

# “旋转型气—液雾化喷嘴”流量特性的实验研究

龚景松, 傅维镛

(清华大学 工程力学系, 北京 100084)

**摘 要:**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雾化喷嘴——“旋转型气—液雾化喷嘴”, 其气液比在热态实验时为 4%~6% (用压缩空气雾化), 并对其流量系数进行了系统的研究。主要考虑了喷嘴的结构参数、气液比 (ALR) 和液体粘度等因素对流量系数的影响。通过实验测量与拟合, 最后得到了喷嘴的流量系数的表达式, 可以用来指导喷嘴的设计。

**关 键 词:**喷嘴; 流量系数; 气液比

中图分类号: TK474 文献标识码: A

## 1 引 言

喷嘴是液体燃料燃烧装置中不可缺少的一个关键组成部分。人们对大量的雾化方法进行了实验与理论研究, 发展了各种不同类型的喷嘴, 目前普遍应用的喷嘴主要有以下几种类型<sup>[1~2]</sup>: 机械式喷嘴、气动喷嘴和旋转式喷嘴等。

气动喷嘴是用空气或蒸汽作雾化介质, 将油流雾化, 有高压和低压两种类型。主要包括气体辅助雾化喷嘴 (内混或外混)、气泡雾化喷嘴<sup>[3]</sup>和 Y 型喷嘴等。在气动喷嘴的研究中, 如何降低气体的消耗量是科研人员研究的目标。

本文在对各种气动喷嘴及其雾化机理分析的基础上, 提出了一种新型的雾化喷嘴——“旋转型气—液雾化喷嘴”, 其气液比在热态实验时为 4%~6% (用压缩空气雾化、燃烧超稠油乳化油), 可以保证良好雾化, 燃烧充分。下面就喷嘴的流量特性进行研究。

## 2 实验系统

图 1 为喷嘴的一个关键部件的典型结构, 油与气分别从不同的通道切向进入混合室, 且雾化空气

与液体——对应, 几股燃料与气互相混合、旋转从喷口喷出, 进行雾化。本文主要考虑了如下的因

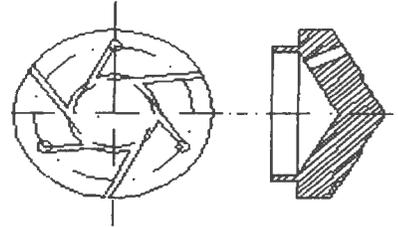


图 1 典型喷嘴结构

素对流量系数的影响: 喷嘴的结构参数、气液比 (ALR) 和液体粘度等。喷嘴的结构参数主要包括: 切向旋转半径  $R$ 、液体切槽截面积  $S_1$ 、气体切槽截面积  $S_g$  和出口半径  $r_p$ 。具体组合关系如下:

- 1-1-12-2.5,      1-1-12-4,
- 1-1-12-6,      1-0.75-12-2.5,
- 1-0.75-12-4,      1-0.75-12-6
- 0.8-0.8-12-4,      0.8-0.8-12-6,
- 0.6-0.6-12-4,      0.6-0.6-12-6,
- 1-0.75-9-2.5
- 1-0.75-9-4,      1-0.75-9-6,
- 1-0.75-6-2.5,      1-0.75-6-4

其中: 第一个数字: 单个液体槽的面积 ( $\frac{1}{3}S_1, \text{mm}^2$ );

第二个数字: 单个气体槽的面积 ( $\frac{1}{3}S_g, \text{mm}^2$ );

第三个数字: 切向槽的旋转直径 ( $2R, \text{mm}$ );

第四个数字: 出口直径 ( $2r_p, \text{mm}$ )。

同时建立了一整套实验系统来研究喷嘴的流量特性, 其结构如图 2 所示。

本文主要用水和不同配比的甘油与水的混合物作为液体介质, 用齿轮油泵对液体介质加压, 提供所需的压力, 用空气压缩机提供压缩空气作为气体介质。为了能够准确调节流量, 调节阀门均采用针型阀, 考虑到喷嘴的安装方便, 在液、气管路与喷嘴之

