

# 回流式循环流化床烟气脱硫的工程试验研究

韩 旭, 姚光益, 李瑞鑫, 刘立权

(武汉凯迪电力股份有限公司, 湖北 武汉 430223)

**摘 要:**在银川热电厂 5 号炉(150 t/h)回流式循环流化床烟气脱硫装置开展了半干法循环流化床烟气脱硫技术的工程试验研究,该脱硫装置的设计处理烟气体积量为 160 000 m<sup>3</sup>/h。脱硫塔内部及顶部采用了特殊回流结构设计,实现物料塔内内循环,减少除尘装置入口浓度。通过工业试验,研究了钙硫比、喷水量等参数对系统脱硫效率的影响。试验结果表明,当钙硫比为 1.3、塔内温度 70℃、塔内浓度为 800 g/m<sup>3</sup>时,系统脱硫效率可以达到 90%,粉尘排放浓度为 80 mg/m<sup>3</sup>,脱硫系统阻力小于 1.5 kPa。

**关 键 词:**回流式;循环流化床;烟气脱硫;脱硫效率

中图分类号: X701.3 文献标识码: A

## 1 引 言

循环流化床烟气脱硫是 20 世纪 80 年代后期开发的一种新的脱硫技术,该技术具有投资少、占地小、结构简单、易于操作,兼有高效除尘和烟气净化功能,运行费用低等特点,能够适应中、小型燃煤电站的脱硫装置改造,有着广泛的应用前景。因而,国内外许多研究单位对该技术的反应机理、反应过程的数学模型等进行了理论、实验研究和工业应用试验研究<sup>[1-9]</sup>。武汉凯迪电力股份有限公司在消化引进德国 Wulff 的回流式循环流化床烟气脱硫技术基础上,成功地采用具有自己特色的烟气脱硫技术在银川热电厂 25 MW 机组上进行了工程设计、安装、调试及工业试验研究。工业试验主要研究钙硫比和塔内温度(喷水量)等参数对脱硫率影响以及塔内温度(烟气湿度)对电除尘器除尘效果的影响。

## 2 工业装置及测试方法

### 2.1 工业装置及测试方法

银川热电厂 5 号锅炉是由无锡锅炉厂制造,其锅炉额定蒸发量为 150 t/h,过热蒸汽压力为

9.8 MPa,过热蒸汽温度为 540℃,给水温度为 210℃。银川热电厂 5 号机组采用 RCFB 脱硫工艺的流程图如图 1 所示。RCFB 烟气脱硫工艺主要由吸收剂输送系统、烟气系统(电除尘器和烟道)、吸收反应塔、物料再循环系统、脱硫产物渣输送系统、给水系统、空气系统和控制系统等组成。从锅炉尾部排出有粉尘与 SO<sub>2</sub> 的烟气,首先进入预电除尘器(1 个电场),除去约 85% 的飞灰。经过预除尘的烟气通过烟道,进入吸收反应塔。从反应塔底部,烟气经过文丘里管进入吸收反应塔。在反应塔内,喷入钙基吸收剂,并喷水雾化,来加速烟气中的 SO<sub>2</sub> 与吸收剂反应。同时,由电除尘器收集的含有吸收剂的循环灰经循环灰流化槽返回到吸收塔中,使没有反应的吸收剂再与烟气中 SO<sub>2</sub> 反应,达到充分利用吸收剂的目的。从反应吸收塔顶部出来的高灰浓度的烟气进入电除尘器,经过带预除尘装置的电除尘器(3 个电场),约 99.75% 的飞灰被收集。经过处理的清洁烟气经过烟道和引风机进入烟囱排入大气中。

