

# 旋流格栅式新型烟气脱硫装置研究

李立清<sup>1</sup>, 郭三霞<sup>2</sup>, 唐琳<sup>2</sup>, 王晓刚<sup>2</sup>

(1. 中南大学能源科学与工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 湖南大学环境科学与工程学院, 湖南长沙 410082)

**摘要:** 基于喷淋、冲击、自激、旋流的原理, 综合了旋流加格栅的特点, 以强化气液间的传质。针对影响脱硫效率的主要因素, 如液封高度、喷淋液 pH 值、烟气含湿量及内塔穿孔气速, 进行了一系列试验, 试验表明, 当喷淋量为 110.68 m<sup>3</sup>/h, 液封高度调节到 1 230 mm, 烟气的含湿量控制在 5.56 左右, pH 值维持在 8~9 之间, 内塔穿孔气速为 14.5 m/s 左右时, 脱硫效率可达 98.5%, 是一个较好的工况点。工业应用表明该装置脱硫效率大于 97%, 设备阻力小于 1 200 Pa。

**关键词:** 烟气脱硫; 旋流格栅; 脱硫效率; 气液传质

中图分类号: TK224 文献标识码: A

## 引言

我国中小型燃煤锅炉量大面广, 产生的烟气中含有大量的粉尘和有害气体, 其中 SO<sub>2</sub> 浓度大量超标, 针对此种情况, 我国要求对“控制区”内的城市锅炉烟气必须脱硫达标后排放<sup>[1~3]</sup>。因此, 开发投资少, 运行费用低, 高效的脱硫除尘技术及装置已成为我国大规模除尘脱硫的基本战略。

某钢厂 75 t/h 的燃煤锅炉, 燃煤并掺烧高炉煤气, 原采用卧式文丘里加麻石水膜除尘器进行净化处理。因多种原因, 现文丘里已全部废除, 仅靠麻石水膜除尘器低效率运行, 净化效果不好。排放的烟尘浓度为 3 345 mg/m<sup>3</sup>, SO<sub>2</sub> 浓度根据燃料成份不同, 变化很大, 限值可达数千毫克每立方米, 林格曼黑度达 4 级。大量排放出的超标有害气体不仅危害了工人的健康, 而且对周围的环境造成了严重的污染。“黑烟囱”还影响了该厂的形象。因此, 对该厂烟尘及 SO<sub>2</sub> 污染的治理已刻不容缓。

结合该锅炉的现实状态, 本着降低林格曼黑度和除尘脱硫的目标, 提出如下措施: (1) 改造原球磨机煤粉灰送锅炉的三次送风工艺, 降低烟囱的林格曼黑度。三次风进入炉膛, 布置在四角煤粉、煤气燃烧器的最上层。该层气温度低, 水蒸气含量高(原煤

中的外在水份蒸发在内), 进入炉膛后, 着火较困难, 而且停留的时间相对也短, 燃烧不完全, 产生黑烟的重要原因。在已有制粉系统的细粉分离器后加一级袋式除尘器, 使之达标直接排放; (2) 采用旋流格栅湿式除尘脱硫设备装置净化锅炉尾气, 脱硫除尘一体化完成。

## 1 工作原理及系统结构

脱硫过程包括了气相中 SO<sub>2</sub> 的向液相中(相界面)的传质扩散、气-液相的化学反应及脱硫剂(假定为石灰石)的溶解扩散。碱液吸收 SO<sub>2</sub> 为飞速不可逆化学反应的吸收过程, 溶质 SO<sub>2</sub> 向碱液中的传递过程由气、液膜边界层控制。传质速率  $N_A$  由以下公式确定<sup>[4]</sup>:

$$N_A = K_G \times F \times (P_A + \Gamma C_B) \quad (1)$$

$$K_G = \frac{1}{1/k_g + 1/k_l H_A} \quad (2)$$

$$\Gamma = \frac{1}{b H_A} \cdot \frac{D_B}{D_A} \quad (3)$$

式中:  $K_G$ —吸收过程传质总系数;  $F$ —气液接触面积;  $P_A$ —溶质 A 组分气相分压;  $C_B$ —吸收剂 B 组分浓度;  $k_g$ —溶质 A 气膜传质分系数;  $k_l$ —吸收剂 B 液膜传质分系数;  $H_A$ —溶质 A 溶解度系数;  $D_B$ —吸收剂 B 扩散系数;  $D_A$ —溶质 A 扩散系数;  $b$ —A 与 B 化学反应计量系数。

