

# 旋转型气-液雾化喷嘴的雾化特性研究

龚景松, 傅维镛

(清华大学 工程力学系, 北京 100084)

**摘要:** 使用激光相位多普勒分析仪 PDA 对旋转型气-液雾化喷嘴的雾化特性进行了实验研究。使用水代替油作为被雾化的液体, 采用压缩空气作为雾化介质, 测量了不同工况下的喷雾特性参数, 如: 喷雾液滴粒子的索太尔平均直径 SMD 和粒子速度等。实验测量结果表明, 喷嘴在较小的气液比条件下可以达到较好的雾化状态, 中心的液滴平均 SMD 可以达到  $40\mu\text{m}$ 。随着压力和气液比的增加, 雾化水平也随之提高, 但是受喷嘴结构的影响很小。本文的研究为喷嘴的实际设计提供了基础依据。

**关键词:** 旋转型气-液雾化喷嘴; PDA; 雾化特性

中图分类号: TK16 文献标识码: A

## 1 引言

液体的雾化过程是能源、动力、化工、农业和环境工程中一个关键性的多相流与传热传质学课题, 在燃油锅炉燃烧、农业灌溉、农药喷洒和烟气脱硫装置等中都有广泛的应用。雾化喷嘴有多种类型, 通常使用的喷嘴有<sup>[1]</sup>: 机械式喷嘴、气动雾化喷嘴和转杯式喷嘴等。在气动喷嘴中, 常用的主要有内混式、外混式喷嘴, 气泡雾化喷嘴、AFJ 型喷嘴和 T 型喷嘴等<sup>[2~4]</sup>。作者在对各种气动喷嘴及其雾化机理分析的基础上提出了一种新型的气动雾化喷嘴——“旋转型气-液雾化喷嘴”<sup>[5]</sup>, 并对其流量特性及雾化角、流强分布特性进行了系统的研究。本文将对喷嘴的雾化特性进行研究。

燃油喷嘴的雾化质量直接影响燃烧的性能。为了获得高质量的燃油雾化, 对喷嘴的雾化特性进行研究就十分必要。对雾场进行实验研究, 不但可以分析雾化特性, 还可为雾化场的数值计算分析提供初始条件, 并为验证数值计算提供依据。所以通过实验详细研究雾场及其影响因素很有意义。本文使用激光相位多普勒分析仪 PDA 对不同工况下的“旋转型气-液雾化喷嘴”的雾化粒径、速度等参数进行了

测量, 并对结果进行了分析。

## 2 测量位置的选择

实验在常温常压条件下进行, 使用水代替油作为液体介质, 压缩空气作为雾化介质, 来研究气液比、压力、喷嘴结构等对雾化粒径的影响。实验系统同文献<sup>[5~6]</sup>。为了对喷嘴的雾化状态进行全面的了解, 选择了不同的测量位置, 如图 1 中的  $x, y, z$  坐标所示, 其坐标原点在喷嘴的出口中心。实验中测量了如下的剖面:

- (1) 喷嘴轴线方向, 从喷嘴出口 5 mm 处开始测量, 到 205 mm 结束, 每 10 mm 测量一个点, 即: 在  $y=0, z=0$  的情况下, 沿  $x$  方向测量;
- (2) 在离喷嘴口 100 mm 处, 即  $x=100$  mm 处, 分别沿  $y, z$  方向测量, 直到测量体离开雾化炬。这样经过轴对称假设后就可以根据  $y, z$  方向的测量而得到沿径向和周向的粒子分布信息。

