

管道喷射烟气脱硫的试验研究

黄震¹, 卢平², 冯斌¹, 李大骥¹

(1. 东南大学 洁净煤燃烧与发电技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 南京师范大学 动力工程学院, 江苏 南京 210042)

摘要: 系统地研究了钙硫化、趋近饱和温度和 SO_2 入口浓度、喷嘴雾化风量、分层喷浆及加压消化等因素对烟气脱硫效果的影响, 结果表明: 增大钙硫比, 降低 ΔT , 采用分层喷水及加压消化等有利于提高脱硫率; 在 Ca/S 比为2.5的情况下, 加压消化喷浆脱硫的脱硫效率可达65%以上。

关键词: 烟气脱硫; 管道喷射; 脱硫效率; 钙硫化

中图分类号: X701.3

文献标识码: A

1 引言

在我国, 中小燃煤锅炉是排放二氧化硫的主要来源, 因此, 有必要开发一种适合我国国情的高效、低成本、实用的烟气脱硫技术。管道喷射石灰(石)浆液脱硫方法是利用锅炉与除尘器之间的烟道作为反应器进行脱硫, 不需要另外加吸收容器, 因而其工艺投资大大降低, 操作简单, 需要场地小, 完全适合在中国开发应用。管道喷射工艺在国外已应用于示范工程^[2-3], 但在国内的研究比较少。西安建筑科技大学、清华大学等在小型实验台上开展了一些研究^[4-5]。研究表明, 管道喷射的脱硫率虽低于湿法脱硫技术但仍可达到70%。

本文通过对东南大学热能研究所的循环流化床烟气脱硫装置的适当改造, 利用流化床本体为模拟电厂烟道进行脱硫实验, 研究了在烟道喷浆情况下的脱硫性能, 分析了各因素对脱硫性能的影响及规律, 并旨在为中小锅炉的烟气治理提供一种切实可行的方法。

2 试验装置与方法

2.1 试验装置

管道喷射烟气脱硫试验装置如图1所示。整个试验装置由烟气发生系统、脱硫烟道、雾化喷射系统、除尘系统以及测量系统组成。试验采用的模拟

烟气由一台燃油炉提供, 燃料为柴油。脱硫烟道筒体直径为 $\Phi 600$ mm, 有效反应总高度为15 m。

实验时, 燃烧室产生的高温烟气经混入空气调节至 $150 \sim 160$ $^{\circ}\text{C}$, 按 15 g/m^3 的浓度混入粉煤灰, 由 SO_2 钢瓶按实验所需的浓度向烟气中混入纯 SO_2 气体。带尘烟气经过脱硫烟道后进入旋风除尘器, 再经布袋除尘器过滤后, 由引风机排出。石灰浆液由泵升压, 通过管路经喷嘴雾化后喷入烟道。

烟道的温度分布由沿烟道高度方向布置的热电偶测量。 SO_2 浓度采用德国罗斯蒙特公司(Rosemount)生产的BINOS1004多组分烟气分析仪测定。进入脱硫系统的各路气体流量分别采用孔板流量计和转子流量计测得。试验风量可调, 当风量为 $2000 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 烟气在烟道中的停留时间为6 s左右。

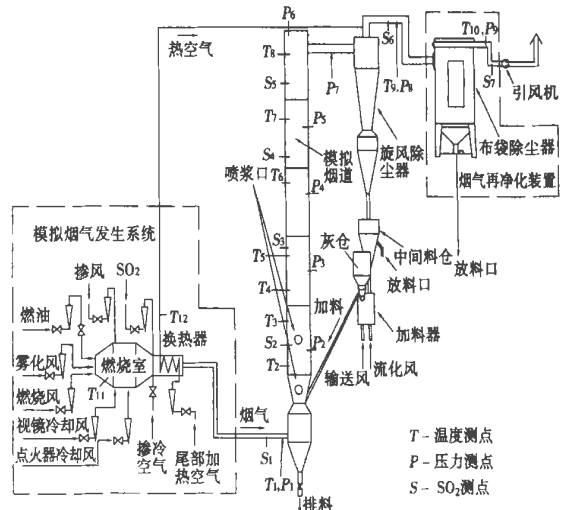


图1 试验装置系统图

试验所需生石灰由南京梅山冶金公司提供, 其成分和粒度分析数据见表1和表2。由于在工业生石灰的加工过程中, 生石灰中可能含有未热解的 CaCO_3 和少量水合形成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 用100 g石灰加

