

试验研究

含筛板式托盘的烟气脱硫塔的
CFD 数值模拟杨景香¹、陈开银²

(1.永清环保股份有限公司 湖南长沙 邮编 410330;

2.湖南宇环智能装备有限公司 湖南长沙 邮编 410100)

摘要:为了掌握烟气脱硫塔内流场分布,采用 CFD 进行数值模拟,通过 ICFM CFD 完成了求解区域的建模与网格划分,在吸收塔内引入 2 层喷淋层,分别进行了有筛板式托盘和无筛板式托盘时的数值模拟,分析了吸收塔内速度场、浆液体积分数和压力场变化情况。结果表明,有筛板式托盘的脱硫塔内浆液体积分数明显增加,有利于气液两相充分反应,从而有效提高了脱硫效率。

关键词:脱硫 CFD 数值模拟 筛板式托盘

中图分类号:X701

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2018)01-0038-03

CFD NUMERICAL SIMULATION OF FLUE GAS
DESULFURIZATION ABSORBER TOWER WITH SIEVE T
RAYYANG Jing-xiang¹, CHEN Kai-yin²

(1.Yongqing Environmental protection Co., Ltd., Changsha 410330, China;

2.Hunan Yuhuan Intelligent Equipment Co., Ltd., Changsha 410100, China)

Abstract: In order to grasp the flow field distribution in flue gas desulfuration absorber tower, CFD was used to numerically simulate the system. Modeling and network partition were completed by ICFM CFD. Two spray levels were used to simulate the situations with sieve tray and without sieve tray to analyze the change of velocity field, pressure field, and serum volume fraction in absorber tower. The results indicate that the serum volume fraction increases significantly in desulfuration absorber tower with sieve tray, which is benefit for desulfurizing efficiency and fully reaction between gas and liquid phases.

Key words: desulfurization; CFD Numerical Simulation; sieve trays.

国家和地方政府对烟气排放要求越来越严,国家于 2011 年颁布的《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011)中规定:从 2014 年 7 月 1 日起,燃煤电厂火力发电锅炉 SO₂ 的排放值 ≤100 mg/m³,重点区域 ≤50 mg/m³[1]。2014 年 9 月,国家发改委、环境保护部和国家能源局等三部委共同发布了《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020 年)》,文件中规定重点区域的燃煤电厂烟气污染物排放限值达到燃气轮机组的要求,

其中 SO₂ 排放量不应超过 35mg/Nm³,达到“超洁净排放”的要求[2]。

当前全球范围内技术最为成熟、运行最为可靠、应用最为广泛的湿法脱硫技术应是石灰石-石膏湿法脱硫的技术。在高硫煤地区,要达到“超洁净排放”的要求,目前的常规的脱硫工艺已经不能满足“超洁净排放”的要求。因此,投入科研力量开发一种高效的、低耗能的、运行维修方便的脱硫系统是非常必要的。本文将采用 CFD 数值模拟的方法对脱硫系统内的流场分布情况进行研究分析。

采用 CFD 数值模拟方法能够克服和填补传统设计方法中的缺陷,将大大减少物理的试验,缩短研究开发的周期,节约研究开发的经费,同时还能够得到大量的瞬态数据,从而指导工程设计和优化^[3]。

影响脱硫效率主要是考虑烟气在吸收系统内的流场分布情况^[4]。为了掌握脱硫塔内流场的分布,本文采用 CFD 方法对吸收塔内有无托盘时的速度场、压力场进行了数值模拟。

1 CFD 数值模拟理论及步骤

在吸收系统的流场模拟方面,由于吸收系统的流场非常复杂,难以从实验的角度来获取内部详细的流场信息,CFD 数值模拟技术是一种有效研究吸收塔内部流场的手段,在使用该技术分析脱硫吸收塔流场时,所建模型和实体尺寸基本一样,在工程实际中运用时,不存在放大效应,且相关参数的设置与所设计的工况相符,其模拟可信度较高。

1.1 流体动力学基本控制方程^[3]

流体的运动遵循着基本的物理定律。本模拟认为烟气是连续、定常且不可压缩的流体。其基本控制方程为质量守恒方程、动量守恒方程、能量方程和组分质量守恒。如下:

1.1.1 质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1-1)$$

式中: ρ 为密度, t 为时间, \vec{u} 为速度矢量, u 、 v 和 w 分别为速度矢量 \vec{u} 在 x 、 y 和 z 方向上的分量。

1.1.2 动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \quad (1-2a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (1-2b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (1-2c)$$

