

## 石灰浆液雾化喷嘴及其特性研究

王乃华, 高翔, 骆仲泐, 王庆东, 岑可法

(浙江大学热能工程研究所, 浙江杭州 310027)

**摘要:** 对一种双流体石灰浆液雾化喷嘴的雾化特性进行了实验研究。分析了各因素对雾化角、雾滴粒径分布的影响规律, 得到了预测雾滴平均粒径的经验公式。结果表明, 该喷嘴能耗低, 雾化效果好, 非常适用于半干法烟气脱硫。

**关键词:** 喷嘴; 雾化特性; 脱硫工艺

中图分类号: TK224.1 文献标识码: A

## 1 引言

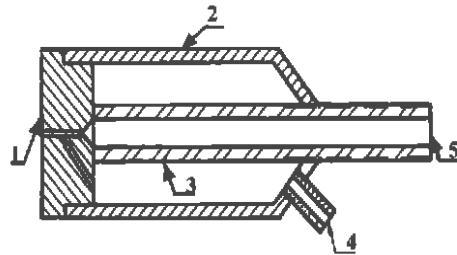
目前正在运行的烟气脱硫装置主要是石灰/石灰石湿法工艺。最近, 半干法脱硫工艺越来越引起人们的关注。半干法烟气脱硫工艺几乎无一例外地涉及到喷嘴雾化。炉内喷钙尾部增湿脱硫工艺和循环流化床脱硫工艺要用雾化喷嘴给烟气增湿。石灰浆雾化喷嘴则是喷雾干燥烟气脱硫装置的核心部件。喷嘴雾化浆滴的粒径分布及雾化角的大小对烟气脱硫有着重要的影响。太小的浆滴蒸发过快, 会导致脱硫反应很快进入降速反应区段; 太大的浆滴则反应时间过长, 反应产物干燥不充分, 会加大脱硫灰渣处理的难度。雾化角如果过大, 则容易造成运行过程中浆滴贴壁现象, 过小则会造成气液混合不够均匀。因此对喷嘴的雾化特性进行详细的研究, 具有非常重要的意义。

双流体喷嘴可以产生高度均匀且粒度小的料雾, 但由于双流体喷嘴能耗高, 因此在使用中受到了很大限制<sup>[1~4]</sup>。本文研制了一种新型低能耗的双流体雾化喷嘴, 利用 FAM 激光测粒仪对这种双流体雾化喷嘴进行了详细的实验研究以了解喷嘴的雾化性能。

## 2 石灰浆液雾化喷嘴

石灰浆是固液两相体, 浓度高、粘度大、雾化困难。喷嘴性能的好坏直接影响到石灰浆的雾化质量, 所以对石灰浆的雾化喷嘴要求很高, 石灰浆喷嘴应该具有良好的防堵性能和雾化性能, 其气率应较

低。



1—喷嘴底盘; 2—外筒; 3—进液管; 4—进气孔;  
5—液孔

图 1 喷嘴结构简图

本文采用一种 Y 型喷嘴, 其结构示意图如图 1 所示。石灰浆液和高速气流在 Y 型喷嘴内相交冲击而

混合均匀, 一冲出喷嘴立即雾化。这种喷嘴的优点在于利用不高的雾化压力和流量能够产生非常一致的小直径颗粒。

## 3 试验装置及测试方法

实验系统如图 2 所示。它包括三部分, 第一部分是石灰供浆系统, 石灰浆由螺杆泵进入喷嘴喷出。在进入浆泵之前, 为了防止灰浆中混入的杂质或软沉淀块进入浆泵, 在浆罐内增设滤网。第二部分是雾化介质系统, 空气经减压阀, 流量调节阀, 流量计进入喷嘴。第三部分是测量系统, 液体、气体流量由转子流量计测量, 压力利用 0.4 级的标准压力表来测量, 颗粒分布的测量采用 FAM 型衍射式激光测粒仪测定, 其原理参见文献[3~4], 雾化角采用照相法直接测定。

