

一种湿法烟气脱硫方式的试验研究

赛俊聪, 吴少华, 汪洪涛, 秦裕琨

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 提出了烟气横向冲刷槽形导流芯的液膜式烟气脱硫方法, 并在一小型试验台上进行了试验研究, 分析了空塔烟气流速、温度以及气液接触面积对烟气脱硫效率的影响规律, 对试验台的结垢问题作了简要分析。

关 键 词: 横向冲刷; 槽型芯; 湿法烟气脱硫; 结垢

中图分类号: TK224 文献标识码: A

1 引 言

现有湿法烟气脱硫技术主要是利用石灰或石灰浆液与烟气并流或逆流接触, 通过增加气液接触面积或反应时间来获得较高的脱硫效率, 从而达到脱硫的目的。但以这两种烟气接触方式脱硫所处理的烟气量不大, 且烟气速度不宜太高。因为随着烟气流量增大, 塔内气体速度增大, 气液接触时间变短, 不利于石灰浆液吸收 SO_2 , 且烟气带水量增多, 易造成风机带水, 烟道腐蚀等问题^[1~3], 需要在尾部增设除雾器和烟气再热设备。此外, 一般的湿法脱硫装置耗水量大。有报道表明, 现在我国人均占有水量为 24 t, 居世界第 41 位; 而到 2010 年我国人均占有水量为 20 t, 将居世界 120 位以后。故耗水量也应成为衡量脱硫装置性能的一个重要指标^[3]。

所以, 在总结国内外现有脱硫装置脱硫机理的基础之上我们提出采用烟气横向冲刷垂直下降液膜的流动方式, 通过此接触方式来增强液膜扰动以达到提高其传质系数的目的。目前很少有人研究此种接触方式对传质的

影响及在相界面附近浓度的分布。在借鉴文献基础之上^[4~7], 提出并设计了槽形导流芯烟气脱硫装置。该装置的特点是: 在反应塔内布置有序排列的槽形导流芯, 导流芯按流通等截面原则设计, 浆液沿导流芯向下流动, 并在导流芯表面形成均匀稳定的下降液膜, 采用烟气横向冲刷下降液膜, 强化了烟气对液膜的扰动, 使下降液膜形成强烈扰动的湍流状态, 进而提高了气液传质系数, 从而达到有效脱除烟气中 SO_2 的目的。

2 试验装置与试验方法

2.1 试验装置

本次脱硫试验装置如图 1 所示, 由模拟烟气系统、浆液循环系统以及反应塔主体三大部分组成。反应塔主体横截面为 320 mm × 300 mm, 有效行程为 400 mm; 槽形导流芯宽 $B=20$ mm, 有效高度 300 mm, 导流芯按错列布置。本试验通过空气与 SO_2 气体混合来模拟实际烟气。通过调节气体流量调节阀以获

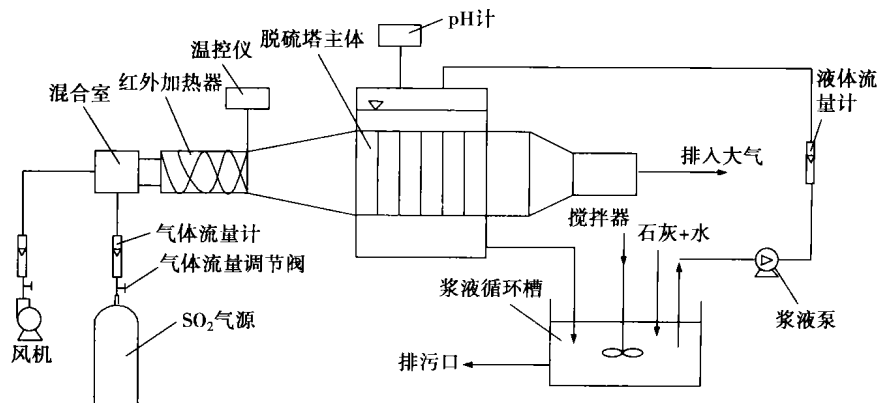


图 1 烟气脱硫系统图

收稿日期: 2002-06-28; 修订日期: 2003-03-06

作者简介: 赛俊聪 (1976-), 男, 云南开远人, 哈尔滨工业大学博士研究生。

得不同工况系统入口的SO₂浓度值和烟气流量。混合烟气经加热器加热至不同试验工况所需的温度,烟气温度由温控仪表控制。然后将加热后的烟气送入脱硫塔进行脱硫,最后直接排入所连接的烟囱中。

