

# 湿法烟气脱硫旋流喷嘴雾化特性研究

李兆东<sup>1</sup>, 王世和<sup>1</sup>, 王小明<sup>2</sup>

(1. 东南大学 市政工程系, 江苏 南京 210096; 2. 国电环境保护研究所, 江苏 南京 210031)

**摘 要:** 雾化喷嘴是湿法烟气脱硫喷淋塔内的关键部件, 雾化的优劣直接影响脱硫效率和脱硫剂的利用率。试验以湿法烟气脱硫工艺中常用的空心锥偏心旋流喷嘴为对象, 研制了几何相似的系列喷嘴和仅出口直径变化的系列喷嘴, 系统研究了空心锥偏心旋流喷嘴的体积流量、雾化粒径、雾化角、雾化粒度分布等特性。试验得到体积流量随压力和喷嘴结构的变化、雾化粒径随压力、流量和喷嘴结构的变化、雾化角随压力的变化等规律, 并用平均径跨表示分散度衡量雾化粒度分布, 得到随着出口直径的增加平均径跨减小的变化规律。

**关 键 词:** 湿法脱硫; 旋流喷嘴; 雾化特性

中图分类号: X701.3

文献标识码: A

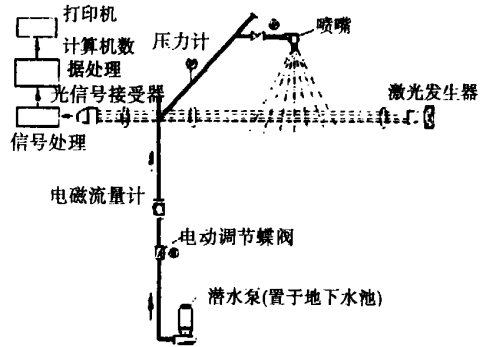


图 1 试验台原理图

## 1 引 言

石灰石/石灰—石膏湿法脱硫是目前的主流烟气脱硫工艺, 其核心设备是脱硫吸收塔, 较常用的塔型是喷淋塔<sup>[1]</sup>。雾化喷嘴是喷淋塔内的关键部件, 雾化的优劣直接影响脱硫效率和脱硫剂的利用率。通常多用旋流压力式喷嘴, 其中空心锥旋流喷嘴最为常见, 系统地研究旋流喷嘴雾化特性对湿法烟气脱硫工艺的国产化具有重要的现实意义。

## 2 试验系统与工作原理

试验系统由地下水池、潜水泵、管路、阀部件、流量计、激光液滴分析仪和数据处理系统等组成(见图 1)。

潜水泵将地下水池内的喷淋液(清水)经由电磁流量计打入喷嘴, 经喷嘴雾化后汇流返回水池。喷嘴前的液体压力由每个喷嘴前的压力传感器测量, 流量由总管路上的电磁流量计计量, 雾滴直径由英国马尔文公司生产的 MAM5005 激光粒径分析仪分析, 雾化角由数码成像后分析。

## 3 试验喷嘴

石灰石/石灰浆为固液两相流体, 浓度高、粘度大、雾化难, 为此要求喷嘴应具有良好的雾化性能和防堵性能。试验以空心锥偏心旋流喷嘴为对象, 喷嘴结构如图 2 所示。此种喷嘴的结构特点是自由通道尺寸大、喷嘴无内部分离部件, 具有能耗小、流量大、磨损低等优点。

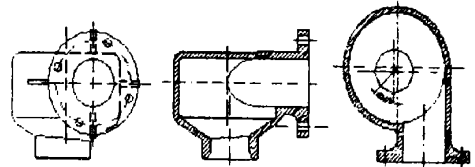


图 2 空心锥偏心旋流喷嘴结构示意图

试验中, 按几何相似理论研制了 5 种口径的喷嘴(D40、D50、D60、D80 和 D100), 再在腔体尺寸不变, 仅改变出口直径设计了 3 种出口直径的喷嘴(D60-36、D60-45 和 D60-54), 试验研究其雾化性能。