脱硫系统测试点分别布置在脱硫塔入口烟道、脱硫塔顶部和电除尘器的出口烟道上。在入口烟道上,分别布置有压力、温度、烟气湿度和烟气成份(粉尘浓度、O<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>)测点,在脱硫塔顶部布置有温度、压力和湿度测点,在出口烟道上布置有压力、温度和烟气成份(粉尘浓度、O<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>)测点。通过布置在脱硫塔入口烟道、脱硫塔顶部和出口烟道的压力、温度压力传感器进行在线测量,可以对脱硫系统的压力、温度进行测量。试验过程中,通过布置在脱硫塔入口烟道和出口烟道上在线烟气成份分析仪测量进口、出口烟气成份。整个系统的脱硫效率定义为在特定含氧量条件下,进出反应系统的烟气中的 SO<sub>2</sub> 折算浓度之差与进入系统的烟气中的 SO<sub>2</sub> 折算浓度之比。

收稿日期: 2004-09-27; 修订日期: 2004-11-23

基金项目: 武汉市科技攻关基金资助项目(20046002067)

作者简介: 韩旭(1961-)男,山东平原人,武汉凯迪电力股份有限公司高工,博士

在本试验中,采用的是由 CaO 经消化的熟石灰 (Ca(OH)<sub>2</sub>),其平均粒度为 10 μm,其中氧化钙含量 >85%,氧化镁含量 <1.5%,通过变频螺旋给料机+气力输送向脱硫塔内喷射脱硫剂,采用变频螺旋给料机进行计量。

### 2.2 回流式反应塔技术特点

回流式反应塔由从下向上布置的塔底灰渣仓、过渡段、文丘里管、渐扩管以及变截面的塔顶等组成。RCFB 脱硫塔的最大特点是采用了双循环,即脱硫剂在塔内的内循环和来自外部除尘器的固体颗粒回流到反应塔的外循环。为了加强内循环,在脱硫塔内采用了涡流发生器以及变截面的塔顶结构设计。脱硫塔内的涡流发生器可以使向上流动的烟气与向下流动的固体造成剪切湍流,产生有效的内旋涡,从而提高了烟气与脱硫剂之间有效接触时间和脱硫效率。变截面塔顶结构的作用是当烟气向上流向出口时,烟气中一部分固体颗粒由于惯性作用在塔顶浓缩,与塔顶碰撞,沿着反应塔侧壁向下流动,实现塔内循环。

在本工业试验装置脱硫塔直径为 4.5 m,塔体高度为 30 m,有效高度为 20 m,烟气在塔内停留时间为 4.8 s。除上述技术特点外,在该工业装置中,塔底部与烟道连接采用了导流板+L型结构,这样不仅满足了系统要求,而且有效地减少了系统阻力。此外,采用了空气流化槽输送方式来进行循环灰返回脱硫塔,通过在流化槽进行特殊设计,能保证循环灰在塔内与烟气充分接触、反应。

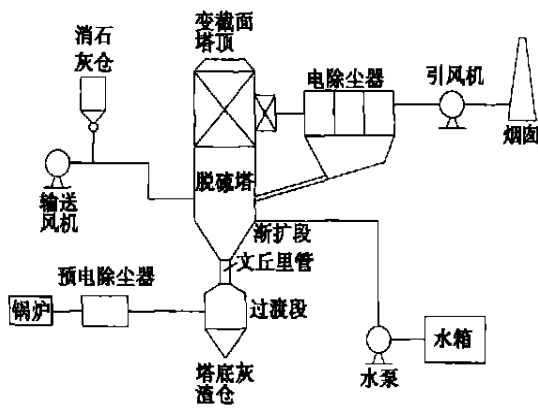


图 1 RCFB 烟气脱硫工艺流程图

试验过程的主要运行参数为:反应器入口烟气温度控制在 120 ~ 140 °C,烟气量为 123 000 ~ 142 000 m<sup>3</sup>/h,入口烟气二氧化硫浓度为 1 100 ~ 2 800 mg/m<sup>3</sup> (O<sub>2</sub>=7%左右时)。在脱硫塔前部加一个过预电除尘器,其除尘效率为 85%,进入脱硫塔的烟气粉尘浓度为 2.5 g/m<sup>3</sup>。

试验过程中,对循环流化床烟气脱硫系统进行了阻力测试,并在该试验装置上,对反应器内温度(喷水量)、钙硫比对脱硫效率的影响以及烟气温度对粉尘排放浓度的影响进行了多工况的试验,下面分别对上述试验结果进行讨论。

