DOI:10. 3969/j. issn. 1674 - 1951. 2019. 09. 002

电除尘器进口烟箱结构设计对气流分布的 影响及数值模拟优化

Effect of smoke box structure at ESP inlet on gas flow distribution and optimization based on numerical simulation

熊远南¹, 汪永威¹, 陈英武² XIONG Yuannan¹, WANG Yongwei¹, CHEN Yingwu²

(1.中国大唐集团科学技术研究院有限公司华中电力试验研究院,郑州 450000;2.信阳市发改委节能监察局,河南 信阳 464000)

(1. Central-China Electric Power Test Research Institute, China Datang Corporation Science and Technological Research Institute Company Limited, Zhengzhou 450000, China; 2. Energy Conservation Supervision Bureau, Xinyang Development and Reform Commission, Xinyang 464000, China)

摘 要:某电厂2×300 MW 机组配套的电除尘器原进口烟箱结构不对称且导流板和多孔均布板设置不合理,导 致气流分布不均匀。对进口烟箱进行数值模拟研究,重点考察了进口烟箱结构对气流分布状况的影响:发现导流 板主要起到均匀分配两室烟气流量,调整烟气流向的作用,但对气流均匀性的改善具有一定局限性;而多孔均布 板能有效解决气流速度分布不均的问题,其优化布置形式也存在一定规律,即当安装间距由大变小、开孔率由小 变大时,更容易获得良好的气流分布均匀性,有利于提高除尘效率。通过对比进口烟箱内流场现场测试和数值模 拟结果,证实了数值模拟的准确性和可靠性。

关键词:电除尘器;进口烟箱;气流分布;流量偏差;数值模拟;优化

中图分类号:X 513 文献标志码:A 文章编号:1674-1951(2019)09-0006-06

Abstract: Asymmetric structure of original inlet smoke boxes and irrational arrangement of deflectors and orifice plates of an electrostatic precipitator (ESP) for 2 × 300 MW units in a power plant were conducive to the flow field non-uniformity. Numerical simulation was made on inlet smoke box, which focused on the influence of its structure on airflow distribution. It is found that deflectors play a major role in balancing gas distribution between two smoker boxes and adjusting smoke flow direction, however, they have limited improvement on airflow distribution uniformity. The orifice plates can effectively improve the uniformity of gas velocity distribution. There is regularity in the optimized layout of orifice plates which is the uniformity of airflow distribution can be improved with the decrease of orifice plate installation spaces and the increase of the percentage of open areas. With a better airflow distribution uniformity, the dust-removal efficiency can be raised. By analyzing field test results and the numerical simulation results, the accuracy and reliability of numerical simulation were confirmed.

Keywords: ESP; inlet smoke box; airflow distribution; flow rate deviation; numerical simulation; optimization

0 引言

目前,我国发电装机容量中,燃煤火电机组容量 约占62.2%,仍占据主导地位。燃煤电厂的烟尘排 放直接影响环境空气质量^[1-3],因此,有效控制燃煤 烟尘排放质量浓度,加快研究大气污染治理技术是 满足我国日趋严格环保标准的有效途径。电除尘器

收稿日期:2019-05-30;修回日期:2019-07-31

作为捕集粉尘颗粒的重要设备,以其工作可靠、高效 稳定、除尘效率高以及维护方便等众多优势^[4-5]被 广泛应用于电力、冶金、建材和化工等领域。自 2016年起,我国对燃煤机组全面实施超低排放改 造,要求控制火电厂燃煤机组尾部烟囱粉尘排放质 量浓度不超过10 mg/m³,部分重点地区甚至不超过 5 mg/m³,对电除尘器的性能提出了更高的要求。

