

# 气液双流程烟气脱硫塔内脱硫效率与传质性能的研究

孙忠伟<sup>1</sup>, 周屈兰<sup>2</sup>, 惠世恩<sup>2</sup>, 徐通模<sup>2</sup>

(1. 香港理工大学 屋宇设备工程学系, 香港 红磡 852 2 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘 要:** 实验采用电石渣做为脱硫剂, 对气液双流程液幕式脱硫塔的脱硫性能以及传质特性进行了相关的实验研究。通过实验测试, 提出了烟气流量、浆液循环量、液气比值等主要影响参数对液幕式脱硫塔的脱硫性能的影响。同时本研究提出了一个相关气液双流程脱硫塔的传质模型, 其形式如:  $Sh = 16.226 Re_g^{0.868} Re_l^{-1.64}$  和  $Sh = 27.126 Re_g^{-0.77} (L/G)^{-1.64}$ 。基于气液传质模型, 双流塔内浆液与烟气间复杂的气液传质过程可以通过烟气雷诺数, 浆液雷诺数以及液气比描述的经验关系式进行定量计算。这些参数的影响规律为研究液幕式湿法烟气脱硫系统中二氧化硫的反应特性及实际工程的应用提供了重要的指导数据。实验发现, 浆液循环量增加时, 总的脱硫效率相应会提高, 液气比增加时, 总的脱硫效率也相应会提高。而烟气流量增加时, 相应的脱硫效率却随之降低。通过实验研究发现: 当液气比大于  $20 L/m^3$  时, 脱硫率可达 90% 以上; 然而 pH 值对传质的影响作用很小。

**关 键 词:** 液幕式气液两相流; 湿法烟气脱硫; 传质; 脱硫效率

中图分类号: X701.3 文献标识码: A

## 引 言

电厂脱硫工艺有很多种<sup>[1~7]</sup>, 包括干法、半干法和湿法。其中, 湿式石灰烟气脱硫技术因具有脱硫效率高、操作稳定且经验多等特点成为目前国内外应用最多的一种技术<sup>[8~9]</sup>。根据气液接触方式不同, 湿法烟气脱硫工艺的塔型可分为喷淋塔、鼓泡塔和填料塔等<sup>[10~12]</sup>。通过提高总传质系数从而提高  $SO_2$  的吸收率和降低系统阻力, 开发拥有自主知识产权的  $SO_2$  吸收技术是目前研究的主要目标。

针对目前提高传质系数的问题, 提出了一种气液双流程液幕塔式湿法烟气脱硫系统, 脱硫塔中流型为液幕式气液两相流。该系统通过液幕使浆液充满整个脱硫塔, 并在浆液上升和下落过程中与烟气

