

文章编号: 1000-582X(2012)10-104-05

旁通式烟气循环流化床脱硫特性的数值模拟

唐 强^{a,b}, 侯世锋^a, 张晓琴^a

(重庆大学 a. 动力工程学院; b. 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:应用标准 k- ϵ 模型、DPM 模型和物质运输与化学反应模型模拟了烟气循环流化床内的两相流动及脱硫反应, 模拟结果和实验数据吻合较好。模拟研究了 2 种脱硫塔的脱硫效率和流动阻力, 并进一步研究了入口 SO₂ 浓度对旁通式脱硫塔脱硫效率的影响。结果表明: 旁通式脱硫塔的脱硫效率和阻力特性要优于无旁路脱硫塔; 旁通式脱硫塔的脱硫效率随入口 SO₂ 浓度的增加而降低; 脱硫塔内湿度增加时, 脱硫效率增加。

关键词: 循环流化床脱硫塔; 脱硫效率; 数值模拟

中图分类号: TK09

文献标志码: A

Numerical simulation of desulfurization characteristics in CFB flue gas with bypass

TANG Qiang^{a,b}, HOU Shifeng^a, ZHANG Xiaoqin^a

(a. College of Power Engineering; b. Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: This paper uses the standard k- ϵ model, DPM, Species Transport and Finite-Rate Chemistry model to simulate momentum, energy and composition equations of a new CFB desulfurization tower with gas bypass. The numerical simulation results agree well with the experimental results. The characteristics of desulfurization and flow resistance of two desulfurization towers are analyzed by numerical simulation, and the influence of SO₂ concentration to desulfurization efficiency of bypassing desulfurization tower is also analyzed. The results show that both desulfurization and flow resistance characteristics of bypassing desulfurization tower are better than those of non-bypassing desulfurization tower. The desulfurization efficiency of bypassing desulfurization tower decreases with the increase of SO₂ concentration, the desulfurization efficiency increases with the increase of the relative humidity of bypassing desulfurization tower.

Key words: CFB desulfurization tower; desulfurization efficiency; numerical simulation

烟气循环流化床脱硫是一种使高速烟气流与脱硫剂颗粒充分接触从而实现烟气脱硫的半干法烟气脱硫技术。它由于投资少、运行费用低、脱硫剂利用率和脱硫效率高以及耗水量小等优点而在工业生产中得到广泛的应用^[1-2]。但是, 随着研究的深入, 发

现无旁路的循环流化床脱硫塔存在着流场偏斜的问题; 而且不能很好的适应烟气负荷的变化, 当烟气负荷高于设计工况时, 会导致脱硫效率明显下降, 烟气量偏低时则会影响脱硫剂在脱硫塔内的流化效果, 而且由于其流动阻力较大, 不利于风机的稳定运行。

收稿日期: 2012-04-09

基金项目: 重庆市自然科学基金重点基金项目(CSTC, 2009BA6067)

作者简介: 唐强(1973-), 男, 重庆大学博士, 副教授, 主要从事节能减排环保研究, (E-mail) tangqing@cqu.edu.cn。

随着计算流体力学的发展,很多学者采用 CFD 数值模拟方法对不同形式的脱硫塔内的流动和脱硫反应特性进行了研究^[3-5]。Antonio Gómez^[6], Fabrizio Scala 等^[7]采用 Euler-Euler 两相流机制对工业用的喷雾干燥脱硫器进行了数值模拟,并通过与实验结果比较验证了 CFD 用于研究脱硫装置的准确性;李艳平等^[8]为了解决无旁路脱硫塔流场的偏斜问题,采用 Euler-Euler 两相流机制对循环流化床脱硫塔冷态流动进行了模拟,并提出了将返料口对称布置的想法。目前,对脱硫塔内烟气流动阻力的研究还未见相关文献。

为了解决无旁路脱硫塔流场偏斜以及烟气流动阻力大的问题,首次提出了一种新型旁通式循环流化床脱硫塔,采用 CFD 数值模拟的方法,研究脱硫塔结构和烟气 SO₂ 浓度对循环流化床脱硫塔脱硫效率的影响。

1 物理模型与数学模型

以旁通式循环流化床脱硫塔为物理模型,如图 1 所示。该脱硫塔主体结构为圆柱形,高 2.36 m,直径为 0.2 m;脱硫塔主体下部设置文丘里入口段,高 0.25 m,喉部直径为 0.06 m;回料口直径 0.03 m,距塔底高度为 1 m,倾斜布置,与脱硫塔主体成 30°角;在文丘里入口段上方,对称分布有 4 个旁通烟气入口,直径为 0.02 m,距塔底 0.26 m 处。脱硫塔的其他参数见表 1。

