

垃圾焚烧半干法脱硫塔内流场数值计算

李双双, 马晓茜, 余昭胜, 胡志锋, 李龙君

(华南理工大学 能源高效清洁利用广东普通高校重点实验室, 广州 510640)

摘要: 为给垃圾焚烧半干法脱硫塔优化设计提供理论基础, 以某垃圾焚烧旋转喷雾半干法脱硫塔为研究对象, 运用 FLUENT 软件对不同烟气入口旋转角工况下脱硫塔内部的流场分布以及加入旋转喷雾对速度场以及温度场的影响情况进行数值模拟分析。结果表明: 随着入口旋转角度增大, 烟气停留时间以及主要脱硫反应区域烟气湍流度增大, 同时对塔壁冲刷加强, 烟气分布均匀性降低。综合以上因素考虑, 入口旋转角为 20° 时具有最有利于脱硫反应进行的流场分布。对入口旋转 20° 工况下加入喷雾后的流场进行了分析, 其模拟结果与相关实验结论吻合较好, 并能够兼顾高脱硫率以及后续设备的安全运行。

关键词: 半干法脱硫; 数值模拟; 入口旋转角; 流场

中图分类号: X701.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8759(2013)05-0024-06

NUMERICAL SIMULATION OF FLOW FIELD IN SEMI-DRY FGD TOWER OF GARBAGE INCINERATOR

LI Shuang-shuang, MA Xiao-qian, YU Zhao-sheng, HU Zhi-feng, LI Long-jun

(Key Laboratory of Efficient and Clean Energy Utilization of Guangdong Higher Education Institutes, SCUT, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to provide theoretical foundation for waste incineration semidry desulfurization tower's optimal design, taking a waste incineration rotating spray semidry desulfurization tower as an example, the method of computational fluid dynamics (CFD) is adopted to numerical simulate and analyze the influence of flow field in FGD tower at different rotational angles of entrance, as well as the velocity field and temperature field after added a rotating spray. Calculated results shows; with the inlet rotational angle increases, the gas residence time as well as the main desulfurization reaction zone flue gas turbulence intensity is increased, while the column wall scour strengthening gas distribution uniformity decreases. Integrated above factors, 20° is the most conducive angle of entrance to the flow field desulfurization reaction distribution. Entrance rotated 20° conditions added to the spray after the flow field analysis, the simulation results are in good agreement with related experimental conclusions and be able to take into account the high desulfurization rate as well as follow-up to the safe operation of the equipment.

Keywords: semi-dry desulfurization; numerical simulation; rotational angle of entrance; flow field

随着经济的发展和人民生活水平的提高,城市生活垃圾日益增多,在填埋处理方式不能满足垃圾处理现状的情况下,焚烧处理方式成为城市生活垃圾处理的主要发展方向,然而焚烧烟气产生的环境污染问题日益严重。为了减少 SO_2 和 HCl 等酸性气体的排放,目前及未来相当长的一段时间内仍以烟气脱硫法为主^[1]。其中半干法烟气脱硫技术因系统简单、投资和运行成本低、脱硫产物易处理、且具有较高脱硫效率等优点而逐渐被广泛应用^[1,2]。

目前,众多国内外学者对半干法烟气脱硫技术进行了相关的研究。Tomas^[3]和曾芳^[4]等人研究表明脱硫塔内部烟气以及浆液流动状态对脱硫塔内的压降、脱硫效率有直接的影响;林军等人^[5]对加装烟气预分布器的半干法脱硫塔进行了流场数值模拟,表明烟气预分布器有利于烟气分布均匀和脱硫率;纪辛^[6]分别在空塔和喷雾条件下进行了流场的数值模拟,并研究了雾化角度和尺寸对脱硫的影响。然而,对于脱硫塔烟气入口旋转角度的研究鲜见报道,故本文以广州某处理量为 750 t/d 的垃圾焚烧电厂旋转喷雾半干法烟气脱硫塔为研究对象,利用计算流体动力学 FLUENT 软件对脱硫塔不同烟气入口旋转角时的流场分布进行数值模拟,为脱硫塔的优化设计及运行提供理论基础和研究依据。

1 数值计算模型

1.1 基本假设

(1)脱硫塔内的烟气为定常、不可压缩流体,其流动为三维、定常、不可压缩流动;