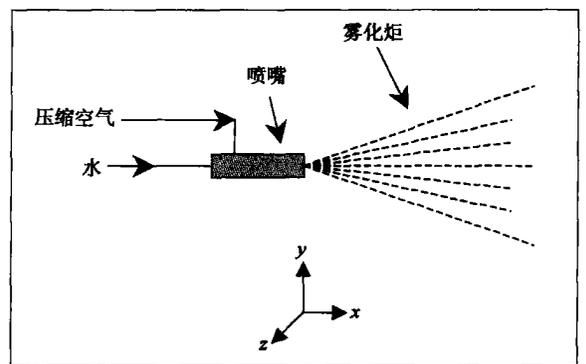


图 1 实验系统图

测量仪器选用二维 PDA 测量系统, 可以同步测量粒子的速度和粒径, 测量结束的判别条件选择为测量的有效粒子数达到 30 000 个或测量时间达到 1 min。

收稿日期: 2006-01-05; 修订日期: 2006-06-02

作者简介: 龚景松(1975-)男, 天津人, 清华大学讲师。

### 3 测量结果分析

#### 3.1 液滴直径分布

图 2 是雾化炬内某一点的雾化颗粒粒子数( $N$ )随直径的典型分布, 此点采集到的粒子总数为 30 000 个。图中光滑曲线为用 GAUSS 分布拟合的结果, 从图中可以看出, 其分布与正态分布基本吻合。雾化炬内的每一点的颗粒分布均具有此分布的特点。

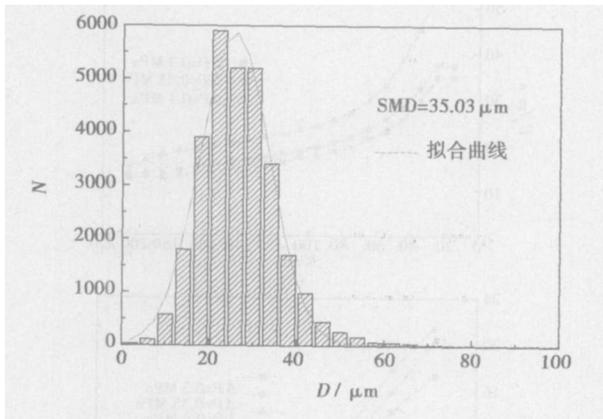


图 2 喷嘴在一点的雾化粒子数随粒子直径的变化

会使颗粒直径变大。

图 4 是喷嘴的雾化粒径沿轴向( $y$  方向)的变化规律, 从实验结果可以看出, 在较小的压力变化范围内, 压力对雾化的影响不大, 只是使平均滴径有所降低, 这一点从图 5 中也可看出。气液比的增加使得沿径向的颗粒直径有所降低, 降低的幅度在  $10 \mu\text{m}$  左右。从图 4 和图 5 中还可以看出, 喷嘴的雾化颗粒直径基本是轴对称的, 为粒子的速度合成提供了基础。

