

电除尘器 CFD 模型验证实验研究

黄三明 李立锋 叶兴联 刘栋栋

(福建龙净环保股份有限公司 福建龙岩 364000)

摘要 CFD 气流分布模拟已成为研究电除尘器的一个重要手段,其数值模拟的准确性主要取决于 CFD 模型是否合理。龙净环保多年的研究结果表明,只有通过基础性物模验证实验对 CFD 模型关键参数进行修正,才能使电除尘器 CFD 技术真正达到实用的要求。

关键词 电除尘器 CFD 模型 物模验证 LNE-CFD

1 前言

CFD 是研究各种流体流动问题的数值计算方法,近年来已广泛应用于电除尘器气流分布的研究,其模拟结果可以清晰显示电除尘器内部的气体流动状态,为电除尘器的设计、改造和研究提供重要的依据^[1]。

CFD 模拟技术的核心是模型的合理性,这需要通过物模实验来验证。由于 CFD 模型在建立时均以诸多假设为前提,因此,要使这项技术真正达到实用化,模型关键参数的基础性物模验证是必不可少的。

2 电除尘器 CFD 模拟基本要点

在电除尘器 CFD 模拟过程中,需要对一些部件进行简化,其中最重要的就是对孔板的简化处理,它直接决定了模拟结果的准确性。一般的处理方法是将孔板简化为 Porous-jump 模型,通过相关参数的设定来反映孔板对气流的作用。

龙净公司与澳大利亚新南威尔士大学合作开发的 LNE-CFD 模拟技术,采用从微观到宏观的多尺度方法,建立合理的数学模型和三维几何模型,并通过与大量基础性物模验证实验结果的对比分析,最终修定模型的

相关参数。LNE-CFD 模拟技术最重要的成果是对关键部件孔板模型的突破,本文主要介绍 LNE-CFD 模型的验证实验研究成果。

3 孔板模拟方法

由于孔板直接模拟法耗时长,对计算机性能要求极高,难以在实际工程中应用,所以电除尘器 CFD 模拟一般根据等效阻力原则建立孔板等效模型,进行简化模拟。

我们在 FLUENT 软件中将孔板简化为 Porous-jump 模型,采用的阻力公式为:

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

式中: μ ——气体动力粘度,Pa·s; ρ ——气体密度,kg/m³; α ——渗透率,m²; C_2 ——压力跳跃系数,1/m; v ——气流速度,m/s; Δm ——渗透膜(孔板)厚度,m。

其中的关键是简化模型参数 α 和 C_2 的确定。

3.1 经验公式法

孔板简化模型参数根据经验数据及经验公式确定。气流通过孔板时,粘性阻力很小,等效模型的渗透率设为 $\alpha=1$,这样,式(1)右侧第一项粘性附加项近似为 0,公式可简化为 $C_2 \Delta m = \xi$ ^[2],即:

$$C_2 = \frac{\xi}{\Delta m} \quad (2)$$

式中: ξ ——孔板阻力系数。

此方法通过 CFD 模拟得到阻力 ΔP ,然后由公式 $\Delta P = \frac{1}{2} \xi \rho v^2$ 计算得到阻力系数,并未对不同孔板进行专门研究,难以保证参数

的准确性。

为解决这一关键问题,我们创造性地提出用单元模拟的方法来确定相关参数。

3.2 单元模拟法

对不同开孔率的孔板进行单元模拟,确定孔板简化模型参数^[3]。即建立单孔单元模型(图1),进行单元模拟,单元模拟的流场如图2所示,再通过对孔板单元模拟结果的回归分析确定简化模型参数。