(2)液滴为离散相,不考虑液滴间的相互作用力,且液滴为球形,在反应和传质过程中始终保持球形;

(3)烟气流动处于旺盛湍流区;

(4)忽略温度、传热、传质、物理化学变化对烟气流动的影响;

(5)忽略雾化喷嘴、浆液入口管道等部件对传热及流动的影响;

(6)考虑实际情况,假定整个脱硫塔壁面温度固定为 300 K,对流与传热在烟气、壁面与液滴间进行。

1.2 物理模型

广州某垃圾焚烧电厂喷雾半干法脱硫塔呈立

式布置,烟气经过省煤器流经脱离塔顶部的蜗壳烟气分配器,进入脱硫塔内与经由旋转雾化器雾化的石灰石浆液充分混合发生脱硫反应,然后由下部烟气出口流出。其具体参数为:脱硫塔高 $h=23\text{m}$,塔筒内直径 $=10\text{m}$ 。

基于脱硫塔原型结构,用 Gambit 软件对其进行适当的简化:采用 8 个矩形入口平面均匀进气代替脱硫塔蜗壳烟气分配器,该 8 个矩形入口的分布以及偏转与实际的相近。综合考虑计算精度以及计算量,采用非结构化四面体网格划分体网格,在烟气入口采用较小的网格进行局部加密优化,网格划分见图 1 所示,总计网格数为 326 228。

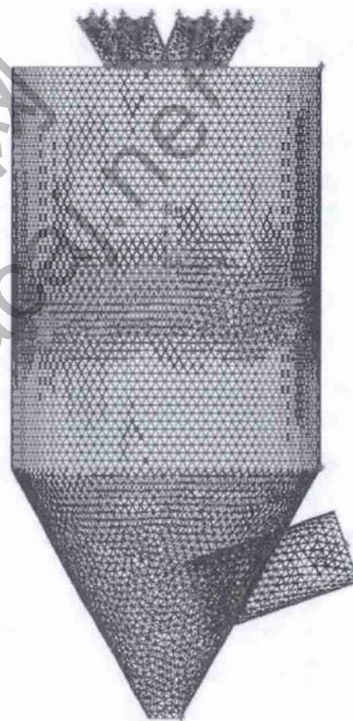


图 1 脱硫塔网格划分模型

1.3 数学模型

根据假设条件,采用时间平均基本方程中的因变量在湍流中表示流量的瞬时值,进而对方程各项进行雷诺平均得到气相三大基本控制方程^[7,8]:

连续性方程:

(1)

动量方程:

(2)

能量方程:

(3)

式中： ρ 为烟气密度， kg/m^3 ； t 为时间， s ； u, v, w 为分别为直角坐标系中三个方向的烟气流动速度， m/s ； S_{mass} 为连续方程的源项， kg ； \vec{u} 为烟气速度， m/s ； P 压力， Pa ； $\tau + \tau^R$ 为剪切应力以及 Reynolds 剪切应力， Pa ； g 为重力加速度， m/s^2 ； S_{mom} 为动量方程的源项， $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}$ ； i 为单位体积物质的内能， J ； k_c 物质的导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ； T 为连续相的温度， K ； S_{en} 为能量方程的源项， J 。

考虑到烟气进入脱硫塔时有一定的旋度，故应用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型对烟气流动进行描述；采用压力-旋流雾化 (pressure-swirl atomizer) 模型产生旋转喷雾，并应用离散相模型 (DPM) 对雾化液滴的流动进行跟踪计算。本文脱硫塔内流场以及温度场的计算采用的是 SIMPLE 算法。

1.4 初始条件与边界条件设定

数值计算初始条件以及边界条件见表 1 所示。

表 1 数值计算初始条件以及边界条件

| 项目 | 数值 |
|---------------------------------------|---------|
| 烟气流速/ $\text{Q}(\text{m}^3/\text{h})$ | 145 450 |
| 烟气入口温度/ K | 463 |
| H_2O | 23.61 |
| O_2 | 5.9 |
| 烟气组分/ $\%$ | |
| SO_2 | 0.0 269 |
| CO_2 | 97 |
| 入口烟气流速/ (m/s) | 14.84 |
| 入口截面积/ m^2 | 2.72 |
| 浆液流量/ (kg/s) | 1.3 |
| Ca/S | 1.4 |

