

液幕式脱硫吸收塔中气液传质特性的实验研究

李 娜, 周屈兰, 徐通模, 惠世恩

(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: 对液幕式吸收塔脱硫性能进行了实验研究, 分析了烟气流量、循环浆液量、浆液 pH 值等参数对脱硫性能的影响, 合理选择装置结构和运行参数时, 脱硫效率可达 95%; 提出了液幕式吸收塔中传质面积的计算方法, 建立了液幕式吸收塔的传质模型, 发现传质系数在 pH=5~10 之间变化不明显, 得到了液幕式吸收塔的传质系数关于气相和液相雷诺数的经验关系式。

关 键 词: 液幕式吸收塔; 脱硫效率; 传质系数; 当量传质面积

中图分类号: X701.3 文献标识码: A

引 言

湿法烟气脱硫工艺的核心部分是气液反应的脱硫吸收塔, 常用的脱硫吸收塔的种类有填料塔、喷淋塔、液柱塔以及液幕塔^[1~3]。随着环保的要求不断提高, 对吸收塔的脱硫能力和传质能力的要求也在不断提高。液幕式气液两相流, 具有单位体积持液量大, 气液相相对速度高、接触表面大和混合强烈等特征。

文献[2]研究了液幕式吸收塔中的传热特性, 分析了气液两相流中的温度场分布, 并研究了传热系数与液气比之间的关系; 液柱式吸收塔与液幕式具有相似的气液流程, 文献[4~5]在液柱冲击塔脱硫装置中, 通过冷态试验研究各种结构和运行参数的变化对液柱冲击塔脱硫效率的影响, 但未提出相应的传质模型; 文献[6]研究了湿壁塔式反应器中高 Re 数下的传质模型及其经验方程; 文献[7]中对罐式反应器建立了传质模型, 研究了化学反应对于传质的影响, 但这两种反应装置的气液接触方式完全不同于液幕塔。根据气液反应器的设计原理^[8], 对于科学研究和工程设计, 必须得到反应器内的传质系数及其与气液两相流动参数的关系。而在以往文献当中, 对于湿法脱硫的吸收塔的性能, 多数采用脱硫率作为指标^[4,9], 未能建立基于传质物理过程

的通用模型, 也未得到具有较广泛适用范围的传质系数的计算方法。

本研究是对液幕式吸收塔脱硫性能进行了实验, 研究了烟气流量、循环浆液量、浆液 pH 值等参数对脱硫性能的影响, 并通过合理定义液幕床的传质面积的计算方法, 建立了液幕式吸收塔的传质模型, 得到了液幕式吸收塔的传质系数经验关系式。这些研究成果, 是液幕式气液吸收方式的科学研究和工程设计的依据。

1 实验系统

液幕式吸收塔实验系统如图 1 所示, 循环浆液(含有 5% 的电石渣)在泵的作用下通过喷嘴阵列竖直向上射入湿法吸收塔内, 到达一定高度后, 在重力作用下回落至底部水箱; 采用燃油锅炉和含硫燃料产生模拟烟气, 在引风机的作用下, 通过浆池上表面后进入吸收塔, SO_2 被吸收。实验采用烟气分析仪测试烟气中的 SO_2 浓度, 实验参数的范围如表 1 所示。

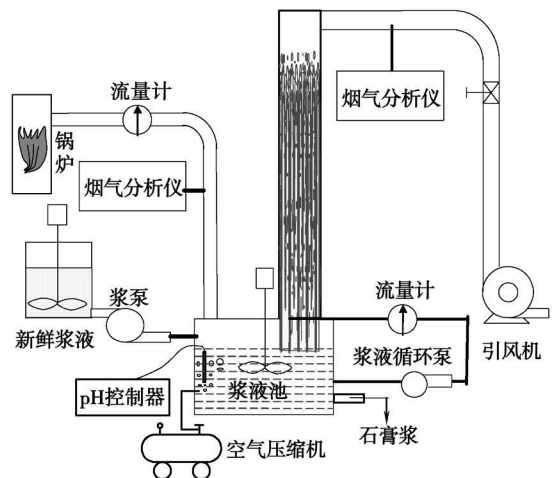


图 1 实验系统示意图

收稿日期: 2008-01-21; 修订日期: 2008-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50276051); 国家重点基础研究发展规划(973)基金资助项目(2005CB221206)

