

陈海林, 杨春平, 甘海明, 等. 2010 螺旋型垂直筛板布气的喷射鼓泡脱硫除尘塔的研制和性能 [ J]. 环境科学学报, 30( 2): 294– 301  
Chen H L, Yang C P, Gan H M, *et al*. 2010 Development and evaluation of a jet bubble reactor using vertical sieves in a spiral housing as a gas inlet device for dust removal and desulfurization [ J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 30( 2): 294– 301

# 螺旋型垂直筛板布气的喷射鼓泡脱硫除尘塔的研制和性能

陈海林<sup>1, 3</sup>, 杨春平<sup>1, 2, 3, \*</sup>, 甘海明<sup>1, 3</sup>, 吴婷<sup>1, 3</sup>, 谢更新<sup>1, 3</sup>, 陈芳<sup>1, 3</sup>, 陈宏<sup>1</sup>, 余关龙<sup>1, 3</sup>

- 1 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082
- 2 南昌航空大学环境与化学工程学院, 南昌 330063
- 3 环境生物与控制教育部重点实验室 (湖南大学), 长沙 410082

收稿日期: 2009-04-11      修回日期: 2009-08-31      录用日期: 2009-11-23

**摘要:** 研制了一种中试规模的螺旋型垂直筛板布气的喷射鼓泡脱硫除尘装置, 具有螺旋型布气、环流布气、气动搅拌等特点. 装置中特有的螺旋型气室是由两块按阿基米德螺线设计的垂直筛板围成, 有结构简单紧凑、开孔面积大、不容易堵塞、气流稳定等优点. 对中试规模装置进行了压降和湿法脱硫除尘实验. 结果表明: 空塔与喷射鼓泡运行时装置各部分压降随气量增加而增加, 喷射鼓泡运行中控制“临界液位差”约 170 mm, 当气量为 1856 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> 时, 塔总压降为 3.37 kPa, 脱硫效率随鼓泡层高度和气动搅拌器转速度的增加而升高; 当石灰石浆液浓度上升时, pH 升高, 有效脱硫时间延长; pH 是控制装置脱硫效率的关键, pH = 5.35 时脱硫效率可达 70%, pH 为 6~7 时脱硫效率保持在 80% 以上; 当烟气中含尘浓度大于 304 mg·m<sup>-3</sup> 时 (粉尘粒径小于 50 μm), 除尘效率可达 91% 以上; 该装置脱硫、除尘效率高, 塔体高度较低, 结构紧凑, 具有很好的应用前景.

**关键词:** 阿基米德螺线; 垂直筛板; 喷射鼓泡塔; 脱硫; 除尘

文章编号: 0253-2468(2010)02-294-08      中图分类号: X701      文献标识码: A

## Development and evaluation of a jet bubble reactor using vertical sieves in a spiral housing as a gas inlet device for dust removal and desulfurization

CHEN Hailin<sup>1, 3</sup>, YANG Chunping<sup>1, 2, 3, \*</sup>, GAN Haiming<sup>1, 3</sup>, WU Ting<sup>1, 3</sup>, XIE Gengxin<sup>1, 3</sup>, CHEN Fang<sup>1, 3</sup>, CHEN Hong<sup>1</sup>, YU Guanlong<sup>1, 3</sup>

- 1 College of Environmental Science & Engineering, Hunan University, Changsha 410082
- 2 School of Environmental and Chemical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063
- 3 Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082

**Received** 11 April 2009      **received in revised form** 31 August 2009;      **accepted** 23 November 2009

**Abstract** A pilot-scale jet bubble reactor (JBR) using vertical sieves in a spiral housing was used as a gas inlet device for dust removal and desulfurization of flue gas. The JBR was equipped with a pierced cylindrical gas inlet device and a pneumatic stirrer. The unique spiral gas chamber consisted of two perforated vertical sieves which were installed in an Archimedes' spiral configuration for gas distribution in the reactor. This configuration has many advantages such as a simple and compact structure, a large open area, less possibility of blockage, and even distribution of gas flow streams. Its performance in flue gas desulfurization and dust removal were evaluated. Results showed that the pressure drop in each part of the JBR increased with an increase in gas flow in no-bad tests and in jetting-bubbling test. In the jetting-bubbling test, the "critical liquid level difference" was about 170 mm. The total pressure drop of the tower in the jetting bubbling test was 3.37 kPa when the gas flow rate was 1856 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>. The desulphurization efficiency increased with an increase in the height of the bubbling layer or in increased rotational speed of the pneumatic stirrer. When the concentration of limestone in the absorption slurry was increased, both the pH and the lifetime of the slurry for high efficiency desulfurization increased. The pH of the slurry was

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50778066); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 (No. NCET-08-0181); 湖南省科技计划项目 (No. 2008SK3082)  
**Supported by** the National Natural Science Foundation of China (No. 50775066), the Program for New Century Excellent Talents in University from the Ministry of Education of China (No. NCET-08-0181) and the Department of Science and Technology of Hunan Province of China (No. 2008SK3082)  
作者简介: 陈海林 (1985—), 男, E-mail: chen hailin.2010@ yahoo. com. cn \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: chunping yang@ gmail. com  
**Biography:** CHEN Hailin (1985—), male, E-mail: chen hailin.2010@ yahoo. com. cn \* **Corresponding author** E-mail: chunping yang@ gmail. com  
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

critical for sulfur removal. The desulfurization efficiency was 70% at a pH value of 5.35, and exceeded 80% when the pH ranged from 6 to 7. When the dust concentration in flue gas is above  $304 \text{ mg m}^{-3}$  (grain diameter less than  $50 \mu\text{m}$ ), dust removal efficiency exceeded 9%. The JBR with its high removal efficiencies of sulfur and dust and short compact structure has potential for industrial applications.

