

## 水煤浆多级喷嘴的雾化和流动特性

原 鲲<sup>1</sup>, 陈丽芳<sup>2</sup>, 吴承康<sup>2</sup>

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 研究了一种多级气动喷嘴对水煤浆燃料的喷雾特性的影响. 采用实验方法研究了水煤浆性质、喷嘴操作工况和喷嘴几何结构对射流雾化细度的影响. 对喷嘴出口附近的两相流场进行了数值计算, 并针对相关结果进行了分析. 研究结果证明, 该喷嘴对水煤浆燃料有很好的雾化性能, 并为喷嘴的进一步优化提供参考数据.

**关键词:** 水煤浆; 雾化; 气动喷嘴

中图分类号: TK16

文献标识码: A

文章编号: 1006-8740(2003)01-0077-04

### Atomization and Spray Characteristics of a Multi-Stage Airblast Nozzle for Coal-Water Slurry

YUAN Kun<sup>1</sup>, CHEN Li-fang<sup>2</sup>, WU Cheng-kang<sup>2</sup>

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Spray characteristics of a multi-stage airblast nozzle designed for coal-water slurry (CWS) were studied in this paper. Factors affecting the atomizing performance were studied experimentally, including properties of CWS in terms of apparent viscosity, operating conditions and geometric structure of the nozzle. The two-phase flow field in the vicinity of the nozzle orifice was studied numerically. The result demonstrated high performance of the multi-stage nozzle, and provided quantitative reference for further optimization of the nozzle.

**Keywords:** coal-water slurry; atomization; airblast nozzle

水煤浆是国际上 20 世纪 70 年代末发展起来的以煤代油的新型燃料. 和石油相比, 水煤浆作为煤基燃料, 可以像石油一样进行储存、运输和燃烧, 却具有低廉得多的产品成本, 对于缓解中国石油短缺的现状尤其具有重要的战略意义. 和煤粉相比, 水煤浆具有和煤粉相当的燃烧效率, 较低的污染物排放和清洁输运特性. 作为经济型清洁燃料, 水煤浆一出现就得到中国政府有关部门和科研机构的高度重视, 经过近 20 年的发展, 现已达到工业应用水平.

水煤浆在燃烧之前须进行雾化. 水煤浆雾化为细小液滴后, 表面积得到极大提高, 有利于提高燃烧时热和质的交换速率, 加快燃烧过程, 提高燃烧效率, 增进燃烧稳定性. 然而, 水煤浆的特殊性质和物理组成给自

身的雾化带来了难题: 1) 水煤浆是高浓度的煤粒悬浮体, 在传统的燃油喷嘴中容易发生堵塞和磨损; 2) 水煤浆为非牛顿流体, 其流变学特性多种多样, 而且均具有很高的表观粘度; 3) 水煤浆的热值相对于燃油低很多, 要取代油进行燃烧, 需要较大的燃料流量.

水煤浆燃料和燃油最大区别在于它是高浓度颗粒的悬浮体, 容易对喷嘴造成磨损和堵塞. 在水煤浆发展的早期, 直接对燃油喷嘴进行改造应用于水煤浆的雾化. 为防止喷嘴的磨损, 采用硬质材料对喷嘴易磨损部位进行填充或表面喷涂<sup>[3]</sup>; 为防止水煤浆的阻塞, 对燃油喷嘴的燃料通道简单地增大. 前一种处理方法直接提高了喷嘴的成本, 后一种处理方法则降低了喷嘴的雾化质量.

\* 收稿日期: 2002-03-18.

作者简介: 原 鲲 (1972—), 男, 博士, kyuan-2000@263.net.

多级气动喷嘴(图 1)采用水煤浆直流通道的思路,解决水煤浆的堵塞和磨损问题.由于喷嘴中水煤浆管道为直流,能够在管道中流动的水煤浆均可在无任何固形物阻挡的情况下流过雾化区,成为液雾两相流动.另外,由于水煤浆的加速是在气流的作用下进行,水煤浆液滴又无与喷嘴壁面直接高速碰撞的可能,喷嘴的磨损很小.喷嘴结构简单,加工方便,成本低廉.喷嘴的优异性能已在大量的工程应用中得到验证<sup>[1,2]</sup>.

