

工业烟气净化系统的风量平衡调节及数值模拟应用研究

赵坤 党小庆[#] 黄璞 谢铮胜 张辉

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要 为了对某钢铁集团烧结机尾气净化系统的风量平衡进行调节,提出了利用 Fluent 仿真软件对通风管道内部流场进行数值模拟,在主管和部分支管上设置节流管、调节管径的改进措施。风量模拟结果表明,通风管道的原风量存在严重的不平衡性,吸尘点的风量不平衡率高达 75.0%,在部分管道增加节流管可以有效调整管道的风量不平衡性,调整后吸尘点风量的不平衡率为 18.8%;对于压力损失较大、风量偏小的管道,可通过管径调节使其风量基本达到设计要求;Fluent 仿真软件的风量模拟值与现场实测值有较高的吻合性,数值模拟方法可以为工业烟气净化系统的改造提供参考依据。不仅能够为前期工程设计提供帮助,大大节省工程调试费用,缩短工期,并有助于风量不平衡管道的调节和改造。

关键词 净化系统 节流管 数值模拟 风量平衡

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2015.05.015

Air volume adjustment of purification system and the application of numerical simulation research in industrial flue gas ZHAO Kun, DANG Xiaoqing, HUANG Pu, XIE Zhengsheng, ZHANG Hui. (School of Environment & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an Shaanxi 710055)

Abstract: In order to regulate the air volume balance of the tail gas purification system for a steel enterprise group's sintering machine, this paper put forward a lot of measures for improvement, such as numerical simulating the internal flow field of purification system by employing Fluent simulation software, adding the throttle pipe into the head and the branch pipe, adjusting the diameter of pipe. The simulation results showed that the original air volume in ventilation pipe was serious imbalance and the imbalance rate of air cleaner was 75.0%. However, through adding throttle pipe in some pipeline, the imbalance rate of air volume in air cleaner decreased to 18.8%. The pipes with larger resistance loss or smaller air volume could also arrive the design requirement of air volume after adjusting the diameter of pipe. The air volume values obtained from Fluent software simulation were highly identical to the values of actual measurement, therefore, numerical simulation could help the modification of purification system in industrial flue-gas pipes effectively. This method could not only provide help for the preliminary design of the project, saving the cost of engineering adjustment in a great amount, shorten the construction period, but also contributed to air flow imbalance adjustment and transformation of pipeline.

Keywords: purification system; throttle pipe; numerical simulation; air volume balance

通风管道风量平衡是工业烟气净化系统设计过程中的重要环节,特别是对复杂的净化系统而言,各通风管道的风量平衡性直接关系到整个系统的正常运行。针对钢铁行业吸尘点在不同岗位上具有确定排风量的特点,根据生产工艺条件,通风管道在设计中必须满足处理风量要求。有些净化系统有几十个甚至上百个吸尘点,必须进行压力平衡计算^[1],即要求实际运行的通风管道的压力与设计值一致,各支管风量偏差小于 10%。如果压力不平衡,实际运行过程中风机的风量根据各支管的压力自行分配,会导致有的吸尘点风量太小,不能起到除尘效果;有的吸尘点

风量太大将物料吸走;有的管道中风速太低,粉尘堵塞管道;有的管道中风速太高,管道磨损加剧^[2]。

为了保证生产的正常进行,使系统达到设计或生产要求,需对工业烟气净化系统的通风管道进行测试和调试。本研究利用 Fluent 仿真软件^[3-4]研究通风管道内部气流流动规律,以避免工业设计中的盲目性,有效缩短设计周期。