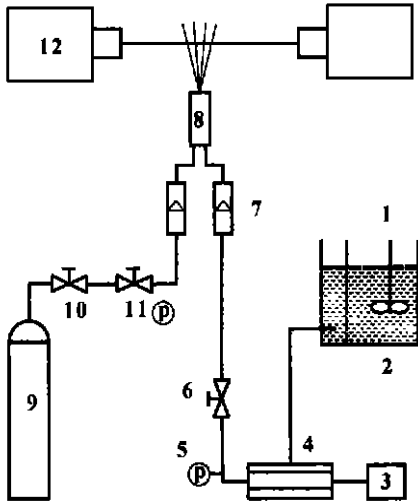
Sauter 平均直径  $SMD$  最适用于研究传热和传质过程。

$$SMD = \frac{\sum(N_i d_i^3)}{\sum(N_i d_i^2)} \quad (1)$$

式中,  $N_i$ —直径为  $d_i$  的液滴数。

本实验主要分析气液质量比以及浆液浓度对雾化特性的影响。本实验喷嘴设计流量为  $Q = 100$

kg/h。浆液浓度  $C_s$  分别为 0(清水)、5%、10%、20%。



1— 搅拌机; 2— 浆池; 3— 调速电机; 4— 螺杆泵; 5— 浆液压力表; 6— 球阀; 7— 转子流量计; 8— Y型喷嘴; 9— 空气罐; 10— 空气减压阀; 11— 调节阀; 12— FAM 激光测粒仪

图 2 实验系统图

### 4 实验结果及分析

雾化质量的好坏对于脱硫效率和反应器的结构尺寸都有很大的影响。为了评价喷嘴雾化质量的优劣, 必须有反映雾化性能的质量指标。雾化质量指标主要有: 喷嘴雾化角、雾化颗粒细度、雾化颗粒均匀度、流量密度和雾炬的射程等。

#### 4.1 雾化角

雾化角的大小对反应器有很大的影响, 雾化角过大浆液会喷射到反应器壁面, 造成严重的贴壁现象。雾化角过小则会导致反应器内传质过程减弱, 影响脱硫效率。研究表明, 该喷嘴的雾化角较小, 影响雾化角的因素主要为气液质量之比, 而石灰浆浓度影响较小。如图 3 所示, 雾化角的范围在  $15 \sim 30^\circ$  之间, 最大雾化角发生在气液比最小的工况。增大气液比, 雾化角减小。这是因为随着气耗率的增加, 颗粒所具有的初速度增大, 横向脉动相对减小, 颗粒越不易向两边扩散。

#### 4.2 液滴粒径分布

气液质量比  $q$  是影响平均雾滴粒度的一个重要参数。由图 4 可见, 平均直径  $SMD$  (距喷嘴出口 500 mm 处) 随着气耗率的增大而下降。  $q$  的值介于 0.01 ~ 0.3 之间。  $q$  小于 0.01 时, 即使对于象水一样易于雾化的介质, 雾化情况也会很快恶化。  $q$  超过 0.3 只

能是浪费能量而达不到明显减小雾滴粒径的效果。  $q$  增加一方面增加了气液两相之间的动量比和相对速度, 增加了气体对液膜及液滴的破碎效果; 另一方面导致了最大液膜厚度减小而产生较细的液滴。

