

# 湿法烟气脱硫流场优化数值模拟与模型试验研究

Numerical simulation and model experimental research on optimizing the flow field in wet flue gas desulfurization

杨丁<sup>1,2</sup>, 叶兴联<sup>1,2</sup>, 郭俊<sup>1</sup>, 苏寅彪<sup>1</sup>, 张楚城<sup>1</sup>

(1. 福建龙净环保股份有限公司, 福建 龙岩 364000; 2. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 流场是影响湿法烟气脱硫吸收塔脱除 SO<sub>2</sub> 效果的关键因素, 为了达到超低排放标准要求, 对湿法脱硫吸收塔流场优化至关重要。采用 CFD 方法对某燃煤电厂 2 × 660 MW 机组湿法脱硫吸收塔优化前流场进行数值模拟研究, 分析优化前吸收塔流场存在的问题, 之后对吸收塔流场进行优化。优化方案在吸收塔进口烟道和出口烟道布置导流板、在吸收塔内布置多孔分布器可使吸收塔流场得到显著改善, 有利于提高脱硫效率、减小烟道浆液沉积和降低烟道阻力。根据流体力学相似理论, 搭建缩小比例吸收塔模型进行流场试验, 试验速度分布均匀性与数值模拟结果相近, 验证了流场优化方案的可行性, 能为吸收塔设计提供指导作用。

**关键词:** 湿法烟气脱硫; 流场优化; 数值模拟; 模型试验

**Abstract:** Flow field is a key factor affecting the removal efficiency of SO<sub>2</sub> from wet flue gas desulfurization absorption tower. In order to meet the requirements of ultra-low emission standards, the flow field optimization of wet desulfurization absorber is of great importance. The CFD method is applied to simulate the flow field of a wet desulfurization absorber for a 2 × 660 MW unit in a coal-fired power plant. The existing problems of the flow field in the absorber before optimizing are analyzed, and then the flow field is optimized. In the optimization scheme, flow guiding vanes are set in the inlet and outlet flue ducts, and a porous flow distributor is set in the tower. The flow field has been significantly improved after optimizing, which is conducive to improve the desulfurization efficiency, reduce slurry deposition and decrease flow resistance. Based on the similarity theory of fluid mechanics, a model of reduced proportion absorption tower is built to carry out flow field experiment. The velocity distribution uniformity of the experiment is similar to that of numerical simulation. The feasibility of the flow field optimization scheme is verified, and it can provide guidance for the design of absorption tower.

**Key words:** wet flue gas desulfurization; flow optimization; numerical simulation; model experiment

中图分类号: X701.3

文献标识码: B

文章编号: 1674-8069(2018)02-009-05

## 0 引言

燃煤电厂排放的 SO<sub>2</sub> 是形成酸雨、雾霾等大气问题的主要污染物来源, 其对人体健康、自然生态、工农业生产、建筑结构等多方面都会造成危害<sup>[1-2]</sup>。为了控制 SO<sub>2</sub> 排放, 从 2011 年到 2014 年国家不断提高燃煤电厂 SO<sub>2</sub> 排放标准, 排放浓度限值由 200 mg/m<sup>3</sup> 降低至 35 mg/m<sup>3</sup><sup>[1-2]</sup>。

湿法烟气脱硫是当前燃煤电厂最主要烟气脱硫技术, 具有脱硫效率高、技术成熟、运行稳定等优点, 占据了 80% 以上的市场<sup>[3-4]</sup>。吸收塔是湿法脱硫的核心设备, 在吸收塔内含有 SO<sub>2</sub> 的烟气与石灰石

脱硫浆液一般逆向流动, 通过气液接触完成 SO<sub>2</sub> 吸附脱除。为了达到 SO<sub>2</sub> 排放浓度小于 35 mg/m<sup>3</sup> 的超低排放标准要求, 需要对湿法脱硫吸收塔进行精细化设计, 除了增加喷淋层、提高液气比外, 还应重视对流场进行优化。

流场是影响吸收塔脱硫效率的关键因素。在正常条件下, 喷淋层的脱硫浆液按均匀喷淋设计, 当喷淋层烟气分布不均时, 高烟速区域吸收剂不足, 而低烟速区域吸收剂又过量, 从而降低了整体的脱硫效率。为获得最佳的脱硫效果, 在吸收塔各横断面上烟气必须均匀分布, 使通过各喷淋区的气液充分接触反应。另外, 流场对吸收塔除雾效率、流动阻力也