**Keywords** Archimedes' spiral; vertical sieves; jet bubble reactor; desulfurization; dust removal

## 1 引言 (Introduction)

目前国内中小型工业锅炉数量多、分布广,并且多处在人口稠密区,烟囱一般为低空排放,对环境造成了严重的污染,有效控制中小锅炉  $\text{SO}_2$  和粉尘排放刻不容缓(高翔等, 1999). 全球有效的脱硫系统中普遍使用湿法. 而湿法脱硫系统中气体吸收装置是关键(钟秦等, 1997a), 约占总投资 33% 以上, 最常见的气体吸收装置有喷雾塔、填料塔、孔板塔、液幕塔、喷射鼓泡塔等(赵毅等, 2001). 其中喷射鼓泡塔由日本千代田公司在 20 世纪 70 年代研发, 其代表为 CT-121 工艺, 有不易堵塞和结垢、除尘效率高、投资费用少等优点(郝吉明等, 2001; Burford *et al.*, 1993; 马双忱等, 1998). 国内目前已经有广东台山、重庆长寿等多个喷射鼓泡脱硫系统的示范点(曾庭华等, 2004; 林彬等, 2006; 姚欣建等, 2007). 但是国内喷射鼓泡类项目拥有自主知识产权核心技术的较少, 研究开发具有自主知识产权的核心技术是未来趋势(郭东明, 2007). 近年来, 国内在开发新型喷射鼓泡脱硫塔方面已有所突破, 例如专利《喷射鼓泡脱硫除尘装置》(钟秦等, 1996)、《环栅式塔器进气装置》(赵欣等, 2005)、《气动搅拌喷射鼓泡脱硫除尘吸收塔》(甘霖等, 2008).

布气方式对装置性能有重要影响, 传统的布气方式有切向布气、多级叶片分流布气、具有中间缓冲挡板的管式布气等, 在化工、医药、环保等行业中应用广泛(王树楹, 1998), 传统布气方式对探索研究其他新型布气方式有重要意义. 同时, 孟蕾等(2007, 2008)研究发现环栅式塔器进气装置具有中心布气不均匀的缺点.

为实现中小锅炉脱硫除尘一体化并探索开发新的布气方式, 本研究设计了一种螺旋型垂直筛板布气及脱硫除尘装置. 其中螺旋型垂直筛板布气方式克服了环栅式塔器进气装置中心布气不均匀的缺点, 有利于粉尘沉降; 结构紧凑, 可有效降低塔体高度, 开孔面积大、不易堵. 实验中通过研究空塔压降、负荷运行压降、鼓泡层高度、搅拌器转速、pH 值与时间的关系、pH 与脱硫效率的关系, 对装置的性能和参数进行了探讨. 本布气方式及装置已申请国

家发明专利和实用新型专利, 希望解决脱硫技术自主知识产权缺乏的问题.

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 装置的构造

本研究使用的新型塔装置图如图 1 所示. 全塔由有机玻璃制造, 包括椭圆底的塔壁、内筒、气动浮筒搅拌器、两块螺旋形垂直筛板、折板除雾器等.

塔体下部直径 800 mm, 塔体中部及上部直径 400 mm. 内筒底与塔底有悬空间距, 塔壁和内筒之间构成一个环形烟气通道, 通道上方由圆环形密封板密封, 内筒的顶端固定在井字梁上. 环形烟气通道中设有气动浮筒搅拌器(运行时可浮在液面上), 气动浮筒搅拌器由上部的帆、底部的桨叶、浮筒构成. 圆环形密封板、塔壁和内筒上部密封围成一个环形液体通道, 吸收液从吸收液进口导入环形液体通道中, 再经圆环形密封板下装有的喷嘴组进入塔内. 两块阿基米德螺旋形垂直筛板一端在内筒中相交并与支撑杆相连, 两板之间围成一个螺旋型空间, 此空间上端用螺旋形密封板封死构成一个螺旋型气室. 螺旋型气室入口在内筒壁上切线开口. 整个螺旋型气室用井字形的支架固定在塔壁上. 所述内筒和两块螺旋型垂直筛板底端同一高度上开有条形喷气孔, 喷气孔的尺寸  $8 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 孔间距 5 mm. 塔上部装有折板除雾器及除雾器冲洗喷头.

### 2.2 实验原理

实验中吸收塔、风机和浆液回流泵等构成一个湿法脱硫系统. 其核心——吸收塔属于喷射鼓泡类塔, 运行过程中吸收剂是连续相, 烟气为离散相. 鼓泡过程使传质效率增加, 不容易导致脱硫的边际效应, 因此减少了结垢和堵塞, 形成较高的脱硫效率(单选户等, 2004).

实验过程中模拟烟气从烟气进口以一定速度切向进入环形烟气通道, 与通道顶端喷嘴组喷出的吸收液接触, 在旋转过程中减速、稳流, 一部分  $\text{SO}_2$  被去除, 同时由于旋风湿壁效应除去部分尘粒. 旋转的烟气吹在帆上带动气动浮筒搅拌器旋转, 搅拌器底部的桨叶带动塔内的液体形成一个大涡流, 保持塔内液、固两相混合均匀. 一部分烟气经旋转分