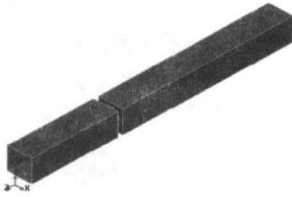


图1 孔板单元示意图



图2 孔板单元模拟流场图

在单元模拟初始阶段,确定孔板简化模型参数时只考虑了开孔率,公式如下:

$$\alpha = 0.004f^2 + 0.003f + 5 \times 10^{-5} \quad (3)$$

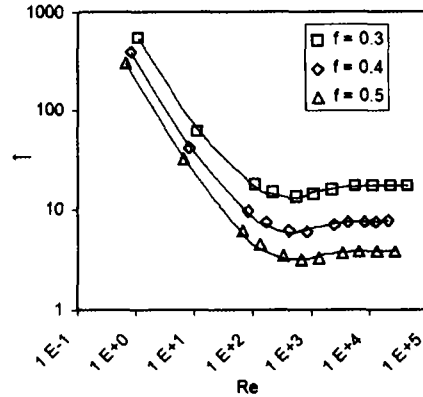
$$C_2 = 321.67f^{-2.8617} \quad (4)$$

式中: f ——孔板开孔率,%。

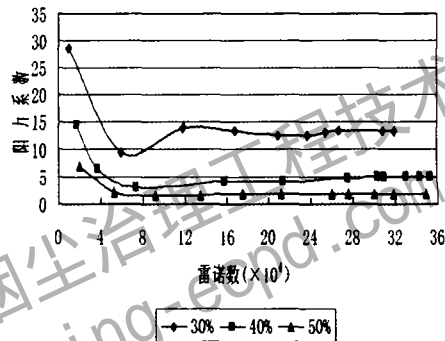
这样获得的CFD模型被证明不够合理,模拟结果的准确性不高(4.1列出了CFD模拟与物模实验结果对比的一组数据)。

根据以上情况,我们对大量的实验数据进行了综合分析,并结合相关理论和实践经验,确定将雷诺数(Re)、孔板孔径(d)和厚度(Δm)等参数也纳入影响因素,通过回归分析来确定CFD模型的参数^[4,5]。经过实验和CFD模拟,得到了雷诺数和阻力系数关系曲线,如图3所示。

分析发现在进入湍流粗糙区(电除尘器实际工作区在此范围内)后,阻力系数的变化



模拟结果



实验结果

图3 阻力系数与雷诺数的关系曲线

与雷诺数无关,所以,确定最后的修正公式如下:

$$\alpha = \frac{2d}{b_1 f} \Delta m \quad (5)$$

$$C_2 = b_2 \frac{1}{\Delta m} \quad (6)$$

式中: d ——孔板孔径,m; b_1 、 b_2 ——通过回归分析得到的与开孔率有关的系数。

修正后的参数在单元模拟实验装置上进行验证实验,对比结果显示两者吻合度高(实验与CFD模拟对比结果见4.2.1)。

4 电除尘器CFD模型的验证实验

4.1 简化模型参数只与开孔率有关

在简化模型参数只与开孔率有关的CFD模拟研究中,进行了基准模型验证实验。基准模型如图4所示,验证对比结果见表1和图5、图6。

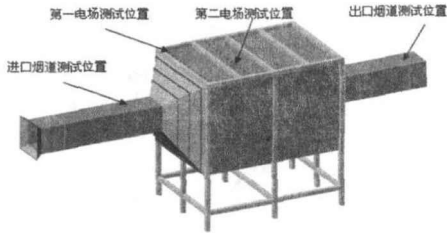


图 4 电除尘器基准模型示意图

表 1 基准模型实验结果与 CFD 模拟结果对比

	第一电场		第二电场	
	CFD 模拟	基准模型实验	CFD 模拟	基准模型实验
平均速度(m/s)	2.166	2.152	2.157	2.071
偏差(%)	0.65		4.15	
相对均方根差	0.366	0.426	0.739	0.507
偏差(%)	-14.08		45.76	

