

文章编号:1000-582X(2010)03-087-05

## 内混式扇形空气雾化喷嘴参数分析

付祥钊<sup>1</sup>, 蒋斌<sup>1,2</sup>, 王勇<sup>1</sup>, 王子云<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045;

2. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要:**采用 Eulerian-Lagrangian 耦合算法, 对内混式空气雾化喷嘴的性能参数进行了数值模拟, 结果表明: 气液质量流量比为定值时, 随着喷嘴孔口宽度的增大, 雾化角和液滴的速度逐渐减小, 索特尔平均粒径(SMD)不断增大; 为了获得更细小的液滴, 喷嘴孔口宽度不宜过大; 喷嘴孔口宽度为定值时, SMD 随气液质量流量比的增加, 先逐渐减小, 达到极小值后, 又逐渐增大, 喷嘴孔口宽度为 0.6 mm 时, SMD 的极小值约为 39.5  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:**液体雾化; 扇形喷嘴; 速度分布; 颗粒粒径分布

**中图分类号:** TQ027.3+2

**文献标志码:** A

## Numerical analysis on fan-shaped air-blast atomizer parameters

FU Xiang-zhao<sup>1</sup>, JIANG Bin<sup>1,2</sup>, WANG Yong<sup>1</sup>, WANG Zi-yun<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Chongqing University, Ministry of Education, Chongqing 400045, P. R. China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, P. R. China)

**Abstract:** Based on Eulerian-Lagrangian coupling algorithm, the performance parameters of Fan-shaped air-blast atomizer is simulated. It is shown that when gas-liquid mass flow ratio is constant, the spray angle and velocity of droplet decreases and SMD increases gradually with the increase of orifice width. Therefore, in order to obtain much smaller liquid droplet, orifice width should not be too wide. When the orifice width is constant, along with the increase of gas-liquid mass flow ratio, SMD decreases firstly and increases later when reaching the minimum. And SMD minimum value is 39.5  $\mu\text{m}$  when the orifice width is 0.6 mm.

**Key words:** liquids-atomization; fan-shaped atomizer; velocity distribution; droplet size distribution

空气雾化喷嘴具有雾化费用低、结构简单、雾化质量高、调节范围大等优点, 在加热炉、干燥炉、窑炉、工业锅炉及化工设备中得到了广泛应用。国内外众多学者对液体雾化方法进行了广泛的实验与理论研究, 研制开发出了各种不同结构和用途的喷嘴<sup>[1-2]</sup>, 并对这些喷嘴的喷嘴流量、雾化角、雾化液滴直径及其分布等方面进行了研究<sup>[3-5]</sup>。随着 CFD

(Computation Fluid Dynamics)技术的发展, 可以利用计算机数值模拟方法对喷嘴性能进行模拟研究, 一些学者对喷嘴内部流场和喷嘴下游液滴在实际流场中的运动状态进行了研究<sup>[6]</sup>; 文献<sup>[7]</sup>在 Y 形喷嘴的基础上, 设计了一种橄榄形出口喷嘴, 并对其进行了实验研究, 测量了不同气、液压力下该雾化喷嘴的流量、雾化角和索特尔平均粒径(Sauter Mean

收稿日期: 2009-11-18

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAJ01A06-3)

作者简介: 付祥钊(1948-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事建筑节能, 建筑通风、空调等方面研究, (E-mail) xiangzhaof@yahoo.com.cn。

Diameter, SMD) 及其在空间上的横向和纵向分布; 文献[8]设计了一种双流体喷嘴, 通过实验研究得到了该喷嘴各参数之间的相互牵制关系; 文献[9]对压力式喷嘴雾化过程中气液传质性能进行了研究, 考察了  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2\text{-paraffin}$  系统中液体对气体的吸收速率, 推导了单液滴运动速度与时间的关系式。但上述文献所研究的喷嘴大部分都不是扇形喷嘴, 文献[7]所研究的喷嘴也只是在 Y 形喷嘴的基础上进行了改进, 目前, 对扇形喷嘴的报道比较少见。

笔者运用数值计算方法, 研究了非稳态条件下不同喷嘴孔口宽度、气液质量流量比对内混式扇形空气雾化喷嘴的外部流场、喷嘴下游颗粒速度分布以及颗粒粒径分布的影响。

## 1 物理模型

喷雾装置结构示意图如图 1 所示, 为 JN-SS-SU13A 系列某型号内混式扇形空气雾化喷嘴。压缩空气经空气流道进入喷嘴, 在喷嘴内部与水进行混合, 发生强烈的能量交换和动量交换, 在扇形喷口处, 气液混合物被挤压成扁平的扇形状高速喷出, 完成喷雾过程。空气流道直径为 10 mm, 水流道直径为 5 mm, 扇形喷口宽度分别为 0.4、0.6、0.8 mm。

