

## 工艺与设备

# 复合喷动烟气净化工艺气液 主反应区段蒸发特性研究

高继慧, 龚泽儒, 陈国庆, 刘加勋, 赵海兵

(哈尔滨工业大学燃烧工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**针对一种新型半干法复合喷动烟气净化工艺,提出了使用截面温度标准差判定蒸发过程的分析方法,利用双回路抽气式温度、湿度测量装置和可测量径向截面温度分布的网状测量装置对该工艺的气液主反应区段进行了蒸发特性研究。详细研究了分析方法、雾化气液比、烟气温度、烟气速度对蒸发特性的影响。研究表明,烟气温度对蒸发特性有显著影响,由 120℃ 上升至 180℃ 可使气液主反应区缩短 34%;雾化气液比由 0.1 上升到 0.3 可使气液主反应区缩短 23.5% 以上;烟气速度对气液主反应影响较小,但较低烟气速度有利于离子吸收反应的进行。

**关键词:**喷雾干燥;气液反应;标准差;烟气净化;试验研究

中图分类号:X701.3

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2008)12-0062-05

## Study on evaporation characteristics of flue gas purification technology with multi-spouted bed in gas-liquid main reaction zone

GAO Ji-hui, GONG Ze-ru, CHEN Guo-qing, LIU Jia-xun, ZHAO Hai-bing

(Institute of Combustion Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The analysis method using the section temperature deviation to judge droplet evaporation is adopted in this paper. For the purpose of studying and analyzing evaporation characteristics, temperature of the gas-liquid main region is measured with the temperature and humidity measurement device with double gas-pumping channel and section temperature netty measurement device. The effects of analytic means, gas-liquid ratio, flue gas temperature and velocity on evaporation characteristics is studied in detail. The results indicate that flue gas temperature has a great impact on the evaporation characteristics. When flue gas temperature varies from 120℃ to 180℃, the main gas-liquid reaction region is cut by 34%. When gas-liquid ratio ascends from 0.1 to 0.3, the main gas-liquid reaction region is cut by at least 23.5%. Changes of fuel gas velocity barely affect the main reaction region. Low velocity is advantageous to ion absorbing reaction.

**Key words:** spray drying; gas-liquid reaction; standard deviation; gas purification; experimental investigate

复合喷动流态化烟气净化工艺是以烟气循环流化床脱硫工艺为基础发展起来的新型烟气净化工艺,该技术着眼于实现多种烟气污染物在低温段的联合脱除和一体化脱除。将气液反应、气固反应、化学吸收、物理吸附等脱除过程通过多级喷动塔体实现有机复合,同时在塔体内实现高速喷动稀相区和低速喷动密相区的复合,从而提高吸收塔的空间利用率和烟气污染物净化效率。文献[1-3]表明,液态水的存在是 SO<sub>2</sub> 吸收及脱除过程的关键控制步骤。包括一级反应塔和二级反应塔入口段的气液主反应区段 SO<sub>2</sub> 的脱除份额占整个系统的 60% 以上,而在该区段内,浆液滴的分布形态、反应塔的蒸发干

燥特性是影响该区段脱硫性能的主要因素。因此,深入研究气液主反应区段的液相分布及蒸发特性对该工艺的优化具有重要价值。

以往关于吸收塔内蒸发干燥特性的研究多是基于单点测量进行的,通过测量径向截面中心处温度的沿塔高分布,据此推算出浆液滴的干燥时间及距离<sup>[3-10]</sup>。实际测量时,由于脱硫塔内存在气、固、液三强的强烈混合,喷嘴雾化液滴在反应塔内呈现非稳态不均匀分布,导致同一截面不同位置的温度分布亦不均匀,所以使用中心处温度表征截面温度分析塔内蒸发干燥特性存在较大的误差。为此,笔者搭建了复合喷动流态化烟气净化工艺热态试验系

收稿日期:2008-08-11

基金项目:国家“十一五”重点科技支撑计划项目(2006BAA01B04);国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA05Z307)

