

# 气动扇形喷嘴雾化特性的实验研究

池保华, 仲伟聪, 杨国华, 洪 流  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 为研究气动扇形喷嘴雾化特性, 设计加工了不同角度、不同出口形式和不同尺寸的 5 种扇形喷嘴, 并搭建了试验台架系统, 进行了喷嘴雾化试验。根据试验测量结果, 从流量特性和雾化特性方面分析了气液比、喷嘴结构等对喷嘴流量系数、喷雾场雾化粒径分布的影响, 并定性给出了喷嘴结构对雾化特性的影响规律。

**关键词:** 扇形喷嘴; 雾化试验; 雾化特性; 气液比; 喷嘴结构

中图分类号: V434-34 文献标识码: A 文章编号: 1672-9374 (2013) 03-0038-06

## Experimental research on atomization characteristics of fan spray nozzle

CHI Bao-hua, ZHONG Wei-cong, YANG Guo-hua, HONG Liu  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** To study the atomization characteristics of fan spray nozzle, five fan spray nozzles with different spraying angle, different outlet form and different size were designed. An experimental bed system was built. The spraying experiment for the nozzles was performed under the design conditions. In the aspects of mass flow and atomization characteristics, the influence of gas-liquid ratio and nozzle structure on flow coefficient of nozzle and distribution of atomization particles was analyzed. The qualitative influence trend of nozzle structure on atomization characteristics is given.

**Keywords:** fan spray nozzle; spraying experiment; atomization characteristic; gas-liquid ratio; nozzle structure

## 0 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, 在液体火箭发动机和航空发动机

中都有广泛应用。国内外对雾化方法进行了试验与理论研究, 发展了各种不同类型的喷嘴。目前普遍应用的喷嘴主要有机械式喷嘴、气动喷嘴和旋转式喷嘴等<sup>[1]</sup>。气动喷嘴是采用空气或蒸汽作雾化介质, 利用气液两相的作用力将工质雾化,

收稿日期: 2013-04-08; 修回日期: 2013-04-20

基金项目: 国家 863 项目(2007AA705302)

作者简介: 池保华 (1982—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机基础理论、热能与动力工程

有高压和低压两种类型。常见喷雾场形式有实心锥、空心锥和扇形等, 喷雾场的雾化粒径分布、流强的空间分布、雾化角度和喷射速度等直接影响燃烧效率、稳定性和热防护, 研究其雾化特性对燃烧装置的设计有重要指导意义<sup>[2-3]</sup>。

本文根据常用气动喷嘴的设计基础, 结合扇形喷雾场的形成方法, 设计加工了 5 种扇形喷嘴, 研究了气液比、临界面积、喷口面积对扇形喷雾场流量系数和雾化粒径分布的影响, 并定性给出了喷嘴结构对雾化特性的影响规律。

1 喷嘴设计

以气动雾化理论为基础, 设计加工了 5 种喷嘴, 喷嘴参数见表 1, 结构见图 1。水和压缩空气分别从液体通道和气体通道进入, 液体通道位于喷嘴中心位置, 4 路气体通道呈中心对称分布, 液体通道和气体通道夹角为 45°。水和压缩空气相撞后, 进入混合室相互冲击混合, 并发生强烈的动量交换和能量交换, 形成均匀的气液混合物, 最后从喷口喷出, 完成雾化。

喷嘴的结构参数主要包括: 液孔直径  $d_1$ 、气孔直径  $d_2$ , 临界面积  $A_{cr}$ , 喷口面积  $A_e$ 。喷口形状为带导流角的橄榄形喷口和矩形喷口, 气液混合物通过混合室出口后, 受到整流槽限制而挤压变形, 形成角度和导流角近似的扇形喷雾场。

表 1 喷嘴规格参数

Tab. 1 Parameters of nozzles

编号	额定流量/ (kg·h <sup>-1</sup> )	导流角(扩 散角)/(°)	喷口型式	$A_e/\text{mm}^2$
1#	216	30	橄榄形	10.67
2#		60	橄榄形	11.01
3#		100	橄榄形	13.70
4#	43.2	20	橄榄形	2.48
5#		20	矩形	2.40