充分接触, 以较低的液气比, 达到较高的脱硫效果。文中对液幕塔内新型气液两相流的脱硫性能以及气液传质特性进行了相关的实验研究。

## 1 实验系统

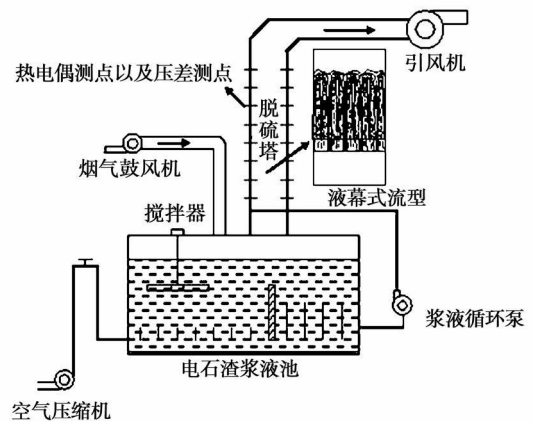


图 1 液幕式脱硫塔系统示意图

根据工程上的命名习惯, 气相的流动方向与液体下落的方向相同, 与液幕喷射的方向相反的塔型称为顺流塔, 气相的流动方向与液体下落的方向相反, 与液幕喷射的方向相同的塔型称为逆流塔。本实验采用逆流塔系统, 如图 1 所示。脱硫塔塔高度为 1 m, 塔身截面为  $60 mm \times 60 mm$ , 喷嘴为 3 排  $\times$  3 个。将实验室小型的燃油锅炉产生的烟气与  $SO_2$  混合后的混合气体作为实验模拟烟气。烟气温度大约为  $50^\circ C$ , 烟气中  $SO_2$  浓度为  $1500 \times 10^{-6} mol/mol$ 。浆液由浆液池经循环泵和流量计由喷嘴从塔底部喷入塔内形成液幕, 烟气由塔底进入塔身。烟气上升过程中, 在与从塔底喷入塔内的浆液形成顺流接触的同时, 与到达最高点后散落回浆液池的浆液再次形成逆流接触, 从而使烟气与浆液充分接触, 提高了

收稿日期: 2009-06-16 修订日期: 2009-09-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50276051)

作者简介: 孙忠伟 (1977-) 男, 湖南涟源人, 香港理工大学博士研究生。

脱硫率。因为空气将浆液池内大部分的亚硫酸钙氧化成硫酸钙, 所以实验中补浆系统不断的给电石渣浆液池提供新鲜的电石渣浆液 (质量浓度 5%) 以维持浆液的 pH 值水平。

## 2 实验测试及结果分析

通过全工况测量得到了烟气流量、浆液循环量和液气比与脱硫塔的脱硫效率的关系曲线。

### 2.1 烟气流量对脱硫率的影响

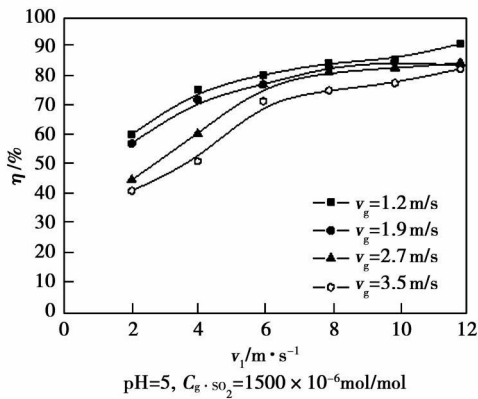


图 2 烟气流量与脱硫率的关系

烟气流量与脱硫率的关系曲线如图 2 所示。从图中可以看出, 烟气流量增大时, 塔内气液两相流之间相互湍动加强, 降低了气液两相间的膜厚度, 同时增加了塔内单位体积内的持液量。但是, 由于烟气流速的增大, 烟气在脱硫塔的停留时间缩短, 因此总的脱硫效率不断的降低。

### 2.2 循环浆液量对脱硫率的影响

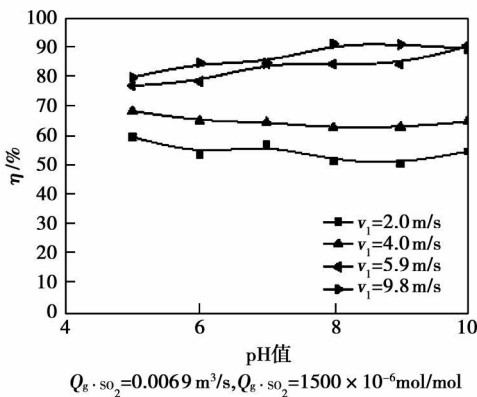


图 3 循环浆液流量, pH 值与脱硫率的关系

循环浆液量、pH 值与脱硫率的关系曲线如图 3 所示。由图可知, 当浆液流量增加时, 脱硫效率也相

应地提高。脱硫塔内的气液流场主要是通过烟气流动和液幕喷射两者相互耦合、相互影响而形成的。随着浆液流量增大, 浆液的喷射高度增高, 一方面增加了脱硫区域和气液接触时间, 另一方面增加了反应塔吸收段的持液量, 有效地进行了  $\text{SO}_2$  的脱除。同时可以看出, pH 值对传质的影响作用很小, 液相流量是影响脱硫率的主要因素。