收稿日期: 2002-06-25

作者简介: 黄震(1967-), 男, 江苏张家港人, 东南大学工程师, 博士后。

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

入到盛有 500 g 水的保温容器内, 测量温度升高, 3 min 内温度升高为 39 °C, 可见该石灰的活性一般。脱硫剂采用常压和加压两种方式消化, 消化好的石灰与一定比例的水在化浆池内充分搅拌, 采用泵送方法经喷嘴雾化后喷入烟道中。

表 1 生石灰成分分析

成分	CaO	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	其余
含量/%	85.85	0.45	1.54	1.05	11.11

表 2 生石灰粒径分布

粒径/ μm	<3	3~6	6~13	13~18	18~25	25~30	30~34	34~74	>74
百分比/%	17.0	1.2	1.3	2.4	1.6	0.8	1.5	3.8	70.4

2.2 试验数据处理方法

2.2.1 反应温度 T_{act}

脱硫反应温度取烟道中的平均反应温度。竖直烟道中沿高度方向共设置了 7 个温度测点, 平均反应温度取这 7 个测点温度的平均值, 即:

$$T_{\text{act}} = (T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8) / 7 \quad (1)$$

2.2.2 烟气量 Q

$$Q = Q_1 + Q_2 - Q_3 \quad (2)$$

其中: $Q_1 = \frac{95.8}{60 \times 1.29} \times \sqrt{\frac{254(P_a + 10)}{273 + t}} \Delta t$, m^3/min ;

P_a 为罗茨风机气源母管表压, MPa; t 为室温, °C; Δt 为板前后压差, Pa; Q_2 为掺冷风; Q_3 为加热布袋除尘器所需风量。

2.2.3 钙硫比 Ca/S

$$\text{Ca/S} = \frac{\text{脱硫剂中 Ca 的摩尔数}}{\text{烟气入口 SO}_2 \text{ 的摩尔数}} \quad (3)$$

2.2.4 脱硫效率 η

脱硫效率的高低表示脱硫系统脱硫能力的大小, 其计算公式为:

$$\eta = 1 - \frac{Q_{\text{out}} \times Q_{\text{out}}}{Q_{\text{in}} \times Q_{\text{in}}} \quad (4)$$

式中: Q_{in} 和 Q_{out} 分别为系统进出口处的 SO_2 浓度, mg/m^3 ; Q_{in} 和 Q_{out} 分别是系统进出口烟气量, m^3/h 。

3 试验结果与讨论

3.1 Ca/S 对脱硫效率的影响

钙硫比是影响脱硫效率的主要因素。由图 2 可以看出, 系统的脱硫效率随 Ca/S 比的增加而增加, 从理论上讲, 当 Ca/S 比小于 1 时, 提供的脱硫剂不能

满足吸收烟气中 SO_2 的需要, 这时脱硫效率完全由脱硫剂的量决定; 而当加入的脱硫剂过量时, 即钙硫比大于 1 时, 脱硫效率增加量逐渐减小, 脱硫剂的利用率也下降; 而当 Ca/S 大于 2.0 时, 增加幅度迅速下降。