2 结果及分析

2.1 脱离塔气相流场分析

半干法脱硫工艺中，雾化后的石灰浆液在脱硫塔中与烟气接触后，浆液中的水分开始蒸发，烟气降温并增湿。目前对于水分蒸发之后石灰石固体是否继续与 SO_2 反应暂无定论，但有研究^[9]表明 SO_2 的脱除反应主要发生在有液态水存在的区域。半干法工艺具有较低的水/石灰石比以及较小的雾化直径 (一般为微米级)，因此浆液中水分蒸发过程较短，有相关研究^[10]表明脱硫反应的发生在距离浆液喷口较近的范围内。本文将着重分析脱硫塔上部流场分布。

通过改变模型中烟气入口导流板的倾斜角度，研究入口烟气的旋转角度 (其他参数不变) 分

别为 $0^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 17^\circ, 20^\circ$ 和 30° 6 个工况下的脱硫塔内部流场。模拟结果采用流线 (pathlines: 流线疏密程度表征烟气流速大小；流线色调高低表征烟气流速快慢) 来标定烟气流动轨迹以及等高线 (contours: 区域色调高低表征烟气流速快慢) 来标定烟气流速。

各旋转角度下纵截面流线分布图和速度等高线图分别如图 2 和图 3 所示。由图 2 和图 3 可知：入口烟气旋转角度对脱硫塔内部流场的影响非常显著。

当入口烟气旋转角为 0° 时，烟气沿入口通道均匀进入脱硫塔内，通道出口处的烟气具有大小相同方向相反的径向速度，另外烟气在塔内碰撞相混后在垂直于塔桶的中心区域形成高速直流区。塔内流线分布光滑有序，近壁面区域的气流由于底部渐缩型收集器壁面的阻挡作用以及射流的卷吸作用，形成较大范围的低湍流回流区，烟气流速较小。入口旋转角从 0° 增加到 15° 时，整体规律与 0° 时相似，但由于旋转角度增大时，烟气在脱硫塔横截面的周向速度逐渐增大，促使烟气射流与近壁面区域烟气的掺混加大，该处流量随之增加，导致烟气湍流度逐渐增大。

当旋转角增加至 17° 时，此时规律与前 3 种角度完全不同，该角度成为转折点。由图 4 可清晰看出，此时烟气在脱硫塔横截面的周向速度增大至使射流吹向塔壁，在壁面处分成两股回流烟气，一股向上部流动，形成对称的较强烈回流区；另一