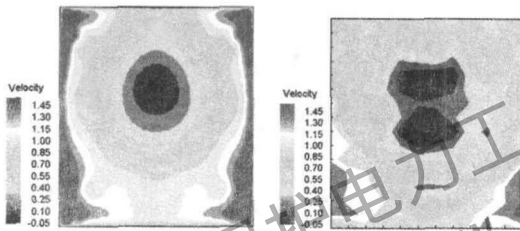


图 5 第一电场测试断面速度分布云图

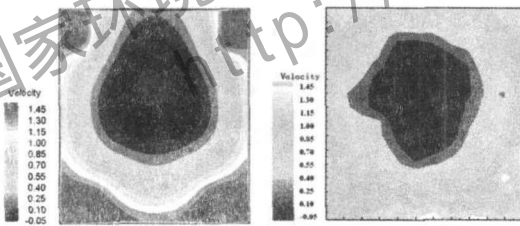


图 6 第二电场测试断面速度分布云图

对比结果显示,孔板简化模型参数只与开孔率有关时,CFD 模拟与物模实验结果虽然在分布趋势上相近,但是具体数值还存在较大差异,如表 1 所示,电场平均速度相近时(偏差在 5% 内),气流分布相对均方根差值最高相差 45.76%。

4.2 简化模型参数与开孔率和 $\Delta m/d$ 有关

4.2.1 单元模拟验证实验研究

首先在单元验证实验模型(见图 7)上完

成一系列孔板阻力特性实验,将不同开孔率和 $\Delta m/d$ 的孔板阻力系数与单元数值模拟结果进行对比,并据此修正孔板单元模拟结果。最终模拟结果与实验结果对比如表 2 所示。

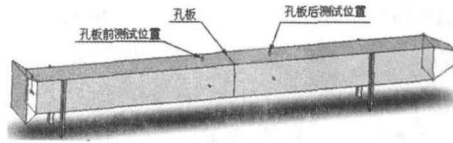


图 7 单元验证实验模型示意图

表 2 不同开孔率和 $\Delta m/d$ 孔板阻力系数对比表

开孔率, f (%)		30	40	50
CFD 模拟	$\Delta m/d=0.1$	18.32	8.20	4.19
	$\Delta m/d=0.3$	16.83	7.45	3.90
文献资料[6] (实验)	$\Delta m/d=0.1$	18.21	8.21	4.24
	$\Delta m/d=0.3$	18.07	8.15	4.22
单元试验	$\Delta m/d=0.1$	18.25	7.36	4.18
	$\Delta m/d=0.3$	16.01	7.00	3.51

从单元验证实验对比结果来看,修正后的 CFD 单元模拟与验证实验及文献[6]中的孔板阻力系数吻合,说明经过单元验证实验的修正,保证了 CFD 模型的准确性。

4.2.2 基准模型实验研究

在单元验证实验的基础上进行基准物模实验,修正后的 CFD 模型模拟结果与实验结果对比如表 3 和图 8~11 所示:

表 3 CFD 模拟结果与基准模型实验结果对比(修正后的 CFD 模型)

	平均速度, m/s		相对均方根差		本体阻力, Pa
	第一电场	第二电场	第一电场	第二电场	
基准模型	1.041	1.018	0.567	0.828	182
CFD 模拟	1.063	1.043	0.576	0.854	180
偏差(%)	2.07	2.40	1.59	3.14	1.10

从以上对比结果来看,电场平均风速、测试断面速度相对均方根差和本体阻力的偏差

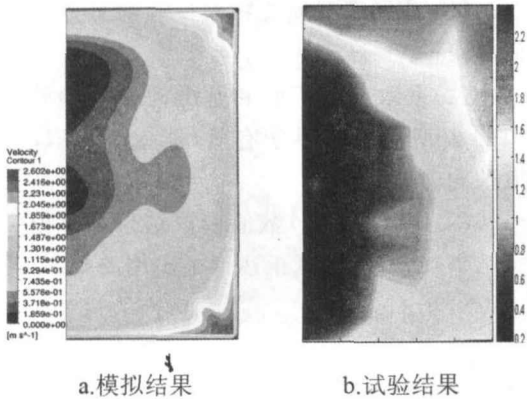


图8 第一电场测试断面速度分布云图(右半)