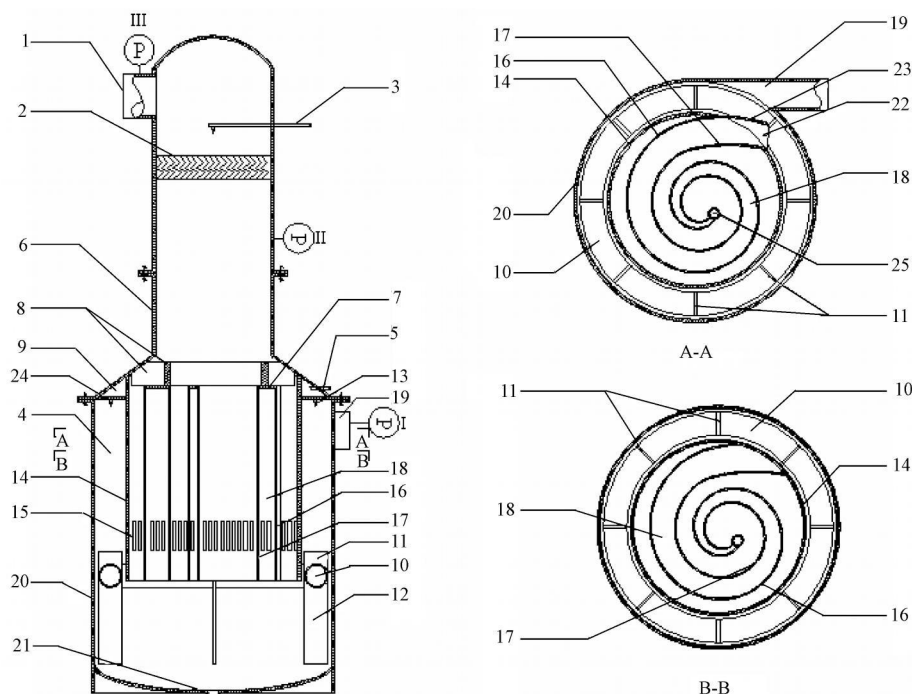


图 1 螺旋形垂直筛板布气的脱硫除尘装置简图 (1 烟气出口; 2 折板除雾器; 3 除雾器清洗喷头; 4 环形烟气通道; 5 吸收液进口; 6 塔体中部; 7 螺旋形密封板; 8 支架; 9 环形液体通道; 10 气动浮筒搅拌器; 11 帆; 12 桨叶; 13 喷嘴组; 14 内筒; 15 格栅状喷气孔; 16 第一块螺旋形垂直筛板; 17 第二块螺旋形垂直筛板; 18 螺旋型气室; 19 烟气进口; 20 塔壁; 21 吸收液排出口; 22 螺旋型气室入口; 23 弧形挡板; 24 圆环形密封板; 25 支撑杆; I . 入口测压点; II . 塔中测压点; III 出口测压点)

Fig 1 Schematic of the JBR ( jet bubble reactor) (1 Gas exit 2 Demister 3 Cleaning nozzles of the demister 4 Annulus chamber 5 Absorbent inlet 6 The middle part of tower 7 Spiral sealing gland 8 Fixed mount 9 Ring-shaped water channel 10 Pneumatic stirrer with pontoon; 11. Rig 12 Paddle 13 Nozzles 14. Inner cylinder 15 Pierced holes 16. The first spiral vertical sieve 17 The second spiral vertical sieve; 18. Spiral gas chamber 19. Gas inlet 20. Wall of tower 21. Drainage 22. Inlet of spiral air chamber 23. Arc baffle plate 24. Ring-shaped sealing gland 24. Support bar I . Pore for measuring pressure in the inlet II . Pore for measuring pressure in the middle III. Pore for measuring pressure in the outlet)

配后, 通过螺旋型气室入口进入螺旋型气室内. 两块螺旋形垂直筛板基于阿基米德螺旋线设计, 气流进入气室后沿螺旋形壁螺旋下行. 特殊结构有利于气流稳定; 螺旋过程产生的惯性力和沉降作用, 进一步提高了除尘效果; 螺旋型气室空间相对较大, 且两壁为垂直安装, 不容易堵塞; 由于阿基米德螺旋线弧长较长, 其底部的格栅状喷气孔数量和开孔面积增加, 提高了塔内的有效布气面积, 有利气液充分接触, 增加处理气量; 螺旋型气室结构简单紧凑, 可充分利用塔内空间, 能有效地降低吸收塔的高度. 经过分布和稳流后的烟气同时将环形烟气通道和螺旋型气室内的液面压低至格栅状喷气孔, 可使孔内外形成 100~400 mm 的“临界液位差” (“临界液位差”是指气体将液面刚压至格栅状喷气孔上沿恰未形成鼓泡层时孔内外的液位差), 气体以一定的速度从格栅状喷气孔中分散后喷出并被塔内的涡流、搅拌器的桨叶等进一步剪切成小气泡在湍流

中曲折上升并破裂形成很高的鼓泡层和鼓泡层脉动(朱晓帆等, 2000; 钟秦等, 1997a), 这种鼓泡层脉动加剧气液扰动使鼓泡层中气液混合更充分, 整个过程中气液接触面积巨大, 接触时间增加, 产生多级传质过程. 鼓泡层上升和回落过程产生的液体扰动, 气动浮筒搅拌器旋转搅拌形成的湍流和涡流使塔内吸收液充分混合, 使石灰石利用率提高, 这些减少了形成物理垢、化学垢的机会(周至祥等, 2006).

### 2.3 实验材料

本实验过程中模拟烟气分别由空气加纯  $\text{SO}_2$  气体混合而成, 脱硫吸收剂由 320 L 的水加一定质量的  $\text{CaCO}_3$  粉末(过 300 目, 一次性加入, 质量浓度为 1.25% 或 1.54%)均匀混合而成. 由于工业锅炉中烟气的  $\text{SO}_2$  浓度一般在 400~6000  $\text{mg m}^{-3}$  之间(杨旭中, 2006), 因此实验中控制进口  $\text{SO}_2$  浓度在 3000  $\text{mg m}^{-3}$  左右, 含尘烟气由过 300 目筛(粒径小于 50

$\mu\text{m}$ )的干燥  $\text{CaCO}_3$ 粉末加空气模拟.

2 4 实验操作与方法

烟气由离心风机正压送入塔内, 运行时喷气孔内外的“临界液位差”约 170 mm, 浆液回流泵维持吸收剂的循环. U 型管压力计测量各点压强, 如图 1 所示. 共有 3 个测压点分别为 I (入口测压点)、II (塔中测压点)、III(出口测压点). PHS-25 型数显酸度计(中国雷磁分析仪器厂)测量 pH 值. 使用标准碘量法测量气体的  $\text{SO}_2$  浓度(HJ/T-2000 2000). 流量可由烟气管道的压力计算得出. 含尘浓度由 TH-880VI 型智能油烟烟尘平行采样仪(武汉市天虹智能仪表厂生产)测量.

