

提升管内熟石灰浆液雾化脱除 烟气中SO₂过程的研究

高继慧, 王 帅, 高建民, 杜 谦, 吴少华, 秦裕琨
(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

Study on Process of SO₂ Removal in Flue Gas by White Lime Slurry Atomization in Riser

GAO Ji-hui, WANG Shuai, GAO Jian-min, DU Qian, WU Shao-hua, QIN Yu-kun

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: The experimental research was carried out about process of SO₂ removal in flue gas using white lime slurry atomization, and with the method of non-contact on-line measuring for SO₂ concentration in riser. The temperature distribution of slurry atomization drying was measured by new sandwich structure thermocouple with air pump. The results showed that the process of SO₂ removal and slurry atomization increases firstly and then decreases along the tower. The maximum SO₂ removal and temperature decreasing amplitude were got at a distance 200mm from the nozzle. There are two apexes on the radial temperature distribution curves of slurry atomization area. When the gas to liquid mass ratio increase from 0.1 to 0.2, desulfuration efficiency was improved by 8% and atomization height was also increased. The sandwich structure thermocouple with air pump is appropriate for measuring the gas temperature in the two-phase gas liquid flow field. By determining slurry evaporation condition with measuring gas temperature field, the nozzle spray patterns in different work conditions can be calibrated.

KEY WORDS: sulfur dioxide; desulfuration; atomization; flue gas; white lime slurry

摘要: 应用非接触在线测量SO₂浓度装置,研究了提升管内熟石灰浆液雾化时SO₂脱除过程。研制了夹层式抽气热电偶,测得了浆液雾化干燥时烟气温度场分布。结果表明:SO₂脱除和浆液干燥过程沿塔高呈先增加后降低的趋势,在距离喷嘴200mm处出现SO₂脱除和温度降低份额的最大值。浆液雾化区径向温度呈双峰分布。气液质量比由0.1提高到0.2时脱除效率提高8%;雾化高度提高。夹层式抽气热电偶适于测量气液两相流场内气体温度,通过测定温度场可以判定浆液蒸发情况,标定不同工况喷嘴雾化状态。

关键词: 二氧化硫; 脱硫; 雾化; 烟气; 熟石灰浆

基金项目: 国家十一五科技支撑计划项目(2006BAA01B04)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Programme of China (2006BAA01B04).

0 引言

循环流化床烟气脱硫工艺按脱硫剂给入方式不同可分为喷粉增湿型和喷浆型。很多学者研究了两种工艺的影响因素,主要包括[Ca]/[S]比,近绝热饱和温度和塔内颗粒浓度、烟气流速、雾化质量等^[1-11]。但是,这些研究多是基于相对宏观上的参数变化,即脱硫塔进出口数据分析得到的,对脱硫塔内SO₂沿程脱除过程,特别是基于试验的研究较少。雾化浆滴的干燥和脱硫过程是研究循环流化床脱硫塔内气、固、液三相传热、传质以及化学反应的基础。笔者搭建了多级喷动^[12-13]热态试验台系统,采用非接触在线测量SO₂浓度装置^[14-16],对多级喷动塔体一级塔内熟石灰浆液雾化脱除SO₂过程进行了试验研究,为进一步机理研究和示范工程提供了依据。

1 试验系统和测量方法

1.1 试验台系统

如图1所示,采用燃烧柴油加入冷空气的方法制备热烟,SO₂由钢瓶供给,纯度99%,钢瓶下部恒温水浴加热。SO₂与烟气在混合室混合后经均流网进入多级喷动试验塔体。塔高3.5m,一级塔体截面190mm×190mm矩形,前后为钢化玻璃便于观察。左右两侧高度方向间距100mm,对称布置φ50mm石英玻璃,便于光谱分析设备沿程测量。每层石英玻璃下部单侧布置φ15mm测温孔。采用如图2所示外混式空气雾化喷嘴。浆液浓度10%,由纯度95%熟石灰粉制得。浆液和压缩空气由转子流量计计量。塔体入口SO₂浓度由一台德图350烟气分析仪监测。入口烟气温度为3只均布热电偶测量的计算均值。