作者简介: 李 娜(1981-)女, 河南驻马店人, 西安交通大学博士研究生

表 1 实验参数范围

烟气流量	烟气温度	SO ₂ 浓度	循环浆液流量	浆液密度	pH
Q_g	$T_{g,in}$	C_{SO_2}	Q_l	ρ	
$/m^3 \cdot s^{-1}$	$/^{\circ}C$	$/mg \cdot m^{-3}$	$/m^3 \cdot s^{-1}$	$/kg \cdot m^{-3}$	
0.003~0.0125	60~80	4.290~5.720	0~8.333 $\times 10^{-5}$	1.1 $\times 10^3$	5~10

2 实验结果及分析

当循环浆液量增加时(液气比增加),浆液的喷射速度增加,液幕式吸收塔内的床层高度增加,喷射散落形成的液滴坠落时间也就越长,这就增加了气液接触面积和接触时间,使得液滴能够更多地吸收SO₂。当烟气流量增大时,气液之间的滑移速度增加,两相之间的湍动加强,提高了系统的传质能力。但是由于烟气流速的增大,烟气在吸收塔的停留时间减短,相对的液气比也减少,系统的脱硫率反而比烟气低流速时低,如图2所示。

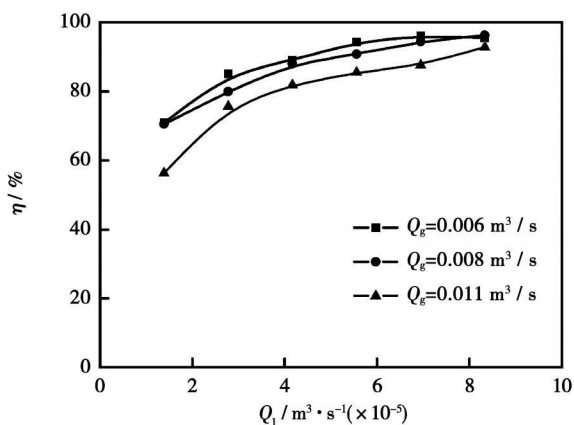


图 2 烟气流量对脱硫率的影响

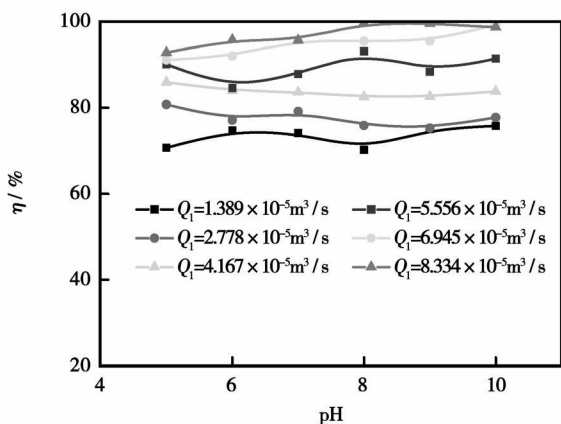


图 3 pH 值和浆液量对脱硫率的影响 ($Q_g = 0.003 m^3/s$)

图 3 为浆液 pH 值在 5~10 之间变化时的情况。脱硫率随着循环浆液量 Q_l 的增加而提高。而当烟气流量和循环浆液量保持相同的时候,脱硫效率随 pH 值的变化并不显著。根据文献 [10] 的计算,5720 mg/m³ 的 SO₂ 溶解于 50 °C 纯水的饱和溶液的 pH 值大约是 2.48, 对应 H⁺ 的浓度是 $3.31 \times 10^{-3} mol/L$ 。而浆液 pH 值在 5~10 之间时,浆液中 H⁺ 的浓度是 $10^{-5} \sim 10^{-10} mol/L$, 是饱和浓度的 $3 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-8}$ 倍。此时,浆液中的 SO₂ 溶解远未达到饱和,传质驱动力在此范围内变化很小。所以,在此范围内,总的传质量受 pH 值影响很小,脱硫率随 pH 值的变化也不大。