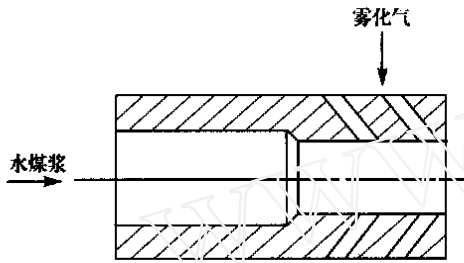
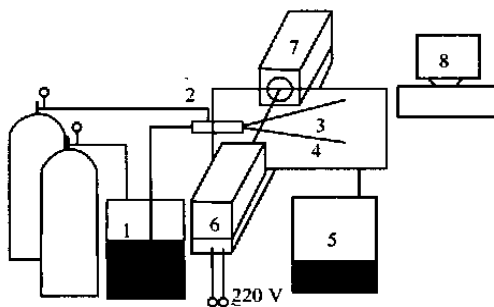


图 1 多级气动喷嘴示意

采用实验方法研究多级气动喷嘴对水煤浆燃料雾化特性的影响.包括水煤浆性质、喷嘴操作工况和喷嘴几何结构对射流雾化细度的影响,并采用数值计算的方法研究喷嘴出口附近的气相流场和液相浓度场.

### 1 实验系统

水煤浆雾化系统见图 2. 储浆罐里的水煤浆在压力作用下进入喷嘴.在雾化室中完成雾化,雾化室两侧开有窗口,便于雾化测量.



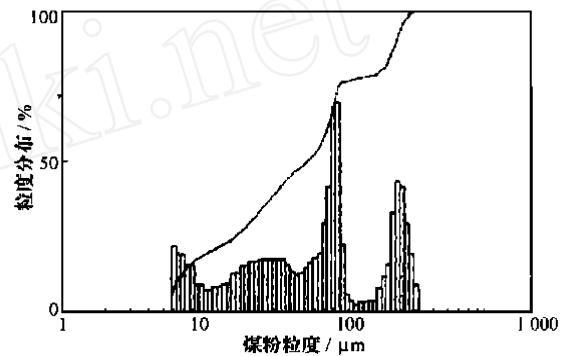
1—CWS 储罐;2—喷嘴;3—雾炬;4—雾化室;5—CWS 回收罐;  
6—激光发生器;7—检测及数据转换设备;8—计算机

图 2 水煤浆雾化及测量系统

用 Malvern 粒度分析仪对水煤浆雾化粒度进行测量.该仪器采用激光散射原理对测量光路上的液滴进行测量分析.测量光束与喷嘴的主轴垂直,如无特殊说明,测量光束的中心距喷嘴出口为 150 mm,并与主轴相交.测量雾炬轴向粒度分布时,光束沿喷嘴轴线移

动,始终与喷嘴主轴相交.

实验中采用了 3 种水煤浆作为工质进行测试.3 种浆中的煤粉中值粒度约 50  $\mu\text{m}$ ,典型的制浆煤粉粒度分布如图 3 所示,由图可见呈双峰分布.水煤浆的表观粘度由 NXS-11 旋转粘度计测定,流变特性见图 4.图中  $\dot{\gamma}$  为剪切率,  $\eta$  为表观粘度.随  $\dot{\gamma}$  的升高,呈下降的趋势.