表 1 脱硫塔的其他参数

参数	无旁路	有旁路
脱硫剂粒径/ μm	15	15
颗粒密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 248	2 248
烟气 SO ₂ 浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	10 ³ ~10 ⁴	10 ³ ~10 ⁴
文丘里喉部流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	12.2~26.8	12.2
旁通入口流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0	6.6~39.9
循环倍率	49	49
钙硫比	1.3	1.3
返料口颗粒质量含率	0.5	0.5

烟气循环流化床脱硫塔内的物料质量浓度为 0.5~2 kg/m³,体积浓度小于 10%^[9-10]。因此,用 Fluent 软件模拟塔内气固两相的湍流流动时,采用 Euler-Lagrange 机制和标准 k- ϵ 模型。有研究表明,塔内进行的主要化学反应^[11-12]为

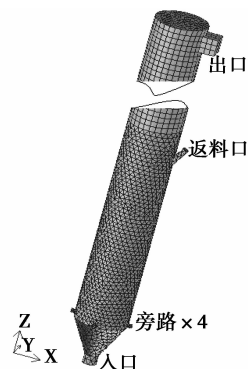
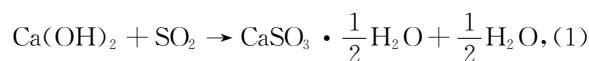


图 1 物理模型和计算单元划分示意图



该反应对 SO₂ 为一级反应。选用物质输运及化学反应模型来模拟塔内 SO₂ 和脱硫剂 Ca(OH)₂ 的反应,反应速率方程以及相应的化学动力学参数按文献[12-13]中选取。模拟时,将 Ca(OH)₂ 和 CaSO₃ 颗粒作为离散相,固体颗粒与增湿水混合完全,在脱硫剂表面形成一层稳定液膜。浆滴内的微小 Ca(OH)₂ 颗粒向液滴表面扩散并同与浆滴表面接触的 SO₂ 发生反应,生成 CaSO₃ · 1/2H₂O,与此同时,浆滴表面的水分在热烟气的作用下蒸发。浆滴表面的水分蒸发完全,生成的 CaSO₃ 附着在固体颗粒表面,此时该脱硫剂颗粒停止反应。

模拟过程中假设:1)脱硫剂颗粒为球形,且取平均粒径;2)颗粒在脱硫塔内只受重力和气固两相间的曳力;3)忽略 O₂ 和 CO₂ 对脱硫反应的影响;4)反应仅在浆滴的液相中完成,脱硫剂与 SO₂ 的反应按式(1)进行;5)忽略颗粒间的摩擦所产生的热量;6)脱硫剂颗粒到达壁面即被反弹回脱硫塔内。

通过网格无关化验证后,将模型划分为 24 万个组合体计算单元,如图 1 所示。入口边界采用速度型入口,出口为出流型边界条件;忽略通过壁面向外界传热,故将壁面的热流密度设为 0。控制方程的离散和求解采用中心差分格式和 SIMPLE 算法。

2 模拟结果与分析

2.1 模拟与实验结果的比较

采用上述数学模型,对文献[14]中的循环流化床脱硫塔进行模拟,并将所得结果与实验数据进行比较,如图 2 所示。总体上,模拟所得的脱硫效率与实验结果比较接近。

露点温差(ΔT_{as})是烟气温度与烟气中水蒸气分压下的饱和温度之差。露点温差在 10~20 °C 时,

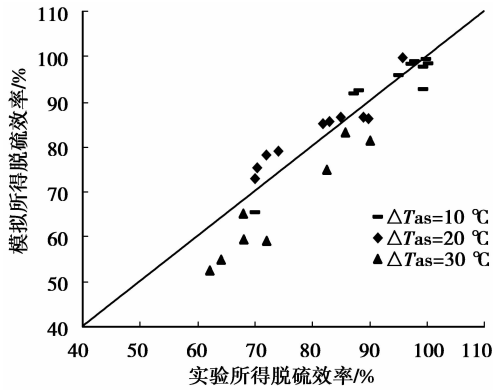


图 2 模拟与实验所得脱硫效率的比较

模拟与实验所得到的脱硫效率吻合较好,最大相对误差为 8.61%。说明在这一露点温差范围内,模拟计算所得的脱硫效率结果与实验相符,模拟所选用的数学模型能够较好反应循环流化床脱硫塔的脱硫状况。