间采用金属软管连接,同时在管路上安装流量计和压力表。测量过程中还要对测量的介质进行压力修正。读取流量计上的读数后根据流量计使用手册提供的相关公式进行流量的修正。

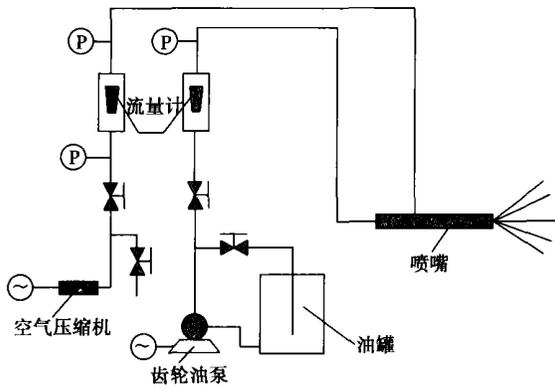


图 2 实验系统图

### 3 流量系数的表达式

液体的流量可以表示为如下的关系<sup>[2]</sup>:

$$Q_l = C_l f_p \sqrt{2\rho_l \Delta P_1} \quad (1)$$

其中:  $Q_l$ —液体的流量, kg/s;  $C_l$ —液体的流量系数;  $f_p$ —喷嘴出口面积,  $m^2$ ,  $f_p = \pi r_p^2$ ;  $\rho_l$ —被测液体的密度,  $kg/m^3$ ;  $\Delta P_1$ —被测液体在喷嘴进出口的压力差, Pa。

此时流量系数可以表达为:

$$C_l = \frac{Q_l}{\pi r_p^2 \sqrt{2\rho_l \Delta P_1}} \quad (2)$$

喷嘴出口达到声速时,雾化气体的流量用等熵流动条件下的流量公式表达为<sup>[2]</sup>:

$$Q_g = C_g f_p \sqrt{\frac{2K}{K+1} \left( \frac{2}{K+1} \right)^{\frac{2}{K-1}} P_g \rho_g} \quad (3)$$

其中:  $Q_g$ —雾化空气的流量, kg/s;  $C_g$ —气体的流量系数;  $P_g$ 、 $\rho_g$ —雾化空气的真实压力 (Pa) 和真实压力下的密度,  $kg/m^3$ ;  $P_0$ —喷嘴出口的压力 (大气压), Pa;  $K$ —绝热指数, 压缩空气为 1.4。

此时气体的流量系数可以表达为:

$$C_g = Q_g / \left( \pi r_p^2 \sqrt{\frac{2K}{K+1} \left( \frac{2}{K+1} \right)^{\frac{2}{K-1}} P_g \rho_g} \right) \quad (4)$$

### 4 流量系数的确定

#### 4.1 气液比的影响

图 3 为喷嘴的流量随压力的变化曲线(1-1-12-6)。横坐标为压力,纵坐标为液体(水)和气体的流量,液体的坐标范围为 100 ~ 200, 气体为 4.4 ~ 8.8, 两个坐标成比例, 便于比较。从图中可以看出, 随着压力的增加, 气体和液体的流量均随之增加, 且气体增加的幅度要大于液体, 主要是因为气体的压缩性比水大得多, 压力越高, 表现出的压缩性越大, 流量增加的趋势越明显。