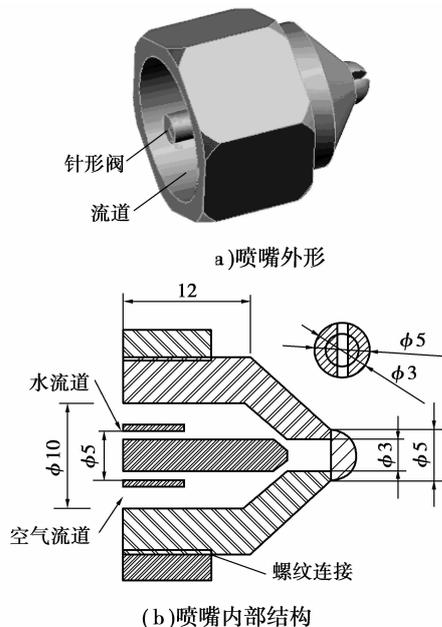


图 1 喷嘴结构示意图

## 2 数学模型

### 2.1 气相湍流模型

现有的湍流模型很多, 包括: 单方程模型

(Spalart-Allmaras)、标准  $k\text{-}\epsilon$  模型、重整组 (RNG)  $k\text{-}\epsilon$  模型、可实现 (Realizable)  $k\text{-}\epsilon$  模型及雷诺应力模型和大涡模拟。可实现  $k\text{-}\epsilon$  模型在模拟平面或圆形射流时, 可以准确给出射流扩张角, 因而, 在喷雾计算中被广泛的采用。

Realizable  $k\text{-}\epsilon$  模型中湍动能及其耗散率输运方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b, \quad (2)$$

其中,  $C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$ ,  $\eta = \frac{S k}{\epsilon}$ ,  $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ ; 各常数的取值为  $C_{1\epsilon} = 1.44$ ,  $C_2 = 1.9$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.2$ 。

### 2.2 液滴阻力系数

雾化过程中, 假定在整个流动区域内保持为球形。此种情形下, 球形物体的阻力系数如下<sup>[10]</sup>:

$$C_{d, \text{sphere}} = 0.424, \quad \text{Re} > 1000, \quad (3)$$

$$C_{d, \text{sphere}} = \frac{24}{\text{Re}} \left( 1 + \frac{1}{6} \text{Re}^{\frac{2}{3}} \right), \quad \text{Re} \leq 1000. \quad (4)$$

当韦伯数较大时, 液滴在气相内运动过程中, 其形状将由初始的球形变化为非球形。极端情况下, 液滴的形状将变化为盘状。由于液滴的阻力系数对液滴的形状依赖较强, 因此, 假定液滴为球形就不合适了。考虑液滴变形的影响, 液滴阻力系数的表达式为

$$C_d = C_{d, \text{sphere}} (1 + 2.632y), \quad (5)$$

其中  $y$  为液滴的变形值, 由下式确定:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{C_F}{C_b} \frac{\rho_g}{\rho_l} \frac{u^2}{r^2} - \frac{C_k \sigma}{\rho_l r^3} y - \frac{C_d \mu_l}{\rho_l r^2} \frac{dy}{dt}. \quad (6)$$

当没有变形 ( $y=0$ ) 时, 就得到了球形的阻力系数值; 当达到最大变形值 ( $y=1$ ) 时, 为圆盘的阻力系数。

### 2.3 液相喷雾模型

在喷雾过程计算中, 泰勒类比破碎模型被广泛的运用。该模型将液滴振动及变形与弹性质量系统进行类比<sup>[11]</sup>, 液滴  $m$  上的空气动力  $F$  对应外力, 弹性反应类比液滴表面张力  $k$ , 阻尼力类比液滴黏性力  $d$ , 则受迫、有阻尼振动控制方程为<sup>[12]</sup>:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F - kx - d \frac{dx}{dt}. \quad (7)$$

根据泰勒类比可得

$$\frac{F}{m} = C_F \frac{\rho_g u^2}{\rho_l r}; \frac{k}{m} = C_k \frac{\sigma}{\rho_l r^3}; \frac{d}{m} = C_d \frac{\mu_l}{\rho_l r^2}, \quad (8)$$