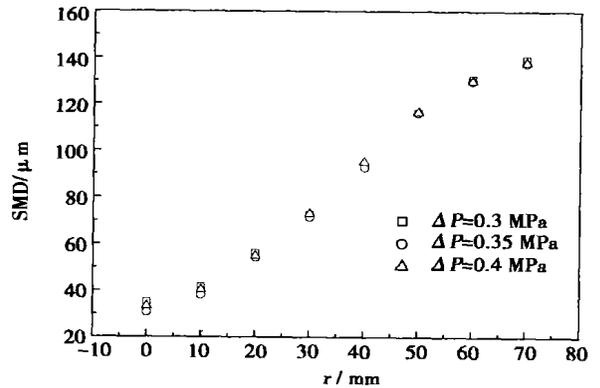


图 4 粒径沿径向( $y$  方向)的变化规律

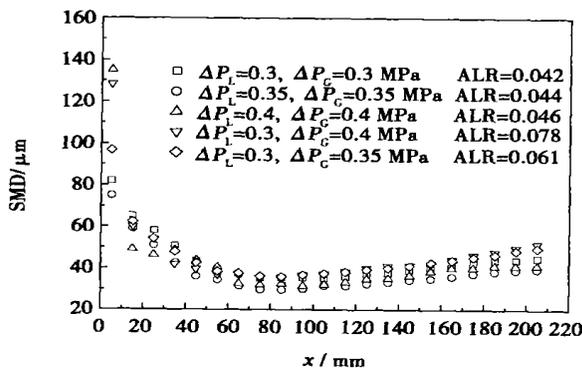


图 3 喷嘴的雾化粒径沿  $z$  方向的变化规律

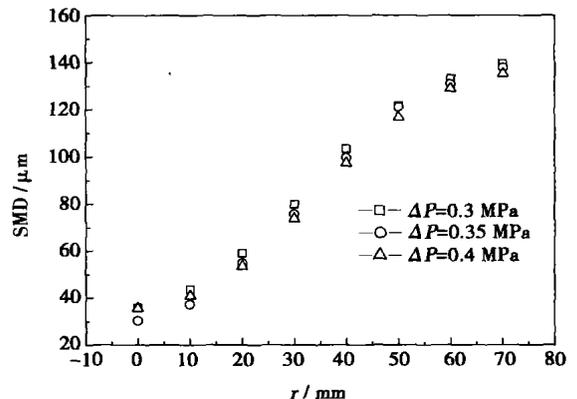


图 5 粒径沿径向( $z$  方向)的变化

下面对几种典型的测量结果进行分析。

##### 3.1.1 气液比和压力的影响

气液比对喷嘴雾化粒径影响的研究是在结构参数为 1-1-12-4 的喷嘴完成的(具体的结构参数见文献[5~6]), 图 3 为雾化粒径沿轴向的变化规律。从图中可以看出, 雾化颗粒直径随着离开喷口距离的增加, 先减小后增加, 在距离喷口大约 90 mm 时达到最小。分析原因主要是因为远离喷口以后, 速度越来越低, 由于重力的作用, 小的颗粒将向下飘动, 与大颗粒结合后形成新的颗粒, 同时由于颗粒本身的脉动, 使得不同颗粒发生碰撞而结合在一起, 都

##### 3.1.2 结构参数的影响

通过文献[5~6]的研究表明, 结构参数对喷嘴的雾化角和流量系数有直接的影响, 但是对粒径的影响还不能确定, 因此对不同结构参数的喷嘴的雾化进行了测量, 其结果如图 6 和图 7 所示。从图 6 中可以看出, 对于不同结构参数的喷嘴, 沿直径方向, 其中心的颗粒粒径基本一致, 在雾化炬边缘的颗粒直径也基本一致。而图 7 中, 不同喷嘴的颗粒直径略有不同, 主要是不同喷嘴工作时的压力和气液比不同, 造成一定的差别, 而结构参数对雾化粒径的影响则很小。结构参数主要影响雾化角的大小<sup>[6]</sup>。

从而可以推断,在实际设计中,选择不同结构参数的喷嘴,都可以达到等同的雾化效果,不会因为结构参数变化而对喷嘴的雾化产生影响大。

以上对喷嘴的雾化特性进行了研究,从颗粒分布来看,此喷嘴能够将水较好地雾化,且气液比较低。对于粘性的影响,观察了恩氏粘度为7的“水包油”型乳化重油的雾化及其热态的燃烧情况,从实验结果来看,仍然可以达到很好的雾化效果。