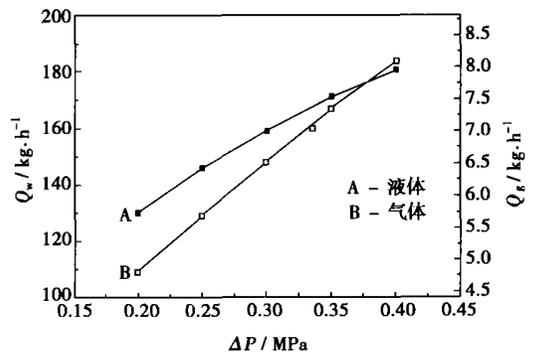


图 3 典型的流量压力曲线

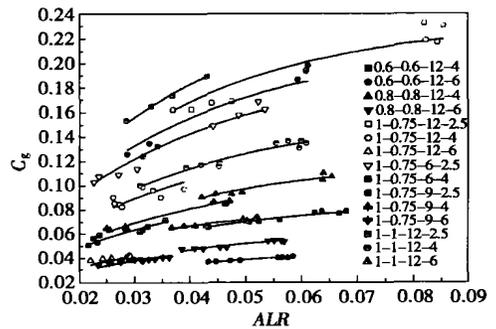


图 4 液体流量系数随气液比的变化关系

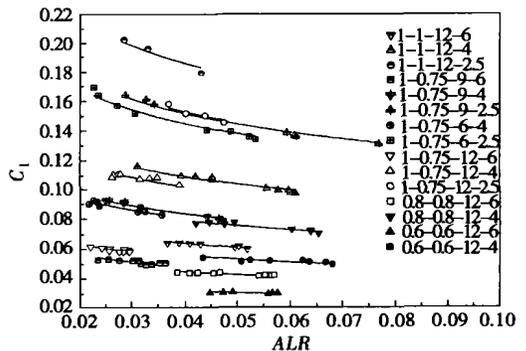


图 5 气体的流量系数随气液比的变化关系

图 4 ~ 图 5 分别为液体和气体流量系数随气液

比的变化, 实线为拟合的曲线, 对于液体, 选择的关系为  $C_l \propto ALR^a$ , 气体的流量系数的关系为:  $C_g \propto 1 - \exp(-bALR)$ 。从图 4 可以看出, 实验点与曲线基本吻合, 此关系式能够用来表达气液比的影响。图 5 是气体的流量系数随气液比的变化关系。将关系式写成等式, 则此时可以写成  $C_l = mALR^a$ ,  $C_g = n \times [1 - \exp(-bALR)]$ , 对不同曲线进行拟合,  $a$  与  $b$  的值变化很小, 通过取平均得:  $a = -0.22$ ,  $b = 31.7$ , 而不同结构喷嘴的  $m$  与  $n$  值不同, 下面继续寻找  $m$  与  $n$  的关系。

### 4.2 结构参数的影响

上面找到了流量系数与气液比的关系, 下面对结构参数的影响进行讨论。通过与机械雾化喷嘴的对比, 找到了结构参数对流量系数的影响, 图 6 是液体的流量系数中  $m$  随  $x$  的变化, 图 7 是气体的流量系数中  $n$  随  $y$  的变化:

$$x = \left(\frac{R}{R_0}\right)^{1.44} \left(\frac{S_g}{S_l}\right)^{0.48} \left(\frac{Rr_p}{S_l}\right)^{1.235}$$

$$y = \left(\frac{R}{R_0}\right)^{1.54} \left(\frac{S_l}{S_g}\right)^{0.92} \left(\frac{Rr_p}{S_g}\right)^{1.147}$$

式中:  $R_0 = 1 \text{ mm}$ , 目的是使得关系式为无量纲数。

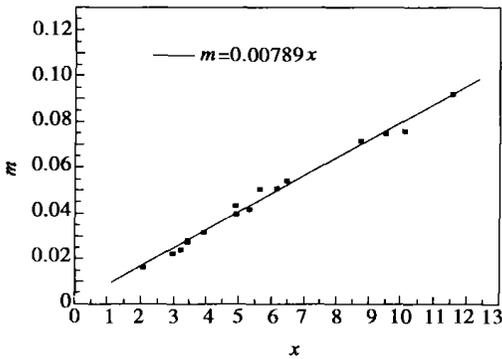


图 6 液相系数  $m$  的关系式拟合

### 4.3 粘性的影响

在本实验中使用了 3 种不同配比的甘油与水的混合液体, 具体的物理性质见表 1。同时由于液体粘性改变, 需要对流量计的读数进行重新标定。

表 1 甘油水溶液的粘性与密度

编号	粘度 / mPa·s	恩氏粘度 (°E)	密度 / kg·m <sup>-3</sup>
1	59.75	6.63	1195
2	27.86	3.31	1173
3	13.7	2.02	1143