其中,  $\rho_l, \rho_g$  分别为液相与气相的密度;  $u$  为液滴的相对速度;  $r$  为未发生变形前的液滴的半径;  $\sigma$  为表面张力系数;  $\mu_l$  液相黏性系数;  $C_F, C_k, C_d$  为无量纲常数。

令  $y = \frac{x}{(C_b r)}$ , 将式(8)代入式(7)可得

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{C_F}{C_b} \frac{\rho_g}{\rho_l} \frac{u^2}{r^2} - \frac{C_k \sigma}{\rho_l r^3} y - \frac{C_d \mu_l}{\rho_l r^2} \frac{dy}{dt}. \quad (9)$$

当  $y > 1$  时, 液体发生破碎。假定相对速度不变, 对无阻尼液滴, 式(7)可解得

$$y(t) = We_c + e^{-(t/t_d)} \left[ (y_0 - We_c) \cos(\omega t) + \frac{1}{\omega} \left( \frac{dy_0}{dt} + \frac{y_0 - We_c}{t_d} \right) \sin(\omega t) \right], \quad (10)$$

其中,  $We_c$  为韦伯数,  $We = \frac{\rho_g u^2 r}{\sigma}, We_c = \frac{C_F}{C_k C_b} We$ 。

喷雾中液滴的大小分布是不均匀的, 常用液滴的某个平均粒径作为指标, 而其中又以 SMD 的使用最为广泛。SMD 物理意义是液滴的体积期望值与面积期望值之比, 其定义如式(11)<sup>[13]</sup>:

$$D_{vs} = \frac{\sum D_i^3 N_i}{\sum D_i^2 N_i}, \quad (11)$$

其中,  $D_i$  为某一间隔的液滴代表尺寸,  $\mu\text{m}$ ;  $N_i$  为某一间隔的液滴代表尺寸的数量。

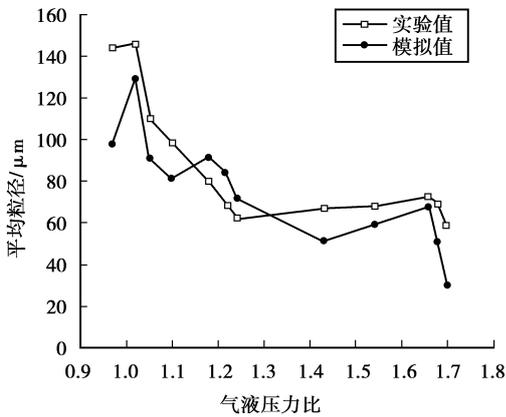


图 2 气液压力比对喷嘴雾化粒径的影响<sup>[14]</sup>

应用上述雾化模型, 文献[14]对内混式 Y 型喷嘴进行了模拟计算, 并将模拟结果与实验结果进行了对比, 如图 2 所示。由图 2 可以看出, 对比结果吻合较好, 气液压力比值越大, 雾化效果越好, 当气液压力比  $p_g/p_l$  的取值在 1.25~1.65 时, 对雾化效果影响较小。由此可见, 泰勒类比破碎模型能够准确地预测压力式空气雾化喷嘴的雾化性能。

### 3 数值计算及结果分析

#### 3.1 网格划分及边界条件

如图 1 所示, 喷嘴为圆头扇形喷嘴, 因此在计算时, 适宜采用三维网格划分, 喷嘴内部和喷嘴出口处进行局部网格加密。喷嘴为对称体, 采用六面体网格, 喷嘴下游流体扩散区域采用四面体网格。从喷嘴下游取 60 mm×40 mm×80 mm(长、宽、高)的长方体为计算区域。

以空气和液态水为工作介质, 空气为连续相, 液态水为离散相, 分别对 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 mm 的喷嘴孔口宽度下, 气液质量流量比为 17%、20%、23%、26%、28% 的喷雾工况进行了模拟计算, 时间步长为 5  $\mu\text{s}$ 。

#### 3.2 计算结果分析

模拟过程中采用 Eulerian-Lagrangian 耦合模型, 气体相采用欧拉连续介质模型, 液滴采用 Lagrangian 离散介质模型。首先对连续相—空气在稳态条件下进行计算, 空气经过扇形喷嘴后, 被挤压成扇形形状向下游充分发展, 当连续相计算收敛后, 再加入离散相—液态水进行喷雾过程计算, 喷雾过程为非稳态耦合计算, 液滴在湍流流动的携带下, 在喷嘴下游扩散开, 完成喷雾过程。