燃煤电厂烟气在烟道空间的流动一般为复杂的 气固多相流^[6],如果电除尘器入口的含尘气流分布 不均匀,会严重堵塞和磨损进口烟箱,烟箱内部存在 的局部涡流和死角,不仅增加了能耗,还降低了除尘 效率。电除尘器两室流量分配的均衡性和气流分布 的均匀性是影响其性能的关键因素^[7-8]。因此,在 电除尘器入口端设计最佳布置形式的导流板,降低 烟气流动阻力,实现对烟气流量分配的均衡^[9-10]; 优化调整喇叭口的气流分布装置,有效减少气流紊 乱、旋流和回流等现象,进而改善气流分布质量,是 目前广大科技工作者重点关注的问题。

电除尘器的气流分布状况是结构设计和运行调整的重要参数,通过调整进口烟箱中气流分布板和导流板的布置方式来进行控制。气流分布研究主要有模型试验和计算流体动力学(CFD)数值模拟2种方法^[11-13]。与模型试验相比,数值模拟避免了试验的盲目性,可在较短周期内准确获得研究对象在实际工况下的各种运行参数。本文通过CFD数值模拟方法研究进口烟箱结构参数对气流分布均匀性的影响,以确定电除尘器进口烟箱结构的优化设计方案。

1 数值模拟

1.1 物理模型及网格划分

以某电厂2×300 MW 亚临界发电机组配备的 双室五电场静电除尘器为研究对象,按1:1的比 例建立电除尘器的几何模型,选取烟气入口流向为 X轴,监测截面烟道宽度方向为Y轴,高度方向为Z轴。由于烟气只在电除尘器进口烟箱内进行流量分 配和混合,同时为了节省计算资源和时间,本文只对 电除尘器的进口烟箱进行数值仿真。如图1所示, 物理模型主要包括入口竖井烟道和 A,B 室进口前 喇叭口。竖井烟道顶部中间安装了2块弧形导流 板,A 室进口圆弧段烟道处布置了4 块立式弧形导 流板,B室进口烟道布置了2块横向折线形导流板。 竖井烟道模型尺寸为 7 600 mm × 8 000 mm × 2 000 mm(长×高×宽),A室进口烟道包括直角段和圆 弧段2部分,其中直角段烟道尺寸为3180mm× 3600 mm × 3200 mm (长×高×宽),圆弧段烟道弧 度为90°,半径为4146 mm;B室进口烟道都是矩形 烟道,尺寸为7280mm×3600mm×3200mm(长× 高×宽)。本文采用了非结构化网格式进行网格划 分,同时对关键部分(导流板和多孔均布板)的网格 进行节点加密。

1.2 网格无关性验证

通过比较不同网格数量的电除尘器进口烟箱阻力压降,以验证计算结果对网格密度变化的敏感性。 如图2所示,网格数大于750万以后,阻力压降基本 不发生变化,且与现场测试值(212 Pa)较为接近。 因此,该物理模型划分的网格总数量为750万左右, 可满足计算精度要求。



1.3 边界条件

采用 Fluent 15.0 商业软件,设置稳态的压力基 求解器,求解方法采用压力-速度耦合的 SIMPLE 算法,对流项采用二阶迎风格式。本文将烟气作为 连续相,计算时采用标准的k-ξ双方程模型来求解 湍流问题^[14-15]。根据烟尘质量浓度测试数据可知, 颗粒相的体积分数约为2.57%,且烟气湍流会对烟 尘颗粒的运动产生影响,因此,采用离散相模型 (DPM) 描述烟尘颗粒在进口烟箱内部的运动轨 迹^[16],考虑烟气相与颗粒相之间的耦合作用。设置 烟气相的入口边界条件为速度进口,颗粒相射入速 度与烟气相相同,以垂直于表面的方式从入口面直 接喷入,速度为16.5 m/s,进口压力为0 Pa(静压); 进口烟箱2个出口为相同的压力出口,颗粒相特性 为逃逸;计算时间步长为0.001s,连续相每迭代计 算20次对离散相进行1次计算;采用无滑移壁面条 件,壁面为绝热且壁面边界层采用壁面函数法进行 处理,颗粒相特性为反射。在 Fluent 图形窗口中监 视各项变量残差的变化趋势,以小于1.0×10⁻⁴作 为迭代收敛的判定标准。