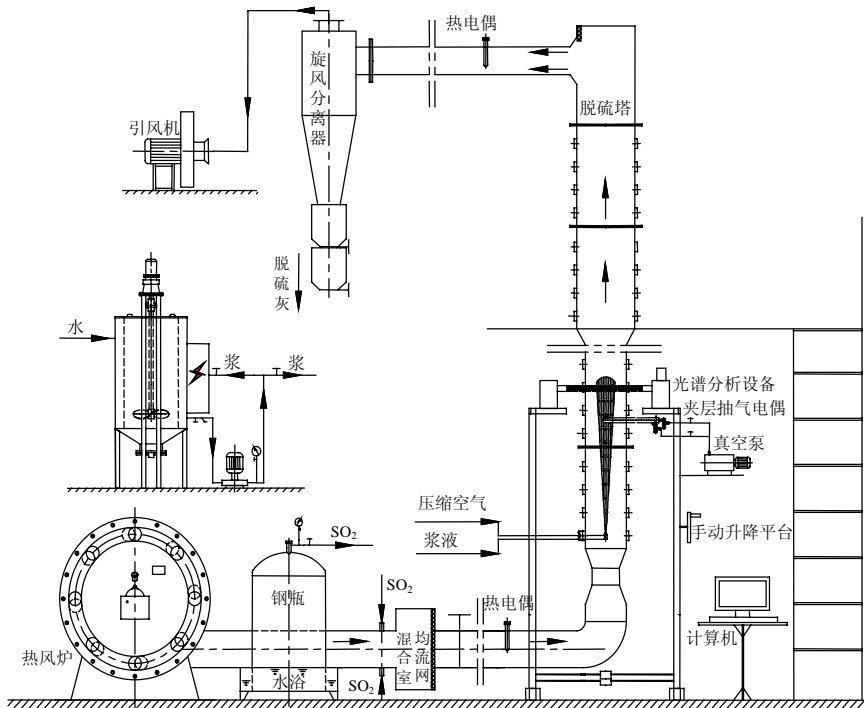


图 1 试验系统
Fig. 1 Test system

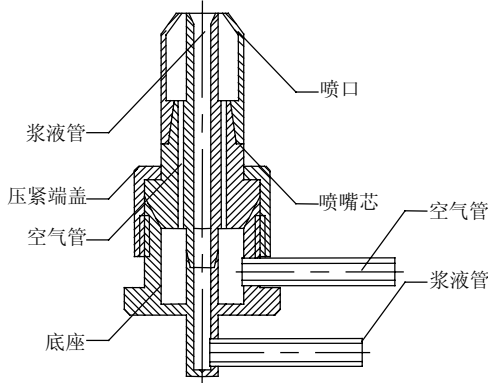


图 2 雾化喷嘴
Fig. 2 Atomizing nozzle

1.2 在线监测测量系统

图 3 为该系统工作原理图。SO₂ 气体对波长在 280~320nm 的紫外光存在特征吸收谱，因此采用氙灯为光源照射测量截面，分辨率为 0.1nm 的 HR2000 摄谱仪接收通过烟气后的光信号，通过对光程内紫

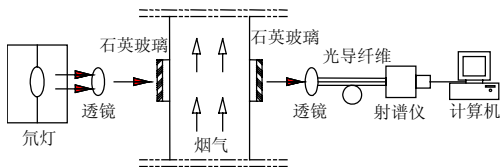


图 3 在线测量系统
Fig. 3 On-line measurement system

外光衰减量的计算并作温度修正，可计算出该截面上的 SO₂ 平均浓度^[14-16]。

1.3 温度测试装置

由于 SO₂ 测量结果需要温度修正，浆液雾化区液滴的存在使得普通接触式测量无法真实反映烟气温度。为此，本文研制了夹层抽气式热电偶，如图 4，在测温点设置 2 个抽气入口，分别与内部夹层套管连接，外层烟气起保温作用。内层烟气管内布置两个热电偶丝测量温度。测温时进气口顺流场方向放置，由于液滴的惯性大，在抽气量较小时仅烟气进入管内，液滴不进入，这样就实现了烟气和液滴混合流场温度的测量。试验中抽气量为 5 m³/h，占烟气总量 1%，其影响可不考虑。

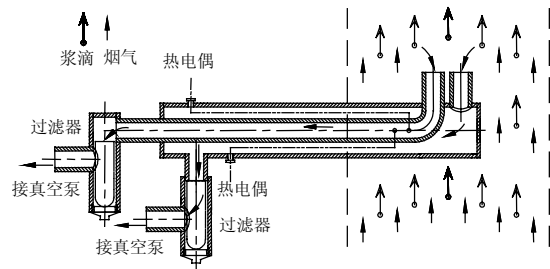


图 4 夹层抽气式热电偶
Fig. 4 Thermojunction of sandwich structure thermocouple with air pump