直方图为煤粉粒度的分布规律;  
细实线为煤粉粒度的分布函数

图 3 典型煤粉粒度分布

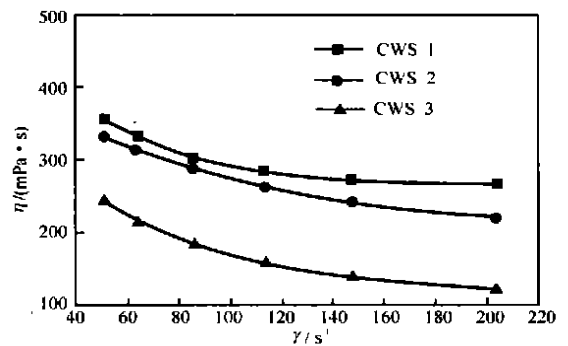


图 4 水煤浆表观粘度

### 2 实验结果及分析

#### 2.1 水煤浆性质对雾化粒度的影响

图 5 为多级气动雾化喷嘴对 3 种水煤浆的雾化特性的影响.图中横坐标为气浆质量流量比,纵坐标为雾化液滴的 Sauter 平均直径  $D_{32}$ .  $D_{32}$  越小,雾化质量越好.结合图 4 水煤浆表观粘度的测量结果可见,对水煤浆的雾化效果该喷嘴与水煤浆的表观粘度相关,表观粘度最大的 1 号浆雾化平均粒度最大,表观粘度最小的 3 号浆雾化效果最好.在整个气动雾化过程中,粘度始终对液滴的形成和破碎起主要的阻碍作用,因而,粘度越大,雾化效果越差.

#### 2.2 操作工况对雾化粒度的影响

图 6 为水煤浆储罐压力  $p_{CWS}$  分别为 0.2 MPa、0.

3 MPa 和 0.4 MPa 时的雾化粒度随气浆比的影响. 在每一种压力下, 随气浆比的增加, 雾化粒度均呈下降趋势. 另外, 随浆压的升高, 雾化粒度和气浆比的关系曲线下行的斜率增大, 表明在相同的气浆比条件下, 提高浆压可降低喷嘴雾化粒度. 原因是提高浆压也提高了浆流量, 要在提高浆压的同时保证相同的气浆比, 就必须提高气压及气流量, 从而气流在与浆流接触时有更高的速度, 有利于雾化粒度的降低.