##### 3.2.1 孔口宽度对喷嘴性能的影响

由图 3 可以看出, 液滴在湍流气流的携带下, 在喷嘴下游空间充分扩散开。图中颗粒标记色从黑色至灰色依次表示颗粒速度由小到大, 在靠近喷嘴附近有一层标记色为黑色的颗粒群, 由于喷出的液滴和周围环境流体存在较大的相对速度, 离开喷嘴出口后液滴开始向周围空间扩散, 而周围空气只是在射流的卷吸作用下运动, 速度很小, 扩散到喷嘴出口周围空间的液滴受到空气的阻碍, 速度减小, 运动很缓慢, 被“滞留”在了喷嘴出口附近。

从图 3 也可以看出, 液滴的速度随着孔口宽度的增加而减小, 孔口宽度为 0.4 mm 时, 液滴的最大速度为 79.6 m/s; 喷嘴孔口宽度为 0.8 mm 时, 最大速度为 53.2 m/s。气液质量流量比为定值时, 随着喷嘴孔口宽度的增大, 雾化角逐渐减小; 孔口宽度为 0.4 mm 时, 雾化角约为 150°; 喷嘴孔口宽度为 0.8 mm 时, 雾化角约为 70°。

喷嘴孔口宽度的大小对喷嘴雾化性能影响极为显著, 很大程度上决定了液滴的大小。由图 4 可以看出, 气液质量流量比为定值时, SMD 随着喷嘴孔口宽度的增大而增大: 当喷嘴孔口宽度为 0.4 mm 时, SMD 为 39.6  $\mu\text{m}$ ; 喷嘴孔口宽度为 0.8 mm 时,

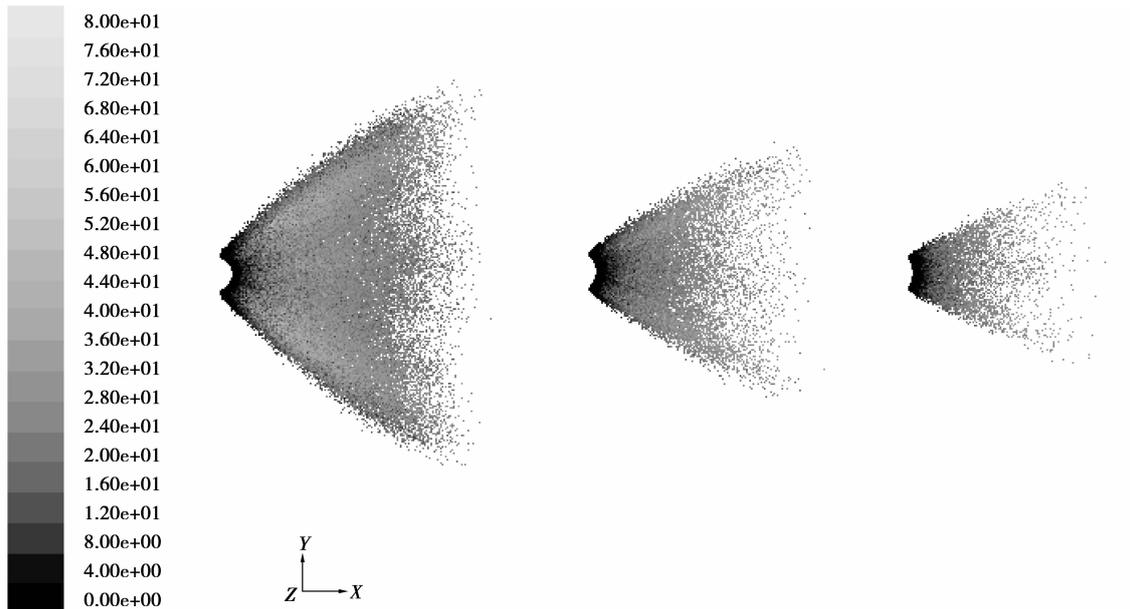


图 3 气液质量流量比为 23%、 $T=1.55 \times 10^{-3}$  s 时液滴的速度分布(孔口宽度从左到右为 0.4、0.6、0.8 mm)