1.4 评价标准

采用相对均方根值 σ 对电除尘器 A,B 两室进

口截面气流流速的分布情况进行评价。DL/T 514—2017《电除尘器》中规定: $\sigma \leq 0.25$ 为合格, $\sigma \leq 0.15$ 为良好, $\sigma \leq 0.10$ 为优^[17]。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{v_i - \bar{v}}{\bar{v}}\right)^2} , \qquad (1)$$

式中: σ 为监测截面气流速度的相对均方根值; v_i 为 各测点的烟气流速,m/s;n为测点数; \bar{v} 为监测截面 各测点气流速度的算术平均值, m/s_o

一般电除尘器两室设计流量偏差在±5%范围 内,本文采用以下公式来计算电除尘器两室气流偏 差程度δ。

$$\delta = \frac{q_{mA} - q_{mB}}{q_{mA} + q_{mB}} \times 100\% , \qquad (2)$$

式中: q_{mA} , q_{mB} 为烟气经过除尘器 A,B 两室的质量 流速,kg/s。

2 数值模拟结果验证

2.1 现场流场测试结果

机组负荷稳定时,在电除尘器的2个进口烟道 监测截面处,采用3012H型自动烟尘测试仪及配套 的S型皮托管,以网格法顺序逐孔测量出不同负荷 下监测截面上各点的烟气流速和烟尘质量浓度。每 个进口矩形烟道尺寸为3600 mm×3200 mm(高× 宽),分别在A,B监测截面顶部(Y方向)开设4个 测孔,在每个测孔垂直方向(Z方向)分布16个测 点,测试结果见表1。

由表1可知:不同负荷条件下电除尘器A,B两 室内部速度分布的均匀性很差;随着负荷的增加,两 室入口截面的平均流速和烟尘质量浓度逐渐增大, 但σ和δ值几乎不发生变化:因此,本文只需要考察 100% 锅炉最大连续蒸发量(BMCR)工况即可。

2.2 现场测试与模拟结果对比

由图 3 可知,监测截面处烟气速度的数值模拟 分布趋势与现场测试结果比较吻合,说明运用数值 模拟进口烟箱内烟气流场分布是比较可靠的。A 室 入口烟道是直角结构,入口处布置了 2 块横向折线 形导流板,因此贴近下壁面附近存在明显的局部高 速涡流,流速高达28.0 m/s 左右,其他区域流速偏 低;B室入口烟道采用了直角弯弧结构,入口处也布 置了4块卧式弧形导流板,由于导流板的引流作用, 加上烟气偏流严重,B侧监测截面右壁面处于高流 速区,流速高达27.5 m/s 左右。



图 3 电除尘器 A, B 侧监测截面速度 分布模拟值与测试值

Fig. 3 Numerical simulation results and field test results of gas velocity distribution at monitoring cross-section on side A and side B of ESP

由表2可知,电除尘器A,B室监测截面烟气平 均流速、速度均方根值σ、阻力压降以及烟尘质量浓 度的现场测试和数值模拟结果较为接近,相对误差 均在8%以内,可满足工程应用的精度要求。

3 进口烟箱结构对气流分布的影响

3.1 导流板布置方式的影响

受空间布局限制,原电除尘器进口烟箱结构不 对称,当电除尘器尾部2个烟道出口对称时,在相同 引风机动力源的驱动下,A,B两室阻力不同;同时, 由于竖井烟道中的导流板几乎不起作用,导致烟气

	表1	电除尘器监测截面现场测试结果	
Tab. 1	Field	test results at monitoring cross-section of ESI	,