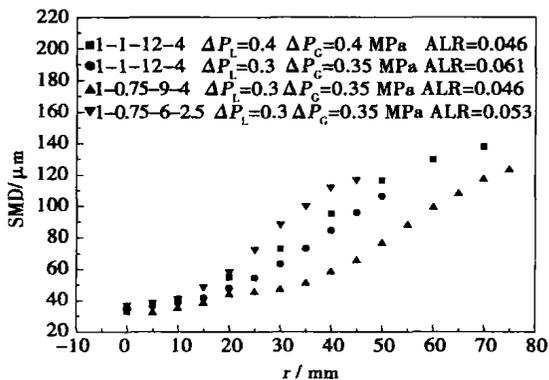


图6 粒径沿径向(y方向)的变化

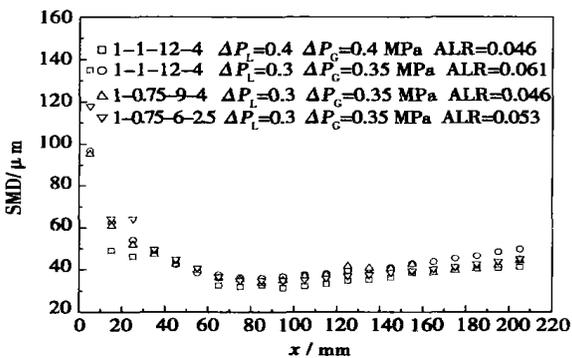


图7 粒径沿轴向(x方向)的变化

### 3.2 速度分布特点

粒子速度分布特点也是一项十分值得研究的内容,它将直接影响到颗粒与空气的混合情况。图8是颗粒速度的变化曲线,(A)为喷嘴中心轴向速度沿轴向(x方向)的分布,从喷嘴出口开始,离喷嘴越远,速度越低,这主要是颗粒与空气的相互作用使粒子速度降低;根据PDA测量原理,同时假设雾化炬满足二维轴对称分布(对于离开喷嘴出口较近距离内可以忽略重力的影响),则对y方向(见图1)的测量给出轴向与径向的速度分布,对z方向的测量给出轴向与切向速度分布,经过速度合成得到喷嘴的径向和切向速度分布。图8中的(B)、(C)、(D)分别为距离喷嘴出口100mm剖面

上的轴向速度(x方向)、径向速度和切向速度沿半径方向的变化情况。从图中可以看出,轴向速度从中心向边缘逐渐减小;径向速度离中心越远,速度越大,与实际相符;切向速度从中心到雾化边缘变化不大,且绝对值也不大,说明旋转很小。由图可见,随着压力的增加,各个速度分量均呈现增加的趋势,必然增加液雾与空气的混合效果。

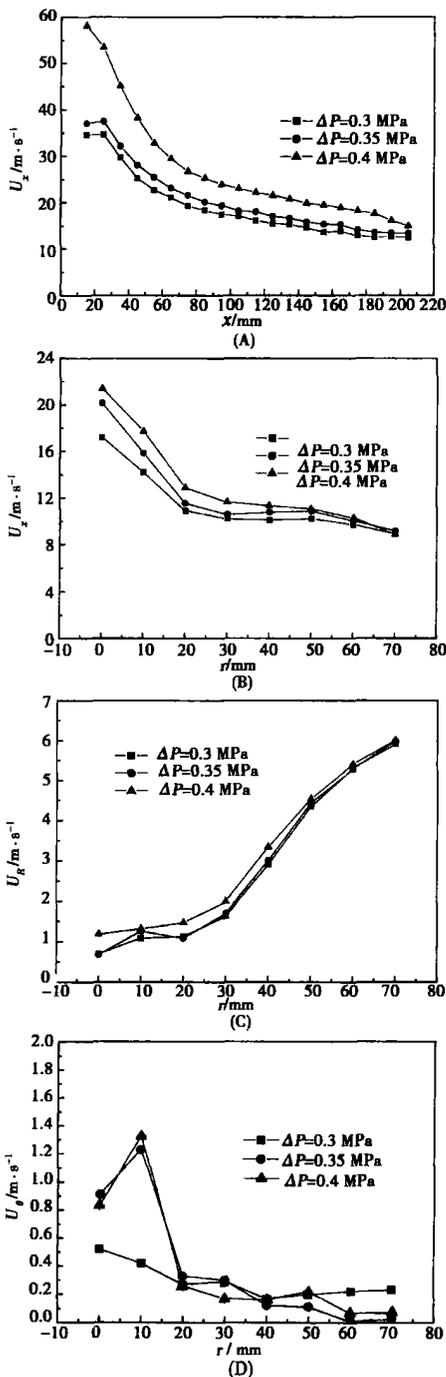


图8 雾炬颗粒速度的分布特点

(下转第639页)

平均间隙相对较小。

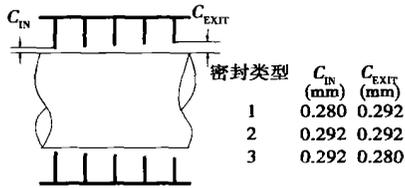


图 11 密封锥度结构示意图

表 4 密封动特性及漏气量

密封类型	$k \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$	$D / \text{Ns} \cdot \text{mm}^{-1}$	$\gamma$	泄漏量 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
1	-2 360	-2 080	0.097 6	0.625
2	-7 770	1 290	-0.518 4	0.990
3	-1 391	1.400	-0.855 1	0.729