收稿日期: 2005-04-14; 修订日期: 2005-08-23

基金项目: 国家高技术研究发展计划(836)基金资助项目(2001AA642020)

作者简介: 李兆东(1973-), 男, 安徽来安人, 东南大学工程师, 博士研究生。

### 4 试验结果及分析

雾化质量的好坏直接影响脱硫效率和脱硫剂的利用率。为了综合衡量与评价喷嘴雾化性能, 一般采用的雾化性能参数有: 流量密度、雾化角、雾化粒径和雾滴粒度分布等<sup>[2-3]</sup>。

#### 4.1 体积流量的变化规律

体积流量表示单位时间内流经喷嘴的液体体积, 是反映喷嘴特性的最基本、最重要的参数之一。本试验将所测得的各喷嘴实际流量值与相应的喷射压力的平方根值绘制曲线, 利用多项式进行拟合, 喷嘴的拟合曲线(即流量—压力关系曲线)可以统一表示为如下公式:

$$Q = A + B_1 \sqrt{p} + B_2 p \quad (1)$$

式中:  $p$ —喷射压力, kPa;  $Q$ —喷嘴体积流量,  $m^3/h$ ;  $A$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ —体积流量系数, 不同的喷嘴系数值不同。

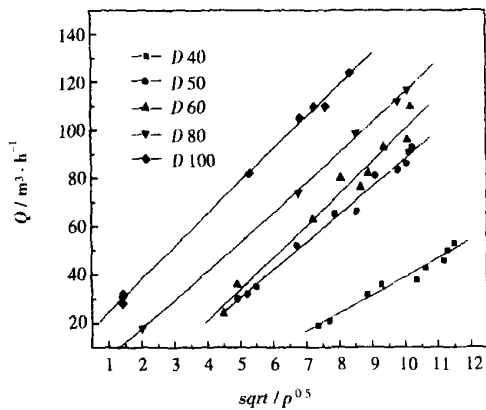


图 3 流量—压力关系曲线 (喷嘴结构几何相似)

图 3 中的 5 种喷嘴是按几何相似设计。在相同压力下, 进出口直径大的喷嘴流量大, 喷嘴的最大流量随进出口直径的增加而增大。当直径大于  $D50$  后曲线斜率近乎相同, 说明几何相似的喷嘴其流量随压力的增长在很宽的范围内具有相似性; 当进出口直径减小到  $D40$  时, 这种增长则变得平缓, 高压时压力的升高对体积流量的改变则更不明显。因此, 在空心锥偏心旋流喷嘴设计时, 需考虑进出口直径的范围, 进出口直径减小到一定值时会使这种喷嘴的流量系数  $B_1$  值减小, 要得到相同流量则必须付出更高的压力, 使能耗增加, 运行经济性降低。由图 4 可见: 随着喷孔直径的加大流量增加, 曲线的斜率略有增大; 而  $D60-45$  和  $D60-54$  曲线几乎重

合, 这表明, 喷孔直径在一定范围内变化, 不会影响空心锥偏心旋流喷嘴的流量—压力特性, 但喷孔直径的加大可以增加最大流量。

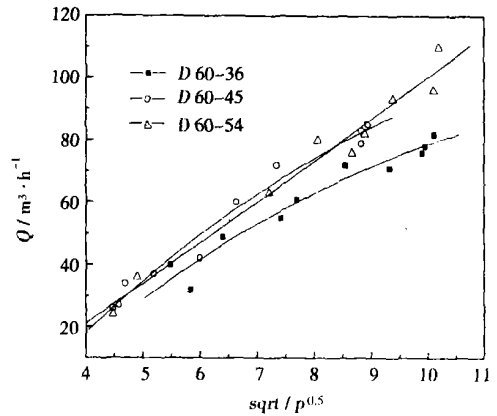


图 4 流量—压力曲线 (仅出口直径不同)