3 结果 (Results)

3 1 空塔运行时各部分压降

测定了装置在空负荷运行时气体流量和塔各部分压降的关系, 结果见图 2 如图 2 所示, 在空塔运行实验中塔内各部分压降随气量增加而上升; 当气体流量  $1376 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  时, 布气系统压降和塔总压降分别为 0.32 kPa 和 0.58 kPa 风量最大时, 气体流量  $2689 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , 布气系统压降和塔总压降分别为 1.58 kPa 和 2.65 kPa 布气系统压降与除雾器压降相当.

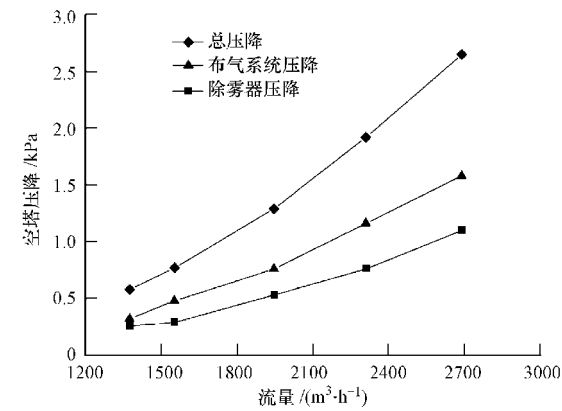


图 2 空负荷运行时气体流量和塔各部分压降的关系  
Fig 2 Relationship of gas flow and the pressure-drops in different parts of the tower in no-load tests

3 2 喷射鼓泡运行时各部分压降

用清水测定了喷射鼓泡运行时塔各部分压降和流量的关系, 喷射鼓泡运行时“临界液位差”约 170 mm. 如图 3 所示.

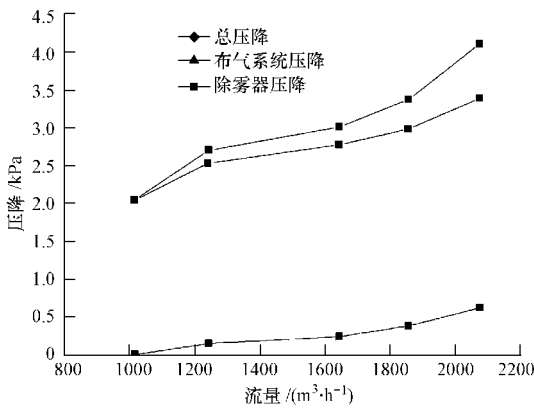


图 3 喷射鼓泡运行时气体流量和塔各部分压降的关系  
Fig 3 Relationship of gas flow and pressure-drop in different part of the tower in the jetting bubbling test

3 3 气量与鼓泡层高度、气动浮筒搅拌器转速的关系

用石灰石浆液和模拟烟气模拟湿法石灰石-石膏脱硫实验, 浆液的静止液位在格栅状喷气孔上方 34 mm, 得塔内鼓泡层高度、气动浮筒搅拌器转速与气量的关系见表 1

表 1 气量与鼓泡层高度、气动浮筒搅拌器转速关系  
Table 1 Relationship of gas flow rate and height of bubbling layer and rotational speed of the pneumatic stirrer

| 气量 /<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 鼓泡层高度 /<br>m | 气动浮筒搅拌器<br>的转速 / ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ) | 浆液 pH 为 6 时<br>脱硫效率 |
|----------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------|---------------------|
| 1016.5                                       | 0.5          | 无                                                     | 49.2%               |
| 1243.0                                       | 0.8          | 6                                                     | 68.2%               |
| 1855.8                                       | 1.2          | 17                                                    | 75.6%               |
| 2074.4                                       | 1.7          | 20                                                    | 80.1%               |

3 4 运行时间和 pH 值的关系

实验中使用模拟烟气 ( $\text{SO}_2$  浓度控制在  $3000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 和石灰石浆液测试了时间和 pH 值的关系, 结果见图 4 由图 4 可见, 随着运行时间的增加,

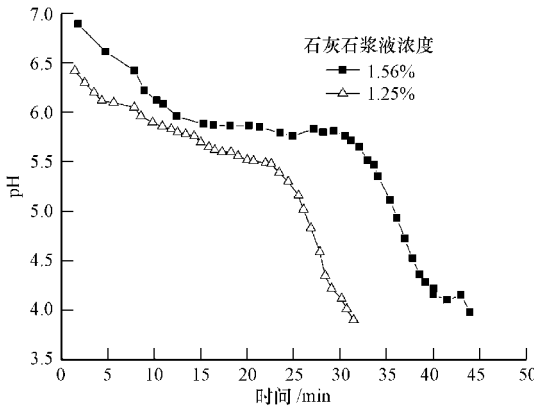


图 4 pH 值随运行时间的变化  
Fig 4 Relationship of pH and operating duration

两次实验中浆液 pH 由初始值在 1 min 内迅速降低至 7 以下, 然后缓慢地下降, 随后 pH 值迅速降低, 失去高效脱硫性能。当石灰石浆液浓度为 1.25% 时, 系统运行 23 min 后 pH 值从 5.48 开始剧减; 当石灰石浆液浓度为 1.56% 时, 系统运行 30 min 后 pH 值从 5.8 开始剧减, 运行时间较长。

### 3.5 脱硫浆液 pH 值和脱硫效率的关系

浆液 pH 值是影响脱硫效率的重要参数, 图 5 为 pH 值与脱硫效率的关系。由图 5 可见, 低浆液浓度时, 脱硫效率随气量增加而增加, 最高脱硫效率为 89%; 当进气压力约 4 kPa, pH = 5.35 时两次脱硫实验的脱硫效率即可达到 70%; pH 值在 6~7 时, 装置的脱硫效率可稳定在 80% 以上。