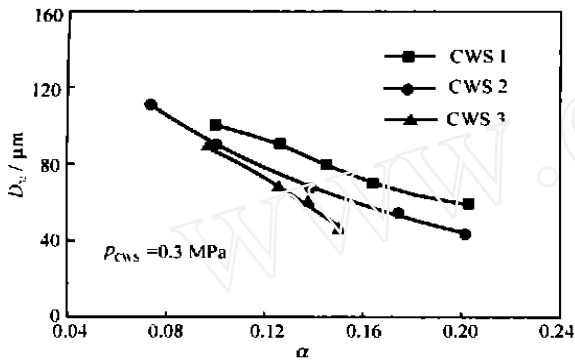


图 5 粘度对雾化粒度的影响

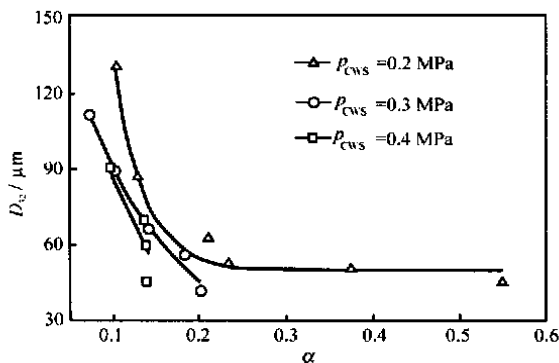


图 6 操作工况对雾化粒度的影响

### 2.3 喷嘴结构对雾化粒度的影响

图 7 为多级与单级气动喷嘴进行雾化的雾化性能比较. 多级雾化喷嘴的工作原理为: 第一级气流先破坏水煤浆的管道连续流动, 在靠近喷嘴出口处形成气液

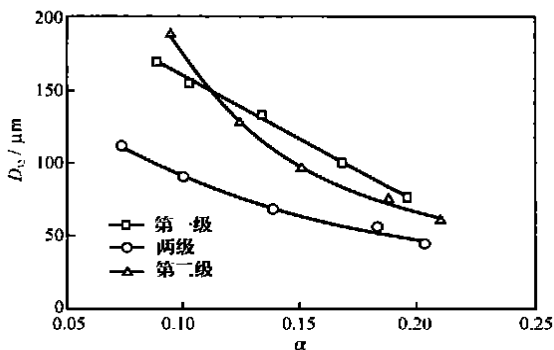


图 7 喷嘴结构对雾化细度的影响

两相流动, 另外, 气流带来的较强的剪切力使水煤浆粘度降低; 第二级气流完成初始液滴的二次雾化, 并形成满足燃烧系统要求的雾化炬流场. 根据不同燃烧系统的要求, 可改变两级气流的切向角和径向角, 从而对雾化角和雾炬流场进行调整. 从图 7 可见, 仅考虑雾化粒度, 只用任何一级气流, 均比多级雾化的效果有明显的差距.

## 3 雾炬流场的数值计算

### 3.1 计算模型

对气相湍流采用  $k-\epsilon$  模型, 对液滴相采用无滑移模型.

### 3.2 基本假设

由于气孔周向布置, 其作用与周向狭缝类似, 将气孔简化为狭缝, 数值分析则转化为二维.

第一级气流与雾化了的液滴形成主射流, 以均匀流速进入计算区域.

### 3.3 边界条件

- 1) 轴线上, 取对称条件;
- 2) 壁面条件取无滑移条件;
- 3) 进口条件取均匀入口条件, 如图 8 所示. 第一级气流和燃料液滴形成主射流, 第二级气流周向射入雾炬. 由于两级气流由同一个气源供气, 进口压力和速度差别都很小, 因此, 第二级气流速度和主射流的速度存在一定的关联. 设第二级气流速度为  $v_g$ , 主射流速度为  $u_g$ , 第一级气流入口总的横截面积为  $A_1$ , 喷嘴主射流出口横截面积为  $A_0$ , 则  $u_g = A_1 \cdot v_g / A_0$ ;

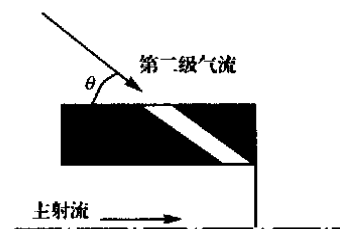


图 8 入口边界条件

- 4) 出口条件 假定出口截面上各点的法向速度的一阶导数为常数, 根据总体质量守恒原则, 由内点的速度分布得到出口截面上的速度和液滴浓度分布<sup>[4]</sup>.

### 3.4 计算结果及分析

#### 3.4.1 二级气流对雾炬流场的影响

图 9 为雾化气流出口速度为 140 m/s 时喷嘴雾炬流场的计算结果. 计算中, 第二级气流与喷嘴轴线的夹角为 30°, 图中横坐标为无量纲轴向距离, 用喷嘴出口

直径进行无量纲化;纵坐标为无量纲径向距离,用喷嘴的出口半径进行无量纲化;喷嘴的轴线与横坐标重合.图中箭头方向表示气流的流动方向,箭头长短表明速度的大小.图中曲线为液滴浓度的等值线.由图 9 可见,随离喷口距离的增大,轴心速度减小,射流横截面积扩大,速度剖面由陡逐渐变平坦.计算了二级气流速度为 0 的喷嘴射流流场,计算中主射流的流速和图 9 中的主射流速度相同,结果见图 10.对比而言,图 9 由于有周向气流的作用,喷嘴出口的核心区变得很短,液滴浓度在喷嘴轴线上降低得很快,在径向则衰减得很慢.因此,在喷嘴出口的下游区域,有二级气流的情况下,雾炬中液滴的浓度分布沿径向相对更均匀一些.