露点温差为 30 °C 时,模拟所得效率均低于实验结果,最大相对误差为 18.25%。露点温差较大时,浆滴液相蒸发加快,颗粒蒸干后会通过相互摩擦使反应产物脱落从而使脱硫剂继续进行反应,而模拟中认为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 蒸干后即丧失了脱硫能力,这就使得模拟中脱硫剂颗粒的转化率降低,从而降低了脱硫效率。因此,露点温差较大时,模拟的脱硫效率与实验值偏差较大,且均低于实验值。

对于旁通式脱硫塔,采用同种脱硫剂,其参数变化保持在如图 2 所示范围内,应用该数学模型对其做了多种工况的数值模拟。

2.2 脱硫塔结构的影响

模拟烟气流量对 2 种脱硫塔的脱硫效率和流动阻力的影响时,保证旁通式脱硫塔的文丘里入口烟气流速为 12.2 m/s(50%烟气量)不变,通过改变旁通烟气入口的烟气量来适应总的烟气量的变化。

入口 SO_2 浓度 C_{SO_2} 为 3 000 mg/m^3 ,露点温差 ΔT_{as} 为 16 °C 时,烟气流量变化对旁通式脱硫塔与无旁路脱硫塔的脱硫效率和流动阻力的影响如图 3 所示。当烟气流量在 50%~120% 负荷变化时,旁通式脱硫塔的脱硫效率整体上高于无旁路脱硫塔,最多提高 15.1%。

图 4、图 5 分别为烟气流量 100% 时脱硫塔中心轴线的速度分布和 SO_2 体积浓度分布。从图 4 看出,旁通式脱硫塔中心轴线的速度在文丘里入口和旁路入口处最高,之后沿脱硫塔高度方向逐渐趋于稳定;无旁路脱硫塔则在文丘里入口处速度最高,之后在返料口下部的大部分区域,中心轴线上的速度

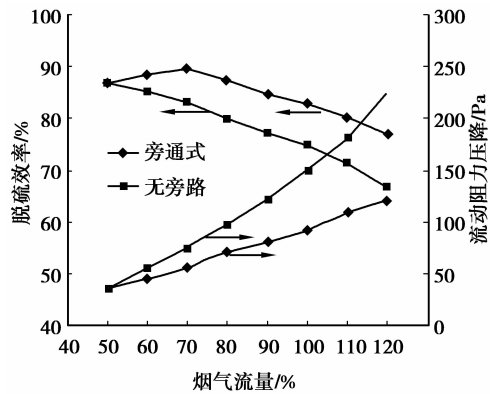


图 3 旁通式脱硫塔与无旁路脱硫塔的比较

值明显低于稳定值。图 5 则说明,在返料口下部的大部分区域,旁通式脱硫塔的 SO_2 浓度有明显的降低,而无旁路脱硫塔变化不大。以上表明,无烟气旁路时,返料造成脱硫塔内返料口下部流场发生明显偏斜,脱硫剂集中分布在脱硫塔的一侧,不能均匀而广泛地分布在脱硫塔内,不利于脱硫反应的进行。旁通式脱硫塔在文丘里入口段上方设置了 4 个旁通的烟气入口,可以有效地降低返料对流场的影响,减轻了脱硫剂在塔内的偏斜程度;同时,旁通烟气与主流烟气的混合扰动增强了塔内的湍流强度,强化了 SO_2 与脱硫剂间的传质,提高了脱硫效率。图 3 还表明,旁通式烟气脱硫塔的流动阻力特性较好。2 种脱硫塔的烟气入口和烟气出口之间的流动阻力均随烟气流量的增加而增大,但旁通式烟气脱硫塔的流动阻力增加的幅度更小。

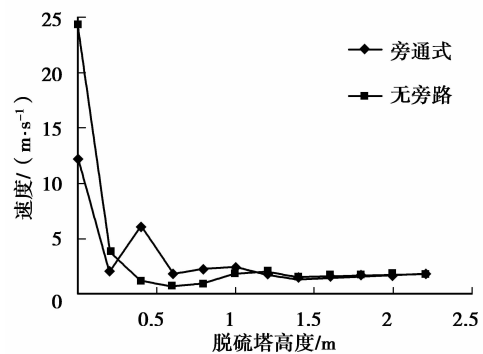
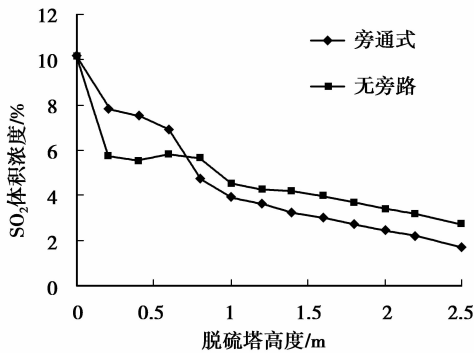