### 3.1 循环流化床脱硫系统阻力

在回流式循环流化床烟气脱硫试验装置上对烟气和循环物料循环两相流动阻力分别进行了试验,反应器底部为 L 型+导流板排渣装置,其系统阻力试验结果如图 2 所示。由图可以看出,烟气单相流动和循环物料循环两相流动时,其系统压力损失随着流量的增加而增大。对于烟气单相流动,其系统阻力主要是脱硫塔底部 L 型装置、文丘里管局部阻力损失以及电除尘器内部阻力损失,其中脱硫塔底部 L 装置+文丘里管局部阻力占系统阻力损失的 70%左右。对于有循环物料循环两相流动时,其系统阻力主要由脱硫塔底部 L 型装置、文丘里管、脱硫塔内两相流动阻力及电除尘器内部阻力损失组成,其中脱硫塔内两相流动阻力约占系统阻力的 50%左右。在流量相同的条件下,有循环物料循环的两相阻力要比单相烟气流动系统的阻力要大 0.65 kPa。在正常工作范围内,脱硫系统阻力小于 1.5kPa,同采用旋风分离器或布袋除尘器(仅布袋除尘器阻力为 1.5 kPa 左右)相比<sup>[8]</sup>,其系统阻力要小得多。

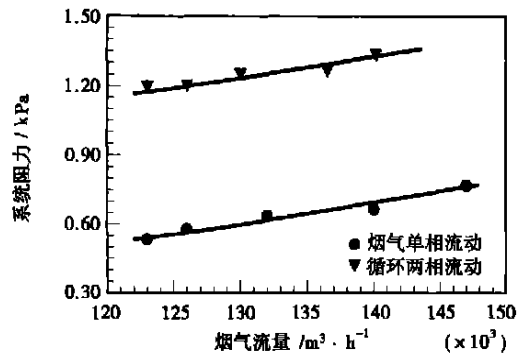


图 2 系统阻力与流量之间的关系

## 3 试验结果及分析

### 3.2 钙硫比对脱硫效率的影响

图3是以 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 为脱硫剂,采用喷水降温,在反应器内流速等于 $4.0\text{ m/s}$ 、循环物料浓度 $G_S=800\text{ g/m}^3$ 时,试验温度分别 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 时钙硫比与脱硫效率之间的关系曲线。由图3可以看出,当反应器内温度、速度和循环物料浓度一定时,随着钙硫比的增加,系统脱硫效率增大。