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2017J06023)

会产生影响。当除雾器区域烟气速度分布不均时,烟速过高或过低均会造成液滴逃逸;流场不均、烟气流动混乱将增加涡流耗散,使流动阻力上升。

研究吸收塔流场的方法主要 CFD 数值模拟和模型试验两种方法。王旭<sup>[5]</sup>将大型脱硫吸收塔进行了简化,采用 CFD 方法对湿法脱硫吸收塔空塔流场进行了二维数值模拟。林永明<sup>[6]</sup>、耿萍<sup>[7]</sup>、陈安新<sup>[8]</sup>、高原<sup>[9]</sup>等也对吸收塔空塔流场进行了数值模拟研究。闫娜<sup>[10]</sup>对吸收塔空塔流场进行数值模拟研究,并搭建了吸收塔模型测试了除雾器效率及阻力特性,分析了喷嘴性能及组合布置、烟气出口位置、塔加高对流场的影响。陈鸿伟<sup>[11]</sup>、张冰洁<sup>[12]</sup>采用 CFD 方法对有、无喷淋条件下脱硫喷淋塔的流场进行数值模拟研究,分析了喷淋塔内烟气速度分布和阻力特性,但未涉及对流场进行优化,研究范围内仅从吸收塔入口至出口。

综上所述,研究人员主要采用 CFD 模拟方法研究吸收塔流场,仅局限于塔内流场,并且少有开展模型试验。由于引风机出口至吸收塔入口烟道常有转弯、变尺寸等,其对吸收塔入口流场会产生影响,因此吸收塔流场研究范围应从引风机出口至吸收塔出口,包含吸收塔进口烟道、吸收塔塔体、吸收塔出口烟道。本文将采用 CFD 方法对某燃煤电厂 2 × 660 MW 机组湿法脱硫吸收塔流场进行数值模拟分析,之后对流场进行优化使烟气速度分布均匀以满足高效脱硫要求,并结合流场模型实验,为湿法脱硫吸收塔设计提供指导。

## 1 研究对象

某燃煤电厂 2 × 660 MW 机组湿法脱硫吸收塔结构示意图如图 1 所示,包含引风机出口至吸收塔入口的进口烟道、5 层喷淋层和 3 级屋脊式除雾器以及出口烟道。塔径 16 m, BMCR 工况设计处理烟气流 270 465 563 m<sup>3</sup>/h。

## 2 模型假设及计算模型

根据湿法脱硫吸收塔实际运行情况,对吸收塔内烟气流动做如下假设:工况稳定,烟气流动为稳态;烟气为不可压缩牛顿流体;忽略温降对流场的影响;浆液液滴对烟气流动的作用采用多孔介质进行等效,阻力系数按喷淋层压降设置;除雾器采用多孔介质等效,阻力系数按除雾器压降设置。

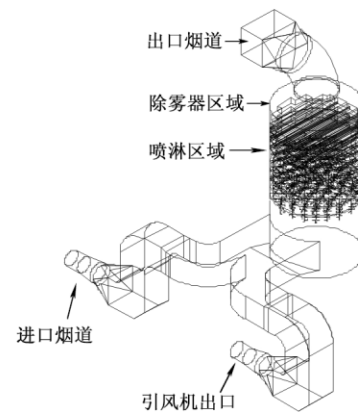


图1 某 2 × 660 MW 机组湿法脱硫吸收塔结构示意图

数值模拟控制方程使用连续性方程、动量方程,湍流模型采用标准 双方程模型、压力 - 速度耦合采用 SIMPLE 算法。假设模型入口速度均匀,边界采用速度入口边界,速度值按烟气流量计算得到;出口边界采用压力出口。

采用相对标准偏差值  $C_v$  来定量评价断面速度均匀性,其值越小表明数据越均匀, $C_v$  为:

$$C_v = \frac{1}{\bar{V}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n-1}} \quad (1)$$