从上式可以看出传质速率主要由气相传质系数, 气液相接触面积, 浓度梯度等决定, 为了提高传质速率, 应从传质理论和传质动力学方面进行考虑。目前国内在这方面的研究主要针对吸收塔传质性能的强化<sup>[5]</sup>。当前主要从 4 个方面进行传质强化, 采用高气速、增加气体均布装置、新型的喷嘴设计、排列和采用塔内构件<sup>[6]</sup>。本系统即综合考虑的前提下, 组合各个方面的优点, 进一步强化了吸收塔的传

收稿日期: 2006-05-28; 修订日期: 2006-06-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20376019)

作者简介: 李立清(1966-)男, 湖南郴州人, 中南大学教授, 博士生导师

质。 本系统包括装置本体、浆液系统及水处理系统，

如图 1 所示。

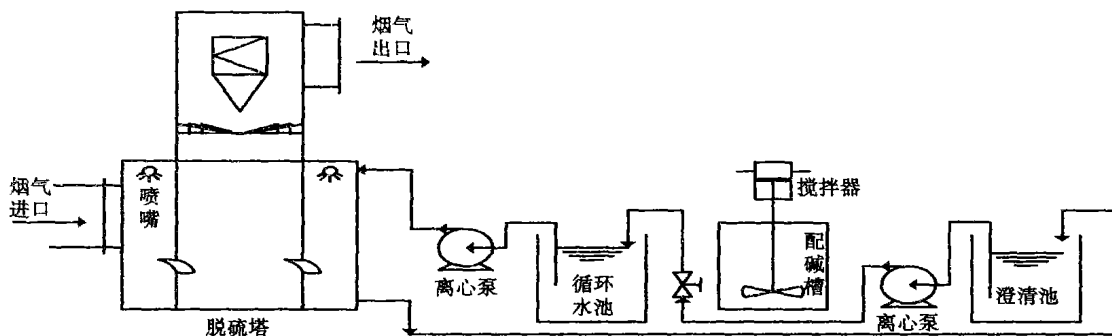


图 1 新组合式脱硫装置系统图

装置本体采用双圆筒结构，进出风道采用方形结构，烟气切向进入外塔，外塔与内塔之间部分的塔顶安装一圈喷嘴，浆液由喷嘴喷出。喷出的浆液分散后形成浆滴，浆滴在气流的作用下在外圈湍动并绕着外圈旋转，在碰撞的过程中，使液膜表面不断更新，气液固三相湍动使传质过程加强，旋转至塔底，高速进入内塔的过程中冲击塔底液层，形成泡沫层。气相和液相在接触过程中，气相中的烟尘和二氧化硫在扩散、碰撞、凝并、捕集的作用下，被捕获取留和吸收。切向进入内塔后旋转上升，一部分液滴和颗粒物在离心力的作用下，甩向四周的塔壁而被除去。在内塔，具有一定含湿量的烟气旋流向上，穿过旋流板，与旋流叶片相冲击，一部分液滴被叶片捕集而形成薄液层被除去。

精心设计的内部结构首先有利于增大气流速度和液流强度，气液二相处于高度湍动状态下，促使传质膜厚度减小，从而使扩散阻力迅速下降，传质系数  $K_G$  迅速得到提高。其次，内塔入口处形成的泡沫层，使气液二相不断分散，获得了巨大的气液相际接触面积  $F$ 。最后，在内塔塔顶设置的旋流板具有拦截的作用，可以除去烟气中过多的液滴，起除雾作用，在使传质效果处于最佳效果的同时也优化了系统结构。

## 2 工艺条件分析

为实现高脱硫效率，在工况条件下，实验研究了不同因素对脱硫效率的影响，即：液封高度、浆液 pH 值、烟气含湿量和内塔穿孔气速。

以及烟尘浓度，德国凯恩 KM900 手持式烟气分析仪测进口和出口二氧化硫浓度。

### 2.1 液封高度对脱硫效率的影响

实验中采用消石灰作为脱硫剂，脱硫过程中控制循环水量为定值，调节液封的高度，改变内塔进风口的大小。图 2 为液封高度的变化对脱硫效率的影响，液封高度在 955 ~ 1 230 mm 之间变化时，随着液封高度的增加，脱硫效率逐渐增加，最高可达到 97.5%，而当高度继续增加的时候，脱硫效率反而急速下降。二氧化硫与氢氧化钙之间的反应属于瞬间反应，而脱硫效率由气相传质系数、气液相接触面积控制，气速越大气相传质系数和气液相接触面积越大，则传质速率越高。然而气速超过某一临界值  $V_{cr}$  时，液体由连续流转变成分散流，阻断了气液之间的接触，同时反应停留时间的缩短也对反应造成了一定的影响，于是脱硫效率急剧下降。