1 研究方法

1.1 几何模型的建立

图1显示了某钢铁厂 60 m² 烧结机尾气净化系

第一作者:赵坤,男,1988年生,硕士研究生,研究方向为大气污染控制技术与设备。[#] 通讯作者。

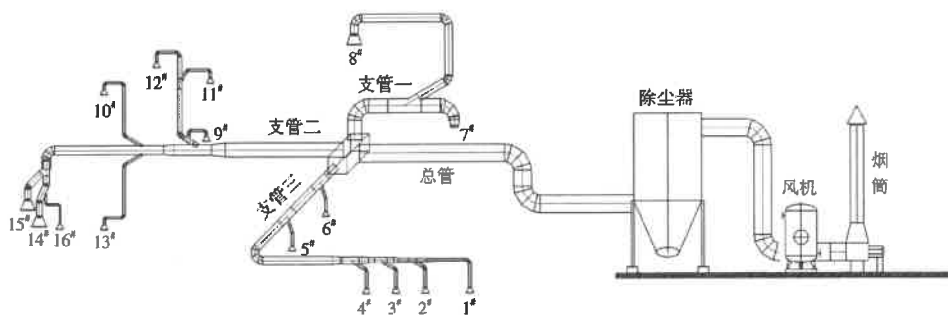


图1 某钢铁厂烧结机尾气净化系统的通风管道结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of ventilation pipe structure of tail gas purification system for a steel enterprise group

统的通风管道结构(弯头36个、三通管13个、渐缩管17个、吸尘点16个(1#~16#))。粉尘从各吸尘点进入支管,在总管处汇合,最后进入除尘器,处理后经烟囱排放。

该通风管道由3条支管组成,其中支管一有2个吸尘点(7#为烧结机下料口吸尘点;8#为带冷机进料口吸尘点),最大管径为2.9 m;支管二有8个吸尘点(9#、11#、12#、13#为带冷机中部吸尘点,10#、14#为磨机吸尘点、15#为振动筛吸尘点、16#为皮带输送机吸尘点),最大管径为1.5 m;支管三有6个吸尘点(1#~4#为配料皮带吸尘点、5#、6#为生石灰仓吸尘点),最大管径为0.7 m。

1.2 网格划分

按照通风管道的实际结构尺寸建立1:1的几何模型。利用Gambit软件对计算区域进行网格划分,该软件具有几何模型建立能力全面和划分网格功能强大等特点,对求解区域可以划分出高质量网格。采用结构化和非结构化混合网格对吸尘罩、弯头、柱体、三通管等进行划分^[5]。模拟区域划分的体网格数为508 204,面网格数为1 027 681,节点数为116 847。

1.3 数学模型

通风管道内部是三维湍流流场,含尘气流从各个吸尘点的集气罩吸入,为方便计算,假定流体是不可压缩的稳态流^[6],做定常流动。进行管道内部气流数值模拟研究时,选择以下控制方程^[7-9]:

连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (i=1,2,3; j=1,2,3) \quad (2)$$

湍动能 k 方程:

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

耗散率 ϵ 方程:

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

式中: u_i, u_j 为速度分量; x_i, x_j 为坐标分量; ρ 为气体密度; t 为计算时间; P 为静压; τ_{ij} 为应力张量; g_i 为重力加速度分量; F_i 为模型其他的相关源项,如多孔介质和自定义源项; k 为湍动能; μ 为层流流体黏度; μ_t 为湍流流体黏度; G_k 为由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; ϵ 为耗散率; σ_k 和 σ_ϵ 分别是与 k 和 ϵ 对应的 Prandtl 数; $C_{1\epsilon}$ 和 $C_{2\epsilon}$ 为经验常数。本研究取 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\epsilon = 1.3$ 、 $C_{1\epsilon} = 1.44$ 、 $C_{2\epsilon} = 1.92$ 。式中各变量单位根据实际计算确定。

1.4 计算方法和边界条件

利用 Fluent 仿真软件^[10-12]模拟通风管道内部的气流流动,采用标准的 $k-\epsilon$ 双方程模型^[13-14],稳态3D的压力基求解器,压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法;对流项差分格式采用二阶迎风离散格式,管道模型吸尘点进口选择压力入口边界条件,压力为1 800 Pa;总管出口选择压力出口边界条件,压力为0 Pa。

2 传统的通风管道风量平衡调节方法

传统的通风管道风量调试过程是:根据原风量验证结果,计算各管道的压力损失,再根据压力损失来调节各吸尘点的风量,使通风系统的风量达到平衡^[15-16]。

支管一的压力损失(ΔP_1 , Pa)计算:

$$\Delta P_1 = (\xi_1 + \sum \xi_i + \lambda \frac{l}{D}) \cdot \frac{\rho V_1^2}{2} \quad (5)$$