图 4 脱硫塔 Z 向中轴线的速度分布

图 3 中无旁路脱硫塔的脱硫效率随烟气流量的升高而降低。这是因为烟气量的增加减少了 SO_2 在脱硫塔内的停留时间;同时由于存在着流场的偏斜以及较大的阻力压损,使得烟气湍流强度的增加对脱硫反应的影响较小,脱硫效率随烟气负荷的升

图 5 脱硫塔高度方向的 SO_2 分布

高而降低。旁通式脱硫塔的脱硫效率随烟气流量的增大呈现先略有升高后降低的趋势。随着烟气流量的增加,脱硫塔内湍流强度增强,对脱硫效率的影响较大,使脱硫效率有所提高。但是,烟气流量较大时,湍流强度的作用减小,此时烟气中 SO_2 因停留时间缩短而使脱硫效率逐渐降低。

2.3 入口 SO_2 浓度的影响

烟气流量为 100% 时,旁通式脱硫塔的脱硫效率与入口烟气 SO_2 浓度的关系如图 6 所示。

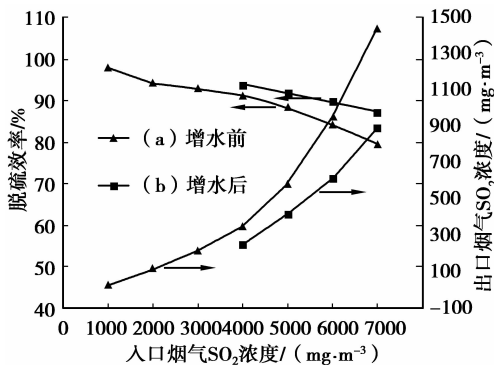
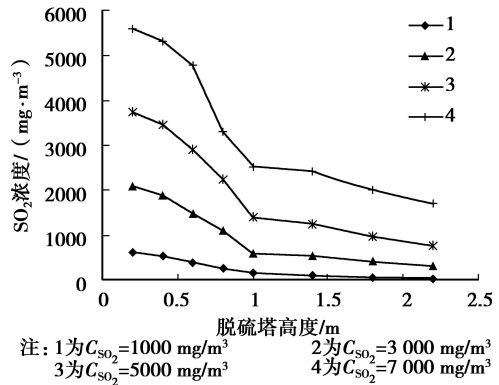
图 6 入口 SO_2 浓度的影响

图 6 曲线(a)表明,脱硫效率随入口 SO_2 浓度的增加而降低。图 7 显示了脱硫塔内 SO_2 的浓度分布。图 7 表明, SO_2 浓度沿脱硫塔高度方向逐渐降低,且降低趋势随入口烟气 SO_2 浓度的降低而变得均匀。在循环倍率、钙硫比和烟气流量不变的情况下,进入脱硫塔内的返料量随入口烟气 SO_2 浓度的降低而降低,使脱硫塔内的固体颗粒量减少,减小了烟气的流动阻力,使得脱硫塔内的物料分布更均匀,有利于 SO_2 与脱硫剂颗粒的传质。另一方面,入口 SO_2 浓度的增加会增大初始阶段的脱硫反应速率^[15],生成的脱硫产物快速地附着在固体颗粒外表面,增大了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 向颗粒表面扩散的阻力,减少

了 SO_2 与脱硫剂的接触面积,使脱硫剂的转化率降低,降低了脱硫效率。因此当入口 SO_2 浓度高于 $7\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$ 时,脱硫效率降到 80% 以下,此时 SO_2 的排放浓度已大大超过 $900\ \text{mg}/\text{m}^3$ 。

图 7 入口 SO_2 浓度对脱硫塔轴向 SO_2 分布的影响

为了提高较高 SO_2 浓度烟气的脱硫效率,模拟对入口烟气 SO_2 浓度高于 $4\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$ 的工况增大了返料的含水量,如图 6 曲线(b)所示。当返料的含水量增大时,塔内相对湿度增加,减缓了脱硫剂表面水分的蒸发,降低了脱硫反应的传质阻力,增大了脱硫剂的转化率,提高了脱硫反应平均速率,使脱硫效率有所增加。

图 6 还显示了旁通式脱硫塔出口处的 SO_2 浓度随入口烟气中的 SO_2 浓度的变化关系。从图 6 中可以看出,增加返料含水量后,出口 SO_2 的排放浓度明显降低,使得脱硫塔对 SO_2 浓度的适应范围有所增大。