对不同粘度的甘油与水的混合物进行流量特性实验, 采用上面同样的方法, 最后得到了粘性对流量系数的影响, 如图 8 所示, 即:

$$m \propto 1 - \exp\left(-\frac{c\mu_w}{\mu_l}\right)$$

其中:  $\mu_l$ —被测液体的粘度;  $\mu_w$ —20 °C 时水的粘度, 经过拟合,  $c$  值为 25.77。

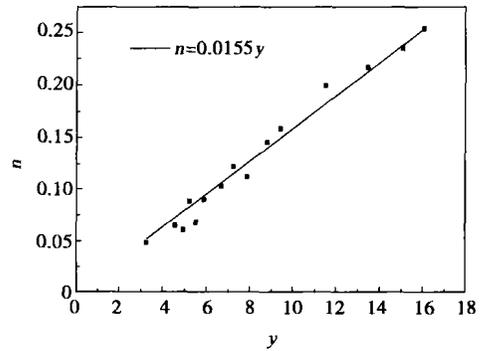


图 7 气相系数的关系式拟合

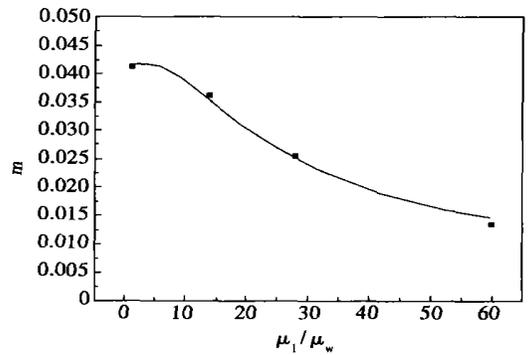


图 8 粘性系数的关系式拟合

通过前面的拟合, 最后得到喷嘴的流量系数的表达式:

$$C_l = 0.00789 \left(\frac{2R}{R_0}\right)^{1.44} \left(\frac{S_g}{S_l}\right)^{0.48} \left(\frac{Rr_p}{S_l}\right)^{-1.235} \times ALR^{-0.22} (1 - \exp(-\frac{25.77\mu_w}{\mu_l})) \quad (5)$$

$$C_g = 0.0155 \left(\frac{2R}{R_0}\right)^{1.54} \left(\frac{S_l}{S_g}\right)^{0.92} \left(\frac{Rr_p}{S_g}\right)^{-1.147} \times (1 - \exp(-31.7ALR)) \quad (6)$$

将此关系式的计算结果与实验结果进行对比, 如图 9 ~ 图 10 所示。横坐标为实验得到的流量系数的值, 纵坐标为计算的流量系数的值, 如果计算结果与实验相等, 则此点将落在直线上。若偏离直线, 说明计算与实验之间有一定的误差, 从实验与计算的

结果得出,对于液体的流量系数,其绝大多数的误差在 ±10% 以内,只有零星的几个点的误差大于 ±10%;对于气体的流量系数,误差较液体的要大,但是它的误差也是大部分在 ±10% 以内。造成实验与计算之间的误差的原因很多,如气源、水源等的不稳定,读数误差等。