#### 4.2 雾化粒径的变化规律

在研究喷嘴雾化特性时, 最重要的指标之一是雾化粒径。湿法烟气脱硫的雾化粒径一般约在  $1\ 300 \sim 3\ 000\ \mu m$  之间。试验中采用 SMD 直径来衡量雾化粒径。

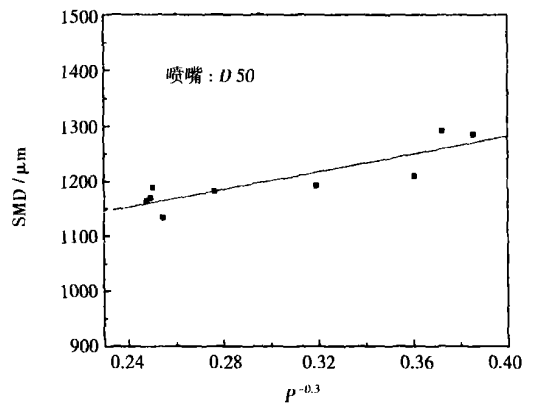


图 5 SMD—喷雾压力关系曲线

图 5 表明, 试验喷嘴的 SMD 直径与  $p^{-0.3}$  近似成线性关系, 测点在高压处分布较为密集, 说明压力升高到一定程度后, 压力对粒径的作用已不明显。由图 6 可见, SMD 压力拟合曲线的斜率随喷嘴出口直径的增大是先增大后减小, 这说明旋流喷嘴雾化粒径对压力的敏感程度随结构参数而变化; 在出口直径约  $60\ mm$  时, 压力的变化对雾化粒径产生的作用最明显, 通过改变压力可以有效地改变雾化粒径。

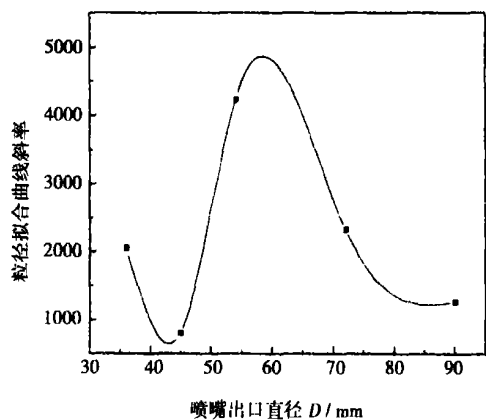


图 6 粒径拟合曲线斜率—出口直径关系曲线

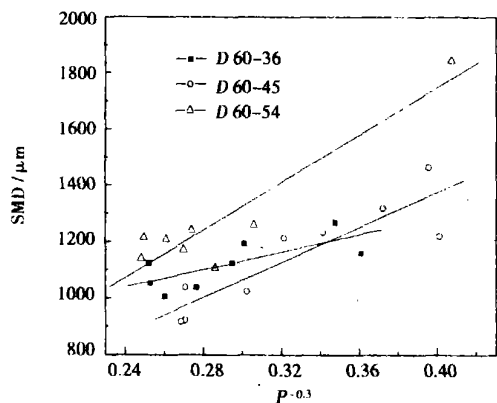


图 7 SMD—雾化压力关系曲线 (喷孔直径不同)