试验负荷	监测截面	平均流速/(m・s ⁻¹)	烟尘质量浓度/(g·m ⁻³)	σ	δ/%
50% PMCP	A室进口	9.6	16.99	0.441	-13.9
30% BMCK	B室进口	12.7	22.73	0.364	+13.9
75 / DMCD	A 室进口	11.5	20.89	0.438	-13.8
13% BMCK	B室进口	15.2	28.39	0.373	+13.8
1000 DMCD	A 室进口	14.3	27.83	0.457	-13.6
100% DMCK	B室进口	18.8	38.60	0.356	+13.6

表 2 电除尘器 A, B 侧截面现场测试和数值模拟结果对比

Tab. 2 Comparison between the field test results and numerical simulation results at

monitoring cross-section on side A and side B of ESP

项目	A室进口监测截面				B室进口监测截面			
	平均速度/ (m・s ⁻¹)	σ	烟尘质量浓度/ (g・m ⁻³)	阻力/ Pa	平均速度/ (m・s ⁻¹)	σ	烟尘质量浓度/ (g・m ⁻³)	阻力/ Pa
现场测试	14.26	0.457	27.83	212	18.76	0.356	38.58	173.00
数值模拟	13.45	0.469	29.35	207	17.56	0.382	37.55	178.00
相对误差/%	5.68	2.63	5.46	2.36	6.40	7.30	2.67	2.89

偏流现象严重。当烟气由竖井烟道进入 A,B 两室 时,流向由垂直变成水平方向,气流在拐弯处容易出 现涡流,造成中心气流和四周气流的分布严重不均。 因此,需要对电除尘器的导流板进行优化布置,引导 气流均匀分配。本文考察了竖井烟道中导流板的安 装角度、块数和位置对电除尘器两室流量分配和气 流均匀性的影响,如图4、图5 所示。



图 4 电除尘器进口烟箱竖井烟道中 导流板的布置方式 Fig. 4 Arrangement of deflector in vertical duct of smoke box at ESP inlet

由图5可知:当弧形导流板圆心角 θ 为60°时能 够获得最佳的气流分配均衡性;通过调整导流板的 安装位置(Y=0.9m)也可以优化气流分布;在竖井 烟道中安装1块导流板时,可初步改善电除尘器进 口烟气的流量分配,但还不足以消除内部强烈的旋 流现象;布置3块导流板与布置2块导流板起到的 均流效果差不多,其流量分配已趋于均衡,δ值均小 于5%,σ值稳定在0.17 左右。由此可知,导流板 并不是越多越好,因此,在竖井烟道中布置2块导流 板较为合理。

3.2 多孔板开孔率及间距的影响

为了改善气流分布的均匀性,通常会在电除尘 器进口烟箱喇叭口中布置多层多孔均布板。紊乱不 均的含尘气流通过多孔均布板时,依靠其节流作用, 迫使气流重新打乱分布,流速趋于一致,保证气流均 衡地布满整个空间,获得良好的流化状态。因此,本



图 5 竖井烟道中导流板布置方式对气流 均匀性的影响

Fig. 5 Effect of deflector installed in vertical duct on airflow distribution uniformity in smoke box at ESP inlet

文继续考察了进口烟箱喇叭口处3层多孔板的开孔 率和孔板布置间距对气流分布的影响,如图6—8所 示(图中:K为开孔率;X为安装间距)。



图 6 电除尘器进口烟箱气流分布装置结构 Fig. 6 Structure of air distribution plates in smoke box at ESP inlet

由图 7 可知:当喇叭口 3 层均布板的设置间距 一定时,在前 3 种开孔率方式中,3 层多孔板的开孔 率均是由小变大,有利于促进高低流速区域的烟气 流充分混合,增强流场分布的均匀性,随着开孔率的 减小,气流分布的均匀性得到进一步加强;但当采用 由大变小的第4种开孔率方式时(50%,45%, 40%),即使减小单层多孔板的开孔率也不能改善 流场分布的均匀性。多孔板是通过减小开孔率来增 加烟气阻力的,多孔板前面的大量烟气流被依次切 割,每切割1次,湍动强度就会被明显减弱,并在多 孔均布板后形成小规模紊流,因此当开孔率由小变 大时,不仅可以有效降低局部大涡流的产生,而且不 会过大增加烟气流动阻力。多孔板开孔率的设置应 结合进口烟箱的实际情况,开孔率过大均流效果会 减弱,过小烟气阻力会明显增加。相对而言,第3种 开孔率方式(40%,45%,50%)的烟气速度分布比 较均匀,且大部分分布在12~25 m/s。