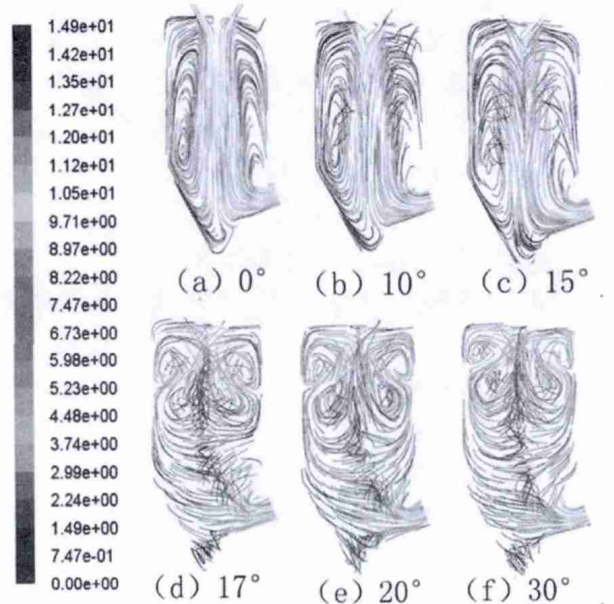


图 2 各旋转角度下纵截面流线分布图

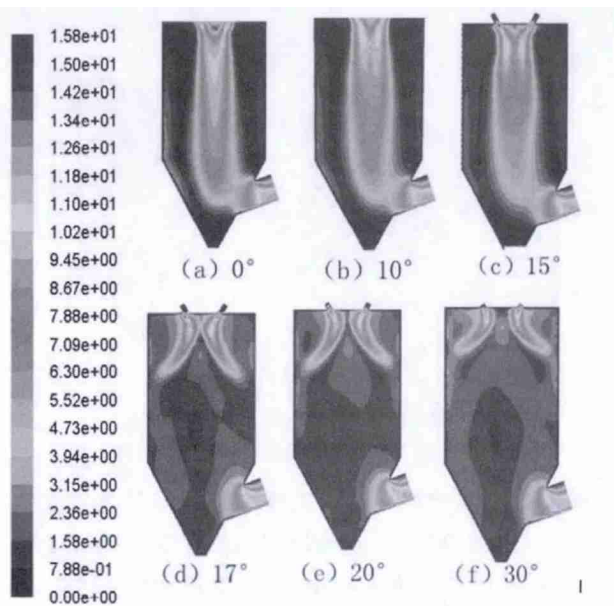


图3 不同入口烟气旋转角时纵截面速度等高线图

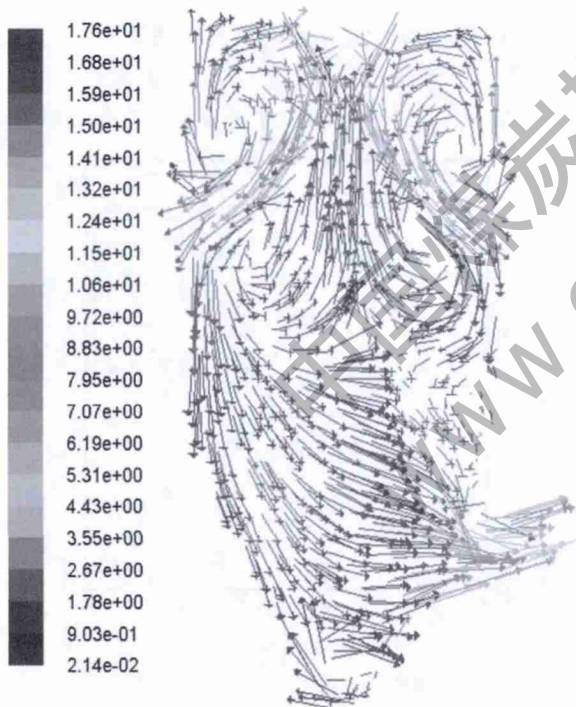


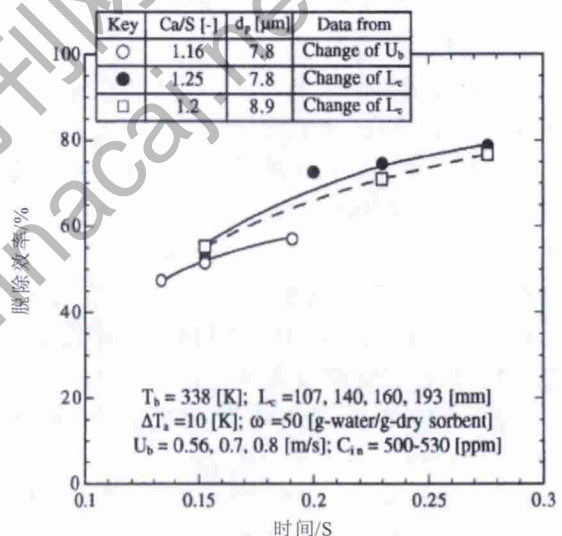
图4 入口烟气旋转 17° 的纵截面速度矢量图

股向下流动并卷吸周围烟气,在旋转角度的作用下,该股烟气在脱硫塔中部逐渐混合至均匀,此时速度亦逐渐降低。在脱硫塔内形成的回流区有利于延长烟气在塔内的停留时间,从而有利于该区域内气液的传热传质以及脱硫反应的进行。低速烟气流至空间较小的脱硫塔出口时重新形成较高速度的烟气,有利于后续的除尘过程。

当入口旋转角从 17° 增大到 20° 时,烟气在脱

硫塔横截面的周向速度增大,从而使射流到达塔壁后形成的回流区域更大强度更高,最终导致下部强回流带动烟气流动使之更加均匀;然而,当入口旋转角从 20° 增大到 30° 时,烟气在脱硫塔横截面的周向速度更大,使烟气射流从入口直接吹向塔壁,从而使回流减弱,影响范围变小,最终导致回流强度以及流场分布均匀性变差。