2.2 试验方法

试验采用石灰浆液直接脱硫。试验所用的脱硫剂是辽宁朝阳产的分析纯CaO,其纯度为98%。将CaO粉在浆液循环槽内配制成pH>10的浆液,经充分搅拌后由浆液泵将石灰浆液输送到反应器。浆液流量由流量调节阀、液体流量计控制,以适应不同的液气比。反应后的浆液经排污处理后仍可循环利用。本试验的入口SO₂浓度C_{SO₂}设为3432 mg/m³,液气比为1.8 L/m³,入口烟气温度T分别取为63、53、43和33℃,烟气速度V分别为8.0、7.2、6.7、4.6、3.5 m/s。

3 结果与讨论

3.1 空塔烟气流速、烟气温度以及气液接触面积对脱硫效率的影响

本试验研究了U型和H型两套导流芯的脱硫效率。先在U型芯上研究了相对节距为S₁/B=1.75, S₂/B=1.05的管束其空塔烟气流速、烟气温度对脱硫效率的影响试验。碱性浆液沿导流芯与孔板间的狭缝向下流动,在U型芯的凹面形成一定厚度的稳定的下降液膜。U型芯在塔内错列布置,烟气横向冲刷导流芯并与其表面的下降液膜接触发生化学反应。

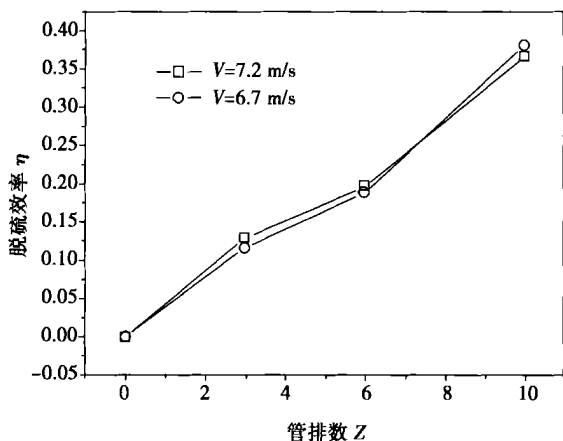


图2 烟气行程对脱硫效率的影响

由图2可见,在相同空塔烟气流速和温度的情况下,随着烟气行程增加,即随着烟气流经导流芯管

排数的增加,烟气停留时间(脱硫反应时间)加长,使反应进行得更加完全,进而使脱硫效率逐渐提高,最高可达47%。

从图3的变化趋势可知,在相同入口烟温的情况下,空塔烟气速度较小时,脱硫效率随烟气速度的增大而增大;当烟气速度超过某一值后,脱硫效率随烟气速度的增大反而下降。这是因为:一方面,随空塔烟气速度的增大,横向冲刷的烟气撞击到管束表面时既有横向流动也有沿液膜方向流动,烟气在管束间交替收缩和扩张的弯曲通道中流动,在管束间产生强烈的湍动和混合,强化了烟气对液膜的扰动,使下降液膜形成强烈扰动的湍流状态,加快了传质,提高了气液传质系数,使烟气与下降液膜接触更加充分,从而有利于化学反应的完成,进而使脱硫效率得到了提高,这充分体现了通过增强界面扰动来提高传质的优点。另一方面,随着空塔烟气流速的增大,高流速的烟气在反应塔内的停留时间缩短,在此段脱硫过程中气液接触时间占主导地位,而通过增强界面扰动来提高传质的优点没有得到充分的体现,从而使脱硫效率降低。在低速区通过增强液膜扰动来加强传质的作用占优势,当烟气速度到达一定值后,气液接触时间占优势,致使脱硫效率呈现出图中的变化趋势。