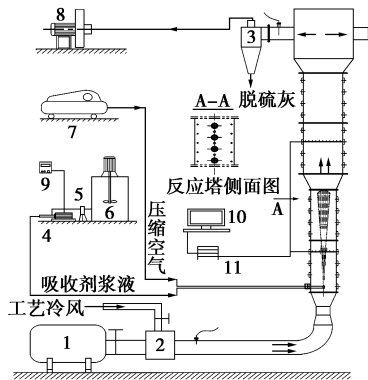
作者简介:高继慧(1971-),男,博士生,副教授,主要从事燃煤烟气污染物控制研究,gaohj@hit.edu.cn。

统,使用自行设计的网状温度场测量装置测量了沿塔高径向截面的温度场分布,提出以径向截面温度分布标准差表征液滴蒸发干燥特性的分析方法,并进一步分析了不同入口参数对液滴蒸发特性的影响。

## 1 试验系统及分析方法

### 1.1 试验系统

复合喷动流态化烟气净化试验系统主要由模拟烟气发生系统、吸收剂制备和供给系统、污染物吸收系统、除尘引风系统和测量控制系统5部分组成,具体如图1所示。



1—热风炉;2—混气室;3—旋风分离器;4—浆液泵;5—过滤器;  
6—制浆罐;7—空气压缩机;8—引风机;9—变频控制柜;  
10—计算机;11—巡检仪

图1 复合喷动流态化烟气净化试验系统图

模拟烟气由1台燃油热风炉制备,该热风炉可将 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ 的空气由 $20\ ^\circ\text{C}$ 加热到 $200\ ^\circ\text{C}$ 。为了实现烟气量及其温度的可控调节,设置了旁路烟道。燃烧加热后形成的高温烟气首先进入气体混合室,与工艺冷风混合,调整至试验所需温度,形成模拟烟气。烟气量和烟气温度可以分别通过旁路调节阀和燃油量来控制调节。在本文试验中,一级塔体截面为方形,边长 $200\ \text{mm}$ ,表观气速控制在 $7\sim 8\ \text{m/s}$ ;二级塔体截面为方形,边长为 $350\ \text{mm}$ ,表观气速控制在 $2\sim 3\ \text{m/s}$ ;根据试验需要,反应塔由高度为 $550\ \text{mm}$ 的单元段堆叠连接而成,塔体高度可调。每个单元段左右两侧为螺栓连接可拆卸金属盖板,盖板沿塔高均布5个孔径 $8\ \text{mm}$ 的螺纹孔和直径 $50\ \text{mm}$ 的即开式端盖。单元段前后两侧面采用耐高温钢化玻璃密封,便于观察塔内流动及雾化情况。雾化喷嘴为SiC材料的双流体喷嘴。

在实验中,雾化介质为压缩空气,质量分数为10%左右的熟石灰浆液经螺杆泵输送至喷雾干燥塔

底部的双流体雾化喷嘴,在高速压缩气流作用下雾化为细小液滴。压缩空气由空压机提供,其额定工作压力为 $0.7\ \text{MPa}$ 。试验所需热烟气经反应塔下部文丘里管进入反应塔,与液滴群接触混合的同时完成气液两相间的传质和传热过程。增湿减温后的烟气由引风机排入烟囱。

### 1.2 试验测量及分析方法

采用如图2所示的测量装置对脱硫塔内温度场进行测量,整个测量装置由不锈钢边框、网线及热电偶3部分组成。为了减少浆液挂网结垢,降低装置对塔内流场的影响,本文采用的布网铁丝直径为 $0.8\ \text{mm}$ ,网间距为 $40\ \text{mm}$ ;热电偶采用TT-K-36-SLE型热电偶,偶丝直径为 $0.2\ \text{mm}$ 。为适应一、二级塔体的截面尺寸,笔者各设计1个网状测量装置,其中用于一级塔体的测量装置设25个测量点,二级塔体的测量装置设33个测量点。