SMD 为  $46.9 \mu\text{m}$ 。由此可见,为了得到更细小的液滴,喷嘴孔口宽度不宜过大。

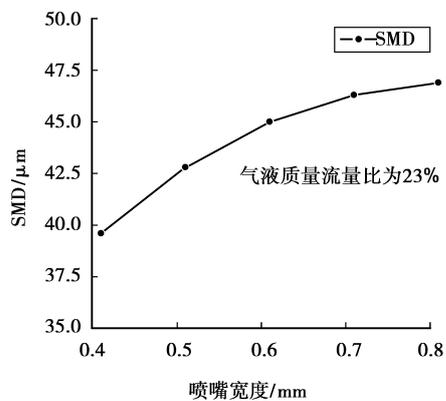


图 4 气液质量流量比为 23%、距离喷嘴出口 20 mm 处 SMD 随喷嘴孔口宽度的变化

### 3.2.2 气液质量流量比对喷嘴性能的影响

在图 5 中,以气液质量流量比为 23% 的工况为例,可以看出,空气进入喷嘴,在喷嘴内被压缩加速,经过压缩区后,气流速度达到约 60 m/s,然后经过扇形孔口,在扇形孔口处流体被充分挤压,再次加速,当达到喷嘴出口( $X=21.5$  mm)时,速度达到最大值 166 m/s。空气喷出喷嘴后,与周围空气相互作用,发生明显卷吸现象。此后,由于受到外部气体的耗散作用,气流速度逐渐下降。

气液混合物中,气相所占的比例越大,则气液混合物的动能也就越大。从图 5 也可以看出,随着气

液质量流量比的增加,轴线上气流的速度也不断增大:气液质量流量比为 17% 时,喷嘴出口气流速度为 125 m/s;当气液质量流量比增加到 28% 时,喷嘴出口气流速度可达 209 m/s。

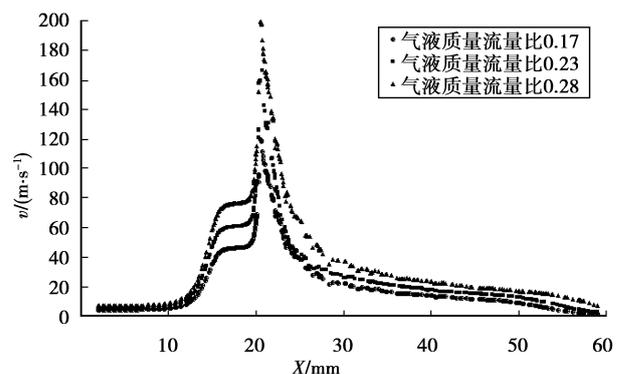


图 5 喷嘴孔口宽度为 0.6 mm 轴线上气流速度分布

如前所述,在喷嘴孔口宽度一定的情况下,气液混合物中,气体所占的比例越大,混合物所具有的动能就越大,液体破碎越充分,所得到的液滴就越细小,但液滴直径与气液质量流量比并非总是呈反比变化。图 6 是喷嘴孔口宽度为 0.6 mm 时,距离喷嘴出口 20 mm 处 SMD 随气液质量流量比的变化,可以看出,SMD 随气液质量流量比的增加,先逐渐减小,当 SMD 达到极小值后,又开始增大,SMD 的极小值约为  $39.5 \mu\text{m}$ 。因此,在实际应用过程中,为了获得最佳的液滴粒径分布,应根据实际喷嘴孔口宽度,选择合适的气液质量流量比。

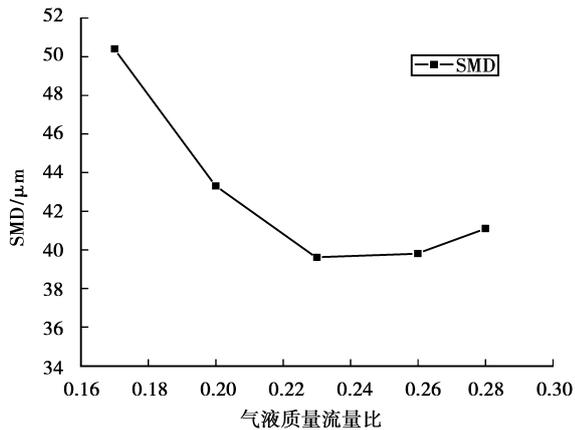


图6 喷嘴孔口宽度为0.6 mm、距离喷嘴出口20 mm处SMD随气液质量流量比的变化

## 4 结 论

1)气液质量流量比为定值时,随着喷嘴孔口宽度的增大,雾化角和液滴的速度逐渐减小,在相同的气液质量流量比下,孔口宽度越大,液滴的出口速度越小;SMD随着喷嘴孔口宽度的增大而增大,因此,为了得到更细小的液滴,喷嘴孔口宽度不宜过大。