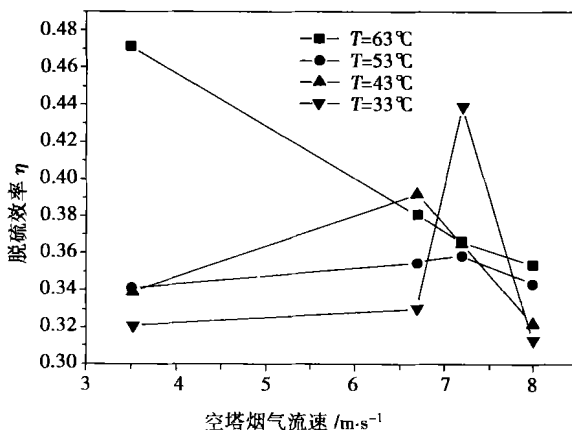


图3 空塔烟气流速、温度对脱硫效率的影响

对图3中低速区气液传质系数作一简单分析。由于本次试验采用石灰浆液作为脱硫剂,SO₂与石灰浆液的反应为瞬时反应,以致在气液界面附近溶入的SO₂气体很快就被消耗,SO₂气体在液膜中的扩散阻力大为降低,甚至降为零,吸收速率只决定于SO₂气体从气相主体扩散到气液界面的阻力,这时总吸收系数可以近似地认为等于气相分吸收系数,

此时传质速率为气膜传质过程所控制。由因次分析理论知, 气相修伍德数 ($Sh_G = kd/D$, k 为传质系数, D 为扩散系数) 可用无因次准则关联式表达:

$$Sh_G = k_1 Re_G^{k_2} Re_L^{k_3} Sc^{k_4}$$

式中: $k_1 \sim k_4$ 为无因次经验常数, Sc 为施密特数 ($Sc = \nu/D$)。由文献[6, 8~11] 可确定 k_2, k_3 为小于 1 的数, k_4 为 0.5, Re_G 中的流速采用垂直于流体流动方向的最窄截面的流速。通过计算, 本次试验的 Re_G 约为 9 990, Re_L 约为 12 724。上述无因次准则关联式表明, 在高雷诺数时液膜的波动能提高相界面积和湍流程度, 从而有利于气液传质系数的提高。由于对流传质主要靠旋涡的作用, 通过烟气对液膜的横向冲刷进一步增强了界面的湍动, 在相界面形成许多旋涡, 使下降液膜形成强烈扰动的湍流状态, 相当于负的界面阻力, 从而使气液传质系数以小于一次方的关系提高。

此外由图 3 可见, 在空塔烟气速度较高或较低 (即在烟气流速过渡区外) 的情况下, 随着烟气温度的增加其脱硫效率有所增加。这主要是由于在烟气流动的过程中, 下降液膜受横向冲刷的烟气加热而使其温度增加, 在化学反应所需的最佳反应温度范围内, 这不但可以加快 CaO 与 H_2O 的反应速度, 还可以提高浆液的活性, 从而提高脱硫效率。

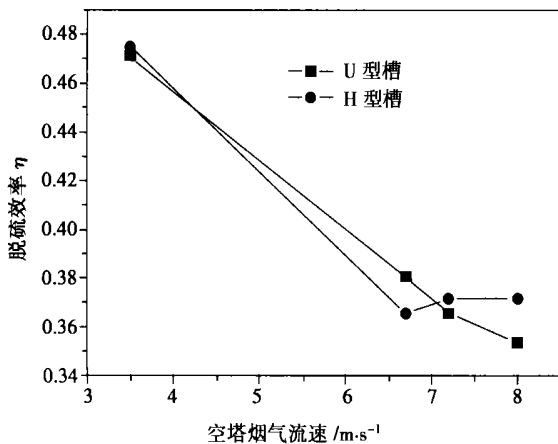


图 4 气液接触面积对脱硫效率的影响 ($T=63\text{ }^{\circ}\text{C}$)