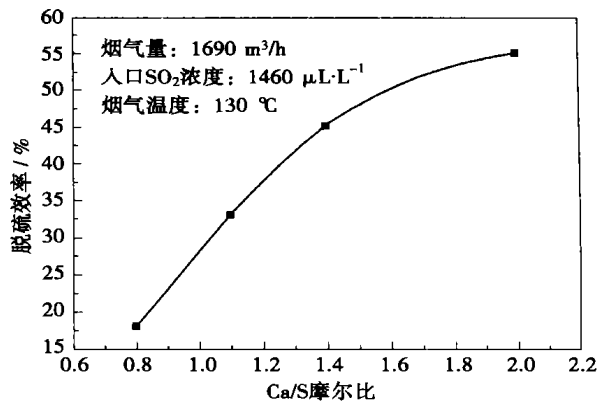
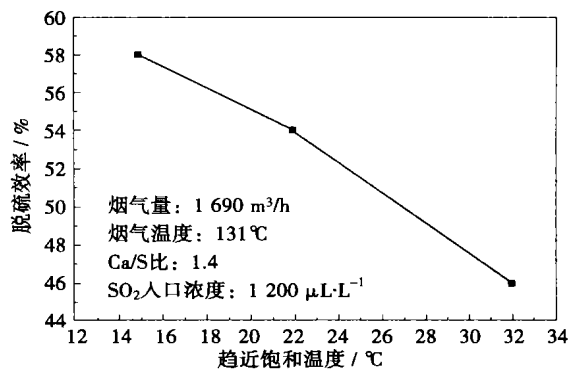


图 2 钙硫比对脱硫效率的影响

图 3 趋近饱和温度 ΔT 对脱硫效率的影响

3.2 趋近饱和温度对脱硫效率的影响

在管道喷射脱硫中, 趋近饱和温度 ΔT 也是影响脱硫效率的重要因素。趋近饱和温度是指系统烟气反应温度与绝热饱和温度的差值 ($\Delta T = \Delta T_{\text{act}} - T_{\text{烟气露点}}$)。经查表计算, 本实验中烟气的绝热饱和温度约为 50 °C。因而, ΔT 大小直接决定了反应区温度的高低, 烟气温度不仅决定着反应速率, 而且对吸收塔内液滴的蒸发速度及烟气在塔内的有效滞留时间都会发生影响。图 3 给出了 ΔT 与脱硫效率的关系。由图可知, 脱硫效率随着 ΔT 的增加而减小。从提高脱硫效率的角度出发, ΔT 应该越小越好, 此时液滴蒸发慢, 气-液-固三相共存时间延长, SO_2 与脱硫剂反应时间增加, 脱硫效率提高。因此, 降低趋近饱和温度可以提高脱硫效率而不影响运行费用, 但是,

趋近饱和和温度过低时,将会引起管壁积垢,这一点在实际运行时应引起重视。

3.3 SO₂ 入口浓度的影响

图4给出了烟气入口SO₂浓度对脱硫效率的影响。由图可知,随着SO₂入口浓度的减小,脱硫效率呈增加的趋势,但在试验浓度范围内增幅较小。SO₂浓度增加,使得SO₂与脱硫剂反应时的液膜传质阻力增大,引起总传质阻力的增加。因此尽管SO₂浓度增加,提高了烟气中SO₂气体分压力,SO₂传质推动力也随之增加,但吸收速率增加的幅度必然要小于浓度值的增长比例。因此,脱硫效率变化与SO₂浓度变化趋势是相反的。

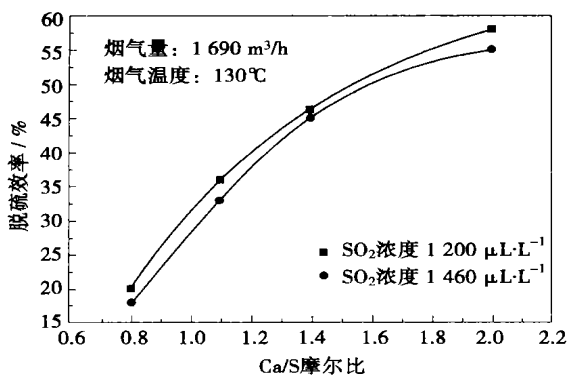


图4 SO₂ 入口浓度对脱硫效率的影响

3.4 喷嘴雾化风量对脱硫效率的影响

图5是改变喷嘴雾化风量的大小对烟气脱硫的影响情况。由图可以看出,当雾化风为18m³/h时,其脱硫效率要高于雾化风为12m³/h时的脱硫效率。这主要是由于雾化风为18m³/h时,喷嘴雾化浆滴更细小、更均匀,增加了雾化浆滴与SO₂的反应接触面积,从而有利于脱硫反应的进行。