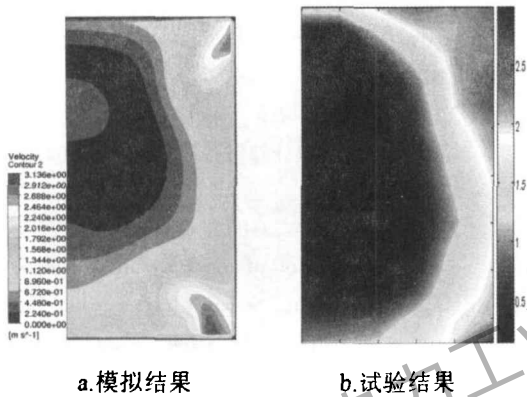


图9 第二电场测试断面速度分布云图(右半)

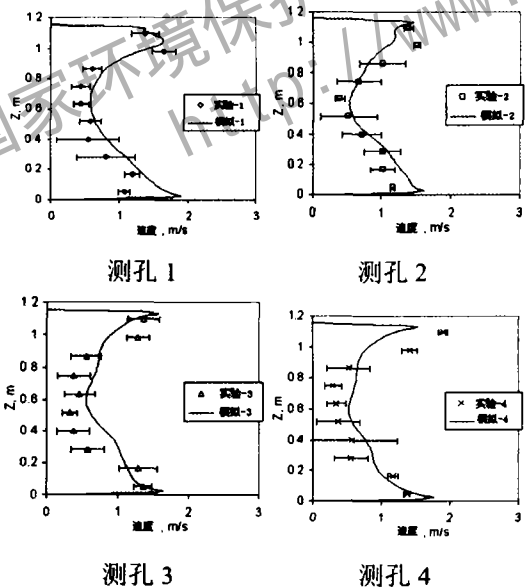


图10 基准模型第一电场模拟速度和实验速度对比

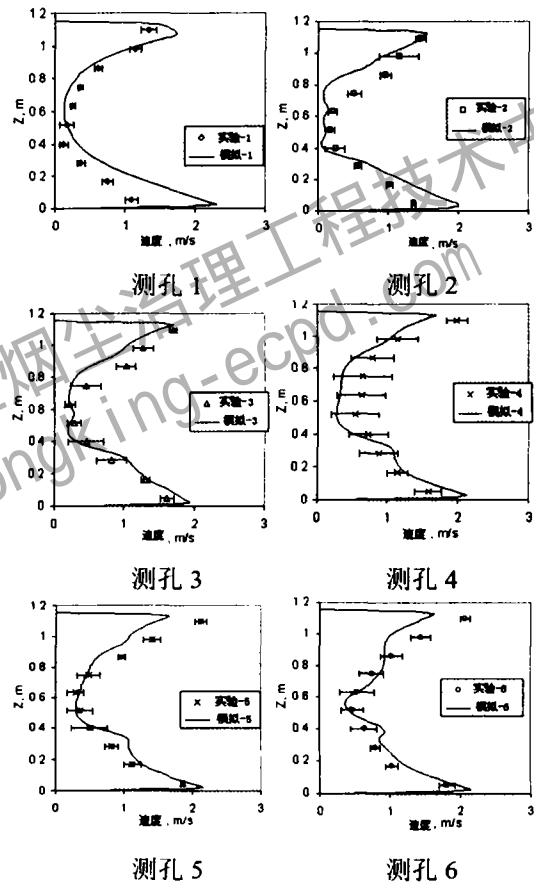


图11 基准模型第二电场模拟速度和实验速度对比

5 实际工程应用

以某电厂660MW机组配套电除尘器为例,其物模如图12所示。首先建立CFD几何模型(如图13所示),根据修正后的CFD模型模拟结果提出气流分布方案,然后根据该方案进行物模实验,CFD模拟和物模实验