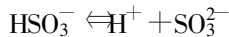
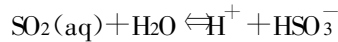
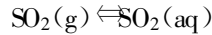
本次试验还研究了 H 型导流芯的脱硫效率。H 型芯与 U 型芯的不同之处就在于 H 型除在迎风面有下降液膜外, 在背风面还有下降液膜, 烟气不与背风面液膜直接接触, 而是通过绕流尾涡与背风面液膜接触从而达到脱硫的效果。由图 4 可见, 在相同空塔烟气流速和温度的条件下, H 型芯的脱硫效率总体上比 U 型芯的脱硫效率略高。这是由于 H 型

芯的气液接触面比 U 型芯的气液接触面大, 增大了有效传质面积, 进而使其脱硫效率比 U 型芯大。

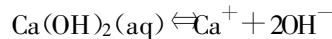
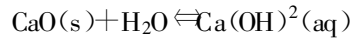
3.2 结垢问题分析

本次试验采用了高 pH 值运行, 此时溶入水中的 SO_2 都以 SO_3^{2-} 的形态存在^[1], 这时在本试验塔内的脱硫反应为:

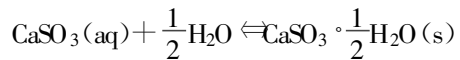
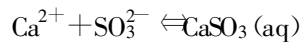
第一步: 烟气中 SO_2 气体的溶解、水合和离解过程



第二步: 石灰的溶解



第三步: 吸收溶解的 SO_2



Gage 和 Rochelle 认为亚硫酸钙将降低脱硫效率^[13], 而且生成的 $CaSO_3 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ 在水中的溶解度只有 0.004 3g/100g H_2O ($18\text{ }^{\circ}\text{C}$), 在实际脱硫设备中极易达到过饱和而结晶在塔壁和部件表面上, 很快就会造成设备堵塞而无法运行下去。因此为了提高脱硫效率, 增加系统运行的稳定性, 应通过化学或机械的方法及时去除生成的 $CaSO_3$ 。通过本次试验可以观察到上述现象。随着反应的进行脱硫效率在逐渐下降, 由于本次试验循环槽较小, 所以到脱硫后期 pH 值以及脱硫效率均下降很快; 在塔内壁、导流芯片尖端处和导流芯表面形成了一层很薄的白色垢层, 这主要是由于液膜的蒸发而使得垢层结晶析出所致, 这种垢物一般呈叶状, 柔软, 形状易变, 用手轻轻一拭就可去掉; 试验完毕后在液膜入口处还会有轻微的堆积垢层, 这一垢层可用水冲洗去除。在浆液循环槽中主要生成的是难于脱水且结晶较细的 $CaSO_3 \cdot \frac{1}{2}H_2O$, 静置后仍难于打捞。由于生成的 $CaSO_3 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ 溶解度随 pH 值降低而明显升高^[12], 因此可用人工清除或降低溶液 pH 值的方法去除软垢。当烟气中 SO_2 浓度较高时, 生成的 $CaSO_3 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ 还会继续与溶解的 SO_2 反应生成 $Ca(HSO_3)_2$, 从而使得设备可能不结垢或结垢不严重。

通过试验发现, 随着空塔流速的增加沿程压降逐渐增加但并不大, 8 m/s 时为 64 Pa。而空塔流速的

增加不但可以提高气液相对运动的速度,减小气液间的传质阻力,从而加快反应速度,而且还可以增大烟气处理量,缩小塔的尺寸,节约投资。但若气速过高,将会导致气液接触时间变短、脱硫效率降低,甚至吹散液膜造成烟气带水。由于导流芯的特定形状和布置方式,烟气在较高流速下表面液膜也不易被撕破,经过长时间的运行,试验台后的集气箱内未见有雾滴析出,因此烟气含湿量的增大主要是由于水分蒸发引起。因此,该方法具有烟气带水少,烟气处理量大,耗水量少且脱硫效果好等优点。同时,该法也为界面传质的强化提供了一种有效的方法。