液气比是吸收塔设计和运行中最重要的参数之一。图 4 以 pH=5 为例,讨论液气比对脱硫率的影响。当烟气量不变时,随着液气比的增加,投入液体量增加,气液接触面积也随着增加,SO₂ 与浆液的反应更加充分,脱硫率增加。当 $L/G > 10 L/m^3$ 时,液幕式吸收塔的脱硫效率可达 95%, 此后,液气比的变化对脱硫率的影响将不再明显。而当烟气量下降时,在相同的液气比时,气液两相的流速都比较低,相对的滑移速度下降,湍流混合变弱,脱硫率有所下降。

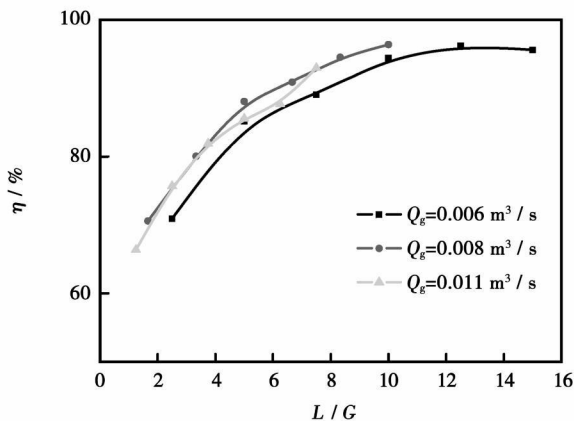


图 4 液气比对脱硫率的影响

3 液幕式吸收塔传质模型

传质系数是表达装置传质能力的主要参数,也是进行吸收过程计算的关键参数。通过传质实验得到进出口 SO₂ 浓度之后,可以通过式(1)来计算液幕式吸收塔的传质系数:

$$k = \frac{M}{A(C_g - C_l)} \quad (1)$$

式中: k —传质系数, m/s; M —单位时间内的气相与液相之间的传质量, 可由塔内气体流量及进出口浓

度分布求出, mol/s; C_g —气相的平均浓度, mol/m³; C_l —液相的平均浓度, mol/m³; A —当量传质面积, m²。

在液幕床中, 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, 很难获得精确的气液传质面积。因此, 液幕床的传质模型建立的关键是能否给出一个合理的传质面积的计算方法。定义液幕塔中的气液“当量传质面积”为:

$$A = n\pi d_n \frac{v_j^2}{2g} \quad (2)$$

式中: n —喷嘴的个数; d_n —喷嘴的直径, m; v_j —喷嘴喷射速度, m/s。

根据液体的雾化理论^[11], 忽略液体的粘性时, 射流的初始总动能转化成了雾化液滴的表面能和重力势能, 这样定义“当量传质面积”具有以下合理性:

(1) 当假定液体喷射动能转化为液滴表面能的转化率基本保持不变的时候, 这种定义可以体现出射流的总动能对传质面积的影响, 即喷射速度越大, 转化的表面能越多, 则雾化形成的液滴表面积越多, 总传质面积越大(也就是循环浆液量增大, 喷射速度增加, 液柱高度越大, 传质面积也越大); (2) 还可以体现出装置结构和传质面积之间的关系: 喷嘴个数越多, 传质面积越大; 喷嘴直径越大, 传质面积越大。