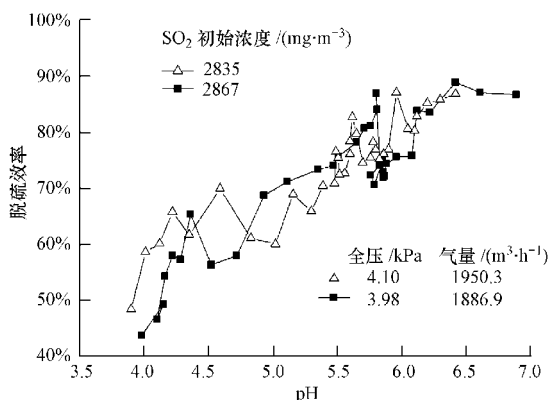


图 5 pH 值与脱硫效率的关系

Fig 5 Relationship of pH and desulfurization efficiency

### 3.6 粉尘浓度和除尘效率的关系

粉尘经过干燥可过 300 目筛子 (粒径小于 50  $\mu\text{m}$ ), 操作压力 3.7 kPa, 气量 1732  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 运行中控制“临界液位差”约 170 mm。粉尘浓度和除尘效率的关系见图 6。由图 6 可见, 当粉尘浓度超过 304

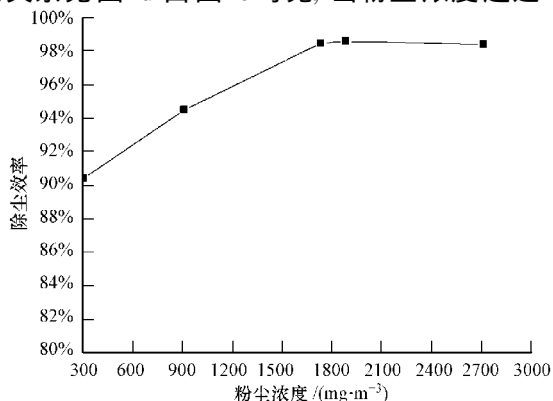


图 6 粉尘浓度和除尘效率的关系

Fig 6 Relationship of dust concentration and dust removal efficiency

$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时 (粒径小于 50  $\mu\text{m}$ ), 装置的除尘效率大于 91%; 含尘量大于 1733  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, 效率可稳定在 98% 以上。

## 4 讨论 (Discussion)

### 4.1 空塔运行压降

由图 2 可知, 实验中空塔总压降比其它喷射鼓泡类塔高, 同气量下其它喷射鼓泡类塔的空塔压降都在 0.1~0.6 kPa 之间 (钟秦等, 1997; 吴婷等, 2008; 孟蕾等, 2007)。气体压损随阻力系数和气速的增加而增加。主要原因有: ①在内筒 (见图 1 中 14) 空间中螺旋型气室 (见图 1 中 18) 占有一定的空间, 其余空间即为干净烟气的出气通点, 但由于出气通量截面积小导致气体速度增大, 压损增加, 今后还需进行优化; ②通过实验可以测得在环形烟气通道中气速分布规律是离塔壁越近气速越大, 烟道中螺旋型气室入口 (见图 1 中 22) 上的弧形挡板末端 (见图 1 中 23) 离塔壁距离太短, 导致气流以更大的平均速度吹在弧形挡板上改变气流方向进入螺旋型气室内, 压损因此增加。经过改进后塔压降可以显著降低。

### 4.2 喷射鼓泡运行压降

由图 2 和图 3 可知, 塔喷射鼓泡运行时“临界液位差”约 170 mm, 各部分压降随气量增加而增加, 因为气量越大时气速越大, 气速大压损增加。喷射鼓泡运行中气量为 1856  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  时, 塔总压降为 3.37 kPa。导致喷射鼓泡运行压降的主要原因有: ①运行时气体将环形烟气通道、螺旋型气室内的液体压向格栅状喷气孔外, 使孔内外的“临界液位差”约 170 mm, 气体至少需要克服约 1.7 kPa 的水压差通过格栅状喷气孔; ②塔体高度在实验室内有限制, 资金不足等原因在螺旋型气室上方的塔体采用小直径, 而实验中鼓泡层平均高度远高过布气室顶, 鼓泡过程中液体容易在小直径塔体处形成一定程度的液封效果, 增加压降。

### 4.3 气量与鼓泡层高度、气动浮筒搅拌器转速的关系

由表 1 数据可得, 鼓泡层高度、气动浮筒搅拌器转速随气量的增加而增加。而鼓泡层高度是喷射鼓泡类塔的一个重要参数, 较高的鼓泡层可延长气液接触时间并增加气液接触面积, 因此脱硫效率随鼓泡层高度的增加而增加, 由资料可知其他喷射鼓泡类塔的鼓泡层高度一般在 600 mm 以下 (仲兆平等,

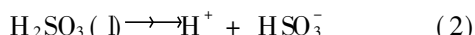
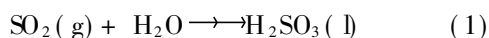
2003 周至祥等, 2006).

气动浮筒搅拌器由气流带动, 气流在环形烟气通道内旋转时吹在搅拌器的帆上, 其中一部分能量转变为搅拌器的动能, 按能量守恒定律气速越大搅拌器转速也越大. 搅拌可使塔内液固两相混合更均匀, 使大颗粒固体随涡流向塔底聚集由吸收液排出口排出, 不易导致堵塞和结垢, 同时由旋转产生的涡流可剪切气泡, 进一步改善气、液接触效果. 实验中选择气量  $Q \approx 2000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  为湿法脱硫实验参数 (风机的最大风量).

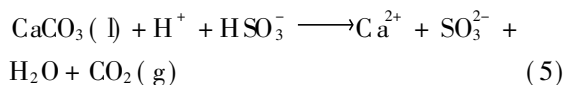
#### 4.4 运行时间和 pH 值的关系

石灰-石膏法脱硫反应机理主要分以下 4 个步骤 (周至祥等, 2006).