由以上内容可知,随着入口烟气旋转角的增大,烟气掺混碰撞加强,使得烟气能量损失随之增大;而塔内烟气的回流强度逐渐增大至 20° 时达到最大值后减小;由路径和速度大小可知,入口旋转角为 17°、20° 和 30° 时烟气在塔内的停留时间大于旋转角为 0°、10° 和 15° 时;对比发现,图 2(e) 和图 3(e) (即入口旋转角为 20° 时) 的脱硫塔下部分烟气流场分布最均匀。

图5 烟气停留时间对脱硫效率的影响^[11]

实验研究^[11,12]表明半干法烟气脱硫效率随着烟气和脱硫剂在脱硫塔内停留时间的增加而显著提高,见图 5 所示。上文,分析可知,烟气入口旋转角从 0° 变化到 17°, 烟气湍度增强,回流增大,在塔内停留时间大幅增加;当旋转角继续增大到 30° 的过程中,受到容器壁面的限制,流场分布以及停留时间变化不大,反而增大了对壁面的冲刷。综合考虑烟气停留时间、流场分布、喷雾角度以及烟气对壁面的冲刷等影响因素,在该模型尺寸下,入口旋转角为 20° 时具有最有利于脱硫反应进行的流场分布。

2.2 加喷雾脱硫塔流场分析

采用 DPM(离散相)雾化模型中的压力-旋流

雾化 (pressure-swirl atomizer) 模型, 取上文研究的最佳入口烟气旋转角 20° 为例, 将水旋转雾化喷入脱硫塔, 以此对比分析喷入浆液前后对其内部流场的影响。考虑到脱硫塔的实际运行情况, 将脱

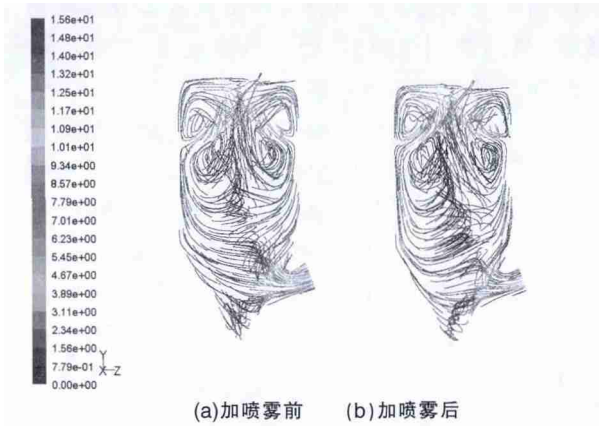


图 6 加喷雾前后脱硫塔内速度场对比

硫塔壁面温度设为 300K。

加入喷雾前后脱硫塔内纵截面速度流线分布如图 6(a)、(b)所示。对比发现喷雾的加入对流场的影响较小。主要区别在于:(1)加喷雾后回流区域增大。由于喷雾的加入,水滴进入脱硫塔吸收足够热量后蒸发成为水蒸气,然而刚喷入水滴时仍为液态水,此时水滴的密度大于烟气的密度,在烟气的卷吸作用下,其离心力比烟气大,故所形成的回流区域增大;(2)脱硫塔横截面的平均速度减小。未加喷雾工况下,距离塔顶 1 500 mm 截面面平均速度为 3.05m/s,出口截面面平均速度为 8.22m/s;加入喷雾后,其对应的面平均速度分别降至 3.04m/s 及 7.94m/s。这是由于喷雾的加入降低烟气温度,导致密度加大,且影响大于喷雾加入的质量流量,从而出口截面平均速度降低。烟气回流区域及影响范围增大(图 6(b)中脱硫塔底部烟气也受到卷吸作用向中心回流),但此时烟气在脱硫塔内各截面的速度分布较之未加喷雾时均匀。由此可见,当入口旋转角采用 20° 时,虽然加喷雾后脱硫塔出口平均速度降低 3.4%,但塔内的烟气回流区域更大、流场分布更均匀,从而有利于脱硫反应的进行。

2.3 加喷雾脱硫塔温度场分析

由图 7 可知,加喷雾前后温度场分布规律相似,均为从入口喷入高温烟气后在回流卷吸的作用下使脱硫塔中上部区域形成较高温区,随着烟气的继续换热,在中下部区域烟气温度逐渐降低。