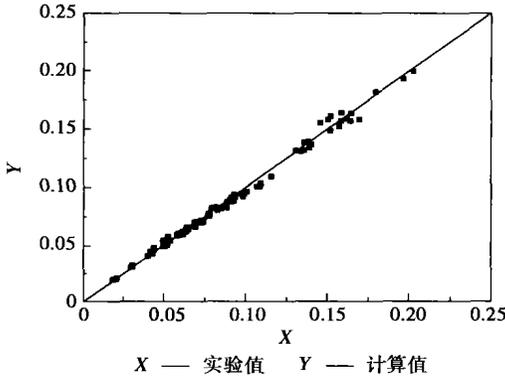


图 9 液相流量系数的计算与实验对比

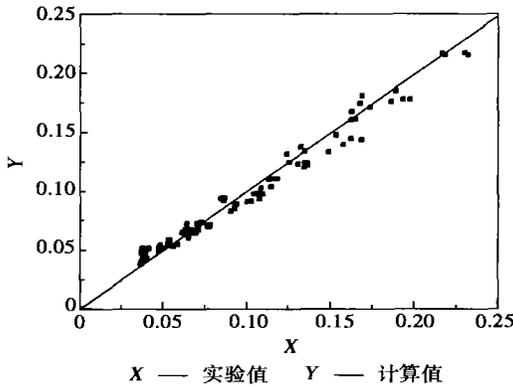


图 10 气相流量系数的实验与计算对比

### 5 雾化机理分析

液体燃料的雾化机理是极其复杂的。当油流或油滴在气体介质中高速运动时,会受到外界空气动力(如阻力、拉伸力)和液体燃料内力(表面张力和粘性力)的相互作用。对于气动喷嘴来说,雾化主要是通过气体的气动力克服液体的表面张力和粘性力来使液柱破碎成液滴,达到雾化的目的。本喷嘴之所以有较好的雾化性能,主要考虑了以下几方面:

(1) 通过机械方法形成燃料油的预置膜。燃料油从几个通道中被挤出,形成比较薄的膜,再与达到

音速的雾化空气接触,膜与空气的速度相差很大,流体的剪切作用十分强烈,使油流与空气之间形成气液两相流,达到初步的雾化。由于它不像离心喷嘴利用高速旋转来形成预置膜,而是靠几个机械通道将油挤出,压力较低,压力只有 0.3~0.4 MPa。

(2) 增加雾化介质与液体的混合。本喷嘴将空气与液体分成几股切向进入混合腔,不同组合的油、气混合物互相撞击,经过混合后,从喷嘴口喷出。与 Y 型喷嘴相比,增加了几股两相流之间的相互作用,充分利用每个槽道中流出的高速气流的动能,撞击未被雾化的大油滴,将每股油流中未充分雾化的大油滴继续雾化,达到更好的雾化。

(3) 降低喷嘴内部的动力损耗。如何降低内部的动能损耗也是提高雾化质量、降低气液比不可忽略的一个方面。本文的喷嘴尽量降低了空气与油流混合过程的动能损耗。

### 6 结 论

本文提出了一种新型的雾化喷嘴——“旋转型气—液雾化喷嘴”,并对其流量系数进行了较系统的实验研究。主要考虑了喷嘴的结构参数,气液比(ALR),液体粘度等因素对流量系数的影响。通过实验测量与拟合,最后得到喷嘴的流量系数的表达式:

$$C_l = 0.00789 \left( \frac{2R}{R_0} \right)^{1.44} \left( \frac{S_g}{S_l} \right)^{0.48} \left( \frac{Rr_p}{S_l} \right)^{-1.235} ALR^{-0.22} \times (1 - \exp(-\frac{25.77 \mu_w}{\mu_l}))$$

$$C_g = 0.0155 \left( \frac{2R}{R_0} \right)^{1.54} \left( \frac{S_l}{S_g} \right)^{0.92} \left( \frac{Rr_p}{S_g} \right)^{-1.147} \times (1 - \exp(-31.7 ALR))$$

此表达式可以用来指导喷嘴的设计。

### 参考文献:

[1] LEFEBVRE A H. Atomization and spray[M]. Hemisphere Publishing Corporation, 1989.  
 [2] 曾汉才,韩才元,吴学曾,等. 燃烧技术[M]. 湖北:华中理工大学出版社,1990.  
 [3] 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.