4 结 论

(1) 在相同空塔烟气流速和温度下,脱硫效率随着烟气行程的加长而逐渐增加;

(2) 在相同烟气温度下,空塔烟气速度较小时,脱硫效率随烟气速度的增大而增大,当烟气速度超过某一值后,脱硫效率随烟气速度的增大反而下降;

(3) 在空塔烟气速度较高或较低(即在烟气流速过渡区外)的情况下,随着烟气温度的增加其脱硫效率有所增加;脱硫效率随气液接触面积的增大而增加;

(4) 在高 pH 值下脱硫产物主要为 $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ 和部分 $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$, 它主要以软垢的形式存在,会造成脱硫设备堵塞;

(5) 本试验通过烟气横向冲刷下降液膜来增强

液膜扰动以提高传质系数,同时也为界面传质的强化提供了一种有效的方法。

参考文献:

- [1] FROLICH D A, GRAVES G M. Eliminating reheat from existing FGD system — a design and economic evaluation[J]. **Control Technology**, 1987, 37(3): 314—321.
- [2] 徐夕仁, 马春元, 李 京. 提高湿式烟气脱硫除尘净化器性能的措施[J]. 山东环境, 1998, 85(4): 22—23.
- [3] 黄其励. 21世纪发电新技术[A]. 郑宝森. 火力发电厂可持续发展与环境保护技术论文集[C]. 哈尔滨: 黑龙江省电机工程学会, 2001. 1—24.
- [4] 岑可法. 气固分离理论及技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999.
- [5] 张永照. 冲击式槽形管惯性分离器的试验研究[J]. 动力工程, 1989, 9(6): 9—13.
- [6] 杨世铭. 传热学[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [7] 秦裕琨. 一种用于烟气脱硫装置中的有序液流组反应器[P]. 中国专利: ZL 01 2 21686. 0 2002—02—13.
- [8] 杨昌竹. 传质过程系数[J]. 云南化工, 1997(3): 41—44.
- [9] 徐国文. 填料塔气液传质参数研究(II)—气膜传质系数[J]. 化学工程, 1996, 24(1): 19—21.
- [10] 张丽芬. 非绝热降膜蒸馏塔传质特性的研究[J]. 苏州丝绸工学院学报, 2000, 20(3): 41—44.
- [11] 钟 秦. 湿法烟气脱硫的理论和实验研究(IV)—高雷诺数时的传质经验方程[J]. 南京理工大学学报, 1999, 23(3): 257—260.
- [12] 童志权. 工业废气净化与利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [13] 钟 秦. 湿壁塔石灰石烟气脱硫的中试研究[A]. 第七届全国大气环境学术会议论文集[C]. 北京: 中国环境科学学会大气环境分会, 1998. 631—636.

(渠 源 编辑)

2004 年《热能动力工程》征订

《热能动力工程》是学术性与技术性综合的技术刊物。本刊报导内容力求结合我国实际,具有很强的针对性和实用性。本刊为国内外公开发刊,覆盖面大,多次分别荣获国防科工委、中国船舶工业总公司、黑龙江省、第二届全国优秀科技期刊奖及船舶总公司科技进步三等奖。本刊还被定为国家核心期刊,中国科学引文数据库来源期刊,编入光盘期刊。被录入美国工程索引数据库,并被俄罗斯文摘期刊录用。

《热能动力工程》刊载的主要内容是:国内外蒸汽轮机、燃气轮机的研究成果及发展状况;国内外电站及各种锅炉的设计和试验研究;传动装置设计和试验研究;热能工程、能源开发利用和节能技术与设计运行经验;新技术转让消息和新产品介绍等。

读者对象:热能动力工程领域的科研单位的研究人员;大专院校的师生;工矿企业动力部门的工程技术人员及运行、维护人员。

本刊既有理论性,也有实用性。对科研设计,使用单位有较大参考价值。

刊号 ISSN1001—2060 双月刊 A4 版. 全年订价 72 元,每册 12 元。
CN23—1176/TK

全国各邮电局(所)均可订阅;邮局代号 14—158 或编辑部直接订阅。

地址:150036 哈尔滨市香坊区公滨路 452 号 A 座 407 电话:0451—55654932

Diffusion in a Gas-solid Two-phase Turbine [刊, 汉] / LU Jia-hua, LING Zhi-guang (College of Aviation Transportation under the Shanghai University of Engineering & Technology, Shanghai, China, Post Code: 200336) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 454 ~ 458