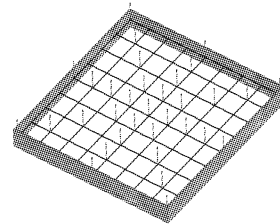
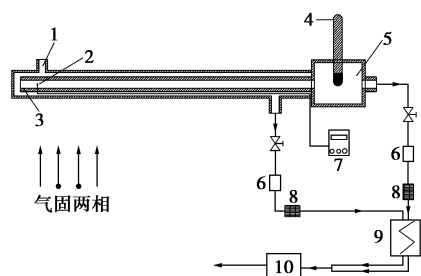


图2 径向截面的温度测量装置示意图

温度采集使用基于MGCS开发的温度数据采集系统,可实现对多达64点位的温度实时在线测量。测量时,使用螺栓将装置固定在预测截面处,根据工况需要可实现网状测量装置在吸收塔高度方向的调节。为防止测量时浆液在网线及热电偶上干燥结垢,试验过程中装置要定期用水冲洗。

为准确测量烟气的干球温度,进行标准差对比分析,笔者设计了一种双回路抽气式温、湿度测量装置(见图3),主要由测温元件、保温系统和辅助系统3部分组成。测温元件采用铜-康铜热电偶,将热电偶固定在内层管内;测量段主体由 $\Phi 8\ \text{mm}$ 内管和 $\Phi 16\ \text{mm}$ 外管组成,在外管距端部 $40\ \text{mm}$ 处开有进气口;辅助系统包括流量测量装置、过滤装置及抽气装置。测量时,在真空泵的作用下,烟气从外管入口进入测量装置,然后分为2路,一路在外管内流动,主要起到保温隔热作用,另一路烟气经 $180^\circ$ 折转后进入内管,通过惯性作用将烟气中的少量固液颗粒分离出去,进入内管的烟气与热电偶接触,从而测得烟气干球温度。内层管道的气流进入湿度测量室,用Testo635温、湿度仪测量烟气的相对湿度及测量

室中烟气温度,然后根据测点的烟气温度换算得到烟气的相对湿度。



1—入口测量点;2—热电偶;3—内层管入口;4—Testo 温度、湿度仪;  
5—测量室;6—流量计;7—数据采集系统;8—过滤器;9—冷凝器;  
10—真空泵

图 3 双回路抽气式温湿度测量装置示意图

通过正常运行时截面温度标准差与空塔运行时截面温度标准差的比较,判断液滴的蒸发干燥特性。所谓截面温度标准差就是在脱硫塔稳定运行的某一时间间隔内,采用网状测温装置所测量的所有数据的标准差<sup>[11]</sup>。由标准差定义可知,该值能够反应该截面装置所测温度分布集的离散程度,可用于评估截面上温度变化和波动的程度。实验测量时,使用温度自动采集系统实时采集数据,选取脱硫系统运行稳定工况下所采集的 6 组数据的标准差作为该截面的标准差。其中,一级塔体径向截面标准差由 150 个数据点求得,二级塔体径向截面标准差由 198 个数据点求得。图 4 分别给出了标准差为 39.00℃ (蒸发区)和 4.86℃ (蒸干区)所对应的温度场分布图。