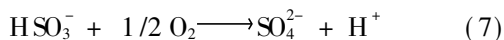
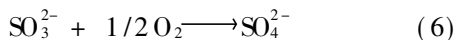
气体  $\text{SO}_2$  被液相吸收



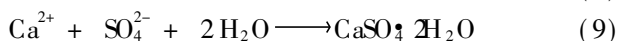
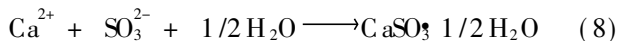
吸收剂溶解和中和反应



氧化反应



结晶析出



喷射鼓泡类塔所有反应都在塔内进行 (单选户等, 2004; 林彬等, 2006; 郝吉明等, 2001), 本实验过程中使用的是模拟烟气 ( $\text{SO}_2$  浓度控制在  $3000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), 模拟烟气中的  $\text{O}_2$  含量高, 同时石灰石浆液浓度低, 所以最终产物  $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$  的浓度很低, 氧化反应和结晶析出两个步骤对整个过程的影响可以忽略. 由以上反应步骤和实验可知, 反应刚开始时 pH 值较高不利于  $\text{CaCO}_3$  的溶解, 气体  $\text{SO}_2$  被液相吸收而  $\text{CaCO}_3$  溶解速率相对较慢,  $\text{H}^+$  剧增; pH 值迅速降低导致  $\text{CaCO}_3$  的溶解速率上升并与溶解的  $\text{SO}_2$  发生中和反应, pH 值缓慢降低, 最终  $\text{CaCO}_3$  溶解速率和中和反应速率在一定时间内会达到一种近似的动态平衡; 最后浆液中  $\text{CaCO}_3$  消耗完毕,  $\text{CaCO}_3$  溶解和中和反应之间的平衡打破, pH 值迅速降低, 失去高效脱硫性能, 所以出现图 4 中 pH 值随运行时间变化的规律.

由图 4 可知石灰石浆液浓度较高时, 运行较长的时间才出现 pH 值剧减, 整个过程中浆液 pH 值也较高, 浆液发挥高效脱硫的时间延长, 这与孙文寿等 (2002) 的实验结果相符. 综上所述, 石灰石浆液浓度是控制 pH 值和运行时间 (也是系统给料时间) 的重要因素 (郭东明, 2007).

#### 4.5 脱硫浆液 pH 值和脱硫效率的关系

浆液 pH 值是影响脱硫效率最直接的一个因素. 由图 5 可见, 气量较大时脱硫效率相对较高, 表明本发明装置的布气系统有利于提高气流稳定性和布气均匀性. 由于资金不足等原因, 格栅状喷气孔和搅拌器与塔底的悬空高度太大, 影响负荷运行时塔内气、液混合的均匀程度 (任志凌等, 2004), 脱硫效率还有很大的提升空间.

#### 4.6 除尘效率

粉尘经过干燥可过 300 目的筛子 (粒径小于  $50 \mu\text{m}$ ), 操作压力  $3.7 \text{ kPa}$  气量  $1732 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . 由图 6 可知, 当粉尘浓度超过  $304 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, 除尘效率稳定在 91% 以上; 当含尘量大于  $1733 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时除尘效率超过 98%, 装置除尘效率高. 除尘的主要机理是惯性碰撞或液滴、液膜捕捉拦截 (郝吉明等, 1988; 周兴求等, 2004), 实验中喷射鼓泡过程产生了巨大表面积和大量液滴, 使粉尘发生惯性碰撞和液膜、液滴捕捉吸附的几率倍增, 导致除尘效率高. 在本装置中粉尘被去除的主要过程如下: 烟气中的粉尘切线进入环行通道中与喷嘴组喷出的液体碰撞, 高速旋转所产生的离心力把液滴和尘粒甩向外壁, 这个过程相当于装有稳流柱的旋风湿壁除尘塔, 部分尘粒被液膜、液滴捕捉, 随重力作用落入塔底, 经过聚集后通过塔底排出口排出, 避免堵塞; 一部分烟气经螺旋形布气室入口进入后在螺旋形布气室中螺旋下行, 产生的惯性除尘作用和沉降作用也可除掉一部分粉尘, 螺旋型气室壁由两块垂直筛板构成不会导致粉尘的沉积和堵塞; 最后在喷射鼓泡过程中形成的巨大气液表面积和液滴的捕捉吸附作用可去除大部分粉尘. 主要机理和结果与 CT-121 喷射鼓泡塔类似, 由文献 (马双忱, 1998) 可知, CT-121 鼓泡塔的除尘效率大于 90%. 综上所述, 装置的除尘效率可达 98% 以上, 本发明装置适合中小型锅炉的脱硫除尘一体化.

#### 5 结论 (Conclusions)

1) 本装置中特有的螺旋型气室是由两块垂直

筛板围成,两筛板按照阿基米德等速螺旋线设计,结构简单,开孔面积大,气体分布均匀,不易堵塞,气流在螺旋下行过程中气速稳定,同时产生的惯性除尘作用和沉降作用也有利于粉尘的去除。

2)装置空塔和喷射鼓泡运行时压降随气量增加而增加,喷射鼓泡运行中“临界液位差”约 170 mm,当气量为  $1856 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  时,塔总压降为 3.37 kPa,脱硫浆液浓度是影响 pH 值和脱硫时间的重要因素;浆液越浓, pH 值越高,浆液发挥高效脱硫作用的时间越长。

3)本装置的气-液-固三相混合均匀,传质效率和脱硫效率高, pH = 5.35 时脱硫效率即可达到 70%, pH 值在 6~7 时整塔的脱硫效率超过 80%,最高可以达到 89%。脱硫效果好,且还有进一步的改进空间。装置的喷射鼓泡过程可高效除尘,当烟气中含尘浓度超过  $304 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时(粒径小于 50  $\mu\text{m}$ ),装置的除尘效率大于 91%;含尘量大于  $1733 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时,效率可稳定在 98% 以上,适用于含尘浓度较高的烟气。