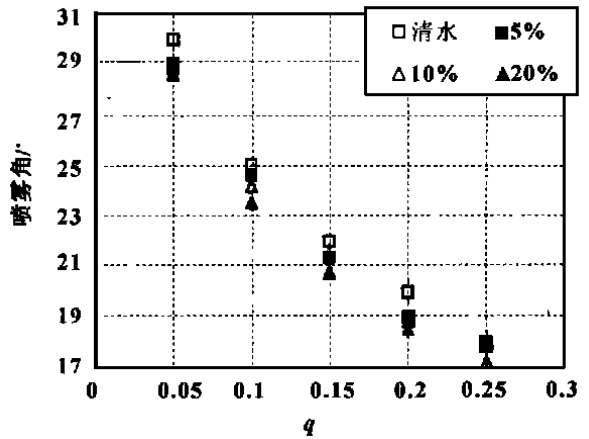


图 3 雾化角与气液比和雾化压力的关系

由图 4 可见, 石灰浆浓度的变化对雾化质量影响很大。浓度越高, 雾化粒径就越粗。这是符合能量守恒的, 因为浓度高者粘度大, 要将液滴破碎必须提供较高的能量。无论是水还是不同浓度的石灰浆, 平均粒径  $SMD$  随着气耗率的变化规律是一致的, 即提高气耗率有利于雾化质量的改善。

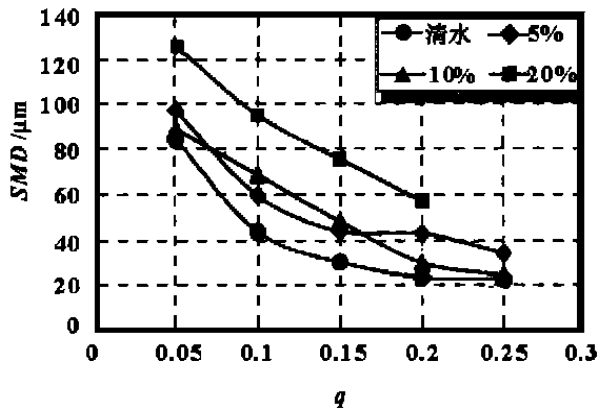


图 4 浓度对浆滴平均粒径的影响

由于水是单相流体, 粘度小, 易于雾化。在相同条件下,  $SMD$  很小且变化范围窄(一般在  $20 \sim 100 \mu\text{m}$  之间)。而石灰浆则随着工况的改变,  $SMD$  显著变化。根据喷嘴雾化过程的动量平衡和能量平衡<sup>[5]</sup> 有:  $SMD \propto (1 + q^{-1})$ 。对上述实验数据进行回归, 给出以下预测粒子平均直径的计算式:

$$SMD = 2.1C_s + 3.79(1 + q^{-1}) \quad (2)$$

上式适用范围为:  $Q \geq 40 \text{ kg/h}$ ,  $0 \leq C_s \leq 20\%$ ,  $0.05 \leq q \leq 0.3$ 。上式与实验数据的相关系数为 0.90。93% 的预测值与实验值相对偏差在  $\pm 15\%$  以内。

#### 4.3 石灰浆的雾化粒度的空间分布

石灰浆的雾化粒度的空间分布主要包括颗粒的轴向分布和径向分布。

##### 4.3.1 轴向分布

随着测量位置距喷嘴出口距离的增大, 雾化平均粒径  $SMD$  增加(石灰浆浓度为 10%)。雾炬特性参数随轴向距离的变化可以认为与下列因素有关: (1) 颗粒多重散射的影响。颗粒多重散射的影响与光程长度, 液滴尺寸以及液滴浓度有关。但当遮光度在 0.2 ~ 0.5 之间时, 多重散射的影响一般可以忽略。(2) 雾化液滴的蒸发。雾化液滴的蒸发速率是与液滴大小有关, 在相同条件下, 由于微小液滴的蒸发速度大于粗液滴的蒸发速度, 因而引起  $SMD$  变大, 但在冷态情况下, 这种影响可以忽略。(3) 液滴的相互碰撞复合。液滴的相互碰撞复合是由于喷嘴出口雾炬的相互干扰所引起的。(4) 雾化液滴的射程。在上述这些影响因素中雾化液滴的射程是影响液滴平均直径沿轴向距离增大的主要因素。这是因为液滴射程与液滴直径有关, 液滴直径越大其速度的衰减就越缓慢, 射程就越远, 反之就越短。因此随着轴向距离的增大, 在雾炬中直径大的液滴所占的比例就越多, 液滴平均直径  $SMD$  就越大。