2 试验结果分析

2.1 试验条件

试验工况参数如表 1。试验中首先测试 3 个不同高度截面径向温度分布, 结果表明试验用喷嘴加工精度满足要求, 温度沿径向基本对称分布, 因此在以下的工况中均测量半径方向的 4 个点温度。为了清楚表述温度场, 图 5~6 中给出了镜像后的数据。

表 1 试验工况
Tab. 1 Test condition

气液质量比	入口烟气温度 $T/^\circ\text{C}$	雾化空气压力 P/MPa	$[\text{Ca}]/[\text{S}]$	烟气量 (m^3/h)	温度测点到壁距离/mm
0.1	180	0.3	1.2	500	10, 40, 70, 95
0.2	180	0.3	1.2	500	10, 40, 70, 95

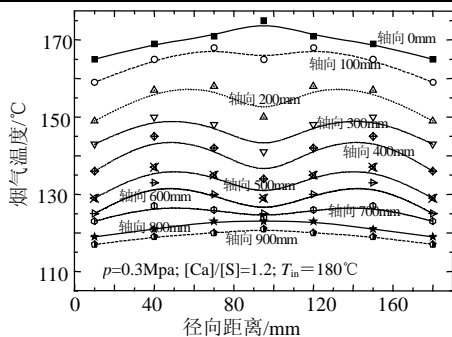


图 5 径向温度场分布

Fig. 5 Radial distribution of temperature field

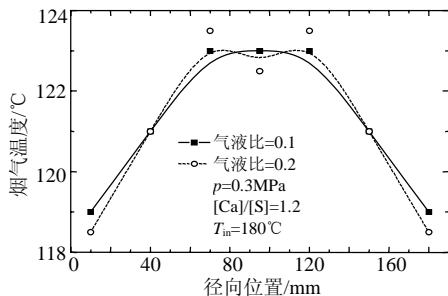


图 6 塔高 800mm 处不同气液比温度分布

Fig. 6 Temperature distribution at 800mm tower height

2.2 温度场分布

图 5 为气液质量比 0.1 时自喷嘴喷口起, 烟气在轴向方向不同位置处径向温度分布图。在喷嘴处未进入浆液雾化区前, 温度分布呈中间高边壁低的趋势, 进入雾化区后则呈现双峰分布。沿塔体的径向, 塔体边壁和中心出现 2 个低温区。边壁低温是塔体壁面向外界散热导致。由于喷嘴形成锥形雾化角, 进入中心的烟气先与锥形雾化区雾滴接触干燥降温, 因而形成雾化区的中心低温区。沿塔体轴向向上, 随着雾化角延伸, 中心低温区沿轴向方向延伸, 呈扩大趋势。当达到一定高度后雾化的浆液蒸发完毕, 塔内径向温度恢复雾化前中间温度高边壁温度低的趋势。

图 6 给出在距离喷嘴 800 mm 处两种气液比条件时塔内烟气温度分布图。由图可见, 随着气液比增加, 雾化高度也增加, 这主要是受空气量加大后雾化刚性加强导致。

图 7 给出沿塔高每隔 100mm 烟气平均温度降低幅度。通过烟气温度降低的幅度可以评价液滴的蒸发强度。两种气液比条件下温度降低幅度分布趋势一致, 沿雾化区域高度方向呈先上升再下降的趋势, 在距离喷口 200mm 处达到最大值。影响浆液干燥的条件有: 雾化细度、烟气温度、气液有效接触情况。试验中出口烟气温度始终保持在 100°C 以上, 因此温度因素暂不考虑。已有研究结果认为受液滴惯性和二次团聚的影响, 双流体喷嘴雾化液滴粒径沿雾化高度增加^[17-18]。但试验中蒸发最快的区域并不是在喷嘴附近, 这主要是因为外混式两相流喷嘴环隙空气的气流刚性大, 在喷嘴口一段距离内会形成内部液滴与烟气间的夹层, 阻碍烟气与液滴的接触^[19]; 另一方面由于在喷嘴附近雾化距离近, 雾化液滴覆盖烟气流通面积较小所致。

喷嘴的雾化特性除了与结构、雾化参数(压力、气液比、负荷、粘度等)有关外还受其工作环境中气体流速影响。已有的试验研究结果认为, 外部气流速度提高, 雾化效果变差, 液滴平均粒径变大, 雾化高度增加^[20]。工程应用的喷嘴雾化特性多是在试验室静态气流中测定的, 而实际运行中受负荷波动影响, 脱硫塔内烟气流速也会变化, 会影响喷嘴的雾化效果, 使其可能偏离设计参数。应用本试验中的方法可在现场根据不同负荷标定喷嘴雾化状态。