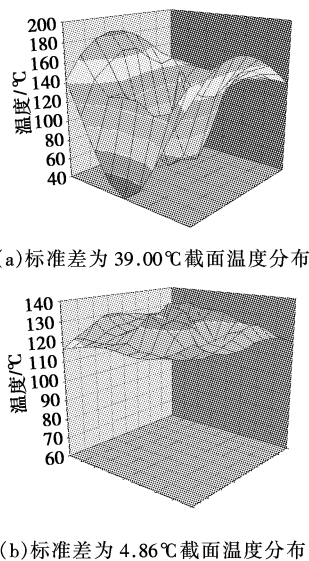


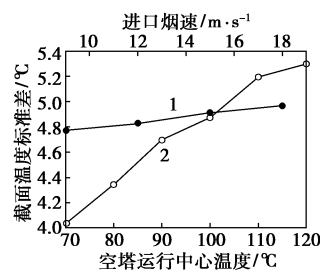
图 4 标准差为 39.00℃ 和 4.86℃ 截面温度场分布

## 2 试验结果分析

### 2.1 反应塔内蒸发特性判断标准

在烟气净化反应塔运行过程中,塔内液滴的蒸发和塔体壁面散热是导致径向截面温度分布不均匀的主要因素<sup>[12]</sup>。为了能够更加准确地研究液滴蒸发对脱硫塔径向截面温度分布的影响,明确液滴蒸发完毕的判断比照标准,首先研究了空塔运行时,由于塔体壁面散热等系统因素导致的不同工况条件下的标准差基准,并以此作为反应塔内液滴蒸发完毕与否的判断依据。除反应塔散热、形状结构等系统因素外,影响空塔截面温度分布均匀性的主要因素为脱硫塔入口烟气流速和温度。为此,笔者主要研究了二者对截面温度分布均匀性的影响。

图 5 给出了不同工况下,空塔运行条件下某一截面温度标准差的分布情况。



1—不同速度条件下;2—不同入口烟气温度条件下

图 5 空塔运行条件下某一截面温度标准差的分布

可依据图 5 数据判断工况液滴是否蒸发完毕。当截面中心温度由 70℃ 上升到 120℃ 时,标准差增加 1.3℃,其变化率约为 0.026;当烟速从 9 m/s 提高到 18 m/s 时,标准差从 4.82℃ 上升到 5.00℃,增加幅度为 0.18℃。由此可见,较烟气温度变化,烟气速度对空塔截面温度分布的影响较小。蒸发过程进行时,温度分布不均主要是由塔内液滴蒸发导致的。当塔内液滴蒸发过程完成时,其截面温度标准差与等中心温度(烟气干球温度)的空塔截面温度标准差应近似相等;当前者等于或小于后者时,可判定该截面液滴蒸发完毕;当前者大于后者时,表示该区域为气液主反应区,蒸发过程在继续。且标准差越大,表明其截面温度分布越不均匀,若结合湿球温度分布特征,还可得到液相存在形态、蒸发强度等更详细的信息。

### 2.2 雾化气液比对塔内蒸发特性及反应环境的影响

图 6 为不同雾化气液比时各径向截面温度标准差的沿程分布。

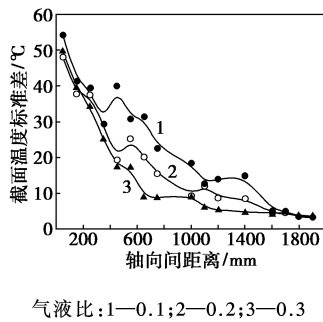


图6 气液比对蒸发特性影响

由图6可见,随着塔体高度增加,标准差总体呈下降趋势,在距离喷嘴500 mm和1 100 mm区段处,标准差出现局部上升趋势。分析认为,500~600 mm为一级塔体的喷动回流区,1 200~1 400 mm为二级塔体入口段,由于受到塔体结构和流场特征影响,该区段气液混合充分,传热传质过程得到强化,液滴蒸发加速,从而使该区段可能出现局部标准差增大的现象。另外,从图6中还可以看出,随着气液比增加,反应塔主蒸发段的标准差相对减小,温度分布均匀性相对增强。分析认为,随着雾化气液比增加,可产生2方面的效果:其一,高速雾化介质射流强化了气液混合效果,并使液滴分布更加趋于均匀;其二,雾化气液比的增加使液滴直径减小,从而导致液相有效传质表面积增加,强化了液滴蒸发过程。各对比工况下反应塔出口烟气温度基本控制在103℃,与之对应的空塔标准差为4.9℃。由图6可知,气液比为0.1、0.2、0.3所对应的蒸发距离分别为1 700、1 600 mm和1 300 mm,随着气液比的增加,气液主反应区域缩短23.5%。综上可知,雾化喷嘴气液比对蒸发特性及液相存在区间有明显影响,气液比过大会导致气液主反应区缩短,不利于液相吸收反应的进行。