3 结 论

通过与实验数据的比较,验证了模拟所采用的数学模型和化学反应机理的准确性,对旁通式循环流化床脱硫塔进行了多种工况的数值模拟,得到以下结论。

1)旁通式脱硫塔可以有效改善无旁路脱硫塔流场偏斜的状况,其脱硫效果要优于无旁路脱硫塔,在计算范围内,脱硫效率最多可以提高 15.1%;同时旁通脱硫塔的系统阻力特性也优于无旁路脱硫塔,可以更好地适应烟气负荷的变化。

2)旁通式脱硫塔的脱硫效率随烟气负荷的增加呈现先略有增加后降低的趋势,而无旁路脱硫塔则随烟气负荷的增加而降低。

3)旁通式脱硫塔的脱硫效率随入口烟气 SO_2 浓度的增加而降低,当增加塔内相对湿度后,可使脱

硫效率有所提高,使得脱硫塔对烟气 SO_2 浓度的适应范围有所增大。

参考文献:

- [1] 朱宝山. 燃煤锅炉大气污染物净化技术手册[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [2] 许勇毅,查智明,赵翠仙. 烟气循环流化床脱硫脱硝工艺技术的特点与现状[J]. 工业安全与环保,2007,33(1):16-17.
XU Yongyi, ZHA Zhiming, ZHAO Cuixian. The characteristics of technology on desulfurization and denitrification by flue gas circulating fluidized bed[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2007, 33(1):16-17.
- [3] Pirker S, Gittler P, Pirker H, et al. CFD, a design tool for a new hot metal desulfurization technology[J]. Applied Mathematical Modelling, 2002, 26 (2): 337-350.
- [4] Long X L, Xiao W D, Yuan W K. Simultaneous absorption of NO and SO_2 into hexamminecobalt(II)/iodide solution [J]. Chemosphere, 2005, 59 (6): 811-817.
- [5] Marocco L, Inzoli F. Multiphase euler - lagrange CFD simulation applied to wet flue gas desulphurisation technology[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2009,35(2):185-194.
- [6] Gomez A, Fueyo N, Tomas A. Detailed modelling of a flue-gas desulfurisation plant [J]. Computers and Chemical Engineering,2007,31(11):1419-1431.
- [7] Scala F, D'Ascenzo M, Lancia A. Modeling ue gas desulfurization by spray-dry absorption[J]. Separation and Purification Technology, 2004, 34 (1/2/3): 143-153.
- [8] 李艳平,胡金榜,赵凯. 循环流化床脱硫器气固两相流动的数值模拟[J]. 高校化学工程学报,2008,22(3):454-459.
LI Yanping, HU Jinbang, ZHAO Kai. Numerical simulation of gas solid flow in circulating fluidized bed desulfurization reactor [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2008, 22(3):454-459.
- [9] 胡金榜,陈安新,李艳平,等. 循环流化床脱硫反应器 Ca/S 比选择的影响因素[J]. 化学工业与工程,2005,22(2):136-139.
HU Jinbang, CHEN Anxin, LI Yanping, et al. Influencing factors of ratio of calcium to sulphur in circulating fluidized bed desulfurization reactor [J]. Chemical Industry and Engineering, 2005, 22 (2): 136-139.
- [10] 韩旭,韩增山,李振中. 循环流化床烟气脱硫试验及数学模型[C]. 第四届全国火力发电技术学术年会论文集. 西安:中国电机工程学会,2003.
- [11] 吴颖海,冯斌,黄震,等. 循环流化床烟气脱硫的实验研究及其数学模型[J]. 热能动力工程,1999,14(4):284-286.
WU Yinghai, FENG Bin, HUANG Zhen, et al. Experimental study of circulating fluidized bed flue gas desulfurization and its mathematical model[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,1999,14(4):284-286.
- [12] Chu C Y, Hwang S J. Flue gas desulfurization in an internally circulating fluidized bed reactor[J]. Powder Technology, 2005,154(1):14-23.
- [13] Irabien A, Cortabitarte F, Ortiz M I. Kinetics of flue gas desulfurization at low temperatures: nonideal surface adsorption model [J]. Chemical Engineering Science, 1992,47(7):1533-1534.
- [14] 雷福林,肖云汉,朱廷玉,等. 循环流化床反应器干法烟气脱硫实验研究[C]. 中国工程热物理学会第十届年会论文集. 北京:中国工程热物理学会,2001:416-420.
- [15] 谢建军,钟秦. 循环流化床烟气脱硫实验研究[J]. 南京理工大学学报,2001,25(6):622-625.
XIE Jianjun, ZHONG Qin. A study on the flue gas desulfurization in a circulating fluidized bed [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2001, 25(6):622-625.

(编辑 陈移峰)