图 7 多孔板开孔率方式对进口烟箱 气流均匀性的影响

Fig. 7 Effect of the percentage of open areas of orifice plates on airflow distribution uniformity

in smoke box at ESP inlet

如图 8 所示,第 3 种布置间距方式(X_1 = 1 800 mm, X_2 = 1 200 mm, X_3 = 1 000 mm)是从大变小且第 1 层间距更大些,这样更容易降低气流的湍动强度,最 大值仅为 2.5% 左右。由于从进口烟箱出来的烟气 在经过第 1 块多孔板前产生的涡流区域较大,烟气 速度严重分布不均,因此第 1 层多孔板的间距 X_1 应 设置较大些,使得烟气通过第 1 块多孔板后有足够 的空间充分混合。由于多孔板的阻力和均流作用, 烟气通过每层多孔板之后流速会大幅降低,且湍流 脉动程度也会降低,因此第 2 层和第 3 层多孔板间 距 X_2 和 X_3 应逐一减少。因此,整个喇叭口内不会 存在明显的高、低速气流区,各区域的湍流强度接 近,促使整体气流分布较均匀。

3.3 进口烟箱结构优化设计

拆除竖井烟道顶部原有的2片磨损严重的弧形



图 8 多孔板布置间距对进口烟箱 气流均匀性的影响

Fig. 8 Effect of the spaces between orifice plates on airflow distribution uniformity in smoke box at ESP inlet

导流板并采取以下优化措施:(1)其余设置不变,在 竖井烟道中间 Y = 0.9 m 处顶部横梁加装 2 块弧形 导流板,圆心角为 60°,厚度为 50 mm,半径分别为 3 600 mm和 1 800 mm;(2)优化多孔均布板的布置间 距和开孔率方式,如图 9 所示。



后数值模拟结果

Fig. 9 Numerical simulation results before and after installation of deflectors in vertical duct in ESP

由图9可知,原进口烟箱的竖井烟道导流板几 乎不起任何作用,加上原结构本身有利于烟气流向 B 室,因此,烟尘颗粒也随烟气严重偏流至 B 室入口。采取优化措施(2)后,增强了烟气的湍流和扩散程度,致使烟气分布更均匀。

锅炉尾部电除尘器进口烟箱内部流场分布不均,会引发电场内部形成高、低速区域,产生局部涡流和死角。由于除尘效率在低速区有所增加,高速 区有所降低,增加的除尘效率远远不及损失的除尘 效率,总的除尘效率是下降的,因此,除尘效率会随 着气流分布均匀性的改善而提高。

从表3可以看出,采取优化措施(1)后,A室入

口段流动阻力压降相比原结构降低了 28 Pa 左右, 和 B 室入口段几乎一样,因此,A 室入口烟气流量会 增大,B 室则会降低,两室流量偏差程度δ由优化前 的±13.60%降至±2.09%;A,B 两室烟气流的速度 均方根也有一定程度的下降,但σ值均在0.16 左 右波动,其气流分布状况不佳。由此可见,导流板的 布置方式对两室烟气流量分配的影响较为显著,但 对气流均匀性的改善有一定局限性。而优化多孔均 布板间距和开孔率方式,可大幅减少进口烟箱中的 气流偏转和局部涡旋,σ值可达到0.08 左右。

表 3 电除尘器进口烟箱优化前、后预期结果 Tab.3 Expected results before and after the optimization on the smoke box at ESP inlet