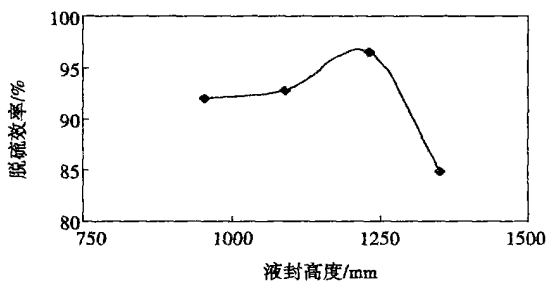


图 2 液封高度对脱硫效率的影响

### 2.2 投碱量和 pH 值对脱硫效率的影响

根据投碱量的多少来控制吸收后液体的 pH 值，图 3 表示吸收后液体 pH 值的变化与脱硫效率的

关系。从图 3 中可以看出: 吸收后溶液中的含碱量, 是由投碱量和脱硫效率决定的。试验表明: 在吸收后溶液 pH=7 左右的条件下, 液气比为 0.7~0.8 L/m<sup>3</sup>时, 脱硫效率可达到 98.7%。

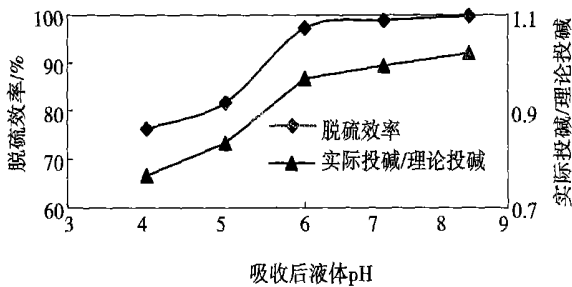


图 3 喷淋液 pH 值对脱硫效率的影响

### 2.3 烟气穿孔速度对含湿量、脱硫效率的影响

随着气速的增大, 烟气通过旋流板的气速方向的变化也越快, 由于惯性力的作用, 颗粒跟随性变差, 速度弛豫时间变长, 所以易于碰到壁面而被捕集<sup>[7]</sup>。但随着速度达到某一临界值后, 变化趋势刚好相反。其原因在于速度增大, 使得气流紊流程度增加, 细雾滴不容易被除去; 同时当速度超过破膜速度后, 易形成“二次夹带”, 从而导致含湿量增加, 反而使除雾效率降低。而随着内塔入口的穿孔气速的增加, 塔内的湍动程度加大, 气液接触面积增大且表面更新加快, 有利于 SO<sub>2</sub> 的脱除; 另一方面, 气速加大, 内塔泡沫层消失, 气液接触时间缩短, 在一定程度上削弱了吸收效果。穿孔速度在小于 14 m/s 时, 随着气速加大, 内塔泡沫层形成, 从而使脱硫效率随穿孔气速的增大而有所提高, 当气速大于 14.5 m/s 后, 脱硫效率开始下降, 如图 4 所示。

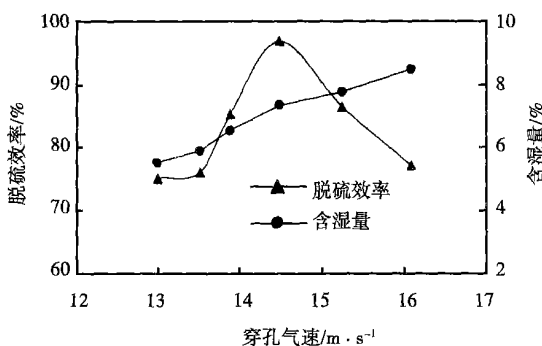


图 4 穿孔气速对烟气含湿量及脱硫效率的影响

已有研究也表明含湿量应 $\leq 8\%$ , 含湿量过大, 导致风机负压运行, 烟道腐蚀和粘灰。

## 3 工业运行效果

某钢铁公司热电厂一台 75 t/h 锅炉采用该装置, 在实验所取得的最佳参数下, 经当地环保部门测试(于 2005 年 11 月 21 日), 除尘脱硫结果见表 1。数据表明: 排放污染物参数优于国家排放标准。