2.3 入口烟气温度对蒸发特性及反应环境的影响

图7为不同入口烟气温度条件下各个径向截面温度标准差的沿程分布,在低于400 mm区段,入口烟气温度越高,其标准差越大,而在400 mm区段以后,则呈现相反趋势。分析认为,入口烟气温度越高,气液两相温度差越大,其传热传质过程得以增强,在较短的区段内液滴蒸发过程就已基本完成,而后,温度分布趋于均匀,故标准差降低。根据本文提出的蒸发距离判断标准可知,4种入口烟速下蒸发距离分别为1 400、1 325、1 155、925 mm,烟气温度变化对反应塔内液滴蒸发距离有显著影响。由于入口烟气温度升高,可以明显缩短反应塔中液相的存在

区域,由120℃上升至180℃可使气液主反应区缩短34%,从而使相应区段的反应环境恶化,不利于液相吸收反应的进行。

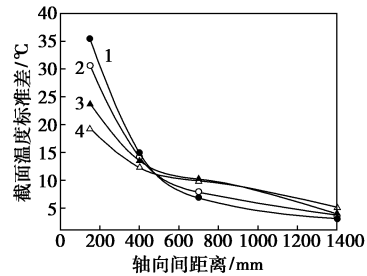
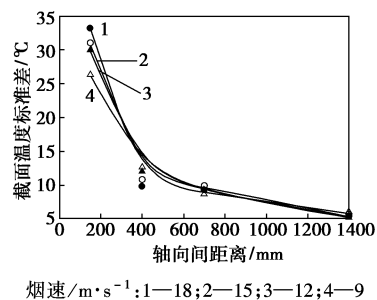


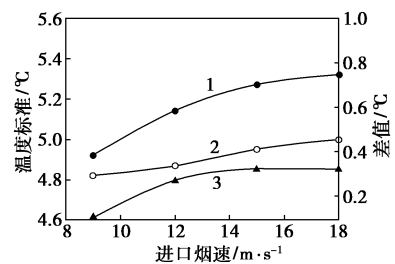
图7 烟气温度对蒸发特性的影响

2.4 入口烟气速度对蒸发特性及反应环境的影响

研究烟气速度变化对蒸发特性的影响对于工程实际具有重要价值,锅炉负荷变化可直接导致烟气速度的波动,其影响主要有2方面,一是引起反应塔内流化状态的改变,二是使反应塔单位容积的热容量发生改变。图8为不同入口烟速条件下径向截面温度标准差分布图。



(a)



(b)

1—1 400 mm处截面温度标准差;2—判断标准;3—差值

图8 入口烟气速度对蒸发特性影响

由图8(a)可见,4种烟速下脱硫塔内液滴的蒸发过程基本相同,烟速变化导致的脱硫塔径向截面温度标准差差异较小。分析认为,虽然反应塔内烟气流速升高,其单位容积内的热容量增加,使液滴蒸发速率升高,蒸发时间缩短,但是由于烟气流速与液滴射出速度的正向叠加,液滴的速度衰减变慢,使其

单位时间内的飞行距离增长,而正反两方面的影响程度相近,所以表现体现为烟气速度对蒸发所需空间距离影响不大。图 8(b)为 4 种烟速下距喷嘴出口 1 400 mm 处烟气温度的标准差分布及其判别标准,由图 8(b)可见,在 1 400 mm 处塔内液滴已基本接近蒸发完毕,且随着入口烟速降低,液滴接近蒸干的趋势较明显。可以认为,烟气速度变化对液滴速度衰减的影响比对蒸发速率的影响略为显著。

综上分析,烟气净化系统负荷变化对液滴干燥的空间分布以及气液反应区段无明显影响,但从烟气净化工艺的整体设计考虑,可适当降低塔内烟气流速。当烟速降低时,在气液主反应区,液相水存在区域无明显变化,但烟气经过该区域的时间却有效增加,可使烟气中  $\text{SO}_2$  与吸收剂之间的离子反应过程更充分。