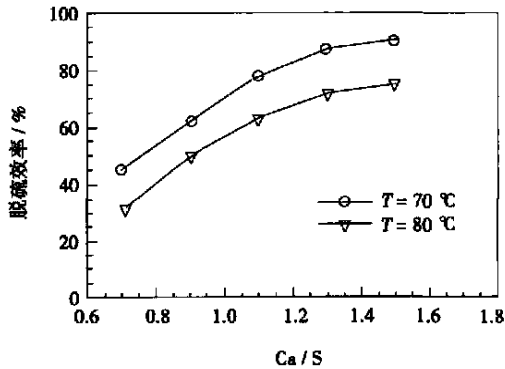


图3 钙硫比对脱硫效率的影响

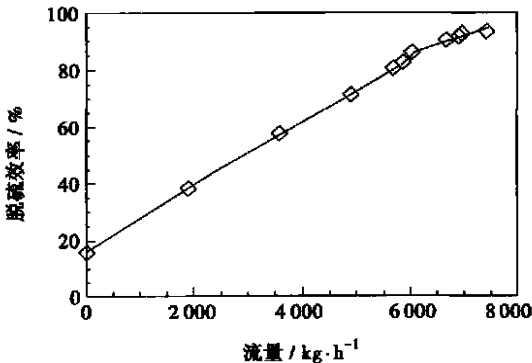


图4 脱硫效率与喷水量之间的关系曲线

### 3.3 喷水量对脱硫效率的影响

图4是在回流式循环流化床烟气脱硫系统中,以生石灰经消化的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 为脱硫剂时,烟气入口温度为 $142\text{ }^\circ\text{C}$ 、烟气量为 $132\ 000\text{ m}^3/\text{h}$ 、钙硫比为1.3和物料浓度为 $800\text{ g/m}^3$ 时的脱硫效率与喷水量之间的关系曲线。由图4可以看出,当钙硫比、循环物料浓度一定时,系统的脱硫效率随着喷水量的增加而增大。在喷水量较低时,脱硫效率随着喷水量的增加而快速上升,当喷水量大于某一定值后,随着喷水量的增加,脱硫效率缓慢上升。喷水量对脱硫效率的影响实际上是通过系统出口烟气温度与绝热饱和温度的差值 $\Delta T$ 来实现的。 $\Delta T$ 在很大程度上决定

了液膜的蒸发干燥特性和脱硫特性,从脱硫角度来看, $\Delta T$ 越小越好,因为液膜蒸发缓慢,存在时间延长, $\text{SO}_2$ 与脱硫剂的反应时间增加,脱硫剂利用率和脱硫效率都能得以提高,但系统出口温度过低会对整个系统运行不利。根据实际运行经验,当控制脱硫塔内温度在 $70\sim 75\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,可以保证系统脱硫效率大于 $85\%$ ,且脱硫系统能够稳定正常运行。

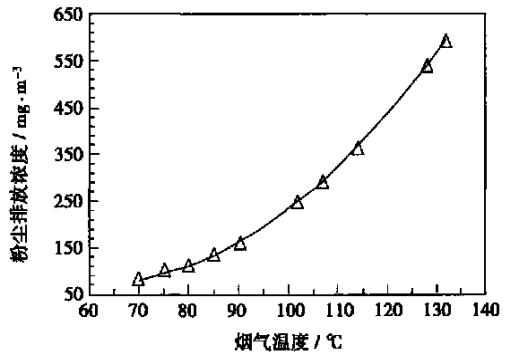


图5 烟气温度对粉尘排放浓度的影响

### 3.4 烟气温度对粉尘排放浓度的影响

采用循环流化床烟气脱硫技术进行脱硫时,由于脱硫塔出口粉尘浓度在 $600\sim 800\text{ g/m}^3$ 范围内,不仅需要满足脱硫要求,而且还要满足粉尘排放要求,因而在脱硫塔出口采用了高浓度+预除尘的高效电除尘器。图5为烟气入口温度为 $142\text{ }^\circ\text{C}$ 、烟气量为 $132\ 000\text{ m}^3/\text{h}$ 、钙硫比为1.3和物料浓度为 $800\text{ g/m}^3$ 时,烟气湿度(烟气温度)对粉尘排放浓度的影响,由图可以看出,随着烟气温度降低(即烟气湿度的增加),粉尘浓度排放浓度降低。当烟气温度大于 $95\text{ }^\circ\text{C}$ 时,粉尘排放浓度大于 $200\text{ mg/m}^3$ ,粉尘排放浓度随着烟气温度增加而急剧增大。当烟气温度小于 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 时,粉尘排放浓度小于 $150\text{ mg/m}^3$ ,粉尘排放浓度随着烟气温度降低而减少。这主要是随着喷入塔内的水量增加,使烟气湿度增加,从而导致粉尘比电阻降低,电除尘器的电气运行特性处于良好区域,从而使电除尘器除尘效率增加。

虽然降低烟气温度能够减少粉尘排放浓度,但也不能把烟气温度降的过低,烟气温度过低,会产生循环灰在塔内积灰和结垢,影响整个脱硫系统的正常运行。由图可以看出,当烟气温度小于 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 时,粉尘排放浓度随着烟气温度的降低而缓慢减少。因此,通过脱硫装置的实际运行,本文建议脱硫塔内烟气温度控制在 $70\sim 75\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内运行比较合适。

## 4 结 论

(1) 通过在 25 MW 燃煤机组(150 t/h 锅炉)上回流式循环流化床烟气脱硫装置进行的工业试验研究表明, 回流式循环流化床烟气脱硫技术成熟, 整个脱硫装置运行稳定, 该项技术可以在国内烟气脱硫工程中推广应用。