式中: ξ_1 为支管一的局部阻力系数; $\sum \xi_i$ 为除节流管外所有的局部阻力系数之和; λ 为沿程阻力系数; l 为管长,m; D 为管径,m; V_1 为支管一的风速,m/s。

支管二的压力损失(ΔP_2 , Pa)计算:

$$\Delta P_2 = (\xi_2 + \sum \xi_i + \lambda \frac{l}{D}) \cdot \frac{\rho V_2^2}{2} \quad (6)$$

式中: ξ_2 为支管二的局部阻力系数; V_2 为支管二的风速,m/s。

对于支管一和支管二,在管径不变的前提下, ξ_1 、 ξ_2 与 λ 为定值。使两并联管道压力损失平衡($\Delta P_1 = \Delta P_2$),则有:

$$\frac{1}{2} \rho V_1^2 \xi_1 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 \xi_2 \quad (7)$$

可见,传统的风量调试必须在除尘系统施工结束后进行,调试周期长,同时要在每个吸尘点的支管上安装有风量调节阀,成本高。

3 基于数值模拟的通风管道风量平衡调节

通风管道原风量的模拟验证结果表明,通风管道原模型中大多数的吸尘点风量没有达到设计要求,在本研究通风管道的 16 个吸尘点中,风量不满足设计要求的有 12 个,风量不平衡率达 75.0%。存在偏差超标的吸尘点中,最大偏差超过 50.0%,大部分的偏差在 15%~30%,可见该通风管道系统的风量存在严重的不平衡,但总管出口风量满足设计要求。通风管道风量的模拟验证结果见表 1。

表 1 通风管道原风量的模拟验证
Table 1 Simulation and verification of the original air volume

项目	设计风量/ ($10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	模拟风量/ ($10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	偏差/%
支管一	144.0	218.0	51.4
支管二	126.0	96.0	-23.8
支管三	34.0	36.3	6.8
总管	304.0	311.0	2.3

由表 1 可见,与设计风量相比,支管一的风量严重偏大,偏差高达 51.4%,支管二的风量偏小,偏差为-23.8%,需要进一步调节;而支管三和总管的风量基本满足设计要求。

3.1 支管一的风量平衡调节

支管一的风量明显偏大,需要增加阻力系数,以达到风量平衡的目的^[17]。设计的技术方案(见表 2)

为在支管一安装节流管,同时调节节流率。

按表 2 技术方案调节后,通风管道风量模拟结果如图 2 所示。由图 2 可见,在节流率为 30% 时,支管一、支管二、支管三的风量偏差分别为 5.8%、-6.9%、14.4%,总管的风量偏差仅为 1.5%,

表 2 通风管道风量平衡的调节技术方案
Table 2 Adjustment scheme of the air volume for the ventilation pipe

方案编号	是否增设节流管	节流率/%
1	否	0
2	是	10
3	是	20
4	是	30
5	是	40
6	是	50

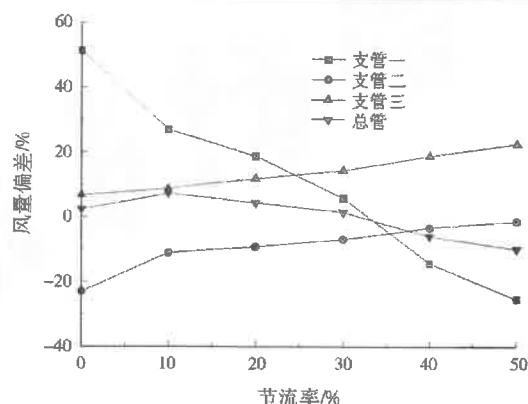


图 2 支管一各调节方案下通风管道风量模拟结果
Fig.2 The simulation results of the air volume for the ventilation pipe under the adjustment process of branch pipe 1