### 2.3 液气比对脱硫率的影响

由于在实际工程设计中, 常使用液气比  $L/G$  作为设计参数, 因此, 需要对液气比 ( $L/G$ ) 的影响进行的相应的研究。液气比与脱硫率的关系曲线如图 4 所示。由图可知, 随着液气比的增加, 脱硫效率也随着增加。因为液气比增加后, 增大了气液接触面积, 使气液反应更加充分。当液气比大于  $20 L/m^3$  后, 其对脱硫率的影响不再显著。

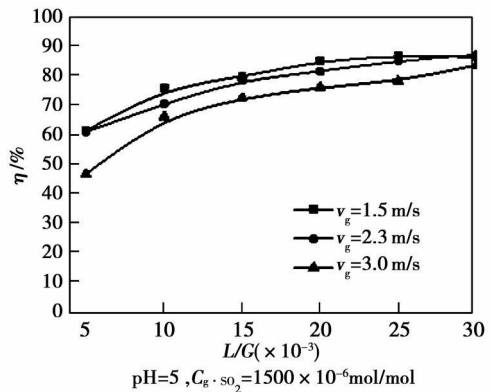


图 4 液气比与脱硫率的关系

## 3 液幕塔气液传质模型

气液传质系数是烟气脱硫、热能深度利用等领域的重要设计参数。本研究通过传质实验测量系统的进出口  $\text{SO}_2$  浓度分布情况, 进行理论分析, 得到了气液双流程湿法脱硫系统的传质模型。其传质系数为:

$$K = M/A(C_g - C_l) \quad (1)$$

式中:  $K$ —传质系数,  $m/\text{s}$ ;  $M$ —单位时间内的气相与液相之间的传质量;  $C_g$ —气相的平均浓度,  $\text{mol}/\text{m}^3$ ;  $C_l$ —液相的平均浓度,  $\text{mol}/\text{m}^3$ ;  $A$ —当量传质面积,  $\text{m}^2$ 。

由于吸收塔中的气液接触面形状极为复杂, 包括液滴、液柱、液体块和气泡等各种类型的气液界面, 所以, 无论是理论计算还是实验测量都很难获得

精确的气液接触面积。因此,本研究定义了气液“当量传质面积”。另外,在计算中使用“理论液柱高度”,实际液柱高度还受烟气流速的影响,而理论液柱高度可以避免烟气流速的影响。烟气流速的影响将在拟合的经验公式中统一考虑。当量传质面积为:

$$A = n d_r h_l \tag{2}$$

式中:  $n$ —喷嘴的个数;  $d_r$ —喷嘴的直径;  $h_l$ —理论液柱高度,也就是根据喷射压力计算的理论上的液柱高度,  $m$ 。

根据分析气相空截面流速、液相喷射速度、液气比与传质系数的关系,可以得到传质系数与液气比和气相空截面流速的关系式:

$$Sh = Kd/D \tag{3}$$

$$K = C_1 R_g^m R_f^d \tag{4}$$

$$K = C_2 R_g^m (L/G)^n \tag{5}$$

式中:  $C_1$ 、 $C_2$ —经验常数;  $R_g$ —气相空截面雷诺数;  $R_f$ —液相喷射雷诺数;  $L/G$ —液气比,  $L/m^3$ ;  $D$ —气相质扩散率;  $d$ —气相的特征尺寸。

由于液相喷射速度、气相空截面流速和液气比并非独立的 3 个参数,所以,根据液气比的定义,两个关联式的两项  $R_f$ 和  $L/G$ 应具有相同的指数  $n$ 。对式(3)~式(5)整理后两边求对数,得到的线性关系为:

$$\ln Sh = \ln C_1 + m \ln R_g + n \ln R_f \tag{6}$$

根据式(6)计算得到的气相雷诺数与舍伍德数之间的关系如图 5 所示。

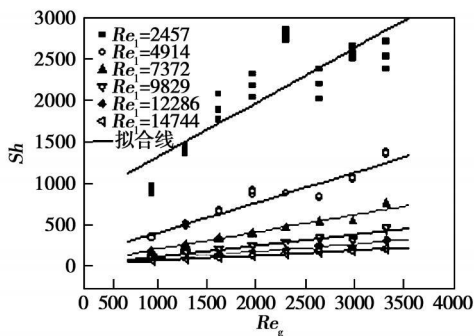


图 5 气相雷诺数与舍伍德数之间关系

图 5~图 7 是拟合的经验关联式与实验结果的对比,可以发现,测量得到的传质系数的对数与液气比的对数成非常良好的线性关系和很高的计算精度。

通过最小二乘法对测量数据进行回归分析,可以得到以下重要的经验关联式:

$$Sh = C_1 R_g^m R_f^n \text{ 或 } Sh = C_2 R_g^m (L/G)^n \tag{7}$$

式(7)中的系数和指数如表 1 所示。

表 1 经验关联式中的系数和指数

浆液 pH 值	$C_1$	$C_2$	$m_1$	$m_2$	$n$
5	12 262 353 34	22 792 610 93	0 878	-0 717 3	-1 592 9
6	13 033 502 03	24 754 979 89	0 889	-0 771 6	-1 657 9
7	19 432 999 28	36 857 872 68	0 826	-0 820 5	-1 646 4
8	17 074 085 48	31 943 205 23	0 838	-0 786 0	-1 624 6
9	19 652 809 09	37 706 202 84	0 838	-0 850 4	-1 688 2
10	10 715 114 26	20 282 653 98	0 908	-0 719 4	-1 626 9

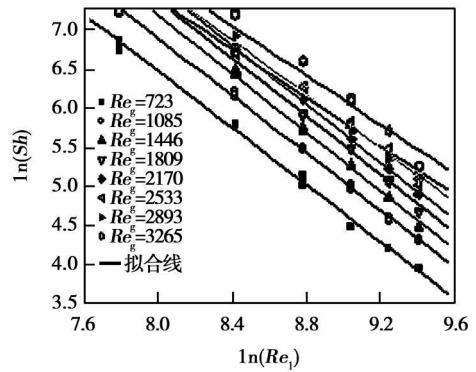


图 6 逆流塔内  $\ln(R_g)$ 和  $\ln(Sh)$ 的关系

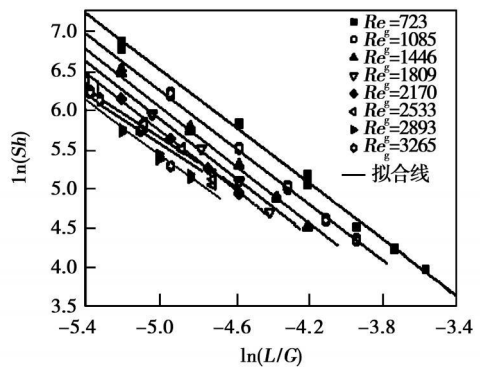


图 7 逆流塔内  $\ln(L/G)$ 和  $\ln(Sh)$ 的关系

浆液对气体中的  $SO_2$  是一种化学吸收作用,浆液中存有的分子态  $SO_2$  很少,  $H^+$  浓度也只有  $10^{-5}$  mol/L 左右,可以视作趋近于零。而且随 pH 的变大,  $H^+$  浓度更加趋近于零。所以 pH 值对气液相之间  $SO_2$  的传质影响很小。基于以上的分析,本研究提出了一个忽略了 pH 值影响的气液两相传质模型,则:

$$Sh = 16.226 R_g^{0.863} R_f^{1.64} \text{ 或 } Sh = 27.126 R_g^{-0.77} (L/G)^{-1.64} \tag{8}$$

在实验范围内, 该传质模型计算值与实验值的平均绝对误差为 6.8%。

## 4 结 论

以气液两相流的传质理论为基础, 对气液双流程液幕塔内的气液两相流特性进行了相关的研究。得到了液幕塔脱硫性能和传质特性的规律, 其结论为:

(1) 随着烟气流量的增加, 脱硫效率不断地降低; 随着循环浆液流量的增加, 脱硫效率不断地增加; 随着液气比的增加, 脱硫效率也随着增加; 当液气比大于  $20 \text{ L/m}^3$  时, 脱硫率可达 90% 以上;  $\text{pH}$  值对传质的影响作用很小。

(2) 在不考虑浆液  $\text{pH}$  值影响的情况下, 基于气相雷诺数, 液相雷诺数和液气比的情况, 本研究提出了一个新的液幕式湿法烟气脱硫塔的气液两相传质模型, 得到气液双流程液幕式吸收塔传质的经验关系式, 为电厂脱硫工程的实际运行提供理论指导。

### 参考文献:

[1] 陈德钧, 季延安. 大气污染化学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.  
[2] 雷仲存. 工业脱硫技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.