表 1 湘钢 5 号锅炉除尘器出口烟尘烟气监测结果

出口烟道断面积/m <sup>2</sup>	3.6	烟气平均流速/m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	14.5
烟气温度/°C	49	过量空气系数/a	2.9
标态烟气量/m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	147 878	热态烟气量/m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	188 028
烟气黑度(级)	1	排气筒高度/m	85
测试位置	频次	实测烟尘浓度/mg·m <sup>-3</sup>	实测 SO <sub>2</sub> 浓度/mg·m <sup>-3</sup>
排气筒 1 号测试孔	1	102	12
	2	97	13
	3	100	12
	4	96	15
	5	82	15
	6	96	14
排气筒 2 号测试孔	1	121	13
	2	139	10
	3	120	—
	4	125	—
	5	133	—
	6	131	—
实测浓度均值		112	13

## 4 结 论

(1) 本装置在喷淋量一定的情况下, 脱硫效率随着内塔进口气速的增加而增加, 而进口风速由液封的高度控制, 在喷淋量为 110.68 m<sup>3</sup>/h, 将液封高度调节到 1 230 mm, 此时内塔进口气速为 14.5 m/s 左右时, 脱硫效率可达 98.5%, 是一个较好的工况点。

(2) 脱硫效率随投碱量增加而升高, 为得到较高的脱硫率应将吸收后液体 pH 值维持在 7 左右。

(3) 内塔进口气速为 14.5 m/s 以下, 烟气的含湿量控制在 8 以内, 风机不会发生带水和震动。

(4) 该装置合理的利用了原有设施, 集除尘脱硫脱水于一体, 创新性地 将内外塔合为一体, 并在塔

(下转第 220 页)

本文利用所建立的并流有序降膜式湿法脱硫装置,对石灰石—石膏湿法烟气脱硫系统的脱硫过程进行了试验研究,得到如下结论(沿烟行程上)。

(1) 脱硫率上升,但上升的趋势逐步减弱。当脱硫率较高时,要再增加脱硫率,吸收段高度或液气比要增加很多,火电厂机组在确定脱硫系统的脱硫率时,应有适当的选择。

(2) 脱硫浆液的 pH 值下降,且在吸收塔入口至 0.5 m 范围内,浆液 pH 值下降迅速,而后下降变缓。

(3) 浆液中石灰石的含量下降,且由于浆液 pH 值下降及  $S^{4+}$  浓度增加,其下降趋势逐步增强。

(4) 浆液中  $Ca^{2+}$ 、 $S^{6+}$  及  $S^{4+}$  浓度均增加;浆液中  $Ca^{2+}$ 、 $S^{6+}$  的增加,使得石膏的过饱和度增加;在考虑控制脱硫系统石膏的过饱和度时,不能只考虑循环槽内的石膏过饱和度,还应考虑到吸收塔吸收段浆液中的石膏过饱和度会增加的因素。

参考文献:

(上接第 215 页)

顶安装特殊设计的除雾装置,结构紧凑,占地少,投资少,能耗低,可为我国燃煤锅炉烟气治理提供借鉴。

参考文献:

- [1] 孔 华,施正伦,高 翔,等.喷淋式湿法脱硫装置的试验研究[J].动力工程,2001,21(5):1459—1463.
- [2] 孔 华,高 翔,吕同波,等.湍流式湿法除尘脱硫装置试验研究及工业性应用[J].燃烧科学与技术,2001,7(4):261—263.
- [3] 张俊丰,董志权.喷淋塔脱硫除尘技术研究[J].环境污染治理技术与设备,2005,6(2):84—87.

- [1] 陈 东,林继发.湿法烟气脱硫技术简述[J].陕西环境,2003,10(5):32—34.
- [2] 杜 谦.并流有序降膜组脱除烟气中  $SO_2$  过程的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2004.
- [3] 秦裕琨.一种用于烟气脱硫装置中的有序液流组反应器[P].中国专利:ZL 01 2 21686.0 2002—02—13.
- [4] KILLS, MICHELSEN M L, DAM JOHANSEN K. Experimental investigation and modeling of a wet flue gas desulfurization[J]. Ind Eng Chem Res, 1998, 37, 2792—2806.
- [5] 杜 谦,吴少华,刘 辉,等.湿法烟气脱硫吸收塔循环槽的改进[J].热能动力工程,2005,20(1):85—88.
- [6] 胡广军,严季新.铝箔腐蚀液中硫酸根离子的测定[J].电子元件与材料,1996,8:55—56.
- [7] BROGREN C, KARISSON H T. A model for prediction of limestone dissolution in wet flue gas desulfurization applications[J]. Ind Eng Chem Res, 1997, 36: 3889—3897.
- [8] 杜 谦,吴少华,朱群益,等.石灰石/石灰湿法烟气脱硫系统的结垢问题[J].电站系统工程,2004,20(5):41—44.