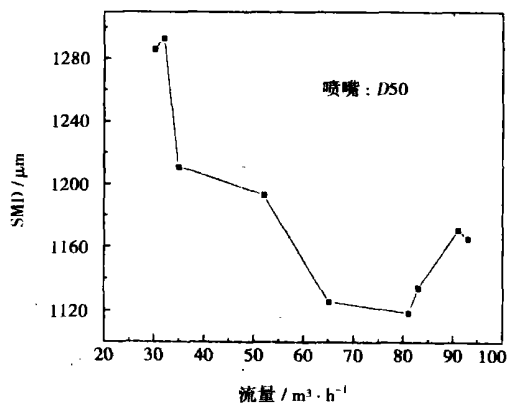


图 8 SMD—流量关系曲线

图 7 中,随着喷孔直径的减小,拟合曲线的斜率减小。旋流喷嘴雾化粒径对压力的敏感度降低,可见,仅改变出口直径也可影响雾化粒径。从图 8 中曲线可以

看出,雾化粒径随流量的增大是先减小后增大。

### 4.3 雾化角的变化规律

不同喷嘴的压力—雾化角关系比较如图 9 所示。可见,喷嘴的雾化角随压力的变化不大,几何相似时 D80 喷嘴的雾化角(约 90°)比 D50 喷嘴的雾化角(约 80°)大。从图 10 可以看出,仅出口直径变化时雾化角随压力的变化规律基本一致,3 条曲线几乎重合,这说明仅改变出口直径对雾化角的影响不大。旋流喷嘴结构参数的变化对雾化角的影响较小,且在较大的运行压力变幅内保持稳定,避免了脱硫塔负荷变化时,因雾化角变化而造成的气流短路现象。

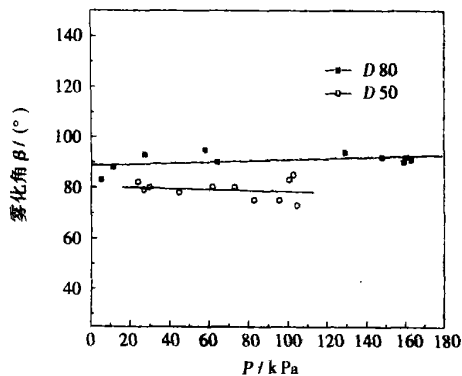


图 9 雾化角与压力关系曲线

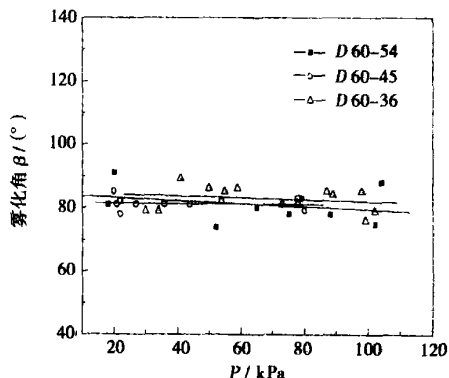


图 10 出口直径变化雾化角变化曲线

### 4.4 雾滴粒度分布规律

雾滴粒度分布采用分散度作为指标来综合判断和评价,并用径跨 SPAN 表示分散度<sup>[4]</sup>。其定义为:

$$SPAN = \frac{d_{0.9} - d_{0.1}}{d_{0.5}} \quad (2)$$

其中:  $d_{0.1}$ 、 $d_{0.5}$ 、 $d_{0.9}$ —直径小于  $d_{0.1}$ 、 $d_{0.5}$ 、 $d_{0.9}$  的液滴的质量百分数分别为 10%、50%、90%。因此,径跨越大,分散度越大,雾化质量越差。

为了综合衡量分散度, 引入平均径跨  $\overline{SPAN}$  的概念, 即用流量加权平均数表示  $\overline{SPAN}$ :