(2) 工业试验结果表明, 喷水量对脱硫反应起着关键作用, 随着喷水量增加, 反应塔内温度越接近烟气露点温度, 系统脱硫效率越高。此外, 随着喷入塔内的水量增加, 使烟气湿度增加, 从而导致粉尘比电阻降低, 电除尘器的电气运行特性处于良好区域, 从而使电除尘器除尘效率增加。从系统脱硫、除尘两方面考虑, 建议其塔内温度在 70~75 °C 范围内运行比较合适。

(3) 工业试验结果表明, 采用合适的脱硫塔底部、顶部结构, 可以有效减少脱硫塔内部阻力, 保证脱硫系统正常运行时, 其系统阻力小于 1.5 kPa, 从而减少脱硫系统动力消耗。

## 参考文献:

- [1] 樊保国. 循环流化床烟气脱硫机理研究[J]. 环境科学, 1998, 19(3): 14-17.
- [2] 谭忠超, 项光明. 循环流化床排烟脱硫模型[J]. 环境科学, 1999, 20(3): 21-25.
- [3] 吴颖海, 张建平. 变速循环流化床烟气脱硫实验和机理分析[J]. 环境科学, 2000, 21(2): 54-57.
- [4] 吴颖海, 冯 斌. 循环流化床烟气脱硫的实验及其数学模型[J]. 热能动力工程, 1999, 14(4): 284-286.
- [5] NEATHERY JAMES K. Model for flue gas desulphurization in a circulating dry scrubber[J]. *AIChE Journal*, 1996, 42(1): 259-268.
- [6] 刘现卓, 赵长遂. 蒸汽水合生石灰的脱硫实验研究[J]. 热能动力工程, 2001, 17(1): 10-13.
- [7] 李振中, 韩 旭. 烟气循环流化床脱硫技术的试验研究[A]. 中美清洁能源技术论坛论文集[C]. 北京: 中美能源环境技术中心, 2001. VI 19-25.
- [8] 韩 旭. 双循环流化床烟气脱硫的试验研究[J]. 环境工程, 2003, 21(3): 31-33.
- [9] 韩 旭. RCFB 烟气脱硫技术在恒运电厂的应用[A]. 2003 年全国二氧化硫排放总量控制及排污交易政策高级研讨会暨二氧化硫治理技术交流会[C]. 江西: 中国环境科学学会, 2003. 184-188.

## 新 机 组

## Mercury 50 回热式燃气轮机

据《Gas Turbine World》2003 年 12 月—2004 年 1 月号报道, 美国索拉透平(Solar Turbine)公司在其电力生产新闻发布会上宣布, 它正在继续开展 Mercury 50 回热式燃气轮机系统商业化计划。

紧凑的 5 MW 级设计最初被开发作为美国能源部(DOE)资助的“Advanced Turbine Systems Program(先进的涡轮系统计划)”的一部分, 该计划要求提高性能、减少能源费用和降低 NO<sub>x</sub> 排放。

索拉公司早在几年前就打算把 Mercury 50 提供给商业市场, 但是由于回热器不能满足性能要求, 而决定推迟其投放市场。

以后, 重点放在改进回热器设计上。现在已解决了它的设计缺陷, 并且大量的试验已经证实系统能满足其运行要求。

改进内容包括回热器结构材料从 347 不锈钢改变成 625 铬镍铁合金, 并使回热器长度延长 0.457 m, 但是其基本设计本身来源于原表面式回热器概念。

该燃气轮机具有 10 级轴流压气机和 2 级轴流涡轮的单轴设计, 第一级涡轮采用空气冷却。

以天然气作为燃料在 ISO 条件下, Mercury 50 的额定输出功率为 4 600 kW, 热效率为 38.5%。超贫预混燃烧系统使 NO<sub>x</sub> 排放为 5 ml/m<sup>3</sup>, CO 和 UHC 的排放不大于 10 ml/m<sup>3</sup>。在燃气轮机排气流量约为 17.64 kg/s、温度为 371 °C 时能很好满足小型热电联产项目的要求。