式中: p 为流体微元体上的压力, τ_{xx} 、 τ_{xy} 和 τ_{xz} 等是微元体的表面粘性应力 τ 的分量。

1.1.3 能量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_r \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中: C_p 为比热容, T 为温度, k 为流体的导热系数, S_r 为粘性耗散项。

1.1.4 组分质量守恒:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_s u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho c_s v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho c_s w)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial z} \right) + S_s \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中: C_s 为组分 s 的体积浓度, ρ_s 为该组分质量浓度, D_s 是该组分扩散系数, S_s 为生产率。

1.2 数值模拟步骤

利用 CFD 模拟计算软件进行数值模拟,模拟过程按以下步骤进行:

根据吸收系统设计的主要条件和数据建立吸收系统几何模型。

根据计算的需要对所建模型进行了网格的划分。

确定初始条件及边界条件。

设置求解计算的控制参数。

计算到结果收敛为止。

获取计算结果及后处理。

2 脱硫系统简介及物理模型的建立

2.1 吸收系统简介

某项目选用成熟的石灰石-石膏湿法脱硫空塔喷淋设计工艺,整个吸收塔设计采用一炉一塔系统配置。

2.2 物理模型的建立

本模拟根据广东某热电厂提供的原始设计图纸和相关资料建立吸收塔模型,吸收塔结构如图 2.1 所示。烟气沿入口烟道进入吸收塔,在上升过程先经过筛板式托盘^[5],再经过两层喷淋层。均匀布置在喷淋层的雾化喷嘴将脱硫浆液喷出,逆流接触上升烟气,浆液吸收 SO_2 之后下落到浆液池,本数值模拟采用点喷的方式对喷嘴进行设置,喷嘴参数与实际情况一致。经过洗涤之后的烟气再经过除雾器层后再经塔顶出口烟道排出。由于浆液池液面波动对吸收塔内烟气流场影响较小,本模拟对吸收系统做出物理上的简化,未考虑浆液池的影响,计算区域选为浆液池以上至烟气出口处。