根据实验数据, 通过式(1)计算出逆流塔内的传质系数, Re_g 和 Re_l 分别取塔体湿周直径和喷嘴直径为特征长度进行计算。然后, 取 SO₂ 的质扩散系数 $D = 1.17788 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, 以塔体湿周直径为特征长度^[8], 由式(3)计算 Sh 数:

$$Sh = \frac{kd_g}{D} \quad (3)$$

式中: d_g —气相的特征尺寸, 塔体湿周直径, m; D —气相质扩散率, m²/s。

根据气相空截面流速、液相喷射速度、液气比与传质系数的关系, 可以整理出液幕床中气液两相传质的经验关系式(分别以 Re 数表达和液气比表达):

$$Sh = 3\ 462\ 159.55 Re_g^{0.604} Re_l^{-1.425} \quad (Re_g = 700 \sim 3\ 300, Re_l = 2\ 400 \sim 15\ 000) \quad (4)$$

$$Sh = 6\ 061\ 819.03 Re_g^{-0.822} (L/G)^{-1.425} \quad (Re_g = 700 \sim 3\ 300, L/G = 0 \sim 30) \quad (5)$$

图 6 和图 7 为实验数据与关联式计算结果的对比关系。在实验范围内, 拟合的关联式与实验值的平均相对误差为 11.038%。这些结果也表明, 使用本文定义的“当量传质面积”来整理液幕床内的传质

数据时, 数据显现出良好的规律性。

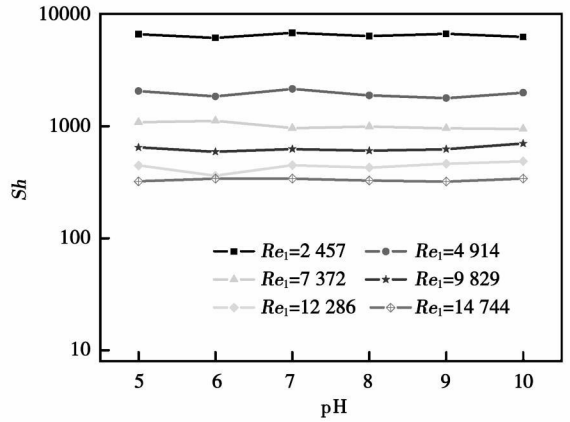


图 5 pH 值, 液相 Re_l 与 Sh 的关系

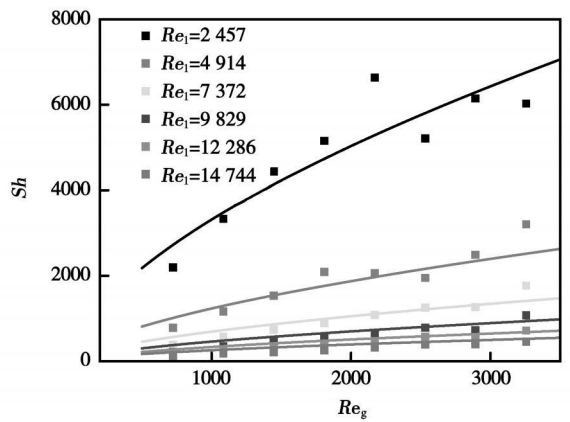


图 6 气相 Re_g 与 Sh 的关系

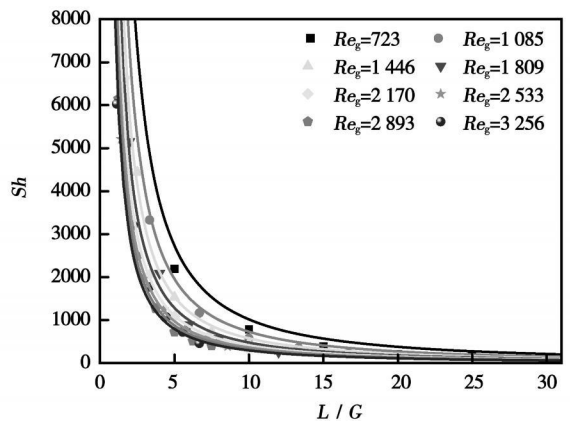


图 7 液气比与 Sh 的关系

图 5 显示了 Sh 数随 pH 值的变化不大, 这与前面的讨论结果一致。图 6 显示出 Sh 数随气相雷诺数 Re_g 的增加而增加。而图 7 显示 Sh 数随液气比的增加而下降, 这是因为, 液幕床传质是一种特殊的传质过程, 其传质面积不是常数, 而是一个与液相流