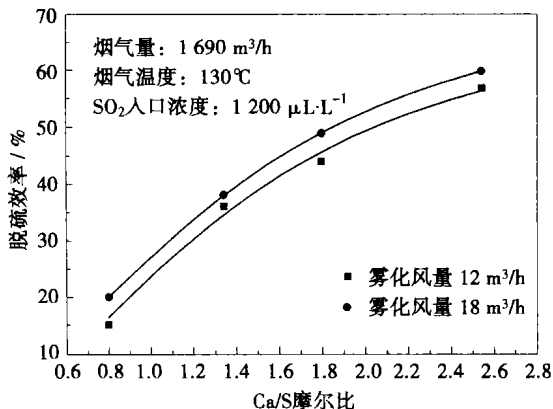


图5 喷嘴雾化风量对脱硫效率的影响

3.5 分层喷浆对脱硫效率的影响

本试验利用脱硫系统中安置的两层喷嘴,研究了分层喷浆对烟气脱硫效率的影响情况。其中第一层喷嘴安放在文丘里管的扩散段中,第二层喷嘴安放在距第一层喷嘴2300mm处的竖直烟道中。图6为第一层喷浆与第二层喷浆脱硫效率的对比。由图可以看出,第二层喷浆比第一层脱硫效果要低,这一方面是由于第二层喷浆的浆液在烟道中的停留时间比第一层短,使得烟气中SO₂与脱硫剂的反应时间减少;另一方面,第一层喷嘴布置在文丘里的扩散段,这里的气流强烈扰动使得雾化浆滴分布更为均匀,有利于脱硫反应的进行。

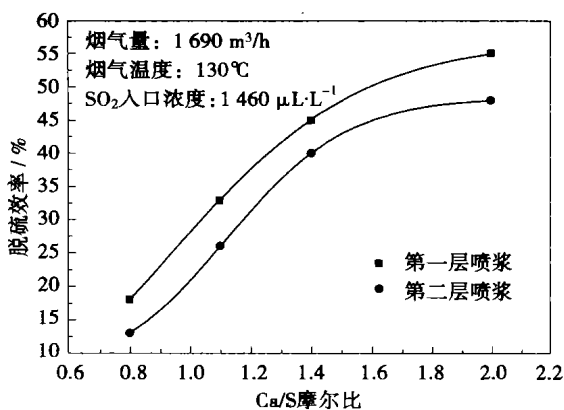


图6 第一层与第二层喷浆脱硫效率的对比

图7为第一层喷浆与第一、第二层同时喷浆脱硫效率的对比,总喷浆量为85kg/h。由图可以看出,第一、第二层同时喷浆比只有第一层喷浆脱硫效率高,这是由于分层喷浆使得气-液-固三相混合更加均匀;分层喷浆还使得系统平均反应温度有所降低,从而使ΔT降低,有利于脱硫反应的进行。