## 6 结 论

采用数值方法计算分析了压缩机叶轮入口迷宫密封流场、转子壁面气动力以及密封动特性系数, 得出结论如下:

(1) 三维 CFD 模型能正确描述密封内流体的回流特征, 速度、压力、密度等流动参数的解更准确。

(2) 密封入口正向预旋速度增大能产生较强的正交叉刚度, 而直接阻尼增加地相对较小, 从而导致作用在转子表面与转动同向的切向气动力增加, 易于诱发轴系失稳。

(3) 增大密封间隙, 转子稳定性提高, 但同时漏气量增大, 热效率降低; 与等间隙迷宫密封相比, 间隙收敛形密封的交叉刚度较大, 同时产生负直接阻尼, 不能为转子提供抑制失稳的正阻尼; 间隙发散密封能产生较强的负交叉刚度和正直接阻尼, 对抑制转子失稳有利。

## 参考文献:

- [1] SCHARRER J K, CHILDS D W. Theory vs experiment for the rotordynamic coefficients of labyrinth seals, parts 1& 2 [J]. *J of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, 1988, **110**(3): 270—287.
- [2] DIEITZED F J, NORDMANN R. Calculating coefficients of seals by finite-difference techniques [J]. *ASME J Tribol*, 1987, **109**: 388—394.
- [3] TAM L T, PRZEKWAS A J, MUSZYNSKA A, *et al*. Numerical and analytical study of fluid dynamic forces in seals and bearing [J]. *ASME J Vibr Acoustic*, 1988, **110**: 315—325.
- [4] JEFFREY MOORE J. Three dimensional CFD rotordynamic analysis of gas labyrinth seals [J]. *Journal of Vibration and Acoustics, ASME*, 2003, **125**: 427—433.
- [5] TOSHIO HRANO, GUO ZENGLIN, GORDON KIRK R. Application of fluid dynamics analysis for rotating machinery—part II: labyrinth seal analysis [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 2005, **127**: 820—826.
- [6] 鲁周勋, 谢友柏, 丘大谋. 200 MW 汽轮机高压缸中汽流激振对轴系稳定性的影响 [J]. *动力工程*, 1994, **14**(1): 2—6.
- [7] 李雪松, 黄典贵. 迷宫密封三维非定常流场及转子动特性数值仿真 [J]. *机械工程学报*, 2003, **39**(4): 136—140.
- [8] FLUENT INC. *Fluent 6. 2 User's Guide* [M]. Lebanon: Centerra Resource Park, 2005.

(何静芳 编辑)

(上接第 634 页)

## 4 结 论

通过对不同参数的喷嘴的雾化特性的实验测量研究, 结果表明:

(1) 此喷嘴在较小的气液比条件下可以达到较好的雾化状态, 在以水为工质的条件下, 气液比为 4%~6% 时, 液雾射流中心的 SMD 可以达到 40  $\mu\text{m}$ ;

(2) 随着压力和气液比的增加, 雾化水平有一定的改善, 从实验结果来看, 可以使 SMD 降低约 10  $\mu\text{m}$ ; 但是由于实验中压力变化范围不大, 所以雾化改善的程度也不大;

(3) 喷嘴的结构参数对雾化的影响程度很小。这点对喷嘴的设计是有利的, 可以选择不同结构参

数的喷嘴而达到同等的雾化水平。

## 参考文献:

- [1] LEFEBVRE A H. *Atomization and spray* [M]. Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- [2] 吴道洪. WDH 型气泡雾化喷嘴的流量特性研究 [J]. *冶金能源*, 1998, **17**(6): 37—44.
- [3] 李玉峰. 奥里乳化油蒸汽雾化机理及雾化蒸汽参数的选择 [J]. *中国电力*, 1999, **32**(7): 70—76.
- [4] 仇性启, 王宗明, 王丽娟, 等. 气动旋流雾化原油喷嘴雾化特性的实验研究 [J]. *石油机械*, 2001, **29**(2): 5—7.
- [5] 龚景松, 傅维标. “旋转型气—液雾化喷嘴”流量特性的实验研究 [J]. *热能动力工程*, 2004, **19**(4): 376—379.
- [6] 龚景松, 傅维标. “旋转型气—液雾化喷嘴”的雾化角与流量分布特性研究 [J]. *冶金能源*, 2004, **23**(1): 44—47.