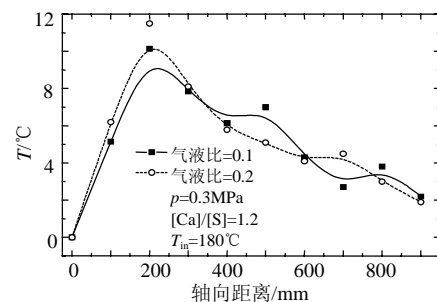


图 7 温度沿塔高降低幅度

Fig. 7 Flue gas temperature descending amplitude along the tower height

2.3 SO_2 脱除过程

图 8 给出了两种气液比下 SO_2 的沿程降低分数, 沿塔轴向方向分布图。可见 SO_2 脱除效率呈先上升再降低的趋势, 与温度降低幅度趋势相同, 而且峰值点也出现在 200mm 处。可以认为试验中干燥最快的区间也是 SO_2 吸收最快的区间。气液比加大后系

统的脱硫效率也有所提高,在其他条件相同的前提下,气液比从 0.1 提高到 0.2,脱硫效率提高 8%。这是因为一方面气液比加大后雾化粒径减小,增加了气液传质有效面积;另一方面雾化高度提高,增加了液滴与烟气接触的时间。当气液比=0.1 时,在 800 mm 高位置浆液蒸发完毕(图 7),SO₂ 浓度在 800 mm 后也没有变化。而当气液比=0.2 时,浆液蒸发(图 7)和 SO₂ 浓度变化都持续到 900 mm 高度。两组数据互相验证了试验的准确性。

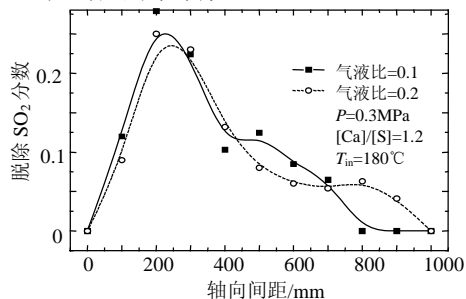


图 8 SO₂ 浓度沿塔高降低分数

Fig. 8 Descending drifts of SO₂ concentration along the tower height

3 结论

(1) 应用在线测量设备研究了提升管内熟石灰浆液雾化脱除 SO₂ 的过程。SO₂ 脱除率呈先升高后降低趋势,存在一个最大脱除区域,试验中在距离喷嘴 200 mm 处。

(2) 研制了夹层式抽气热电偶,该装置适用于测量气液两相流场内气体温度。

(3) 喷嘴雾化区域内温度呈双峰对称分布,蒸发强度先高后低,在距离喷嘴 200 mm 处达到最大值。

(4) 通过测定温度场可以判定浆液蒸发情况,在实际工程中可用该方法标定不同工况喷嘴雾化状态。

参考文献

- [1] 赵旭东, 项光明, 姚强, 等. 干法烟气脱硫固体颗粒物循环特性及微观机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 70-76.
Zhao Xudong; Xiang Guangming; Yao Qiang, et al. Mechanism of dry fgd process and characters of circulating particles[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 70-76(in Chinese).
- [2] 高翔, 刘海蛟, 滕斌, 等. 循环悬浮式烟气半干法脱硫技术的实验研究[J]. 动力工程, 2006, 26(5): 720-725.
Gao Xiang, Liu Haijiao, Teng Bin, et al. Experimental study of semi-dry flue gas desulfurization in circulating suspension fluidized bed [J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(5): 720-725(in Chinese).
- [3] 何大阔, 王福利, 李振中. 循环流化床烟气脱硫效率的研究[J]. 动

力工程, 2005, 25(4): 582-586.