lift-off. The lower the resonant frequency, the stronger the turbulence. At other frequency values the flame remains attached and has a shorter length with the shortest length appearing at 50% to 60% of duty cycle. The condition of piping connection can also influence the pulsating characteristics of the flame. Under resonant frequencies and with an increase in average Reynolds number the flame may lift off at a relatively high fuel-rich combustion-time share while under other frequencies the flame will remain attached all the time. **Key words:** combustion with a pulsating fuel feed, low  $\text{NO}_x$  combustion, flame characteristics, flame alternative structure.

“旋转型气-液雾化喷嘴”流量特性的实验研究 = **Experimental Investigation of the Flow Characteristics of a Swirl-type Gas-liquid Atomization Spray Nozzle** [刊, 汉] / GONG Jing-song, FU Wei-biao (Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(4). — 376 ~ 379.

The atomization mechanism of various types of pneumatic spray nozzles was analyzed. On this basis proposed is an innovative atomization spray nozzle, the so-called swirl-type gas-liquid atomization spray nozzle. Its air-to-liquid mass flow rate ratio (ALR) during hot-state tests is 4% - 6% (atomized by compressed air). A systematic study was conducted of its flow factor with main attention being focused on the influence of nozzle structural parameters, ALR and liquid viscosity on the flow factor. Through experimental measurements and fitting a mathematical expression of the nozzle flow factor is obtained, which can serve as a guide for the spray nozzle design. **Key words:** spray nozzle, flow factor, air-to-liquid mass flow rate ratio.

惯性分离器内气固两相流雷诺应力数值模拟 = **Numerical Simulation of Reynolds Stresses of Gas-solid Two-phase Flows in an Inertial Separator** [刊, 汉] / WANG Hai-gang, LIU Shi, JIANG Fan (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(4). — 380 ~ 383.

A detailed numerical study was conducted of the gas-solid inertial separation process in a circulating fluidized bed. A Reynolds stress model is used to serve as a turbulent flow model with the object of study being the gas-solid two-phase flow in a U-shaped separator. To truthfully describe the collision process between solid particles and a separator wall surface, a particle trajectory model was adopted to simulate solid particles. In addition to the introduction of the influence of the wall surface roughness, the diffusion action of the solid particles in turbulent flows and the mutual collision between particles have also been taken into account. The influence of different inlet speeds and quantity of separator dampers on particle separation efficiency and fluid pressure drop has been calculated through the use of simulations. The calculation results have given not only the structural features of the gas-solid two-phase flows in the separator, but also shown the relationship between the separator efficiency and pressure drop on the one hand and inlet main flow speeds and separator structural parameters on the other. **Key words:** Reynolds stress model, inertial separator, particle trajectory model.

多孔介质往复流动燃烧的一维数值模拟 = **One-dimensional Numerical Simulation of Reciprocating-flow Combustion in Porous Media** [刊, 汉] / MA Shi-hu, XIE Mao-zhao, DENG Yang-bo (Power Engineering Department, Dalian University of Science & Technology, Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(4). — 384 ~ 388.

A one-dimensional mathematical model was set up to simulate the reciprocating-flow combustion in porous media. In this system combustible premixed gases change their direction periodically, and flow into a combustor from two ends. It is assumed that gas phase and solid phase exist in a state of local thermal equilibrium and the influence of radiation heat exchange has also been taken into account. A mathematical solution is obtained by using a finite volume scheme. By way of a huge quantity of numerical calculations investigated was the impact of major operating parameters on the temperature distribution and reaction characteristics of the combustion system. As for such parameters one can list: half cycle, flow speed, equivalence ratio, heat losses, attenuation factor of porous media and their heat capacity. The calculation results are qualitatively in fairly good agreement with experimental results. **Key words:** porous media, reciprocating, super adi-