### 3 结论

本文采用双回路抽气式温度、湿度测量装置和可以测量径向截面温度分布的网状测量装置在复合喷动烟气净化试验平台上对气液主反应区的蒸发特性进行了研究。提出了使用截面温度标准差判定蒸发特性的分析方法,并采用该方法分析了主要工艺参数对反应塔蒸发特性的影响,得出如下结论:

(1)提出了使用截面温度场标准差表征塔内液滴蒸发干燥特性的分析方法。由于壁面散热以及流场扰动等系统因素对径向截面温度不均匀性影响较小。温度分布不均匀主要是由塔内液滴蒸发导致的。因此,可通过对径向截面温度标准差及与空塔运行时径向截面温度标准差的比较,判断液滴的蒸发干燥特性。

(2)雾化喷嘴气液比对蒸发特性及液相存在区间有明显影响,雾化气液质量比由 0.1 上升到 0.3,可使气液主反应区缩短 20% 以上。在喷动回流区以及二级塔体入口段存在明显的温度、湿度分布不均匀现象。

(3)烟气温度变化对反应塔内液滴蒸发距离有显著影响。烟气温度由  $120^\circ\text{C}$  上升至  $180^\circ\text{C}$ ,可使气液主反应区缩短 34%,从而使相应区段的反应环境恶化,不利于液相吸收反应进行。

(4)烟气速度变化对反应塔内液滴蒸发距离影响较小。相比较而言,烟气速度变化对液滴速度衰减的影响比对蒸发速率的影响略为显著。实际工艺设计中,可适当降低塔内烟气流速,在气液主反应区无明显变化时,气液有效接触时间增加,使离子吸收反应过程得以充分进行。

### 符号说明

$T_{\text{in}}$ —脱硫塔入口烟气温度/ $^\circ\text{C}$

$P$ —喷嘴雾化压力/ $\text{Pa}$

$M_w$ —喷嘴雾化水量/ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$

$V_{\text{in}}$ —脱硫塔入口烟气速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

### 参考文献

- [1] 高建民,秦裕琨,李广生.内循环多级喷动塔内颗粒浓度[J].化工学报,2006,57(10):2297-2302.
- [2] 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,2006.
- [3] 高继慧,高继录,陈晓利,等.复合喷动烟气净化工艺固主反应区段脱硫特性[J].化工学报,2008,59(2):461-466.
- [4] 钟秦.燃煤烟气脱硫脱硝技术及工程实例[M].北京:化学工业出版社,2002:25-30.
- [5] 吴中标,谭天恩.石灰石浆液脱硫-干燥关系的模拟研究[J].高校化学工程学报,1993,7(2):136-143.
- [6] 谭忠超,项光明,陈昌和,等.循环流化床排烟脱硫系统中浆液的蒸发[J].清华大学学报:自然科学版,2000,40(4):62-65.
- [7] 高继慧,王帅,高建民,等.提升管内熟石灰浆液雾化脱除烟气中  $\text{SO}_2$  过程的研究[J].中国电机工程学报,2007,27(29):40-44.
- [8] Li Yuzhong, Tong Huiling, Ma Chunyuan. 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: 2255-2257.
- [9] Makkinejad N. Temperature profile in countercurrent/co-current spray tower[J]. Int J Heat Mass Tran, 2001, 44(2):429-442.
- [10] Kock F, Kockel T K, Tuckwell P A, et al. Design, numerical simulation and experimental testing of a modified probe for measuring temperatures and humidities in two-phase flow [J]. Chemical Engineering Journal, 2000, 76:49-60.
- [11] 盛骤.谢千式.概率论与数理统计[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [12] Spyridon E, Papadakis C, Judson King. Air temperature and humidity profiles in spray drying: Experimental measurements [J]. Ind Eng Chem Res, 1988, 27:2116-2122. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志,邮发代号 82—67。