In the totally three-dimensional viscous turbulent flow field of a dual-stage transonic gas turbine a Lagrangian numerical simulation was respectively conducted of the turbulent diffusion movement of coal particles of different particle sizes and mixed coal particles of 5—50 μm distribution diameter (volume fraction = $0.903 \times 10^{-4}\%$) in a blade flow path. This was accomplished with the use of a gas-solid two-way coupled model. As a result, the corresponding movement trajectories and slippage were obtained. As compared to the results of numerical simulation under the assumed condition of non-viscid, laminar flow and one-direction coupling, more realistic movement characteristics of particles were secured. It should be specially noted that at the blade pressure surface, blade root and tip the distribution of impact-point of particles with blades is in relatively good agreement with the distribution condition of actual blade impact/erosion points. This has confirmed the non-negligible effect of the turbulent diffusion characteristics of particles in the blade flow path. The results of the numerical simulation will provide a more reliable basis for furthering the optimization of the aerodynamic design of gas-solid two-phase turbine blades. **Key words:** gas-solid two-phase turbine, viscous turbulent flow field, turbulent diffusion, two-way coupling, Lagrangian method, numerical simulation

修正的 $k-\epsilon-k_p$ 双流体模型用于模拟旋流突扩燃烧室内气固两相流动 = Numerical Simulation of Gas-solid Two-phase Flows in a Swirling-flow Combustor through the Use of a Modified $k-\epsilon-k_p$ Two-fluid Model [刊, 汉] / LI Zhi-qiang, WEI Fei, LI Rong-xian, et al (Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 459 ~ 462

The source item of ϵ equation in a standard $k-\epsilon-k_p$ model after a modification is used to simulate swirling gas-solid two-phase turbulent flows. The simulation results were compared with experimental data. The resulting modified model can relatively well simulate the swirling flows and play a significant role in promoting an optimized engineering design. **Key words:** swirling flow, modified $k-\epsilon-k_p$, two-fluid model, numerical simulation

有再循环系统的超音速两相流升压性能的研究 = A Study on the Performance of a Supersonic Steam-liquid Two-phase Flow Pressure-boosting Unit Equipped with a Hot-water Recirculation System [刊, 汉] / GUO Ying-li, LI sheng, YAN Jun-jie, et al (College of Energy and Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 463 ~ 466

A theoretical calculation and experimental study is conducted of a supersonic steam-liquid two-phase flow pressure-boosting unit, which incorporates a hot-water recirculation system. It has been found that under a condition of constant inlet steam parameters the pressure boosting performance will decrease with an increase in feed water temperature and increase with an increase in outlet water flow. The outlet water temperature will decrease with an increase in outlet water flow, and increase with a rise in feedwater temperature. The unit under discussion not only retains the self-adaptive characteristics of the original outlet pressure, but also features self-adaptive characteristics of outlet flow rate. **Key words:** supersonic, steam-liquid two-phase flow, shock wave, constant flow rate characteristics

一种湿法烟气脱硫方式的试验研究 = Experimental Research of a Wet-process Flue-gas Desulfurization Method [刊, 汉] / SAI Jin-Cong, WU Shao-hua, WANG Hong-tao (College of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 467 ~ 470

A flue gas desulfurization method based on the use of a groove-shaped flow-guide core and flue-gas transverse sweep is proposed, which has been studied on a small-size test rig. A qualitative analysis was conducted of the impact of flue gas flow speed, temperature and gas-liquid contact area on flue-gas desulfurization efficiency. The slag formation problem of the test rig is also briefly analyzed and discussed. **Key words:** transverse sweep of gases, groove-type core, wet-process flue-gas desulfurization, slag formation