4)气动浮筒搅拌器使吸收液中固液混合更均匀,烟气与吸收液的反应更充分,气体分布更均匀。这种搅拌装置的结构简单,无需外加动力,成本低廉,尤其是不需要转动轴,对有特殊密封要求的反应器有很大应用价值。

5)装置结构紧凑,尤其是塔高较矮,可节约造价,尤其适用对塔高有限制的烟气脱硫除尘;推荐气量为  $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , pH 值 6,含尘浓度 2000~3000  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,预期脱硫和除尘效率分别为 90%、98%。

6)螺旋形进气方式及脱硫除尘装置,经过研究、改进和优化后,可望在石油化工、精细化工、食品、医药等部门的  $\text{SO}_2$  等气体吸收操作,尤其适用于含尘量浓度较高的中小型锅炉脱硫除尘一体化,有良好的工业应用前景。

责任作者简介:杨春平,教授,博士生导师,环境工程系主任,美国辛辛那提大学环境工程专业博士,美国注册工程师(环境工程类),中国环境影响评价师,教育部新世纪优秀人才支持计划入选者,从事废气废水处理技术研究,在国内获得国家级和省部级科技成果奖 6 项,在国内外杂志发表论文 100 余篇。

#### 参考文献 (References):

Burford D P, Pearl I G. 1993 Initial results from the CT-121 innovative clean coal technology demonstration project at Georgia power's plant

- Yates [A]. //Proceedings of the Joint ASME/IEEE Power Generation Conference [C]. USA. 1—7
- 甘霖,孟蕾,赵欣,等. 2008 气动搅拌喷射鼓泡脱硫除尘吸收塔 [P]. 中国, CN101130154A. 200710035557. 9. 2008-02-27
- Gan L, Meng L, Zhao X, *et al*. 2008 Jet bubbling tower with a pneumatic stirrer for desulphurization and dust removal [P]. China CN101130154A, 200710035557. 9. 2008-02-27 (in Chinese)
- 高翔,骆仲决,周劲松,等. 1999 新型多功能烟气净化装置的开发 [J]. 环境科学学报, 19(4): 362—367
- Gao X, Luo Z Y, Zhou J S, *et al*. 1999 Development of a new type multi-function flue gas cleaner [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 19(4): 362—367 (in Chinese)
- 郭东明. 2007 脱硫工程技术与设备 [M]. 北京: 化学工业出版社. 1—261
- Guo D M. 2007. Technology and Equipment of Flue Gas Desulphurization Engineering [M]. Beijing: Chemical Industry Press. 1—261 (in Chinese)
- 郝吉明,王书肖,陆勇琪. 2001 燃煤二氧化硫污染控制技术手册 [M]. 北京: 化学工业出版社. 296—297
- Hao J M, Wang S X, Lu Y Q. 2001 Handbook of Sulfur Dioxide Pollution from Fire Coal Control Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press. 296—297 (in Chinese)
- 郝吉明,马广大. 1988 大气污染控制工程 [M]. 北京: 高等教育出版社. 161—212
- Hao J M, Ma G D. 1988 Air Pollution Control Engineering [M]. Beijing: Higher Education Press. 161—212 (in Chinese)
- 孟蕾,姚欣建,甘海明,等. 2007 单切线环栅式喷射鼓泡进气脱硫装置的研究 [J]. 化学工程, 35(3): 6—9
- Meng L, Yao X J, Gan H M, *et al*. 2007 Study on single tangent ring bar sprayed bubbling gas distributing desulphurization device [J]. Chemical Engineering 35(3): 6—9 (in Chinese)
- Meng L, Yang C P, Gan H M, *et al*. 2008 Pierced cylindrical gas inlet device for sulfur dioxide removal from waste gas streams [J]. Separation and Purification Technology, 63(1): 86—91
- 马双忱,赵英,李守信. 1998 先进的烟气脱硫工艺——CT-121 工艺 [J]. 电力环境保护, 14(1): 27—31
- Ma S C, Zhao Y, Li S X. 1998 The advanced flue gas desulphurization technology——CT-121 technology [J]. Electric Power Environmental Protection 14(1): 27—31 (in Chinese)
- 林彬,宋建珂,郭斌,等. 2006 喷射鼓泡塔烟气脱硫在 600MW 机组上的运行特征 [J]. 热力发电, 35(3): 33—35
- Lin B, Song J K, Guo B, *et al*. 2006 Operational performance of the flue gas desulfurization system with spray bubbling tower on 600MW [J]. Thermal Power 35(3): 33—35 (in Chinese)
- 任志凌,朱晓帆,蒋文举,等. 2004 软锰矿浆烟气脱硫反应器试验研究 [J]. 环境污染治理与技术, 5(11): 90—93
- Ren Z L, Zhu X F, Jiang W J, *et al*. 2004 Study on flue gas desulfurization reactor with pyrolusite slurry [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control 5(11): 90—93 (in Chinese)
- 孙文寿,吴志标,李悦,等. 2002 旋流板塔钠强化石灰石湿式烟气脱硫研究 [J]. 环境科学, 23(5): 105—108