- He Dakuo, Wang Fuli, Li Zhenzhong. Simulation study on desulfurization efficiency of flue gas in circulating fluidized beds [J]. Journal of Power Engineering, 2005, 25(4): 582-586(in Chinese).
- [4] 董勇. 烟气脱硫循环流化床内物料分离循环的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
Dong Yong. Study on separation and circulating of reactive product in CFB-FGD[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004(in Chinese).
- [5] 颜岩, 彭晓峰, 王补宣. 循环流化床内烟气脱硫模拟分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 173-177.
Yan Yan, Peng Xiaofeng, Wang Buxuan. Investigation on flue gas desulfurization in a circulating fluidized bed[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 173-177(in Chinese).
- [6] 马双忱, 赵毅, 华伟. 烟气循环流化床脱硫数学模型及应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 228-232.
Ma Shuangchen, Zhao Yi, Hua Wei. Mathematic model and its application to desulfurization technology by a circulating fluidized bed of flue gas[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 228-232(in Chinese).
- [7] 许佩瑶, 赵毅, 张艳, 等. 快速流态化下烟气循环流化床脱硫数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 54-61.
Xu Peiyao, Zhao Yi, Zhang Yan, et al. Mathematic model to desulfurization of flue gas circulating fluidized bed under fast fluidization[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 54-61(in Chinese).
- [8] 赵旭东, 马春元, 吴少华, 等. 双循环流化床烟气悬浮脱硫技术工业化试验研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4): 489-493.
Zhao Xudong, Ma Chunyuan, Wu Shaohua, et al. Industrialization experimental study on technology of double circulating fluidized bed flue gas suspend desulfurization[J]. ACTA scientiae circumstantiae, 2002, 22(4): 489-493(in Chinese).
- [9] Ma X, Kaneko T. Use of limestone for SO₂ removal from flue gas in the semidry FGD process with a powder-spouted bed[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(20): 4643-4652.
- [10] 刘向军, 徐旭常. 排烟脱硫循环流化床内脱硫过程的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 184-188.
Liu Xiangjun, Xu Xuchang. Numerical simulation of flue gas desulphurization process in a circulating fluidized bed[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 184-188(in Chinese).
- [11] Tsuchiai H, Ishizuka T, Nakamuya H, et al. Study of flue gas desulfurization absorbent prepared from coal fly ash[J]. Ind. Eng. Chem. Res. 1996, 35(7): 2322-2326.
- [12] 秦裕琨, 吴少华, 高继慧, 等. 内循环多级喷动流态化烟气脱硫塔. 中国, 200520021113. 6. [P]. 2005-7-19.
Qin Yukun, Wu Shaohua, Gao Jihui, et al. Internally circulating and multistage spouted fluidization desulfurization tower, China, 200520021113. 6. [P]. 2005-7-19(in Chinese).
- [13] 高建民, 秦裕琨, 李广生, 等. 内循环多级喷动脱硫塔内浓度[J]. 化工学报, 2006, 57(10): 2297-2302.
Gao Jianmin, Qin Yukun, Li Guang-shen, et al. Particle concentration in internally circulating and multistage spouted desulfurization

- tower[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(10): 2297-2302(in Chinese).
- [14] Xu F, Lv Z, Zhang Y G, et al. Concentration evaluation method using broadband absorption spectroscopy for sulfur dioxide monitoring[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88: 231109-1-3.
- [15] 王华山. 双色光谱法在线测量SO₂浓度的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- Wang Huashan. Monitor the SO₂ concentration on line based on the dual-spectrum law[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005 (in Chinese).
- [16] 高建民. 内循环多级喷动流态化烟气脱硫技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- Gao Jianmin. Study on internally circulating and multistage spouting fluidized desulfurization technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007(in Chinese).
- [17] 张力, 李午申, 蒲舸. 烟气净化双流体喷嘴雾化特性实验[J]. 环境工程, 2006, 24(2): 40-43.
- Zhang Li, Li Wushen, Pu Ge. An experimental study on spray performances of twin fluid nozzle for flue-gas decontamination [J]. Environmental Engineering, 2006, 24(2): 40-43(in Chinese).
- [18] 王乃华, 高翔, 骆仲决, 等. 石灰浆液雾化喷嘴及其特性研究[J]. 热能动力工程, 2001, 16(93): 247-249.
- Wang Naihua, Gao Xiang, Luo Zhongyang, et al. The study of a lime slurry atomization nozzle and its characteristic[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2001, 16(93): 247-249(in Chinese).
- [19] 金国森. 干燥设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [20] 徐祥开. PDA 技术及其在双流体喷嘴雾化的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.
- Xu Xiangkai. PDA technology and its application on spray of twin-fluid atomizer measurement[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2003(in Chinese).

收稿日期: 2007-07-14.

作者简介:

高继慧(1971—), 男, 吉林省九台人, 副教授, 主要从事烟气污染控制研究, gaojh@hit.edu.cn.

(编辑 王庆霞)