除了支管三外,其余偏差均低于 10%,达到风量设计要求。

由图 3 可见,在各调节方案下,支管一上的 2 个吸尘点(7#、8#)风量变化明显,在节流率为 30% 时,风量平衡性达到最优。支管二、支管三上的各个

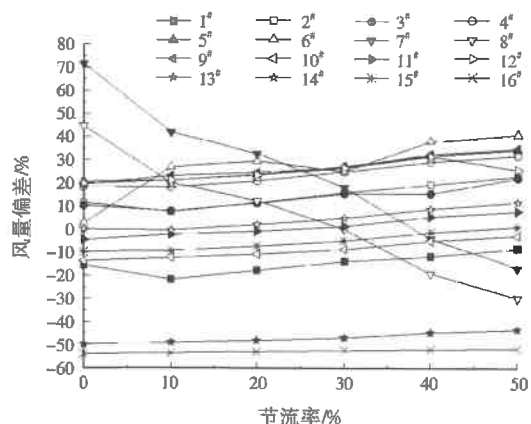


图 3 支管一各调节方案下每个吸尘点风量的模拟结果
Fig.3 The simulation results of air volume in each point of air cleaner under the adjustment process of branch pipe 1

吸尘点随着节流率的增加,风量逐渐变大,在节流率为 30% 时,各个吸尘点的风量平衡性最优。

3.2 支管三的风量平衡调节

根据 3.1 节可知,对支管一进行调节后,支管三的风量偏大,而由于支管三的管径较小,风量小于支管一、支管二,对其进行风量平衡调节,对后两者的影响相对较小。因此,按表 2 所示的技术方案再对管道三进行风量平衡调节,结果见图 4。

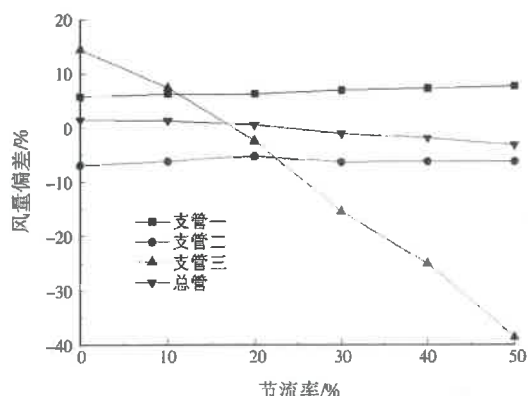


图 4 支管三各调节方案下通风管道的风量模拟结果
Fig.4 The simulation results of the air volume for the ventilation pipe under the adjustment process of branch pipe 3

由图 4 可知,随着节流率的增加,支管三的风量逐渐减少,在节流率为 20% 时,风量偏差的绝对值达到最小值,为 2.3%;调节过程中支管一、支管二的风量基本保持不变。

由图 5 可知,随着支管三风量的调节,支管三上的 6 个吸尘点(1#~6#)的风量都有着明显下降的趋势,其余吸尘点的风量则基本保持稳定。在节流率为 20% 时,支管三上除了吸尘点 1# 外,其他几个吸尘点的风量基本调节至合理范围。

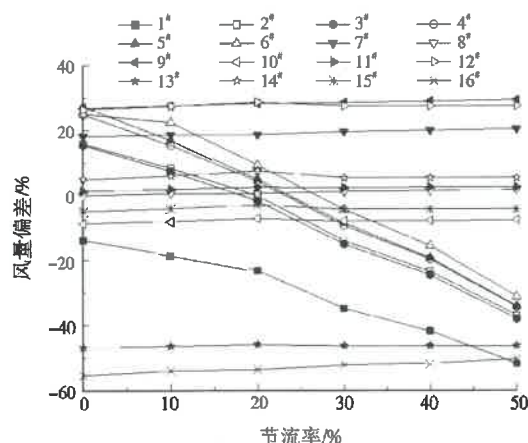


图 5 支管三风量调节过程中每个吸尘点的风量模拟结果
Fig.5 The simulation results of air volume in each point of air cleaner under the adjustment process of branch pipe 3