都在5%以内,说明模拟结果与实验结果吻合性好,修正后的CFD模型合理。

结果如表 4 所示:

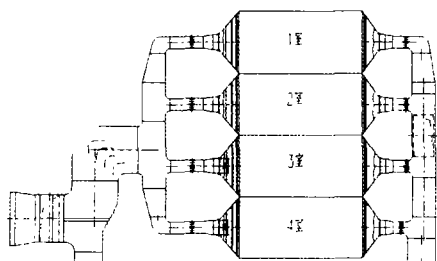


图 12 电除尘器物模示意图

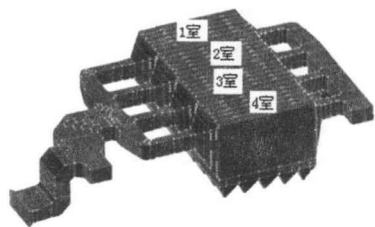


图 13 CFD 几何模型示意图

表 4 电除尘器物模实验和 CFD 模拟结果对比表

		1室	2室	3室	4室
电场平均 风速 (m/s)	CFD 模拟	1.567	1.548	1.554	1.594
	物模实验	1.565	1.562	1.567	1.569
	偏差(%)	0.13	-0.90	-0.83	1.59
相对均 方根差	CFD 模拟	0.183	0.191	0.180	0.187
	物模实验	0.188	0.198	0.178	0.192
	偏差(%)	-2.66	3.54	1.12	-2.60

可以看出,通过 CFD 模拟获得的气流分布方案用于物模实验也能满足要求,即 CFD 模拟已达到物模实验的效果。

6 结论

CFD 模型的合理性是电除尘器 CFD 模拟技术要解决的关键问题,本研究得出如下结论。

(1)CFD 模型须要物模实验对其进行验证和修正。

(2)采取单元实验和基准模型实验验证 CFD 模型的方法科学有效,能保证 CFD 模拟的准确性。

(3)LNE-CFD 数值模拟结果与物模实验结果吻合性好,真正达到了实用的要求。

参 考 文 献

- [1] Arthur G. Hein. Electrostatic precipitation, dust movement and gas flow optimization [C]. The 8th International Conference on Electrostatic Precipitation. Birmingham, USA, 2001.
- [2] 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, 10, 22(5):37-39.
- [3] Q. F. HOU, B. Y. GUO, L. F. LI etc.. Numerical Simulation of Gas Flow in an Electrostatic Precipitator. Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. CSIRO, Melbourne, Australia, 2009. 12
- [4] M. R. Rampure, S. M. Mahajani and V. V. Ranade. CFD Simulation of Bubble Columns: Modeling of Nonuniform Gas Distribution at Sparger. Ind. Eng. Chem. Res., 2009, 48 (17), 8186 - 8192.
- [5] Smith, P. L. and Van Winkle, M. Discharge coefficients through perforated plates at Reynolds number of 400 to 3000 AIChe J. 1958, 266.
- [6] IE Idelchik, Handbook of Hydraulic Resistance (3rd Ed.), Begell House, Inc., 19.

The validation experimental study of ESP—CFD model

Huang Sanming Li Lifeng Ye Xinglian Liu Dongdong

(Fujian Longking Co. , LTD. Longyan Fujian 364000)

Abstract: The flow distribution simulation with CFD has become an important research tool for ESP. The simulation accuracy depends on the reasonable of CFD model. The study result of Longking Co. , LTD is indicated that in order to the ESP CFD technology applies to practice truly, the key parameters of CFD model must be confirmed by foundational physical model experiment.

Keywords; ESP CFD model physical model validation LNE—CFD

国家环境保护电力工业烟尘治理工程技术中心
<http://www.longking-ecpd.com>