本模拟采用 ICEM CFD 完成了求解区域的建模与网格划分,其中网格采用四面体网格格式划分。网格数量达到 400 万,网格精度较高。

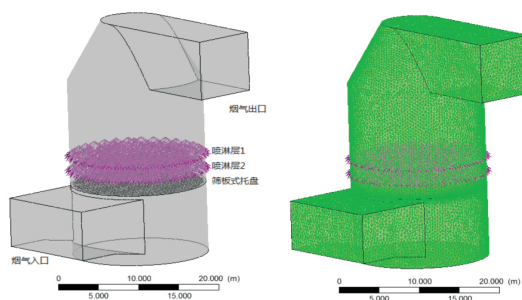


图 2-1 吸收塔物理模型

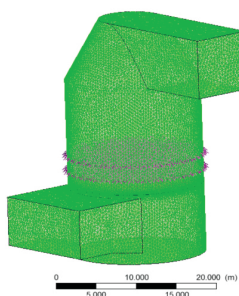


图 2-2 吸收塔模型网格图

3 吸收塔无筛板式托盘和有筛板式托盘的数值模拟

本模拟在吸收塔内引入 2 层喷淋层, 分别进行有筛板式托盘和无筛板式托盘时的数值模拟, 分析吸收塔内的速度场、浆液体积分数和压力场的变化情况。

3.1 吸收塔无筛板式托盘时的数值模拟

本模拟在吸收塔内引入 2 层喷淋层但无筛板式托盘时的数值模拟, 分析吸收塔内的速度场、浆液体积分数和压力场的情况。

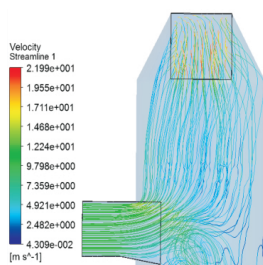


图 3-1 烟气速度流线图

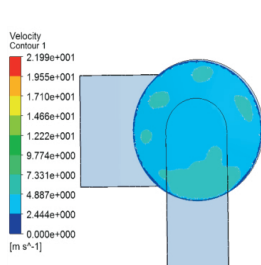


图 3-2 横截面方向速度云图

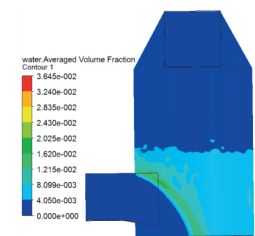


图 3-3 浆液体积分数分布云图

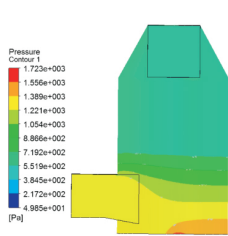


图 3-4 吸收塔压力分布云图

3.2 吸收塔有筛板式托盘时的数值模拟

本模拟在吸收塔内引入 2 层喷淋层有筛板式托盘时的数值模拟, 分析吸收塔内的速度场、浆液体积分数和压力场的情况。

3.3 吸收塔有无筛板式托盘时的数值模拟分析

由图可知, 喷淋液滴对烟气具有强烈的整流

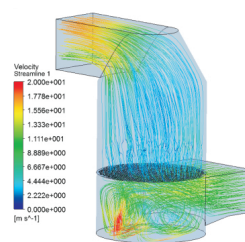


图 3-5 烟气速度流线图

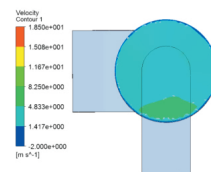


图 3-6 横截面方向速度云图

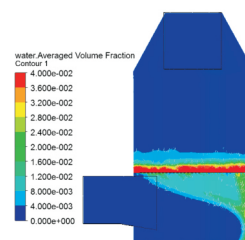


图 3-7 浆液体积分数分布云图

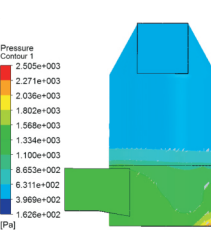


图 3-8 吸收塔压力分布云图

作用, 引入喷淋后, 吸收系统内总体气速降低, 烟气速度分布明显均匀化。吸收塔内无托盘与有托盘对比可知, 吸收塔横截面方向的烟气分布更加均匀, 有筛板式托盘区域的浆液体积分数增加, 塔内压降增加 200 Pa 左右。

由烟气速度流线图和横截面方向的速度分布云图可知, 虽然烟气在筛板式托盘下部远离入口一侧形成漩涡, 但吸收塔筛板式托盘以上部分的烟气流更加均匀、稳定。说明筛板式托盘具有一定的流场的均布的作用, 增加了气液两相接触传质面积, 提高了喷淋浆液的脱硫效率, 且速度分布均匀性能够保证除雾器入口气速维持在设计限值以内, 可有效防止雾沫夹带, 减少烟囱出口带浆液量。有利于除雾器正常发挥作用, 提高除雾效率, 可有效减少烟囱出口带浆液量。

由浆液体积分数分布云图可知, 与塔内无筛板式托盘的吸收塔相比, 吸收塔内加装筛板式托盘时, 在筛板式托盘区域的浆液体积分数明显增加, 烟气穿过此部分区域时, 大大增加了与浆液的接触面积, 有利于气液两相充分反应。

4 总结

本模拟运用 CFD 商业软件, 分析脱硫塔内有筛板式托盘和无筛板式托盘的数值模拟, 由模拟结果可知:

与无筛板式托盘相比, 加装筛板式托盘后, 在

(下转第 30 页)

=1.14 元, 加药量以 62.5 mmol/gCOD 计时, 吨水 H₂O₂ 费用 = $\frac{625 \times 300 \times 34}{1000 \times 0.3 \times 100000} \times 1000 = 2.13$ 元。当 COD = 800mg/L, H₂O₂ 加量以 33.6mmol/gCOD 计时, 吨水 H₂O₂ 费用 = $\frac{33.6 \times 300 \times 34}{1000 \times 0.3 \times 100000} \times 1000 = 3.05$ 元, 加药量以 62.5mmol/gCOD 计时, 吨水 H₂O₂ 费用 = $\frac{625 \times 300 \times 34}{1000 \times 0.3 \times 100000} \times 1000 = 5.67$ 元。预计电厂渗滤液 MBR 出水 Fenton 处理费均在 1.14~5.67 元/吨水。

表 2 两家焚烧厂 MBR 出水 Fenton 处理药剂费

项目	水源	A		B	
		H ₂ O ₂	FeSO ₄ ·7H ₂ O	H ₂ O ₂	FeSO ₄ ·7H ₂ O
最佳用量/(mmol/L)		27.9	1.0	13.0	2.5
吨水费用/元		3.16	0.03	1.47	0.06
合计		3.19		1.54	

5 结论

Fenton 法可以有效处理生活垃圾渗滤液 MBR 出水。Fenton 法处理效果受初始 pH 值、H₂O₂ 投加量和 Fe²⁺投加量的影响。不同渗滤液站 MBR 产水的 Fenton 处理最佳反应条件稍有不同。建议取初始 pH 值 5, Fe²⁺加量 2.5 mmol/L 以上。由于 H₂O₂ 价格昂贵, 加量最好由实验确定, 一般 62.5 mmol/gCOD 以上。