2)喷嘴孔口宽度为定值时,随着气液质量流量比的增加,轴线上气流的速度也不断增大:气液质量流量比为17%时,喷嘴出口气流速度为125 m/s;当气液质量流量比增加到28%时,喷嘴出口气流速度可达209 m/s。SMD随气液质量流量比的增加,先逐渐减小,当SMD达到极小值后,又逐渐增大。因此,为了获得最佳的液滴粒径分布,应根据实际喷嘴孔口宽度,选择合适的气液质量流量比。

### 参考文献:

- [1] 龚景松,傅维镛.一种新型喷嘴的提出及其流量特性的研究[J].工程热物理学报,2005,26(3):507-510.  
GONG JING-SONG, FU WEI-BIAO. A putting forward of a new spray atomizer and the study of it's flow characteristics [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005,26(3):507-510.
- [2] 陈斌,郭烈锦,张西民,等.喷嘴雾化特性实验研究[J].工程热物理学报,2001,22(2):237-240.  
CHEN BIN, GUO LIE-JIN, ZHANG XI-MIN, et al. Experimental investigation of spray characteristics of different nozzles [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001,22(2):237-240.
- [3] FRASER R P, EISENKLAM P. Liquid atomization and drop size of sprays [J]. Chemical Engineering Research and Design, 1956, 34(2):294-319.
- [4] WANG X F, LEFEBVRE A H. Mean drop sizes from pressure-swirl nozzles [J]. Journal of Propulsion and Power, 1987, 3 (1):11218.
- [5] LEFEBVRE A H. The prediction of Sauter mean diameter for simplex pressure swirl atomizers [J]. Atomization Spray Technol, 1987, 3 (1):37251.
- [6] 刘联胜,杨华,吴晋湘,等.环状出口气泡雾化喷嘴液膜破碎过程与喷雾特性[J].燃烧科学与技术,2005,11(2):121-125.  
LIU LIAN-SHENG, YANG HUA, WU JIN-XIANG, et al. Studies on Breakup of Liquid-Sheet and Spray Characteristics Downstream of the Annular-Spout Effervescent Atomizer [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(2):121-125.
- [7] 周俊虎,周林华,杨卫娟,等.新型扇形雾化喷嘴的实验研究[J].过程工程学报,2007,7(4):652-656.  
ZHOU JUN-HU, ZHOU LIN-HUA, YANG WEI-JUAN, et al. Experimental Study on a New-type of Fan-shaped Spray Atomizer [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2007,7(4):652-656.
- [8] 王晓英,罗惕乾,沙毅,等.双流体喷嘴荷电雾化特性[J].江苏大学学报(自然科学版),2007,28(4):328-331.  
WANG XIAO-YING, LUO TI-QIAN, SHA YI, et al. Charged atomization characteristics of two-fluid spray nozzle [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2007,28(4):328-331.
- [9] 胡立舜,王兴军,高邈,等.压力式喷嘴雾化过程气液传质性能[J].化工学报,2008,59(11):3372-0472.  
HU LI-SHUN, WANG XINGJUN, GAO MIAO, et al. Mass transfer of atomization from pressure-swirl nozzle [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(11):3372-0472.
- [10] LIU A B, MATHER D, REITZ R D. Modeling the effects of drop drag and breakup on fuel sprays[C/OL]//International Congress and Exposition, March 8-11, 1993, Detroit, MI, USA. <http://www.sae.org/technical/papers/930072>.
- [11] TAYLOR G I. The Scientific Papers[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1963:457-464.
- [12] O'ROURKE P J, AMSDEN A A. The TAB method for numerical calculation of spray droplet break up[J/OL]. International Fuels and Lubricants Meeting and Exposition, 1987(11). [1987-11-02] <http://adsabs.harvard.edu/abs/1987ifl..meet....O>.
- [13] 王喜忠,于才渊.喷雾干燥[M].北京:化学工业出版社,2004:48-49.
- [14] 李键蓉,张淑荣,尹洪超. Y型喷嘴性能的数值分析[J].热科学与技术,2006,5(3):279-281.  
LI JIAN-RONG, ZHANG SHU-RONG, YIN HONG-CHAO. Numerical analysis of performance of Y-jet atomizer [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2006, 5(3):279-281.

(编辑 王维朗)