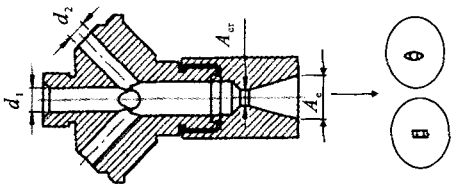
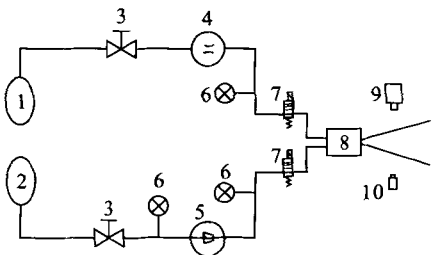


图 1 喷嘴结构  
Fig. 1 Structure of nozzle

2 试验系统

雾化试验系统的结构如图 2 所示, 主要由液流试验系统和光学诊断系统组成。液流试验系统包括水储箱、空气储箱、截止阀、流量计、孔板、压力传感器、电磁阀、雾化喷嘴等。光学诊断系统由激光光源、高速摄影机和图像分析处理系统组成, 能够分辨最小 40 μm 的液滴, 拍摄速度为 4 500 幅/秒。试验系统中以水为工作介质, 以压缩空气为雾化介质。水流量由电磁流量计测量, 空气流量较小, 用 0.5 mm 超音速孔板控制。试验前, 对超音速孔板进行标定, 流量特性为  $Q=0.5(p+0.1)$ , 测量误差在 2% 以内。



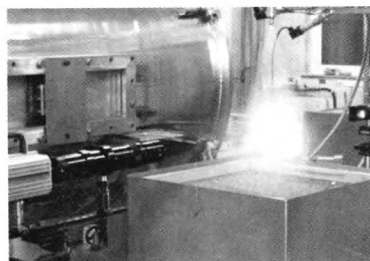
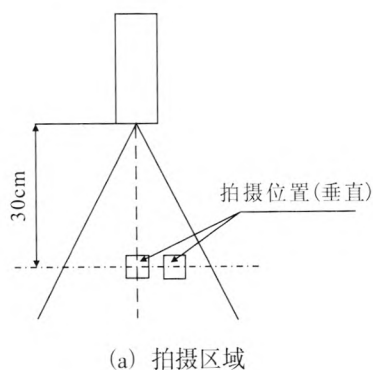
1—水储箱; 2—空气储箱; 3—截止阀; 4—流量计;  
5—孔板; 6—压力传感器; 7—电磁阀; 8—雾化喷嘴;  
9—高速相机; 10—激光光源

图 2 试验系统结构示意图  
Fig. 2 Structural diagram of experimental system

试验前, 调整好光学诊断设备, 分别通入压缩空气和水, 调节两路控制阀达到试验工况, 打开电磁阀, 待流量稳定后, 记录喷嘴工况参数, 利用高速摄影相机进行拍摄测量。同步调节液路流量及气液比, 重复上述试验。

### 3 试验结果及分析

试验中对5种扇形喷嘴分别进行了3种气液比条件下的雾化试验,其中1#,2#和3#喷嘴气液比条件为1.0%,1.5%和2.0%,4#喷嘴气液比为1.0%,1.4%和2.1%,5#喷嘴气液比为1.0%,1.6%和2.0%。高速摄影相机拍摄区域位于喷口下游30 cm,拍摄方向与喷嘴轴线垂直,拍摄区域大小2 mm×2 mm。大喷雾角时拍摄横向3个区域,小喷雾角时拍摄两个区域,试验现场如图3所示。根据试验参数,分析了工况条件、结构尺寸对喷嘴雾化特性的影响。



(b) 试验现场

图3 雾化试验现场

Fig. 3 Atomization testing site

#### 3.1 流量特性

不同气液比下混合物密度不同,计算得到的总流量系数不同。流量系数计算方法如下:

$$\rho_{\text{混}} = \frac{1+\alpha}{\frac{1}{\rho_l} + \frac{1}{\rho_g}}$$

$$C_d = \frac{Q}{A \sqrt{2\Delta p \rho_{\text{混}}}}$$

式中:  $\rho_l$  和  $\rho_g$  为液体、气体密度;  $\alpha$  为气液比;  $Q$  为额定流量;  $A$  为喷口面积;  $\Delta p$  为喷前表压。