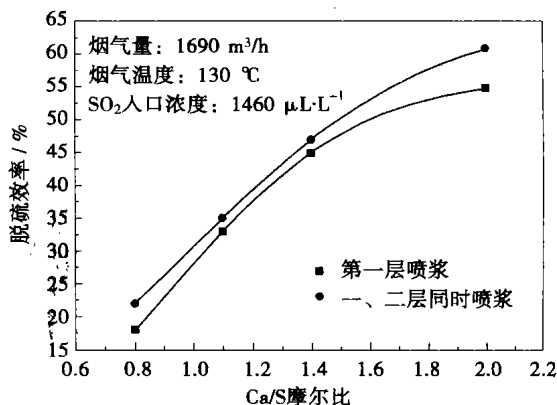


图7 分层喷浆对脱硫效率的影响

3.6 生石灰加压消化对脱硫效率的影响

在常压下进行生石灰水合凝硬反应需要较长的时间。为了缩短脱硫剂制备时间, 研究加压消化对脱硫剂的脱硫性能的影响。本试验还将生石灰放入加压消化器内加压消化, 消化压力为 0.6 MPa。图 8 给出了生石灰常压消化与加压消化喷浆脱硫效率的对比结果, 由图可以看出, 加压消化比常压消化条件下的脱硫效率明显要高。这是因为加压消化所得到的脱硫剂内部的孔隙结构发生变化, 脱硫剂的比表面积增加, 有利于 SO_2 气体扩散, 因而产生较好的脱硫效果。

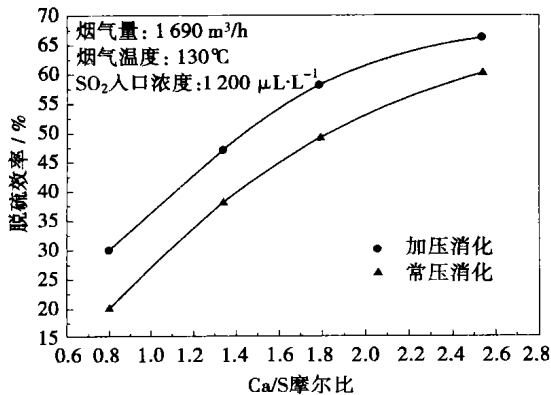


图 8 常压消化与加压消化脱硫对比

4 结 论

(1) 管道喷浆脱硫系统的脱硫效率主要影响因素有: 钙硫比、趋近饱和温度、 SO_2 入口浓度、喷嘴雾化风量、分层喷浆及加压消化等。

(2) 提高钙硫比、降低 ΔT , 采用分层喷浆及压力消化等方法可以有效的提高脱硫效率。当从 Ca/S 大于 2.0 时, 增加幅度迅速下降; ΔT 应大于 15°C , 否则会发生脱硫剂粘壁。

(3) 在试验浓度范围内, SO_2 入口浓度对脱硫效率的影响幅度较小, 而喷浆位置对系统脱硫影响较大, 分层喷浆有利于提高脱硫效率。

(4) 在 Ca/S 比为 2.5 的情况下, 加压消化脱硫剂的管道喷浆脱硫效率可达 65% 以上。

参考文献:

- [1] 周月桂, 章明川, 范卫东, 等. 干式烟气脱硫技术进展及其应用前景分析[J]. 能源技术, 2001, 22(3): 128-132.
- [2] 马果骏. 燃煤电厂烟气脱硫技术[M]. 南京: 东南大学热能工程研究所, 1999.
- [3] RICHARD W RICE, GREGORY A BOND. Flue gas desulphurization by in duct dry scrubbing using calcium hydroxide[J]. AIChE Journal, 1990, 36(3): 473-477.
- [4] 亢燕铭, 李世龙. 管道内烟气喷雾脱硫研究[J]. 环境工程, 2001, 19(1): 31-33.
- [5] 陆永琪, 郝吉明, 侯栋歧, 等. 烟道喷浆脱除烟气中二氧化硫的试验研究[J]. 环境科学, 1996, 17(5): 16-19.