(何静芳 编辑)

and Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 628 ~ 631

A method has been established for solving a full polarization electrochemical model for solid oxide fuel cells (SOFC) coupled with a potential equation and N-S one. A three-dimensional numerical simulation was conducted for the thermoelectric characteristics of the tubular SOFC. The calculated values of power generation characteristics of the cells obtained are in good agreement with the experimental ones. Meanwhile, the electric motive force distribution, electric current density and temperature distribution, electrochemical reaction-produced heat and Ohm heat distribution characteristics were also analyzed. The calculation results show that cathode Ohm polarization and activation polarization losses of the cells would account for 85% of the total losses, while chemical reaction-produced heat would account for about 92% and Ohm heat for 8% of the total heat generated. **Key words:** tubular solid oxide fuel cell, numerical simulation, thermoelectric characteristics

旋转型气-液雾化喷嘴的雾化特性研究 = A Study of Atomization Characteristics of "Swirling Gas-liquid Spray Atomizers" [刊, 汉] / GONG Jing-song, FU Wei-biao (Engineering Mechanics Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 632 ~ 634, 639

By using a laser-phase Doppler analyzer (PDA), an experimental study was conducted of the atomization characteristics of "Swirling Gas-liquid Spray Atomizers". Water was used as the liquid to be atomized instead of oil and compressed air employed as an atomization medium. The parameters of atomization characteristics under different operating conditions were measured, such as Sotyl mean diameter and particle speed of atomized droplet particles etc. The experimental measurement results indicate that the atomizer can achieve a comparatively good atomization state under the condition of a relatively small gas-liquid ratio with the average SMD of droplets at the center reaching 40 μm. With an increase in pressure and gas-liquid ratio, the atomization level will be enhanced accordingly. However, it is scarcely affected by the structure of the atomizer. The research findings can provide an underlying basis for the practical design of atomizers. **Key words:** "Swirling Gas-liquid Spray Atomizers", PDA (Phase Doppler Analyzer), atomization characteristics

迷宫密封转子动特性三维 CFD 数值的研究 = A Study of Methods Used for Three-dimensional CFD (Computational Fluid Dynamics) Numerical Analysis of Dynamic Characteristics of Rotors with Labyrinth Seals [刊, 汉] / LIU Xiao-feng, LU Song-yuan (Vibration Control and Information System Research Institute under the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 635 ~ 639

The aerodynamic force produced by fluid in labyrinth seals is a major factor that may lead to instability of a shaft system. This aerodynamic force can be described by a factor of seal dynamic characteristics. A vortex rotor-labyrinth seal three dimensional CFD (computational fluid dynamics) mathematical model was established. With a labyrinth seal at the inlet of a compressor serving as a specific case, the aerodynamic force at the rotor surface was calculated by using a general-purpose CFD software Fluent followed by a calculation of the seal dynamic characteristics factor. The calculated results when compared with those obtained by using another CFD software TASCflow and integrated-flow labyrinth seal calculation program DYNLAB indicate that the accuracy of loss-of-stability calculation under the three-dimensional CFD method is higher than that obtained by using the integrated-flow method. Finally, the impact of such factors as pre-swirling speed at the seal inlet, variation in clearances and cone-shaped axial clearance of seals etc. on seal stability was also calculated and analyzed in detail, thus providing a theoretical basis for decreasing steam flow excitations in seals. **Key words:** labyrinth seal, computational fluid dynamics, steam flow excitation, rotor dynamic characteristics factor

低质量流速垂直管屏技术的原理与应用分析 = Analysis of Working Principle and Application of Low Mass Flow-speed Vertical Tube-platen Technology [刊, 汉] / LI Yan, ZHAO Xin-mu, YUE Guang-xi, et al (Thermal Energy