经 Fenton 处理, 渗滤液 MBR 出水 COD 最多可降至约 120~200 mg/L, 无法达到《污水综合排放标准》(GB8978-1996) 一级标准和《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889-2008) (二者均为 100mg/L)。

经 Fenton 处理, 渗滤液的可生化性提高, B/C

比从 0.16~0.19 上升至 0.288~0.331, 可对其进行进一步生化处理。

预计电厂渗滤液 MBR 出水 Fenton 处理药剂费 1.14~5.67 元/吨水。

参考文献

- [1] 楼紫阳, 李鸿江, 赵由才. 渗滤液难降解物质物化性质研究[J]. 环境化学, 2011, 30(1):293-299.
- [2] 陈少华, 刘俊新. 垃圾渗滤液中有机物分子量的分布及在 MBR 系统中的变化[J]. 环境化学, 2005, 24(3):153-157.
- [3] 楼涛, 汪学军, 何昆鹏, 等. 腐殖质的光化学降解及其对环境污染环境行为的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4):716-720.
- [4] 许志诚, 罗微, 洪义国, 等. 腐殖质在环境污染生物降解中的作用研究进展[J]. 微生物学通报, 2006, 33(6):122-127.
- [5] Ponge J F. Humus forms in terrestrial ecosystem: a framework to biodiversity[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(7):935-945.
- [6] 陈丽, 刘兰英. 芬顿试剂预处理对甲酚废水的研究 [J]. 环境保护与循环经济, 2016, 10:27-29+52.
- [7] GB 11914-89, 水质化学需氧量测定-重铬酸盐法[S].
- [8] Yang Deng, James D, Englehardt J D. Treatment of landfill leachate by the Fenton process [J]. Water Research, 2006, 40(20): 3683-3694.
- [9] 吴彦瑜, 郑可, 陈东宇, 等. Fenton 试剂氧化降解腐殖酸动力学 [J]. 环境科学, 2010, 31(9):2085-2091.
- [10] 吴彦瑜, 周少奇, 覃芳慧, 等. Fenton 法氧化/混凝作用去除腐殖酸的研究[J]. 环境科学, 2010, 31(4):996-1001.
- [11] 周玲玲, 张永吉, 孙丽华, 等. 铁盐和铝盐混凝对水中天然有机物的去除特性研究[J]. 环境科学, 2008, 29(5):1187-1191.
- [12] 叶少帆, 吴志超, 王志伟, 等. Fenton 法处理垃圾渗滤液过程中有机物分子质量分布和荧光特性 [J]. 环境科学研究, 2010, 23(8):1049-1054.
- [13] 王峻, 谢震方. Fenton 工艺处理垃圾渗滤液 MBR 出水的特性研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(12):188-193.
- [14] 许玉东, 范良鑫, 黄友福. Fenton 法处理垃圾渗滤液 MBR-NF 浓缩液[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9):3711-3716.

(上接第 40 页)

喷淋液滴的整流作用下, 吸收塔内气流均布效果明显, 横截面方向上的速度偏差小, 烟气速度分布明显均匀化。在筛板式托盘区域的浆液体积分数明显增加, 有利于气液两相充分反应, 使得脱硫效率大大提高, 从而为今后大型机组火力发电厂脱硫达到“超洁净排放^{[6][7]}”提供了积极的示范及参考数据。

参考文献

- [1] 环境保护部科技标准司.GB13223-2011 火电厂大气污染物排

放标准[Z].2011-07-29

- [2] 国家发改委、环境保护部、国家能源局. 煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020 年)(国办发[2014]31 号)[Z].2014-09-12
- [3] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004:3-11
- [4] 烟气脱硫喷淋塔流体力学特性研究[J]. 李仁刚, 管一明, 周启宏, 孙大伟, 孙祥志. 电力环境保护. 2001(04)
- [5] 托盘技术应用于湿法烟气脱硫的现状与展望[J]. 袁瑞龙, 孙琛, 肖爱萍, 于江, 张蕾, 杨晓峰. 广州化工. 2016, 44(19)
- [6] 湿法烟气脱硫技术研究现状及进展 [J]. 靳亚琼. 科技与企业. 2015(01)
- [7] 燃煤电厂锅炉超净排放技术改造探讨 [J]. 翟德双. 华东电力. 2014(10)