(渠 源 编辑)

供联合循环应用的新型汽轮机

据《Gas Turbine World》2002年5~6月号报道, 美国通用电气(GE)公司开发, 用于 50Hz 和 60Hz 电力生产的高效率先进技术汽轮机生产线。

针对基于 F 级燃气轮机的联合循环应用, 优化了输出功率范围为 90~300 MW 的再热式汽轮机设计。

新型汽轮机具有高反动度转鼓形转子结构, 16.5 MPa 压力性能, 更紧密的密封间隙, 更低压降的阀门, 更长和更高效率的末级动叶片, 及改进的材料。

GE 公司声称, 新设计将增加汽轮机的输出功率并提高联合循环装置效率, 降低电力生产成本。

在烧天然气的联合循环运行中, 汽轮机与 F19FB 燃气轮机配套将生产 412 MW 输出功率, 装置的净效率为 58%。

(思娟 供稿)

The organic pollutants generated by the combustion of coal, such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), are highly carcinogenic, mutagenic and teratogenic, and have thus attracted widespread public attention. The authors have studied the generation of PAHs during the combustion of various kinds of coal and identified the relationship existing between the PAHs emissions during coal combustion and the content of PAHs in raw coal. Also researched is the influence of the constituent content of fixed carbon, volatile substance and ash in coal on PAHs emissions during the process of coal combustion. **Key words:** coal, polycyclic aromatic hydrocarbons, combustion, pollutant emissions

管道喷射烟气脱硫的试验研究 = **Experimental Study of Flue Gas Desulfurization by Using an In-duct Sorbent Injection** [刊, 汉] / HUANG Zhen, FENG Bin, LI Da-ji (Key Lab of Education Ministry on Clean Coal Combustion and Power Generation Technology under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), LU Ping (Power Engineering Institute of Nanjing Normal University, Nanjing, China, Post Code: 210042) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 128—131

A systematic research was conducted of the influence of various factors on the effectiveness of flue gas desulfurization. Such factors include: approach saturation temperature, SO₂ inlet concentration, atomizing airflow rate of nozzles, injected layered lime slurry and pressurized slaked sorbent, etc. The results of the study indicate that the adoption of an enhanced Ca/S ratio, a reduced ΔT , a layered water spray and pressurized slaked sorbent can be conducive to increasing the desulfurization efficiency. Under the condition of a Ca/S ratio of 2.5 the desulfurization efficiency with the use of pressurized slaked sorbent can exceed 65%. **Key words:** flue gas desulfurization, in-duct sorbent injection, desulfurization efficiency, Ca/S ratio

蜂窝体中碳黑沉积规律的实验研究 = **Experimental Investigation of Soot Carbon Deposition Mechanism in Honeycomb Regenerators** [刊, 汉] / XING Gui-ju (Anshan University of Science & Technology, Anshan, China, Post Code: 114002), HU Sheng-teng, FU Wei-biao (Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 132—135

Under a method of soot carbon production with the use of fuel oil cracking measured was the pressure difference generated during the passing of soot carbon-containing flue gases through a honeycomb body as well as the variation of inlet temperatures. On this basis it was discovered that the deposition of soot carbon in the honeycomb body complies with Boltzmann variation law. Such a discovery is helpful in providing valuable reference data for the applied research of high-temperature and low-oxygen regenerative combustion and for the development of new types of regenerators. **Key words:** honeycomb, soot carbon, pressure difference, deposition, regenerative combustion

强化传热管束狭窄空间内 R-11 的沸腾换热特性 = **Boiling Heat Exchange Characteristics of R-11 in the Narrow Spaces of an Intensified Heat-transfer Tube Bank** [刊, 汉] / LIU Zhen-hua, YI Jie (Institute of Power and Energy Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 136—138

An experimental investigation was conducted of the intensified boiling heat transfer of R-11 in the narrow spaces of a compact heat-transfer tube bank consisting of rolled surfaces. The results of the investigation confirm that the full-liquid type of evaporative heat-transfer device comprising the above-cited tube bank offers a good heat-transfer performance. Its working principle is based on the utilization of the narrow spaces of the intensified heat-transfer tube bank for an early conversion of natural convection heat transfer into a thriving nucleate boiling heat transfer. The experimental results also confirm that the boiling heat-transfer intensification effect of the two kinds of intensified techniques as offered by 1) the narrow spaces formed by the tube bank and 2) the intensified heat-transfer surfaces should not be viewed as a version of simple superimposition. **Key words:** composite intensified heat transfer, boiling heat transfer, narrow space