设计结构	δ/%		σ		阻力 p/Pa		1公小社本 /0/
	A 室	B 室	A 室	B 室	A 室	B 室	— 际主效率/%
原结构	-13.6	+13.6	0.469	0.382	207	178	99.91
优化(1)	-2.09	+2.09	0.163	0.159	179	176	99.95
优化(2)	-2.16	+2.16	0.082	0.078	212	210	99.96

4 结论

电除尘器进口烟箱内的现场流场测试结果证实 了数值模拟的可靠性和准确性。由于原进口烟箱布 置不对称且导流板和多孔均布板的设置存在一定问 题,导致整体流场状况很差。在竖井烟道中 Y = 0.9m 处安装 2 块圆心角为 60°的弧形导流板,促使两 室偏流程度达到最低值($\delta = \pm 2.09\%$);多孔板能 有效解决气流速度分布不均问题,即当每层多孔板 安装间距由大变小,开孔率由小变大时,会更容易获 得有利的气流分布,安装间距 $X_1 = 1800$ mm, $X_2 =$ 1 200 mm, $X_3 = 1000$ mm 以及开孔率 $K_1 = 40\%$, $K_2 =$ 45%, $K_3 = 50\%$ 时,气流分布均匀性可达到最优值 ($\sigma = 0.08$)。本工作可为电除尘器的优化设计与运 行提供技术参考。

参考文献:

- [1]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.
- [2] YI H H, HAO J M, DUAN L, et al. Fine particle and trace element emissions from an anthracite coal-fired power plant equipped with a bag-house in China[J]. Fuel, 2008, 87 (10 – 11):2050 – 2057.
- [3] 郝吉明,段雷,易红宏,等. 燃烧源可吸入颗粒物的物理 化学特征[M]. 北京:科学出版社,2008:1-3,70-76.
- [4]刘忠,刘含笑,冯新新,等. 湍流聚并器流场和颗粒运动轨 迹模拟[J]. 中国电机工程学报,2012,32(14):71-75.
- [5]纪世昌.静电除尘器气流分布数值模拟[J].环境工程学报,2016,10(4):1956-1960.
- [6]龙正伟,冯壮波,姚强.静电除尘器数值模拟[J].化工学报,2012,63(11):3393-3401.

[7] 闫东杰,党小庆,黄学敏,等. 电除尘器气流分布试验研究 和数值计算[J]. 环境工程学报,2008,2(3):383-386.

- [8] 熊远南,周晓湘,汪永威,等.基于响应面法的电除尘器 导流板优化布置[J].热力发电,2019,48(3):88-95.
- [9] 王为术,上官闪闪,姚明宇,等.300 MW 燃煤锅炉 SCR 脱 硝系统导流装置的设计优化[J].煤炭学报,2015,40 (7):1634-1640.
- [10] 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.
- [11] 邵毅敏,王洪江,熊绍武,等. 粉尘对电除尘器气流分布影 响仿真研究[J]. 环境工程学报,2009,3(3):516-520.
- [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): 404-408.
- [13] BHASKER C. Flow simulation in electro-static-precipitator (ESP) ducts with turning vanes [J]. Advances in Engineering Software, 2011, 42(7):501 – 512.
- [14]于飞,刘明,李卫东,等.90°矩形截面弯头内置导流板的 布置优化研究[J].动力工程学报,2015,35(2):147-152.
- [15] 孙超凡, 邬思柯, 钱炜, 等. 大型电袋复合除尘器除尘效 率的实验研究与优化[J]. 动力工程学报, 2014, 34(7): 534-540.
- [16] 王为术,王鑫,张春杰,等. 锅炉烟道飞灰颗粒电除尘捕 获特性研究[J]. 动力工程学报,2017,37(12):1007 -1014.
- [17] 电除尘器气流分布模拟试验方法: JB/T 7671—2017[S]. (本文责编: 刘芳)

作者简介:

熊远南(1992—),男,江西南昌人,工程师,工学硕士, 从事大气污染控制及工业水处理技术等方面的研究 (E-mail:xyn07915060@163.com)。