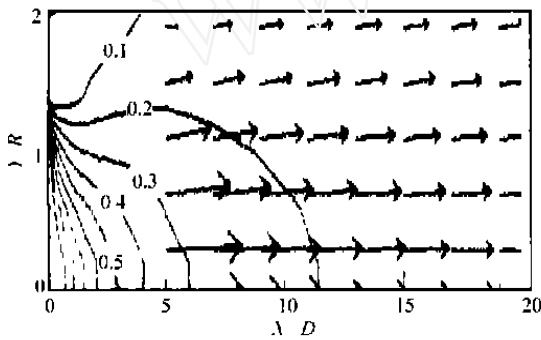


图 9 多级喷嘴射流流场

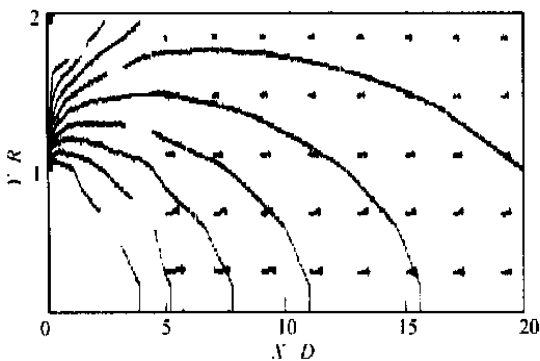


图 10 二级气流速度为 0 的喷射流场

### 3.4.2 气流入射角对液滴浓度扩散的影响

图 11 为不同气流入射角下喷嘴雾炬液滴无量纲浓度分布,气流入射角  $\theta$  为气流入口方向与喷嘴轴线的夹角.图中,随着气流入射角的增大,液滴浓度在轴向的衰减减慢,在径向的扩散降低,这是由于在相同的气流出口速度的情况下,气流入射角越大,气流对主射流的推挤作用越强,降低了液滴在径向的扩散.

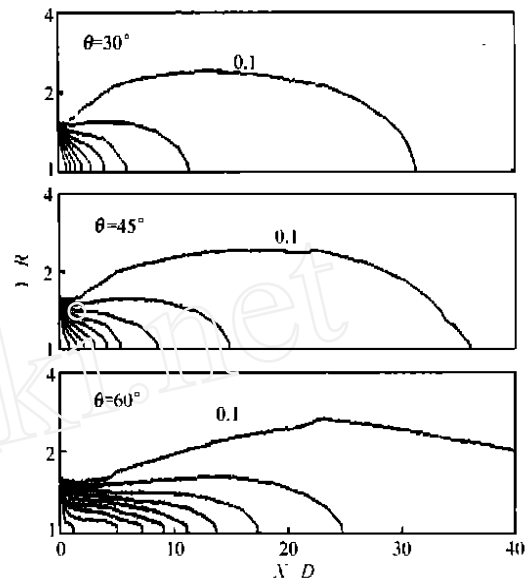


图 11 不同气流入射角下雾炬液滴无量纲浓度分布

## 4 结 论

研究了多级气动喷嘴针对水煤浆燃料的雾化特性和流场特征.结果表明:

- 1) 喷嘴雾化粒度受水煤浆表现粘度影响较大.表观粘度越大,雾化效果较差.
- 2) 保持气浆比不变,增大水煤浆压力,雾化效果可以得到改善.
- 3) 喷嘴采用两级气流进行雾化,可以有效地减小雾化粒度.
- 4) 喷嘴出口周向气流的存在使雾炬中核心区缩短,在下游区域,液滴的浓度分布沿径向更均匀一些.
- 5) 随着喷嘴出口周向气流入射角的增大,液滴浓度在轴向的衰减减慢,在径向的扩散降低.

### 参考文献:

[1] Chen Lifang, Zhan Huanqing, Sun Wenchao. Experimental study on combustion technology for high-rash coal-sludge/ water slurry [A]. *proceedings of 2nd Asian Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization* [C]. Beijing, China, 1993: 488—497.

[2] Chen Lifang, Zhan Huanqing, Sun Wenchao *et al.* Experimental study of combustion of Shen-Mu CWS[A]. *Proceedings of the 18th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems*[C]. New York, USA, 1993:651—658.

[3] 酒井 M. 水煤浆燃烧的研究和发展[A]. 水煤浆技术译文集——国际煤炭会议论文选[C]. 中国煤炭加工利用协会, 1986.

[4] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1988.