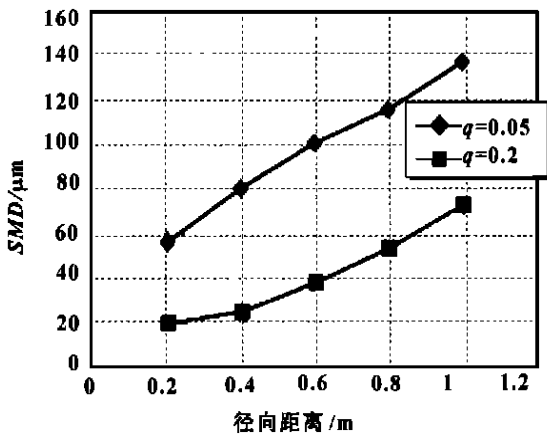


图5 雾化粒度的轴向分布

##### 4.3.2 径向分布

石灰浆喷嘴雾化粒度的径向分布如图6所示。测量条件为: 测量距离 500 mm, 石灰浆浓度 10%。

由图6可知, 雾化颗粒直径沿雾炬径向存在一

个最大值, 其最大值出现在雾炬主流区, 并且随着气耗率的增加最大值所处的位置向外偏移。这是因为大颗粒所具有的惯性力大, 横向脉动速度小, 颗粒不容易向两边扩散。随着距主流区距离的增大, 液滴浓度越低, 激光所能测到的是一些横向脉动速度较大的并弥散于主流区周围的细液滴的缘故。因此相对而言, 在雾炬主流区域内, 大颗粒所占的比例比其他任何区域都高, 从而在这区域内雾化平均粒径出现最大值。另一方面随着气耗率的增加, 雾化颗粒所具有的动量增大, 在同一轴向距离的截面上, 雾炬向内收缩的程度下降, 雾炬主流区向外扩展, 因此雾化平均粒径最大值所处的位置自然向外偏移。

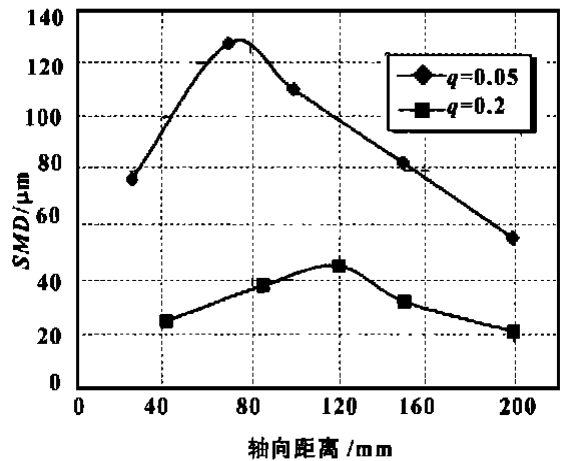


图6 径向粒径分布

由此可见, 颗粒粒径的径向分布规律是随着径向距离的增大, 雾化粒径先增大, 当达到某一最大值后开始减小, 在雾炬外边界雾化粒径趋于零。

在石灰浆雾炬中心, 由于雾化液滴浓度低, 遮光率不足 0.1, 信噪比很小, 因此测量仪无法测出雾炬中心液滴的平均直径。

## 5 结论

通过对脱硫灰浆喷嘴雾化特性试验结果的分析, 可以得到以下几点结论。

(1) 喷嘴的雾化角较小, 一般在  $15 \sim 30^\circ$  之间。气液质量之比增加雾化角减小, 而石灰浆浓度对雾化角影响较小。

(2) 气液质量比和浓度是影响平均雾滴粒度的主要参数。气液质量比的增大, 液滴平均直径  $SMD$

(下转第 254 页)