3.3 个别吸尘点的风量平衡调节

通过对支管一、支管三的风量进行调节后,吸尘点 7#、9#、12# 的风量偏差分别为 18.6%、28.3%、28.7%,仍偏大,需要在吸尘点支管处设置节流管,以达到风量平衡的要求。利用表 2 的技术方案对这 3 个吸尘点进行调节,发现吸尘点 7#、9#、12# 处节流管的节流率分别调节为 20%、30%、30% 时,风量平衡效果最好(见图 6)。

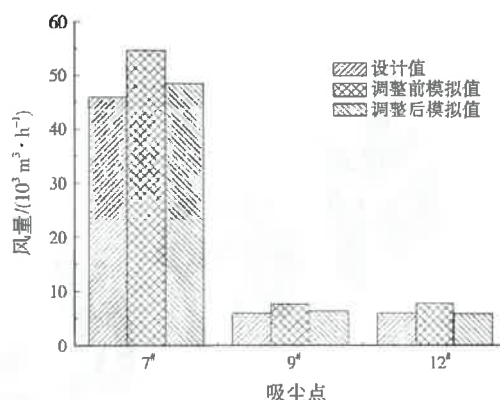


图 6 吸尘点 7#、9#、12# 调节前后的风量对比
Fig.6 The contrast of air volume before and after adjustment of air cleaner 7#, 9#, 12#
注:调整前风量指原风量的模拟计算值,图 8、图 9 同。

由图 6 可见,经调节后,吸尘点 7#、9#、12# 的风量可全部达到设计要求,其管道压力已基本达到平衡。

此外,对支管一、支管三的风量进行调节后,吸尘点 1#、13#、16# 入口风量明显偏小,通过设置节流管调节节流率也无法达到设计要求,较佳状态下的风量偏差分别为 -23.2%、-46.0%、-55.4% (见图 7),需要进一步改变管径才能达到风量的设计要求。现场实测发现,以上吸尘点都距离风机相对较

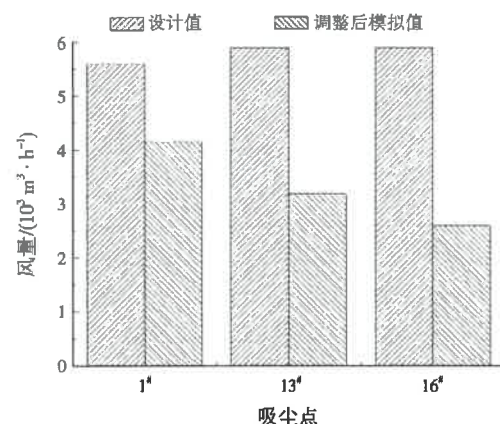


图 7 吸尘点 1#、13#、16# 调节前后的风量对比
Fig.7 The contrast of air volume before and after adjustment of air cleaner 1#, 13#, 16#

远,管道中有较多的弯头,局部阻力损失较大,管道设计不合理,需要进一步调整。

以上调节完成后,除吸尘点 1[#]、13[#]、16[#]外,其余各个吸尘点的风量基本都达到了设计要求,风量偏差小于 10%,且大部分吸尘点的风量偏差小于 5%。风量不平衡率从 75.0%降低到 18.8%,调节取得初步成效。

3.4 管道管径调节

按管道内实际风速计算各段的压力损失^[18]。并联管路的压力损失应尽可能调节平衡,其相对差值应小于 10%,否则必须调整管径,使之满足压力损失平衡。调整管径、平衡压力损失时,可按式(8)进行计算^[19]:

$$D'_2 = D_2 \left(\frac{\Delta P_4}{\Delta P_3} \right)^{0.225} \quad (8)$$

式中: D'_2 为调整后的管径,mm; D_2 为调整前的管径,mm; ΔP_4 为管径调整前的支管压力损失,Pa; ΔP_3 为管径的标准压力损失,Pa。

依据式(8)对吸尘点 1[#]、13[#]、16[#]管径调节后的管道压力损失进行计算,从而确定调整方案,结果如表 3 所示。

表 3 吸尘点 1[#]、13[#]、16[#]管径的调整方案

Table 3 Adjustment scheme of the pipe diameter for air cleaner 1[#], 13[#], 16[#]