$$\overline{SPAN} = \frac{\sum_i Q_i (SPAN)_i}{\sum_i Q_i} \quad (3)$$

几何相似各喷嘴的平均径跨  $\overline{SPAN}$  整理如图 11 所示。

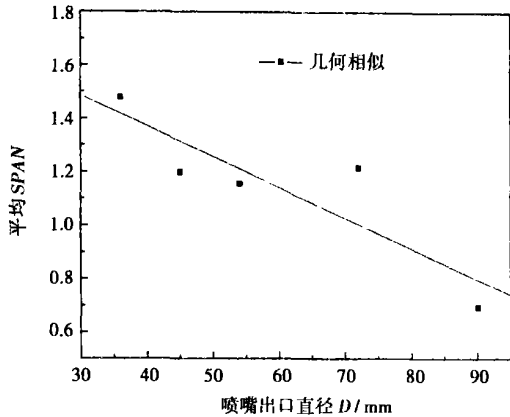


图 11 平均径跨随出口直径变化曲线图

由图可以看出, 几何相似喷嘴随出口直径的增加平均径跨  $\overline{SPAN}$  减小, 分散度减小, 雾化质量提高。这是由于进出口直径大, 液体在旋流腔的旋转时间长, 流动稳定性好, 液膜形成较均匀, 出流散裂较好。可见喷嘴结构参数对粒径分布均匀性影响较大。

## 5 结 论

通过对空心锥偏心旋流喷嘴的试验研究可以得到如下结论:

(1) 旋流喷嘴结构参数对雾化特性的影响较大, 可以通过改变其结构优化雾化特性。

(2) 旋流喷嘴体积流量与压力的平方根成线性关系。在几何相似时, 流量随压力的变化遵循相似规律; 在仅喷孔直径变化时, 随孔径的增加流量压力曲线斜率增加。为保证此种喷嘴运行经济性, 进出口直径应控制在一定范围内。

(3) 雾化粒径随压力增加而减小, 高压时压力对改变粒径的作用不明显; 在出口直径约 60 mm 时, 雾化粒径对压力的变化最敏感。仅喷孔直径变化时, 随着喷孔直径的减小, 旋流喷嘴雾化粒径对压力的敏感度降低。雾化粒径随流量先减小后增大。

(4) 雾化角随压力的变化不明显。相同压力下, 仅出口直径变化时雾化角基本不变。

(5) 采用径跨来分析雾化粒度分布, 得到如下规律: 随着出口直径的增加平均径跨  $\overline{SPAN}$  减小, 分散度减小, 雾化质量提高, 即大口径旋流喷嘴的雾化质量较好。

## 参考文献:

- [1] 郝吉明, 马广大. 大气污染控制工程[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [2] 马斯托思 K. 喷雾干燥手册[M]. 黄照柏, 冯尔健, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
- [3] 岑可法, 姚强, 曹欣玉, 等. 煤浆燃烧、流动、传热和气化的理论与应用技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997.
- [4] 谢明湖. 高粘度液体液料 Y 型喷嘴的雾化机理及其雾化性能研究[J]. 工程热物理学报, 1992, 13(4): 425-430.

(何静芳 编辑)

(上接第 65 页)

本文对气固两相流音速与激波进行了分析计算, 并与 Jackson 模型作了对比, 得到以下结论:

(1) 气固两相流音速比单相的音速低的多, 在气相体积比为 50% 附近出现最小值;

(2) 采用两相音速模型分析两相流激波, 比用单相音速模型所得的结果更合理, 适用性更广。

## 参考文献:

- [1] ALKIMOV A P, KOSAREV V F, POPYRIN A N. A method of cold gas dynamic deposition[J]. Dokl Akad Nauk SSSR 1990 315(5): 1062-1065.
- [2] VAN STEENKISTE T H, SMITH J R, TEETS R E, et al. Kinetic spray coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 1999 111: 62-71.
- [3] VAN STEENKISTE T H, SMITH J R, TEETS R E. Aluminum coatings

via kinetic spray with relatively large powder particles[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 154: 237-252.

- [4] 普朗特 L. 流体力学概论[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [5] 赵良举. 非平衡两相热流体的流动、激波及其应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
- [6] JACKSON C R, LEAR W E, SHERIF S A. Generalized wave analysis of two-phase flow[J]. Mechanics Research Communications, 1998, 25(6): 613-622.
- [7] ZENG DANLING, ZHAO LIANGJU. Sound velocity in vapor-liquid two-phase fluid system[A]. Proceedings of ICECA[C]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press 2001. 50-55.
- [8] 徐进良, 陈听宽. 汽液两相流中的声速研究[J]. 西安交通大学学报, 1994, 28(5): 73-81.
- [9] 刘大有. 两相速度平衡条件下的两相流声速[J]. 力学学报, 1990 22(6): 660-669.