量直接相关的变量。“当量传质面积”将随液相喷射速度的2次方增加。把式(2)代入式(1),得:

$$k \propto M v_1^{-2} \quad (6)$$

假定气相总流量不变,当液气比增加的时候,液相喷射速度 v_j 成比例增加,此时,根据式(2)定义的“当量传质面积”,由式(1)计算的传质系数正比于液相喷射速度 v_j 的-2次方变化。而根据实验数据,总的传质量 M 随液相喷射速度 v_j 的0.575次方增加。最终的结果,是 Sh 数随液气比-1.425次方变化。

4 结 论

在液幕式吸收塔实验台上组织了热态实验,研究了烟气流量、循环浆液量、浆液 pH 值等参数对液幕式吸收塔的脱硫性能的影响,并通过合理定义液幕床的传质面积的计算方法,建立了液幕式吸收塔的传质模型,主要有以下结论:

(1) 在实验范围内,液幕式吸收塔中脱硫效率在烟气流量一定条件下随浆液循环量的增大而提高,在喷液密度一定条件下随烟气流量的增大而降低;当 $L/G > 10 \text{ L/m}^3$ 时,液幕式吸收塔的脱硫效率可达95%。

(2) 建立了液幕式吸收塔的传质模型,提出了液幕床中“当量传质面积”的概念, $A = nd_n \frac{v_1^2}{2g}$, 得到了吸收塔中的传质系数与 Re_g, Re_l 及液气比之间的联系。

(3) 实验结果和理论分析均表明,在浆液 pH=

5~10 的范围内,脱硫率和传质系数与浆液 pH 值的关系不明显。通过实验数据的整理,得到了液幕式吸收塔的传质特性参数的实验数据和传质经验关系式,如式(4)和式(5)所示。这些研究成果是液幕式气液吸收装置科学研究和工程设计的重要依据。

参考文献:

- [1] FUJIMORI T, NAKASHOJI H. Development of double-contact-flow scrubber for flue gas desulfurization // International Conference on Power Engineering[C]. Kobe, Japan Soc Mechanical Eng, 2003. 3-252
- [2] 宋洪鹏,周屈兰,惠世恩,等.液幕状气液两相流传热特性的实验研究[J].西安交通大学学报,2004,38(5):533-536
- [3] 宋洪鹏.液幕床中气液两相流动与传热过程研究[D].西安:西安交通大学,2005.
- [4] 程峰,骆仲决,高翔,等.液柱冲击塔湿法烟气脱硫的试验研究[J].浙江大学学报,2005,39(11):1783-1787.
- [5] YUAN WU, LI QIN, LI FANG. Desulfurization in the gas-continuous impinging stream gas-liquid reactor[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(6): 1814-1824
- [6] 钟秦.湿法烟气脱硫的理论和实验研究[J].南京理工大学学报,1999,23(3):259-262
- [7] SUSIANTO, MATHIEU PÉTRISSANS, ANÉLIE PÉTRISSANS, et al. Experimental study and modelling of mass transfer during simultaneous absorption of SO₂ and NO₂ with chemical reaction[J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, 44(10): 1075-1081.
- [8] 冯霄.化工原理[M].北京:科学出版社,2001.
- [9] 杨小勇,李彦,项光明,等.湿法液柱喷射烟气脱硫反应的实验研究[J].工程热物理学报,2006,27(1):167-170.
- [10] 赵彩虹. SO₂ 溶解的多相平衡及湿法脱硫基础化学分析方法研究[D].西安:西安交通大学,2004
- [11] LIN S P, LIAN Z W. Mechanisms of the break up of liquid jets[J]. AIAA Journal, 1990, 28(1): 120-126

(编辑 单丽华)

新技术、新工艺

燃蒸联合装置管系耐蚀性提高的措施

据《Теплоэнергетика》2008年2月号报道,在俄罗斯第一批燃蒸联合装置运行的经验表明,对在燃蒸联合装置低压回路内流动的工质与金属相互作用物理化学过程特性的研究具有重要的意义。

提供了不同的参数和条件对燃蒸联合装置余热锅炉低压蒸发器管系构件磨损量影响的计算—分析研究的结果,查明了原因并确定了支配它们破坏的机理。提出了有关提高燃蒸联合装置管系耐蚀性的建议。