[3] 郝吉明, 王书肖, 陆永琪. 燃煤二氧化硫污染控制技术手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.  
[4] MEKAP B Ç KUNDU G B SWAS M N Modeling of a novel multi-stage bubble column scrubber for flue gas desulfurization [J]. Chemical Engineering Journal, 2002, 86(3): 331-342.  
[5] TSUKESHITA M SUDO H FGD Performance and experience on coal fired plants [J]. IEA Coal Research, 1993, 58: 35-58.  
[6] KIKAWA H NAKAMOTO T MORISHITA M et al New wet FGD process using granular limestone [J]. Ind Eng Chem Res, 2002, 41: 3028-3036.  
[7] STROCK T W GOHARA W F Experimental approach and techniques for the evaluation of wet flue gas desulfurization scrubber fluid mechanics [J]. Chem Eng Sci, 1994, 49(24A): 4667-4679.  
[8] 姚 强, 项光明, 何苏浩, 等. 中国二氧化硫控制的国际合作 // 2000 年中芬环境与森林研讨会论文集 [C]. 北京: 清华大学, 2000: 47-56.  
[9] INSTITUTE OF CLEAN AIR COMPANIES NC Scrubber myths and realities [J]. Power Eng, 1995, 99(1): 35-38.  
[10] KLINGSPOR J S BRESOWAR G F Advanced limestone based wet flue gas desulfurization [J]. ABB Review, 1995, 8(1): 23-27.  
[11] LANCIA A MUSMARRA D PEPE F et al  $\text{SO}_2$  Absorption in a bubbling reactor using limestone suspensions [J]. Chem Eng Sci, 1994, 49(24A): 4523-4532.  
[12] KILB S MICHELSEN M L JOHANSEN K D Experiment investigation and modeling of a wet flue gas desulfurization pilot plant [J]. Ind Eng Chem Res, 1998, 37(10): 2792-2806.

## 新技术、新工艺

# 耐热合金的热疲劳强度

据《Теплоэнергетика》2009 年 5 月号报道, 现代的燃气轮机装置必须在热循环负荷下运行。有许多可以确定零件热疲劳强度的方法, 但是缺乏必要数量的试验数据妨碍了它们广泛的应用。

进行的平面内凹试样热疲劳试验和完成的计算研究可得出下列结论:

- (1) 按照科富因方法的圆柱形试样的试验和平面内壳试样在真空中的试验给出相同的结果。
- (2) 工业中应用的现代耐热铸造合金比易变形的合金具有明显更高的热疲劳强度特性。
- (3) 定向结晶合金和单晶合金的热疲劳强度值本质上取决于结晶的方位。
- (4) 应力集中对热疲劳寿命有相当大的影响。
- (5) 在一些耐热合金中, 热疲劳强度取决于循环最大温度的关系是非单调的。
- (6) 在给定达到破坏循环次数的情况下, 利用迈松公式预测镍基耐热合金的热疲劳强度将给出 300%~500% 的误差, 这证明了必须应用计算—试验的方法确定广泛应用于燃气轮机的耐热合金的热疲劳特性。
- (7) 进行的平面内凹试样在热循环加载情况下应力变形状态动力学计算, 允许定性地解释不同结晶方位单晶合金热疲劳强度的规律性、在最大温度下时效处理以及应力集中的影响。

(吉桂明 摘译)