式中:  $V_i$  为测点速度;  $\bar{V}$  为截面速度平均值;  $n$  为截面测点数。

## 3 数值模拟结果与分析

### 3.1 优化前数值模拟结果与分析

对吸收塔进行几何建模,优化前的吸收塔体内包含了 5 层喷淋管路和 3 层除雾器,在进口烟道、出口烟道内无导流装置,在吸收塔内无均流装置。

优化前吸收塔 BMCR 工况流场数值模拟结果如图 2 ~ 图 7 所示。

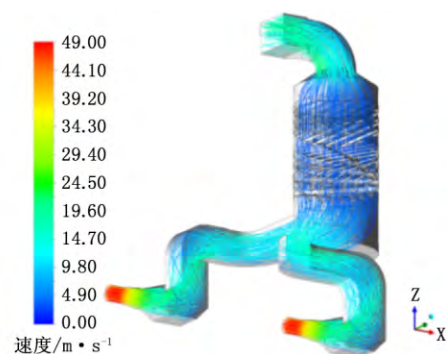


图2 优化前吸收塔烟气流场

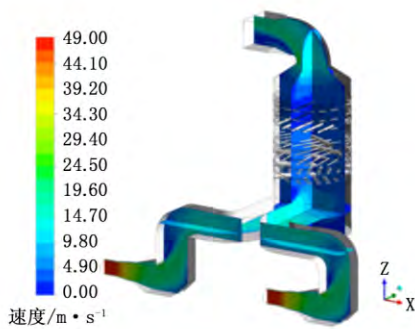


图 3 优化前吸收塔整体速度分布

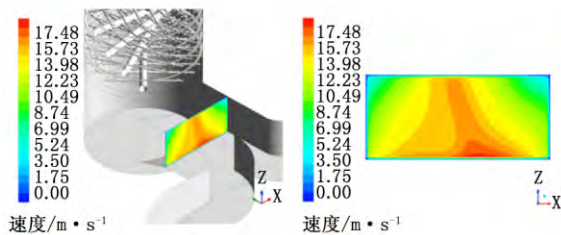


图 4 优化前吸收塔入口速度分布

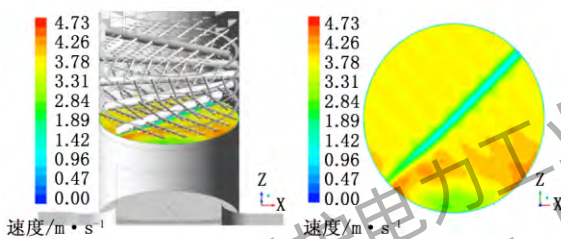


图 5 优化前喷淋层入口速度分布

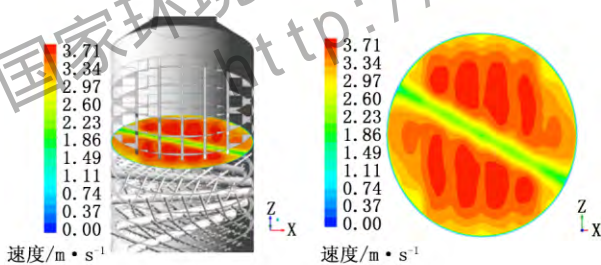


图 6 优化前除雾器入口速度分布

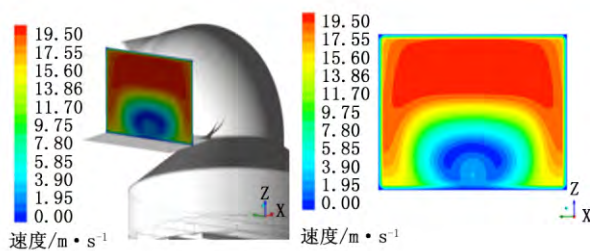


图 7 优化前吸收塔出口速度分布

从图 2、图 3 可知, 优化前在引风机出口至吸收塔入口的进口烟道内烟气流线紊乱, 在转弯烟道受离心力作用烟气形成了涡流, 增加了烟道流动阻力; 统计得到引风机出口至吸收塔入口的压降为 208 Pa。