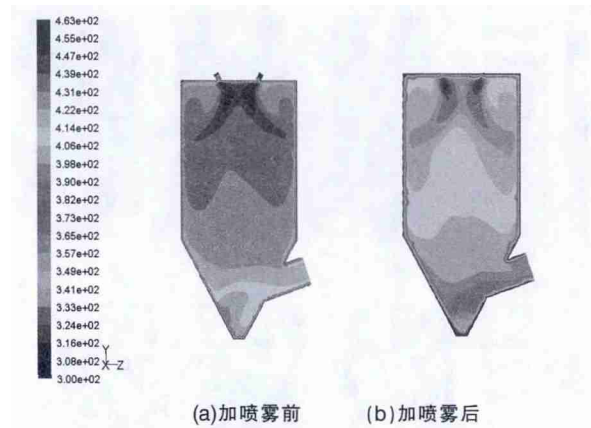


图 7 加喷雾前后脱硫塔内温度场对比

但雾化浆液的喷入对脱硫塔内温度场具有较大的影响。未加喷雾时,脱硫塔内的热量交换存在于壁面与烟气,热量损失较小,出口烟温达到 424K。而加入喷雾后,由于水分蒸发吸收热量,使得脱硫塔整体温度大幅度降低,出口温度降至 382K。

脱硫塔顶部的温降远大于脱硫塔下半部的温降,等温线分布较密,且高温区范围大幅缩小,说明半干法脱硫工艺中水分蒸发主要发生在雾化喷嘴附

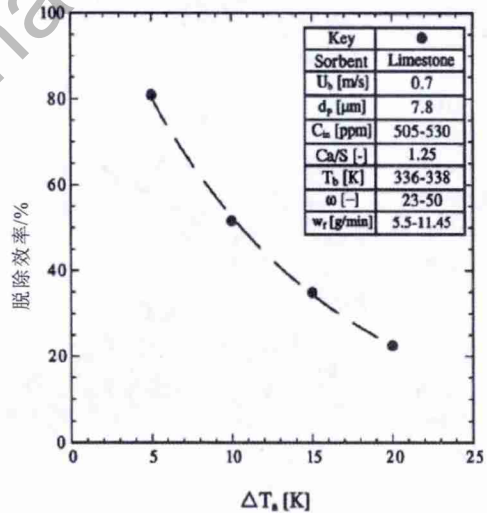


图 8 AAST 对脱硫效率的影响^[14]

近的区域,这与 Hill 和 Zank^[10]的研究结论相符。

Ma 等^[14-16]实验结果表明半干法脱硫效率随 AAST (Approach to Adiabatic Saturation Temperature, 见图 8 所示。近绝热饱和温度)的降低呈指数性增长,且在不同的 Ca/S 比以及不同的烟气气相组分浓度等情况下,随着 AAST 的降低,脱硫效率逐渐接近。AAST 越低,烟气的相对湿度越大,有利于脱硫反应的进行,同时也意味着出口烟气湿度大,易引起物料粘结且对后续处理设备的整体

质量以及安全运行造成较大伤害。

烟气经过脱硫塔反应,绝大部分(90%以上)的酸性气体在塔内被吸收,其酸露点温度降低:脱硫前酸露点为 $105^{\circ}\text{C}\sim 115^{\circ}\text{C}$;脱硫后(按照90%的脱硫塔效率计算)酸露点为 $83^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$ ^[17]。垃圾焚烧省煤器出来的烟气具有较高的入口温度(本模拟中设为463K),在脱硫塔内增湿减温,出口烟气温度为382K,水蒸气质量分数为23.81%,相对湿度为20.05%。该出口烟气特性参数值,既保证了较理想的低AAST值以获得较高的脱硫效率,同时具有较低的相对湿度,保障了后期烟气处理设备的整体质量和安全性。

3 结论

(1)改变导流板的偏转角度对脱硫反应发生的主要区域的流场分布具有较大的影响,其中 17° 是一转折点。随着入口旋转角度增大,烟气停留时间以及主要脱硫反应区域烟气湍流速度增大,同时对塔壁冲刷加强,烟气分布均匀性降低。在本文所研究工况下,综合考虑压降、烟气停留时间、流场分布以及烟气对壁面的冲刷等影响因素,入口旋转角为 20° 时具有最有利于脱硫反应进行的流场分布;

(2)对入口旋转 20° 工况下加入喷雾后的流场进行了分析,结果表明加喷雾后对流场的影响较小,其中出口平均速度仅降低3.4%,但此时烟气的回流区域更大、流场分布更均匀,更有利于脱硫反应的进行;