索拉公司正在接受用户订货, 在 2005 年上半年就可发运第一台生产型机组。

(吉桂明 供稿)

chanical and chemical incomplete combustion losses. The latter is the main cause of a low burn-out rate. The authors' study results may offer significant reference data and information for understanding the combustion characteristics of the above type of boilers and conducting relevant technical adjustments. **Key words:** W-shaped furnace, water-cooled gun suction thermocouple, flue gas analysis, burn-out rate, temperature, particulate size

激光感生击穿光谱技术测量飞灰含碳量 = **The Measurement of Carbon Content in Fly Ash by Laser-induced Breakdown Spectroscopy** [刊, 汉] / WU Ge, LU Ji-dong, YU Liang-ying, et al (National Key Laboratory for Coal Combustion Under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 365 ~ 368

The theory of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and its present status of application potential are described and the measurement of carbon content in fly ash by using this method and results of analysis presented. The rank of coal selected is Jiaozuo anthracite. By a method of rapid incineration fly ash samples with carbon content ranging from 0.5% to 7.0% were obtained. The measurement of carbon content in fly ash by using LIBS technique was compared with the carbon content in fly ash samples measured through the use of traditional weight combustion method. The results of the two measurement methods are in very good agreement. **Key words:** laser-induced breakdown spectroscopy, plasma, calibration, carbon content of fly ash

降低循环流化床锅炉飞灰含碳量的理论及应用 = **The Theory of the Reduction of Fly-ash Carbon Content in a Circulating Fluidized Boiler and Its Applied Research** [刊, 汉] / QIU Yan, TIAN Mao-cheng, CHENG Lin (Institute of Energy and Power Engineering under the Shandong University, Jinan, China, post Code: 250061), NIU Wei-ran (Thermal Energy Research Institute under the Shandong Electric Power Research Academy, Jinan, China, Post Code: 250022) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 369 ~ 372

First, from the viewpoint of combustion an analysis was conducted of the main factors which may influence the carbon content of fly ash in a circulating fluidized bed boiler. Then, in the light of the high carbon content of fly ash during the practical operation of a HG-465/13.7-L PM 7 circulating fluidized bed boiler the impact of coal quality and operating parameters on fly-ash carbon content was ascertained by an analysis on the basis of theoretical investigation in conjunction with on-site tests. The test results have been used to guide boiler operation, resulting in a reduction of fly-ash carbon content from the original 18% to 12%. **Key words:** circulating fluidized bed boiler, carbon content of fly ash, combustion adjustment

回流式循环流化床烟气脱硫的工程试验研究 = **Experimental Study of the Flue Gas Desulfurization Project of a Reflux Circulating Fluidized Bed** [刊, 汉] / HAN Xu, YAO Guang-yi, LI Rui-xing, et al (Wuhan Kaidi Electric Power Co. Ltd., Wuhan, China, Post Code: 430070) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 373 ~ 376

At Yinchuan Thermal Power Plant an experimental investigation was conducted on boiler No.5 (150 t/h) involving the flue gas desulfurization plant for a reflux type circulating fluidized bed (CFB) with a semi-dry method of CFB desulfurization technique being employed. The designed flue gas quantity being treated on the desulfurization plant is 160,000 m<sup>3</sup>/h. Inside the desulfurizer and at its top employed is a special reflux construction design. With the realization of internal circulation of materials inside the desulfurizer the concentration at the inlet of dust removal device has been reduced. Through industrial tests studied was the impact of calcium/sulfur ratio and water spray rate on the efficiency of the system desulfurization. Test results indicate with the calcium/sulfur ratio being 1.3, temperature and concentration inside the desulfurizer respectively at 70 °C and 800 g/m<sup>3</sup> the system desulfurization efficiency can reach 90%, dust emission concentration is 80 mg/m<sup>3</sup> and the desulfurization system resistance less than 1.5 kPa. **Key words:** reflux type, circulating fluidized bed, flue gas desulfurization, desulfurization efficiency