从图 4 可知, 吸收塔入口速度分布不均匀, 受上游烟道的影响, 吸收塔入口速度分布呈现“中间大、两侧小”分布, 截面速度  $C_v$  值为 20.3%, 吸收塔入口速度分布不均匀一方面对吸收塔内烟气速度均匀分布不利, 另一方面在入口干湿界面处低烟速区对浆液的横向曳力不足导致部分浆液滴落入烟道内, 造成烟道结垢、腐蚀。

从图 5 可知, 优化前吸收塔喷淋层入口速度分布不均匀, 截面速度  $C_v$  值 18.2%, 不利于气液接触反应。从图 6 可知, 优化前除雾器入口速度均匀性良好, 截面速度  $C_v$  值为 12.6%, 受喷淋层浆液液滴的整流作用, 通过喷淋层后烟气速度分布趋于均匀, 有利于于除雾器除雾。

从图 7 可知, 优化前吸收塔出口速度分布极不均匀, 截面速度  $C_v$  值为 44.4%, 受转弯烟道影响, 吸收塔出口上部速度大、下部速度小, 产生了涡流, 除雾器逃逸的浆液滴容易在吸收塔出口沉积, 造成出口烟道结垢、腐蚀, 并且出口涡流增大了烟气流动阻力, 统计得到吸收塔出口烟道压降为 83 Pa。

### 3.2 优化后数值模拟结果与分析

根据优化前吸收塔流场数值模拟结果可知, 优化前吸收塔内进出口烟道、喷淋层入口流场均匀性差, 不利于高效脱硫, 并且容易使浆液滴沉积于进出口烟道。为了提高吸收塔脱硫效率, 减小烟道结垢、腐蚀风险, 需对吸收塔流场进行优化。

对吸收塔流场优化措施包括:

- (1) 在进口烟道转弯处合理设置导流板;
- (2) 在喷淋层上游设置多孔分布器, 多孔分布器是由孔板和分隔板组成, 浆液落入多孔分布器中形成浆液层, 孔板、浆液层具有均流作用;
- (3) 在出口烟道转弯处合理设置导流板。