(何静芳 编辑)

sults. In view of the above, the shock wave analysis based on the two-phase flow sonic velocity model is more suited for general applications. **Key words:** gas-solid two phase flow, sonic velocity, shock wave

**湿法烟气脱硫旋流喷嘴雾化特性研究 = A Study of the Atomization Characteristics of Swirl Spray Nozzles Used in a Wet-process Flue-gas Desulfurization Unit** [刊, 汉] / LI Zhao-dong, WANG Shi-he (Department of Municipal Construction Engineering, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), WANG Xiao-ming (Guodian Environmental Protection Research Institute, Nanjing, China, Post Code: 210031) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 66 ~ 69

Atomization spray nozzles are key components in a wet-process flue-gas desulfurization sprinkling tower. The quality of atomization can directly affect desulfurization efficiency and the utilization rate of a desulfurization agent. Tests were conducted with the hollow cone-shaped and eccentric swirl nozzle often used in wet-process flue-gas desulfurization technology serving as an object of investigation. Developed were a series of geometrically similar spray nozzles and also those with a change only in outlet diameters. A systematic study was performed of the above-mentioned nozzle as regards the following characteristics: volumetric flow rate, atomization particle diameter, atomization angle, and atomization particle distribution, etc. From the tests a set of rules or laws governing the following factors were obtained: the variation of volumetric flow rate with a change in pressure and spray nozzle structure, the variation of atomization particle diameter with a change in pressure, flow rate and spray nozzle structure, the variation of atomization angle with a change in pressure, etc. Average-diameter span was used to indicate the dispersion degree for judging the distribution of atomization particles. Identified was a variation law governing a decrease in average diameter span with an increase in outlet diameter. **Key words:** wet-process flue gas desulfurization, swirl nozzle, atomization characteristics

**新型下排气旋风分离器的流场和性能数值模拟 = Numerical Simulation of the Flow Field and Performance of an Innovative Cyclone Separator with a Downward Discharge of Gases** [刊, 汉] / HUANG Sheng-zhu (Department of Thermal Energy & Power Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai, Shandong Province, China, Post Code: 264209), ZHU Lin (Weihai Boiler Works, Weihai, Shandong Province, China, Post Code: 264200), MA Chun-yuan (Institute of Energy and Power Engineering under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061), WU Shao-hua (Department of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 70 ~ 74

By employing a RNG (Renormalization Group)  $k-\epsilon$  turbulent flow model, RSM (Reynolds Stress model) turbulent flow model and a Lagrangian model in a CFD (computational fluid dynamics) software - Fluent a numerical simulation was carried out for the gas-phase flow field and separation efficiency of an innovative cyclone separator with a downward discharge of gases. The cyclone separator features an improved construction with its two sides cut at the inside and outside. An analysis of its specific features and separation performance shows that the gas flow of the cyclone separator has generated three branch flows, namely, an apex vortex ring flow, a flow characterized by a direct entry into an exhaust pipe, and a flow, which after rotating at the outer wall makes its way downward to come to a conic surface, and then turns back to flow upward. The composite vortex structure of a tangential velocity distribution appears to be not distinct. The graded efficiency and pressure losses at different outlet velocities, obtained by simulations, can be used as a practical reference during the engineering design and type selection of cyclone separators. **Key words:** cyclone separator, flow field, RNG (renormalization group)  $k-\epsilon$  turbulent flow model, RSM (Reynolds stress model) turbulent model, numerical simulation

**PEMFC 分布式发电系统动态协调控制仿真 = Dynamic Simulation of Coordinated Control of PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) Distributed Power Generation System** [刊, 汉] / ZHANG Ying-ying, CAO Guang-yi, ZHU Xin-jian (Automation Department of Fuel Cell Research Institute under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 75 ~ 79, 95