(编辑 何静芳)

- [4] 李立清,曾光明,李彩亭,等.75 t/h 沸腾锅炉文丘里水膜除尘器的改造[J].现代化工,2003,23(7):43—46.
- [5] HIROFUMI KIKKAWA, TAKANRI NAKAMOTO. New wet FGD process using granular limestone[J]. Ind Eng Chem Res, 2002, 41(12): 3028—3036.
- [6] 吴国华,王玉军,朴香兰,等.湿法烟气脱硫工艺中吸收塔传质性能及其强化[J].现代化工,2003,23:236—238.
- [7] 杜 谦,吴少华,刘 辉,等.湿法烟气脱硫吸收塔循环氧化槽的改进[J].热能动力工程,2005,20(1):85—88.

(编辑 何静芳)

atomization condition, the particle diameters of the atomization liquid droplets appear to be discrete; with an increase in jet flow velocity, the movement mode of liquid droplets assumes a gradual transition from being regular in shape to becoming turbulent. When the jet flow velocity is 3.5 m/s and the indissolvable medium velocity 0.18 m/s, the development trend of the atomization jet-flow cone height will undergo a change. The research findings are of major significance and have practical value for understanding liquid-liquid jet-flow atomization mechanism and better guiding relevant engineering applications. **Key words:** liquid-liquid atomization, numerical simulation, experimental study, VOF-CSF multi-phase flow model

旋流格栅式新型烟气脱硫装置研究 = A Study of an Innovative Swirling-flow Grid-type Desulfurizer of Flue-gases [刊, 汉] / LI Li-qing (College of Energy Science and Engineering under the South China University, Changsha, China, Post Code: 410083), GUO San-xia, TANG Lin, WANG Xiao-gang (College of Environmental Science and Engineering under the Hunan University, Changsha, China, Post Code: 410082) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 213 ~ 215, 220

On the basis of combining such principles as sprinkling, impingement, self-excitation and swirling flow, integrated were the specific features of a swirling-flow and grid structure so as to intensify the mass transfer between gas and liquid. A series of tests have been performed of such main factors affecting the desulfuration efficiency as sealing liquid height, pH value of sprinkling liquid, flue-gas wetness and inner tower perforation air velocity. The tests indicate that when the sprinkling quantity is 110.68 m<sup>3</sup>/h, sealing liquid height is set at 1230 mm, humidity of flue gas controlled at about 5.56, pH value kept at a value between 8 and 9 and inner tower perforation air velocity is around 14.5 m/s, the desulfuration efficiency can attain 98.5%, which is a comparatively good operating-condition point. The applications in industry show that the desulfuration efficiency of the device exceeds 97% and the resistance of the device is less than 1200 Pa. **Key words:** flue gas desulfuration, swirling-flow grid, desulfuration efficiency, gas-liquid mass transfer

石灰石—石膏湿法烟气脱硫过程的试验研究 = Experimental Study of Limestone/Gypsum-based Wet Process Flue Gas Desulfuration [刊, 汉] / DU Qian, MA Chun-yuan, DONG Yong (College of Energy Science and Engineering under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061), WU Shao-hua (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 216 ~ 220

By making use of a parallel-flow orderly falling film type of wet process desulfuration device established by the authors, an experimental study has been conducted of limestone/gypsum-based wet flue gas desulfuration process. The test results show that along the flue gas path, the rising trend of the desulfuration rate gradually weakened. When the desulfuration rate is comparatively high, to further raise the desulfuration rate will require an increase of the absorption section height or the liquid-gas ratio by a large margin. When the desulfuration rate of a boiler unit in a thermal power plant is to be determined, a proper choice must be made. The pH value of the desulfuration slurry decreases and there will be a rapid reduction of the pH value of the desulfuration slurry in an area from the inlet of the absorption tower extending to 0.5 m distance followed by a slower pH value reduction. The reduction trend of the limestone content in the slurry should be gradually intensified. In the meantime the concentration of Ca<sup>2+</sup>, S<sup>6+</sup> and S<sup>4+</sup> will be all enhanced. The increase of Ca<sup>2+</sup> and S<sup>6+</sup> concentration will somewhat increase the supersaturation of the gypsum. **Key words:** wet process flue gas desulfuration, desulfuration rate, limestone, pH value