模拟过程将多孔分布器和浆液层对气流作用采用多孔介质进行等效, 阻力系数按多孔分布器和浆液层 500 Pa 压降计算。

优化后吸收塔 BMCR 工况流场数值模拟结果如图 8 ~ 图 13 所示。

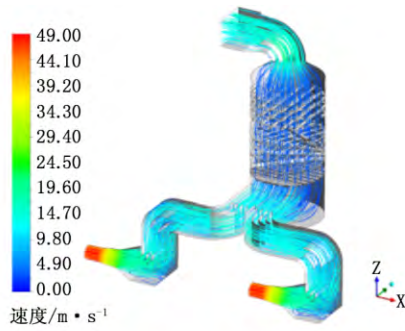


图8 优化后吸收塔烟气流线

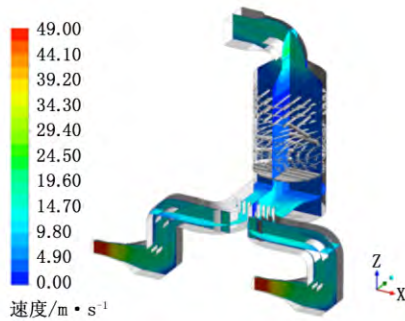


图9 优化后吸收塔整体速度分布

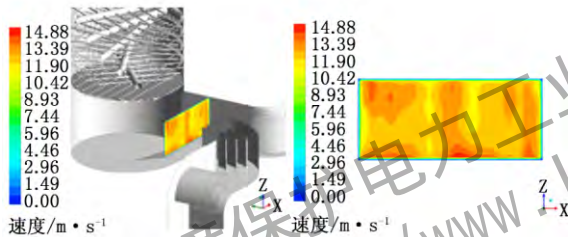


图10 优化后吸收塔入口速度分布

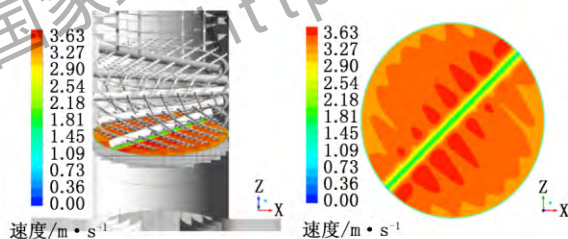


图11 优化后喷淋层入口速度分布

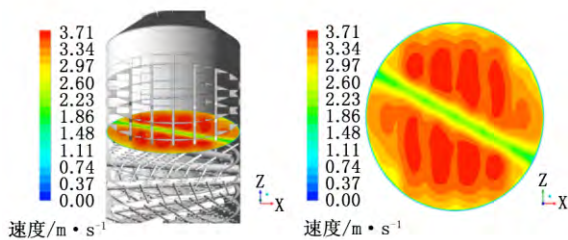


图12 优化后除雾器入口速度分布

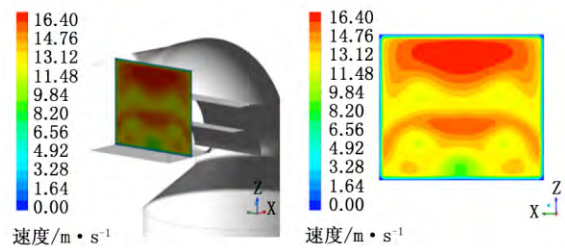


图13 优化后吸收塔出口速度分布

从图8、图9可知,优化后在引风机出口至吸收塔入口的进口烟道转弯处设置导流板消除了转弯处大范围涡流,使烟道内烟气流动变均匀,并降低了烟道流动阻力,引风机出口至吸收塔入口压降由优化前208 Pa降低至178 Pa,阻力减小30 Pa。

从图10可知,优化后吸收塔入口速度分布变均匀,截面速度 $C_v$ 值由优化前20.3%减小为5.7%,因此有必要在吸收塔上游烟道转弯位置合理设置导流板,吸收塔入口速度分布变均匀一方面对吸收塔内烟气速度均匀分布有利,另一方面也使入口干湿界面处的浆液滴不易落入烟道内。

从图11可知,优化后吸收塔喷淋层入口速度分布变均匀,截面速度 $C_v$ 值由优化前18.2%降低至8.8%。多孔分布器和浆液层对烟气具有强烈的整流作用,可使喷淋层入口烟气速度分布均匀,有利于气液接触反应、提高脱硫效率。虽然增设多孔分布器,烟气系统阻力会增加而使脱硫风机功率有所增加,但增设多孔分布器使烟气均匀分布,气液接触面积大,在保证脱硫效率情况下可降低液气比,降低浆液循环泵的功率<sup>[13-15]</sup>,从而降低了系统耗电。

从图12可知,优化后除雾器入口速度均匀性良好,截面速度 $C_v$ 值为12.4%,与优化前相近。

从图13可知,优化后吸收塔出口速度分布变均匀,截面速度 $C_v$ 值由优化前44.4%减小至11.3%,在转弯烟道合理设置导流板,消除了吸收塔出口涡流,逃逸的浆液滴不易在吸收塔出口沉积,并且减小了烟气流动阻力,吸收塔出口烟道压降由优化前83 Pa降低至50 Pa。

### 3.3 优化前、后数值模拟结果比较

优化前、后吸收塔流场数值模拟结果对比如表1所示。优化后吸收塔入口、喷淋层入口、吸收塔出口烟气速度均匀性得到显著改善,有利于提高脱硫效率、减小烟道浆液沉积和降低烟道流动阻力。

表 1 优化前、后流场数值模拟结果对比

项 目	优化前	优化后
吸收塔入口速度 $C_v / \%$	18.3	5.7
喷淋层入口速度 $C_v / \%$	10.1	8.8
除雾器入口速度 $C_v / \%$	12.6	12.4
吸收塔出口速度 $C_v / \%$	44.4	11.3
入口烟道压降/Pa	208	178
出口烟道压降/Pa	83	50

#### 4 流场模型试验结果

按优化方案搭建缩小比例模型开展模型试验, 为了使模型流场与实际吸收塔流场相似, 模型试验应满足几何相似、运动相似、动力相似。

试验采用常温空气作为烟气替代介质, 由一台最大流量为  $40000 \text{ m}^3/\text{h}$ 、风压为  $5000 \text{ Pa}$  鼓风机提供气流; 采用自来水作为浆液替代介质, 由 2 台最大流量为  $400 \text{ m}^3/\text{h}$ 、扬程为  $16 \text{ m}$  的水泵提供循环水, 风机与水泵均采用变频控制。