WFGD水力旋流器中石灰石颗粒分级试验与数值模拟 = Gradation Experiment and Numerical Simulation of Limestone Particles in a WFGD (Wet method Flue Gas Desulfuration) Hydrocyclone [刊, 汉] / YAN Zhen-rong GENG Li-ping YANG Mo (College of Energy Source and Power Engineering Shanghai University of Science and Technology Shanghai China Post Code 200093), LUO Xiaoming (Shanghai City Special Purpose Equipment Surveillance and Inspection Technology Research Institute Shanghai China Post Code 200062) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3). — 321 ~ 325

In a WFGD (Wet method Flue Gas Desulfuration) device, the gradation experiment of a hydrocyclone shows that when the particle mass concentration of limestone slurry is 15%, at the overflow port it will be 30%. The overflow particle diameter is concentrated at less than  $30 \mu\text{m}$ . With an increase of the particle diameter, the particle recovery rate at the bottom outlet will also increase. When the particle diameter reaches  $30 \mu\text{m}$ , the particle recovery rate will already approach 100%. The numerical simulation results show that the Reynolds stress turbulent flow model, free surface multi-phase flow model and Stokes-Lagrange model can depict very well the limestone particle gradation movement and regularity featuring a complex three-dimensional motion in the hydrocyclone. A numerical simulation method with no need to give a flow division ratio for the initial boundary condition and to preset an air column was adopted and the simulation results showed the formation of air column and eddy flow of the fluid. The gradation efficiency of particles in different diameters thus obtained is in relatively good agreement with that tested under the condition of a high inlet mass concentration. Key words: wet method flue gas desulfurization, hydrocyclone, limestone particle, flow division and gradation, numerical simulation

气液双流程烟气脱硫塔内脱硫效率与传质性能的研究 = Study of the Desulfuration Efficiency and Mass Transfer Performance of a Gas-liquid Double-flow-path Flue Gas Desulfuration Tower [刊, 汉] / SUN Zhong-wei (Department of Building Services Engineering Hong Kong Polytechnic University Kowloon Hong Kong Post Code), ZHOU Quan, HUI Shi-en, XU Tong-mo (National Key Laboratory on Multiple-Phase Flows in Power Engineering Xian Jiaotong University Xian China Post Code 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3). — 326 ~ 329

With calcium carbide dregs serving as desulfuration agents in the test, a relevant experimental study was performed of the desulfuration performance and mass transfer characteristics of a gas-liquid double-flow-path liquid-curtain type desulfuration tower. Through tests and measurements, the influence of such main parameters as flue gas flow rate, circulating slurry quantity and liquid-gas ratio etc. on the desulfuration performance of the above desulfuration tower was given. In the meantime, a relevant mass transfer model for the gas-liquid double-flow-path liquid of a desulfuration tower was presented, for instance:  $Sh=16.226Re^{0.863}Re^{-1.64}$  and  $Sh=27.126Re^{-0.77}(L/G)^{-1.64}$ . Based on the above-mentioned model, the complicated gas-liquid mass transfer process between the slurry and flue gases in the double-flow-path tower can be quantitatively calculated by using the empirical correlation formula expressed by the flue gas Reynolds number, slurry Reynolds number and liquid-gas ratio, the influencing law of which can offer important guiding data for studying the reaction characteristics of sulfur dioxide in the liquid curtain type wet method flue gas desulfuration system and its application in the practical engineering projects. It has been found during the test that when the circulating slurry quantity increases, the total desulfuration efficiency will enhance accordingly. With an increase of the liquid-gas ratio, the total desulfuration efficiency will also rise accordingly. When the flue gas flow rate increases, however, the related desulfuration efficiency will decrease correspondingly. The experimental study shows that when the liquid-gas ratio is higher than  $20 \text{ L/m}^3$ , the desulfuration efficiency will be over 90%. The HH value, however, exercises a very little influence on the mass transfer. Key words: liquid curtain type gas-liquid two-phase flow, wet method flue gas desulfuration, mass transfer, desulfuration efficiency

半干法脱硫中应用蒸汽相变促进细颗粒脱除 = Application of the Steam Phase Change in Semi-dry method Desulfuration to Promote the Removal of Fine Particles [刊, 汉] / LIU Jin-hui, SONG Shi-juan, YANG Lin