从公式中可以看到, 颗粒阻力系数和两相速度差越小, 气固密度比和粒子直径越大, 则离心系数越大, 也就是说越不容易随气流一同折向穿过叶片间进入下一次风道, 因此离心系数是可调式煤粉分配器工作性能的一个重要指标。

## 5 结论

(1) 对可调式煤粉分配器进行了机理分析, 表明离心系数是可调式煤粉分配器工作性能的一个重要指标。

(2) 通过试验表明, 该分配器对下一次风中的大颗粒含量的减少都是显著的。它能在基本不改变磨煤机出力, 保持原有锅炉上中下各一次风燃料分配的情况下, 当叶片数为两片时, 提高下一次风粉粒度分布均匀性系数最高达 13.6%。减少下一次风大颗粒的煤粉的煤粉含量最高达 61%, 减少下一次风大颗粒的碳化硅含量最高达 54%。

(3) 煤粉分配器能根据锅炉燃烧煤种的变化来调整其运行工况, 减少由于煤种的变化对锅炉燃烧带来的负面影响, 即这种新型的煤粉分配器通过叶片角度的改变来调整锅炉燃烧的方法是可行。

### 参考文献:

- [1] 史洪启. 双辽发电厂二号炉燃烧调整试验[R]. 吉林: 吉林电力科学研究所, 1998.
- [2] 苗长信, 李凯, 李建生. 鳍片分离式浓淡燃烧器的开发与应用[J]. 热能动力工程, 1997, 12(6): 448-451.
- [3] 高绥强. 可调式煤粉分配器的冷态模化实验研究[D]. 吉林: 东北电力学院, 1998.
- [4] 徐明厚. 一维炉高浓度煤粉试验研究[J]. 工程热物理学报, 1993, 14(2): 214-218.
- [5] 李公博, 温龙. 塔型飞灰浓缩器分离机理的探讨[J]. 热能动力工程, 1997, 12(2): 86-90.
- [6] YARIN L P, HETSRONI G. Turbulence intensity in dilute two-phase flow-1, effect of particle-size distribution on the turbulence of the carrier fluid[J]. Int J Multiphase Flow, 1994 20(1): 1-15.

(何静芳 编辑)

(上接第 249 页)

减小; 浓度增加, 液滴平均直径  $SMD$  增加。对于本喷嘴,  $q$  在 0.05 ~ 0.3 的范围内可获得良好的雾化效果。

(3) 随着测量位置距喷嘴出口距离的增大, 雾化平均粒径  $SMD$  增加。这主要是因为不同粒径的液滴具有不同的射程, 大直径液滴的射程较远所致。

(4) 颗粒粒径的径向分布规律是随着径向距离的增大, 雾化粒径先增大后减小, 在雾炬外边界雾化粒径趋于零。

(5) 该喷嘴在气耗率  $q$  大于 0.05 即可获得满意的雾化效果, 雾化粒径在 20 ~ 100  $\mu\text{m}$  范围内。因此可以认为, 该 Y 型喷嘴具有较好的性能, 在半干法烟气脱硫领域具有广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] MASTERS K. Spray drying handbook[M]. George Godwin Limited, 1986.
- [2] WAIZEL P. Liquid atomization[J]. International Chemical Engineering 1993, 33(1): 46-60.
- [3] 王乃宁. FAM 激光测粒仪[J]. 上海机械学院学报, 1990, 12(2): 1-10.
- [4] 刘治国. 脱硫后排烟对烟筒的影响及半干法烟气脱硫的实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.
- [5] TSAI S C, GHAZMORAD K, VIERS B. Airblast atomization of micronized coal slimes using twin-fluid jet atomizer[J]. Fuel, 1991, 70: 483-490.