由于塔内喷淋层、第一层除雾器含有大量液滴的区域风速测试困难, 因此仅采用风速仪和皮托管测试了吸收塔入口、第二层和第三层除雾入口、吸收塔出口速度分布和引风机出口与吸收塔出口全压。试验结果与数值模拟结果对比如表 2 所示, 试验测得的速度分布均匀性、压降与数值模拟结果相近。模型吸收塔入口干湿界面, 吸收塔入口烟道无液滴沉积, 也表明吸收塔入口速度分布均匀性良好。模型结果验证了流场数值模拟优化方案的可行性。

表 2 试验结果与数值模拟结果对比

项 目	试验结果	数值模拟
吸收塔入口速度 $C_v / \%$	4.8	5.7
吸收塔出口速度 $C_v / \%$	14.7	11.3
第二层除雾器入口速度 $C_v / \%$	6.0	10.8
第三层除雾器入口速度 $C_v / \%$	11.3	12.5
系统总压降/Pa	1983	2116

#### 5 结语

(1) 优化前吸收塔流场均匀性差, 吸收塔入口、喷淋层入口、吸收塔出口速度分布不均, 不利于高效脱硫。

(2) 通过在吸收塔进出口烟道布置导流板、在喷淋层入口布置多孔分布器对流场进行优化, 吸收塔流场分布得到改善, 同时减小了进出口烟道流动阻力。

(3) 模型试验结果与优化方案数值模拟结果相近, 进出口烟道速度分布均匀、干湿界面无液滴沉积, 验证了流场优化方案的可行性, 能为吸收塔设计提供指导作用。

#### 参考文献:

- [1] 吴忠标. 大气污染控制技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [2] 郝吉明, 马广大. 大气污染控制技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [3] Nygaard H G, Kiil S, E. Johnsson J, et al. Full-scale measurements of  $\text{SO}_2$  gas phase concentrations and slurry compositions in a wet flue gas desulphurization and spray absorber[J]. Fuel, 2004 (83): 1151-1164.
- [4] Jin D S, Deshawl B R, Park Y S, et al. Simultaneous removal of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}$  by wet scrubbing using aqueous chlorine dioxide solution[J]. Hazard Mater 2006(135): 412-417.
- [5] 王旭. 大型湿法脱硫喷淋塔空塔流场数值模拟研究[J]. 东北电力技术, 2009(9): 8-11.
- [6] 林永明. 湿法烟气脱硫(WFGD)喷淋塔内烟气流场的数字模拟研究[J]. 热力发电, 2006(4): 6-8.
- [7] 耿萍. 湿法脱硫塔流场温场的数值模拟分析[J]. 山东建筑工程学院学报, 2005 20(5): 43-46.
- [8] 陈安新. 湿法烟气脱硫吸收塔流场的数值模拟研究[J]. 华电技术 2013 35(6): 76-81.
- [9] 高原. 湿法烟气脱硫吸收塔烟气流场数值模拟研究[J]. 节能技术 2012 30(171): 66-68.
- [10] 闫娜. 喷淋塔的冷态试验与数值模拟[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [11] 陈鸿伟, 李树华. 基于 CFD 技术的脱硫喷淋塔阻力特性的研究[J]. 电站系统, 2010 26(6): 24-26.
- [12] 张冰洁. 石灰石-石膏湿法烟气脱硫塔内流场模拟及优化分析[J]. 现代工业经济和信化, 2016(3): 50-61 67.
- [13] 曾庭华, 杨华, 廖永进, 等. 湿法烟气脱硫系统的调试、试验及运行[M]. 北京: 国电力出版社, 2008.
- [14] 张荀, 于桂平, 王宏亮, 等. 火电厂烟气脱硫效率低的常见分析及对策[J]. 电力科技与环保 2014 30(3): 16-18.
- [15] 严瑞峰. 脱硫吸收塔入口烟道泄漏原因分析及对策[J]. 电力科技与环保 2016 32(6): 30-31.

收稿日期: 2017-09-19; 修回日期: 2017-11-21

作者简介: 杨 丁(1981-), 男, 四川广元人, 注册环保工程师, 博士, 主要从事大气污染控制技术研究与应用。E-mail: yblued@139.com