- Sun W S, Wu Z B, Li Y, *et al*. 2002 Sodium-enhanced limestone Wet FGD in rotation-stream tray scrubber [ J ]. Environmental Science, 23( 5): 105—108 ( in Chinese)
- 单选户, 薛宝华. 2004. CT-121鼓泡式吸收塔烟气脱硫工艺技术介绍 [ J ]. 工程建设与设计, ( 8): 9—12
- Shan X H, Xue B H. 2004. Introduction of technical skill of flue gas desulphurization by the CT- 121 Jet Bubbling Reactor [ J ]. Engineering Construction and Design, ( 8): 9—12 ( in Chinese)
- 王树楹. 1998. 现代填料塔技术指南 [ M ]. 北京: 中国石化出版社. 193—195
- Wang S Y. 1998. Handbook of Packed Tower Technology in Present Generation [ M ]. Beijing China Petrochemical Press 193—195 ( in Chinese)
- 吴婷, 杨春平, 甘海明, 等. 2008 气动搅拌喷射鼓泡脱硫除尘吸收塔 [ J ]. 环境工程, 26( 2): 10—13
- Wu T, Yang C P, Gan H M, *et al*. 2008 Jet bubbling tower with pneumatic agitation for desulfurization and dust removal [ J ]. Environmental Engineering 26( 2): 10—13 ( in Chinese)
- 吴忠标, 谭天恩, 潘学良. 1995 旋流板塔内石灰湿法烟气脱硫的实验研究 [ J ]. 环境科学学报, 15( 3): 336—340
- Wu Z B, Tan T E, Pan X L. 1995 Experiment studies of wet FGD with lime in a rotating-stream-tray scrubber [ J ]. Acta Scientiae Circumstantiae 15( 3): 336—340 ( in Chinese)
- 姚欣建, 甘海明, 赵欣, 等. 2007 模块组合式脱硫除尘吸收实验装置 [ J ]. 实验室研究与探索, 26( 3): 40—42
- Yao X J, Gan H M, Zhao X, *et al*. 2007. Module combined laboratory devices of desulphurization and dust removal [ J ]. Research and Exploration in Laboratory, 26( 3): 40—42 ( in Chinese)
- 杨旭中. 2006. 燃煤电厂脱硫装置 [ M ]. 北京: 中国电力出版社. 38—40
- Yang X Z. 2006 Desulphurization Equipment in Coal-fired Power Plant [ M ]. Beijing China Electric Power Press 38—40 ( in Chinese)
- 中国环境监测总站. 2000 HJ/T—2000 固定污染源排气中二氧化硫的测定: 碘量法 [ S ]. 北京: 国家环境保护部
- China E. M. S. 2000 HJ/T — 2000. Determination of sulfur dioxide from exhausted gas of stationary source iodine titration method [ S ]. Beijing State Environmental Protection Department ( in Chinese)
- 周兴求, 叶代启. 2004 环保设备设计手册——大气污染控制设备 [ M ]. 北京: 化学工业出版社. 234—298
- Zhou X Q, Ye D Q. 2004 Handbook of Environmental Equipments Design—Air Pollution Controlling Equipments [ M ]. Beijing Chemical Industry Press 234—298 ( in Chinese)
- 曾庭华, 杨华, 马斌, 等. 2004. 湿法烟气脱硫系统的安全性及优化 [ M ]. 北京: 中国电力出版社. 35—42
- Zeng T H, Yang H, Ma B, *et al*. 2004 Security and Optimization of the Wet Flue Gas Desulphurization System [ M ]. Beijing China Electric Power Press 35—42 ( in Chinese)
- 赵欣, 甘海明, 侯立臣, 等. 2005. 环栅式塔器进气装置 [ P ]. 中国, CN1212173C, ZL03124758. X 2005-07-27
- Zhao X, Gan H M, Hou L C, *et al*. 2005 Ring bar gas distributing device in tower [ P ]. China CN1212173C, ZL03 124758. X 2005-07-27 ( in Chinese)
- 钟秦, 黄俊, 王婷茹, 等. 1997a 喷射鼓泡烟气脱硫 ( I )——化学吸收工艺的研究 [ J ]. 南京理工大学学报, 21( 5): 419—422
- Zhong Q, Huang J, Wang T R, *et al*. 1997a Jet bubbling flue gas desulfurization ( I ) —A study of chemical absorption technology [ J ]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 21( 5): 419—422 ( in Chinese)
- 钟秦, 王婷茹, 刘永奎, 等. 1997b 喷射鼓泡烟气脱硫 ( II )——在工业锅炉上的应用 [ J ]. 南京理工大学学报, 21( 5): 423—427
- Zhong Q, Wuang T R, Liu Y K. 1997b Jet bubbling flue gas desulfurization ( II ) —The application in the industrial boilers [ J ]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 21( 5): 423—427 ( in Chinese)
- 钟秦, 王婷茹. 2008 喷射鼓泡脱硫除尘装置 [ P ]. 中国, CN2235314Y, ZL95240624. 1 1996-09-18
- Zhong Q, Wuang T R. 2008 Jet bubbling desulfurization and dust removal device [ P ]. China CN2235314Y, ZL95240624. 1. 1996-09-18
- 朱晓帆, 苏仕军, 任志凌, 等. 2000. 软锰矿烟气脱硫研究 [ J ]. 四川大学学报 ( 工程科学版 ), 32( 5): 36—39
- Zhu X F, Su S J, Ren Z L, *et al*. 2000. Study on flue gas desulfurization with pyrolusite pulp [ J ]. Journal of Sichuan University ( Engineering Science Edition), 32( 5): 36—39 ( in Chinese)
- 赵毅, 李守信. 2001. 有害气体控制工程 [ M ]. 北京: 化学工业出版社. 27—49
- Zhao Y, Li S X. 2001 Control Engineering of the Harmful Gas [ M ]. Beijing Chemical Industry Press 27—49 ( in Chinese)
- 仲兆平, 金保升, 兰计香, 等. 2003. 鼓泡式脱烟气脱硫原理性实验台气体流动冷模实验 [ J ]. 热能动力工程, 18( 6): 592—596
- Zhong Z P, Jin B S, Lan J X, *et al*. 2003 Cold model tests of gas-liquid flows in a wet bubbling flue-gas desulfurization test rig [ J ]. Journal of engineering for thermal energy and power 18( 6): 592—596 ( in Chinese)
- 周至祥, 段建中, 薛建明. 2006. 火电厂湿法烟气脱硫技术手册 [ M ]. 北京: 中国电力出版社. 34—133
- Zhou Z X, Duan J Z, Xue J M. 2006 Handbook of the Wet Flue Gas Desulphurization Technology in Heat-engine Plants [ M ]. Beijing China Electric Power Press 34—133 ( in Chinese)