(何静芳 编辑)

# 欢迎订购《热能动力工程》

avoidance of abrupt rise in wall temperature, thus contributing to a relatively high operation safety. **Key words:** segregation type heat pipe, small-diameter spiral tube, average heat exchange factor, critical heat flux density

石灰浆液雾化喷嘴及其特性研究= **The Study of a Lime Slurry Atomization Nozzle and Its Characteristics** [刊, 汉] / WANG Nai-hua, GAO Xiang, LUO Zhong-yang, et al (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang Province, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 247 ~ 249, 254

An experimental study was conducted of the atomization characteristics of a Y-shaped twin-fluid nozzle used for lime slurry atomization. An analysis was performed of the various factors liable to influence the atomization angle and the distribution of Sauter mean diameter (SMD) of the atomized spray drop. An empiric formula for predicting spray-drop average diameter has also been obtained. The results of the study indicate that the nozzle under investigation features low power consumption and high atomization effectiveness, making it especially suitable for flue gas desulfurization based on a semi-dry method. **Key words:** nozzle, atomization characteristics

可调式煤粉分配器冷态模化试验及理论分析= **Cold Modeling Test and Theoretical Analysis of an Adjustable Pulverized-coal Distribution Device** [刊, 汉] / ZHOU Yun-long, GAO Shui-qiang (Power Engineering Department, Northeast Electric Power Institute, Jilin, Jilin Province, China, Post Code: 132012), SHI Hong-qi (Jilin Research Institute of Electric Power Science, Changchun, Jilin Province, China, Post Code: 130024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 250 ~ 254

Proposed in this paper is a new type of adjustable pulverized-coal distribution device. Based on a theoretical analysis of the pulverized-coal distribution device the authors have conducted an in-depth experimental investigation. The investigation results have confirmed the feasibility of this new type of pulverized-coal distribution device, which regulates the combustion process of a boiler through a blade angle change of the distribution device. **Key words:** pulverized coal distribution device, experimental study

电站锅炉燃气脉冲除灰过程研究= **A Study of Gas Pulsation-based Ash Removal Process in Utility Boilers** [刊, 汉] / FAN Wei-jun, SUN Wen-chao, WU Cheng-kang (Beijing Astronautics and Aeronautics University, Beijing, China, Post Code: 100083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 255 ~ 258, 277

The burning of huge amount of inferior-quality unwashed coals in Chinese utility boilers has led to serious boiler ash-deposit and related fouling problems. The latter can result in a reduction of boiler thermal efficiency and cause the clogging of the boiler rear flue pass, thus affecting the normal operation of the boiler. The gas pulsation-based ash removal technology was developed by the combustion lab of a Mechanics Research Institute under the Chinese Academy of Sciences. Its use on 30-plus large-sized utility boilers has proved to be very effective. In the present paper the study results of the above-cited technology are reported. They cover a variety of aspects. These include the influence of furnace configuration and fuel on the flame propagation and pressure pulses, the measurement by the use of pressure sensors of the gas pulse pressure distribution at the outlet flow field, and the observation of gas pulse intensity and its action range. In addition, also touched upon were the vibration measurement of ash deposit plate with the help of a vibration sensor and the variation of vibration accelerations at various spatial locations. From the above one can readily gain a better understanding of the mechanism of the gas pulsation-based ash removal action. **Key words:** gas pulsation, explosive burning, soot blower

煤焦再燃过程中催化剂对 NO 还原的影响= **The Effect of Catalysts on NO Reduction during the Reburning of Coal Chars** [刊, 汉] / ZHONG Bei-jing, SHI Wei-wei, FU Wei-biao (Engineering Mechanics Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 259 ~ 262, 274

With three kinds of coal char made from Xianglongtan lignite, Fulaerki lignite and Datong bituminous coal serving as re-burning coals a study was conducted of the effect of these coal chars on the process of NO reduction in the reburning zone. Also analyzed was the effect of metallic oxides in the coal ash on the NO reduction. To study the catalytic action of