项目	原始管径/mm	原始压力损失/Pa	标准压力损失/Pa	调整管径/mm
吸尘点 1 [#] 管道	300	647.3	517.8	315
吸尘点 13 [#] 管道	300	989.8	564.4	340
吸尘点 16 [#] 管道	300	689.7	456.7	330

利用 Gambit 软件对需要调整的管道管径进行调节,其余的参数设定均与调整前的一致,调节后 3 个吸尘点的风量变化见图 8。

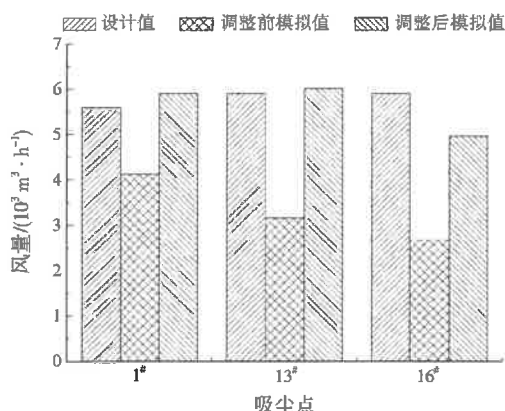


图 8 管径调整后吸尘点 1[#]、13[#]、16[#]的风量变化
Fig.8 The air volume of air cleaner 1[#], 13[#], 16[#] after adjusting pipe diameter

由图 8 可见,经过管径调整后吸尘点 1[#]、13[#]、16[#]的风量偏差分别为 4.0%、1.7%、-15.9%,吸尘点 16[#]的风量稍偏小。

以上的调节措施全部完成后,将各吸尘点风量的模拟计算值和调整前风量的现场实测值进行对比,结果见图 9。由图 9 可见,调整前的实测值和模拟值有相对较高的吻合性,通过 Fluent 仿真软件模拟能够较好反映出风量的基本变化趋势;调节完成后,各个吸尘点风量基本达到了设计要求。

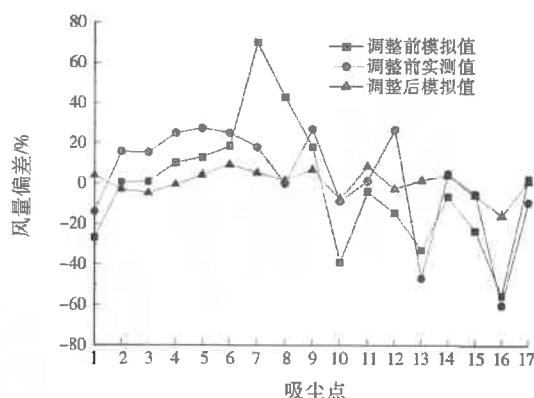


图 9 调整前后各吸尘点风量及与实测数据的对比
Fig.9 The air volume in each point of air cleaner before and after adjustment, and the comparison results with the measured data

注:实测值为调整前风量的现场实测值;吸尘点 17[#]指总管出口。

4 结论与结语

(1) 模拟数据表明,通风管道的原风量存在严重的不平衡性,吸尘点的风量不平衡率高达 75.0%。在部分管道增加节流管可以有效调整管道的压力不平衡性,调整后吸尘点风量的不平衡率为 18.8%,调节效果明显,满足工程实际应用要求。

(2) 对于阻力损失较大、风量偏小的管道,可通过管径调节使其风量基本达到设计要求。

(3) Fluent 仿真软件的风量模拟值与现场实测值有较高的吻合性,数值模拟方法可以为工业烟气净化系统的改造提供参考依据。不仅能够为前期工程设计提供帮助,大大节省工程调试费用,缩短工期,并有助于压力不平衡管道的调节和改造。

参考文献:

- [1] 幸福堂,陈旺生,张九红.武钢三烧电除尘系统风量平衡研究[J].建筑热能通风空调,2005,24(2):95-98.
- [2] 王琦,钟柯.通风系统风量分配器性能的数值模拟[J].制冷空调与电力机械,2006,27(3):17-20.

(下转第 89 页)