(3)旋转喷雾的加入使脱硫塔内烟气流场分布均匀性加强。烟气在脱硫塔内增湿减温,出口烟气温度为382K,水蒸气质量分数为23.81%,相对湿度为20.05%,能够兼顾高脱硫率以及后续设备的安全运行。

参考文献

(上接第20页)

[6]何锡辉.COD测定方法研究进展[J].西华大学学报,2006,25(3).
[7]刘昌文.COD消解方法的改进[J].贵州环保科技,2005,(3):36-42.
[8]陈瑞波.微波炉消解分光光度法测定COD[J].辽宁城乡环境科技,2002,18(3):57-59.
[9]吴秋波,李坚斌,刘慧霞,等.闭管回流消解-分光光度法测定COD的研究[J].甘蔗糖业,2004,(6):21-23.
[10]王敏.COD开管消解测定法的试验研究[J].安徽建筑工业学院

[1]赵卷,张少峰,张占锋.半干法烟气脱硫技术研究新进展[J].河北工业大学学报,2003,32(5):81-86.
[2]滕斌.半干法烟气脱硫的实验及机理研究[D].杭州:浙江大学,2004.
[3]Tomas W.Strock, Wadie F.Gohara. experimental approach and techniques for the evaluation of wet flue gas desulfurization scrubber fluid mechanics [J]. Chemical Engineering Science, 1994,49(24A):4667-4679.
[4]曾芳,陈力,李晓芸.湿式脱硫塔流场数值计算[J].华北电力大学学报,2002,29(2):106-110.
[5]林军,王凡,张凡,钟儒刚.半干半湿法烟气脱硫塔流场分析[J].环境科学研究,2005,18(6):34-36.
[6]纪辛.垃圾焚烧烟气半干法脱酸塔结构优化与流场数值模拟研究[D].广州:华南理工大学,2010.
[7]龚明.粉-粒喷动床半干法烟气脱硫多相传递、反应特性与多尺度效应数值模拟研究[D].西安:西北大学,2011:6-9.
[8]肖容.半干法烟气脱硫工艺中脱硫塔内部流态的数值模拟[D].沈阳:东北大学,2009:6-8.
[9]高继录,陈晓利,高继慧.半干法脱硫塔内SO₂脱除过程数值模拟[J].东北电力技术,2008,7:4-7.
[10]Hill FF, Zank J. Flue gas desulfurization by spray dry absorption[J]. Chemical Engineering and Processing, 2000(39):45-42.
[11]Ma X, Kaneko T, Tashimo T. Use of Limestone for SO₂ Removal from Flue Gas in the Semidry FGD Process with a Powder-particle Spouted Bed [J]. Chem.Eng.Sci, 2000, 55(20):4643-4652.
[12]魏恩宗,程世庆,王乃华.半干法烟气脱硫性能实验及其机理分析[J].电站系统工程,2003,19(1):49-52.
[13]X Ma, T Kaneko, G Xu, K Kato, Influence of gas components on removal of SO₂ from flue gas in the semidry FGD process with a powder-particle spouted bed, Fuel, 80 (5) (2001), pp. Pages 673-680.
[14]X.D. Zhao, C.Y. Ma, Y. Dong, S.H. Wu. Development and application of double circulating fluidized bed-flue gas suspension desulfurization facilities of 75 t/h boiler, Electric Power, 35 (3) (2002), pp. 62-65.
[15]Yuzhong Li, Huiling Tong, Chunyuan Ma. Analytic study on approach to adiabatic saturation temperature and the control scheme for the amount of water sprayed in the semi-dry FGD process [J]. Fuel, 2004, 83(17):2255-2264.
[16]孔华.石灰石湿法烟气脱硫技术的试验和理论研究[D].杭州:浙江大学,2001:100-113.

学报(自然科学版),2007年2月,第15卷第1期:79-83.
[11]普玲.污水COD快速测定中氧化剂和催化剂的改良[J].中氮肥,2007,(4):62-63.
[12]HJ168-2010,环境监测分析方法标准制修订技术导则[S].北京:国家环境保护局,2010.
[13]黄进.环境水样COD快速监测技术综述[J].四川理工学院学报,2006,19(4).