只要依据全套系统的方法就可以保证完全排除燃蒸联合装置管道构件和设备意外的破坏,并提高它们运行的耐蚀性,这些方法包括在腐蚀监控、强烈磨损区(部件)的预测及其统计图的建立、除去强烈变薄危险的构件、制定全套计划帮助电站工作人员按计划运行检查管道和设备构件的厚度等方面的工作。

(吉桂明 供稿)

ation plants. **Key words:** OWC (Ocean Wave Converter), wave energy power generation, impulse type turbine, computational fluid dynamics

液幕式脱硫吸收塔中气液传质特性的实验研究 = **Experimental Study of Gas-liquid Mass Transfer Characteristics of a Liquid-curtain Type Desulfuration Absorption Tower**[刊, 汉]/ LI Na, ZHOU Qu-lan, XU Tong-mo, et al (National Key Laboratory on Multiple-phase Flows in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009, 24(1). - 109 ~ 112

An experimental study has been performed of the desulfuration performance of a liquid-curtain type absorption tower, during which the influence of such parameters as flue-gas flow rate, circulating slurry quantity and pH value etc. on its desulfuration performance was studied. When the structure and operating parameters of the tower are properly chosen, the desulfuration efficiency can reach 95%. The authors have presented a method for calculating the mass transfer area of the tower and established for it a mass transfer model. It has been found that the mass transfer coefficient of the tower does not vary significantly when pH value is in a range from 5 to 10. In addition, an empirical correlation formula of the mass transfer coefficient of the tower concerning gas phase and liquid phase Reynolds Number has been obtained. **Key words:** liquid-curtain type absorption tower, desulfuration efficiency, mass transfer coefficient, equivalent mass-transfer area

喷氨格栅处烟气速度场对高效 SCR 均流与还原剂混合性能的影响 = **Influence of the Flue Gas Velocity Field at an Ammonia-injection Grid on Uniform Flows and Reducing-agent Mixing Performance of a High-efficiency SCR (Selective Catalytic Reduction) Device**[刊, 汉]/ LEI Da, JIN Bao-sheng (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009, 24(1). - 113 ~ 119

With an ever increasing SCR (Selective Catalytic Reduction) system denitration efficiency, the flue gas velocity field at an ammonia-injection grid (AIG) becomes ever more important in SCR system uniform flow and mixing technology. With the SCR system in a high efficiency power plant serving as an object of study, analyzed was the influence of ten typical changes of the flue gas velocity field at the AIG on the uniform flow and reducing agent mixing performance in the SCR system of the power plant by using a SCR system numerical model which has been verified by a cold state model. It has been found that for the SCR system with a high denitration efficiency, any changes to the velocity field at the AIG exercise a great influence on the distribution of ammonia-nitrogen ratio at the interface of a catalyzer inlet and also a definite influence on the velocity field at the inlet interface. In a design process, the control of the inhomogeneity of the flow speed at the AIG can enhance the quality of the uniform flow and mixing in the SCR system. In a high-efficiency SCR system in which a relatively good control over the inhomogeneity of the flow speed at the AIG has been achieved, with an increase of the inhomogeneity, the nonuniformity of the ammonia-nitrogen ratio at the catalyzer inlet will increase. The velocity field at the AIG and that of the catalyzer have a similarity. **Key words:** denitration, SCR (Selective Catalytic Reduction), uniform flow and mixture performance, ammonia-injection grid, flue gas velocity field

炉排-循环床复合垃圾焚烧炉污染物生成模型 = **A Model Featuring the Formation of Pollutants in a Grate-CFB (Circulating Fluidized Bed) Compound Solid Waste Incinerator**[刊, 汉]/ ZHANG Yan-guo, LI Qing-hai, CHEN Chang-he, et al (Education Ministry Key Laboratory on Thermal Science and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009, 24(1). - 120 ~ 126

Established was a mathematical model for the combustion in a grate-CFB (Circulating Fluidized Bed) compound solid