率对电场内的气流速度分布有很大影响,所以在 CFD 模拟中,可以通过调整开孔率使气流速度分布满足设计要求。

将第一电场入口断面气流速度分布的测试结果与 CFD 模拟结果进行对比,如图 9 所示,从中可以看出,CFD 模拟结果与试验结果吻合。

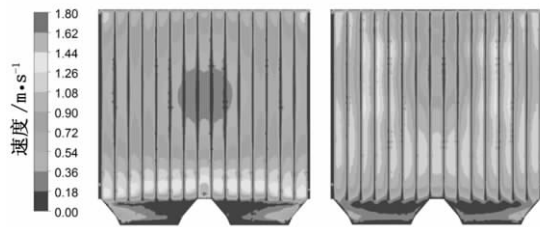


图7 初始开孔率时电场测试断面气流速度分布

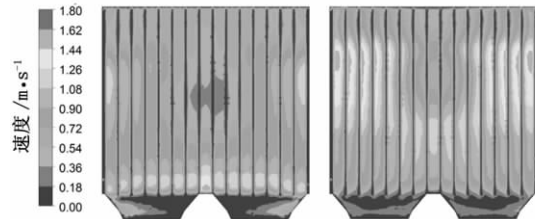
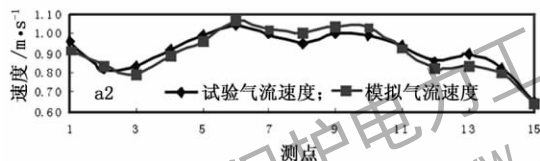
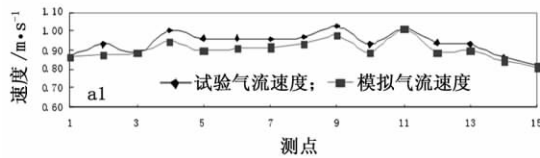
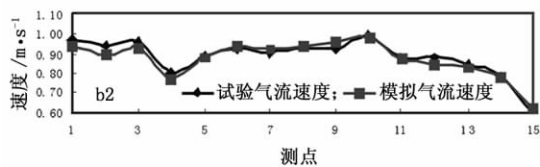
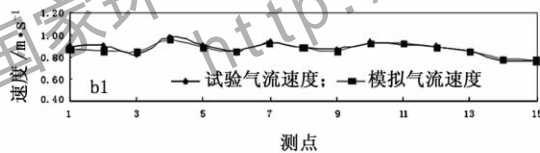


图8 第三层孔板中部开孔率由40%调整为45%



(a) 左室—电场行、列平均值



(b) 右室—电场行、列平均值

图9 模拟结果与试验结果的对比

4 结语

(1) 气流分布的均匀性是影响电除尘器性能的重要因素之一,通过物模试验来确定电除尘器气流分布装置的设计参数受限条件较多。LNE - CFD 模拟技术对影响气流分布的关键部件进行了深入研究,首次考虑了横向阻力的影响,科学地确定了

CFD 模型中的关键参数。

(2) LNE - CFD 模拟技术对孔板研究采用的是由微观到宏观的方法,即建立微观孔板单元模型并进行模拟,计算结果准确,可取代现有结构及布置方式的电除尘器物模试验。

(3) 数十台工业电除尘器的实际应用结果表明,LNE - CFD 模拟技术可以为电除尘器的优化设计和机理研究提供指导。

参考文献:

- [1] Groves J F, Smith C R. Gas - flow distribution effects in electrostatic precipitators [J]. Journal of Electrostatics, 1980, 8(4): 343 - 353.
- [2] Gallimberti. Recent advancements in the physical modeling of electrostatic precipitators [J]. Journal of Electrostatics, 1998, 43(4): 219 - 247.
- [3] 涂建华, 袁伟锋, 朱培君. 电除尘器气流分布的等效阻力法模拟计算 [J]. 环境工程, 2004, 22(5): 37 - 39.
- [4] 党小庆, 袁胜利, 杨春方, 等. 电除尘器气流分布计算流体动力学方法初步研究 [J]. 热力发电, 2005, 34(3): 12 - 14.
- [5] Niels N F, Lind L, Akoh E et al. Numerical Modelling of Gas Distribution in Electrostatic Precipitators [C]. Proceedings 8th International Conference on Electrostatic Precipitation, Birmingham, U S A: Southern Company Services Inc Publication Services, 2001.
- [6] 潘民兴, 袁伟锋. 电除尘器气流分布数值模拟试验研究 [C]. 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.
- [7] Hou Q F, Guo B Y, Li L F et al. Numerical simulation of gas flow in an electrostatic precipitator [C]. Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. CSIRO, Australia, 2009.
- [8] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
- [9] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [10] Dubois F, 郭华谟. 计算流体力学的新进展: 理论、方法和应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [11] 党小庆, 高蕊芳, 马广大, 等. 燃煤电厂电改袋式除尘器气流分布数值分析 [J]. 电力环境保护, 2008, 24(1): 31 - 33.
- [12] 詹秋月. 600 MW 机组烟气循环流化床干法脱硫塔入口气流分布的试验研究 [J]. 电力科技与环保, 26(1): 19 - 22.
- [13] 党小庆, 杨丁, 韩小梅, 等. 有限元法优化电除尘器性能的试验研究 [J]. 热力发电, 2007, 36(2): 19 - 23.
- [14] 原永涛. 火力发电厂电除尘技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

收稿日期: 2011-03-17; 修回日期: 2011-05-03

作者简介: 李立锋 (1980-), 男, 河北保定人, 工程师, 主要从事大气污染治理及计算机模拟研究工作。E-mail: lilifeng116@163.com