图4为喷嘴流量系数随气液比的变化曲线,横坐标为气液比,纵坐标为流量系数。从图中可以看出,随着气液比的增加,喷嘴的流量系数随之减小。同气液比时流量系数较高的是2#喷嘴和4#喷嘴。决定扇形喷嘴出口流动损失的主要因素有导流角度、导流长度、横截面形状、速度分布、流动状态等,流动损失越大,喷嘴流量系数越小<sup>[4]</sup>。试验条件下,从喷嘴流量系数变化可以看出:相同导流角度时,喷嘴流动损失随着出口横截面长宽比的增大而增大;相同出口长宽比下,喷嘴流动损失随着导流角度的增大而增大。

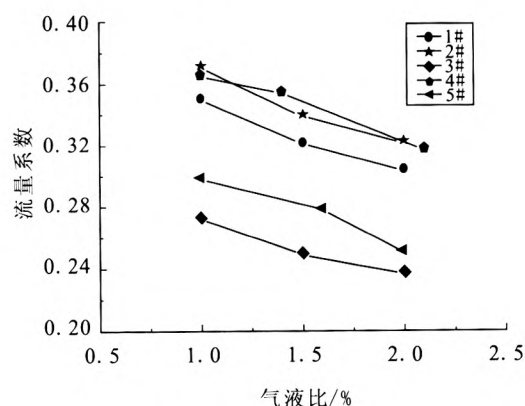


图4 流量系数随气液比的变化

Fig. 4 Flow coefficient vs gas-liquid ratio

#### 3.2 雾化特性

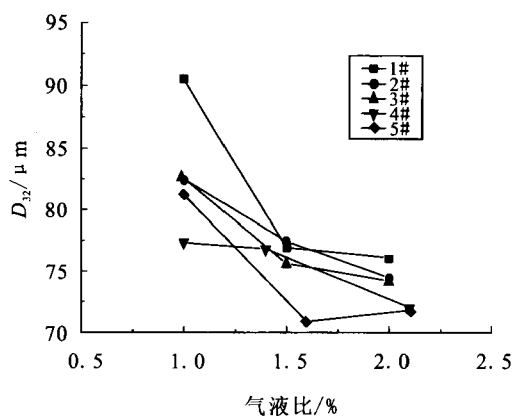
##### 3.2.1 气液比影响

以索太尔直径 ( $D_{32}$ ) 为雾化粒径衡量标准,图5给出了不同区域  $D_{32}$  随气液比的变化曲线 ( $r$  为测量区域距喷嘴中心线的距离)。在气液比1.0%~2.1%时,大流量扇形喷嘴(1#,2#,3#)雾化粒径范围74.2~90.5  $\mu\text{m}$ ,小流量扇形喷嘴(4#,5#)雾化粒径范围70.9~91.6  $\mu\text{m}$ 。喷嘴的雾化特性取决于气液的动量交换,在混合室一定的情况下,混合室入口的气液动量比对气液的混合起着决定性作用。分析不同工况条件下混合室的入口气液动量比,动量比随气液比的增大而增大,1#喷嘴动量比0.034~0.088,2#喷嘴动量比0.038~0.096,3#喷嘴动量比0.034~0.088,4#喷嘴

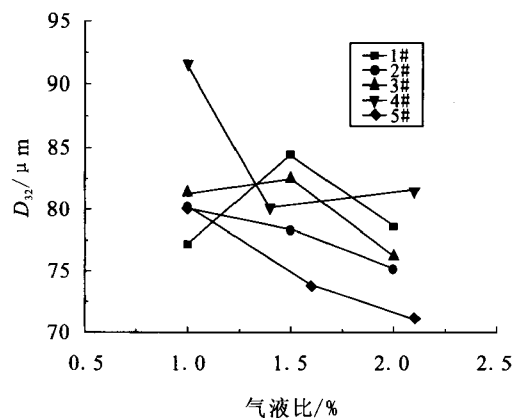
嘴动量比 0.044~0.116, 5# 喷嘴动量比 0.032~0.088。入口动量比越大, 气液混合越好, 平均索太尔直径呈减小的趋势。

图 6 给出了喷雾场不同位置处  $D_{32}$  的变化情况。气液比较低时, 2#, 3#, 5# 喷嘴中心和边区位置 SMD 相差不大, 1#, 4# 喷嘴中心和边区位置 SMD 相差 15  $\mu\text{m}$  以上; 气液比较高时, 1#~4#

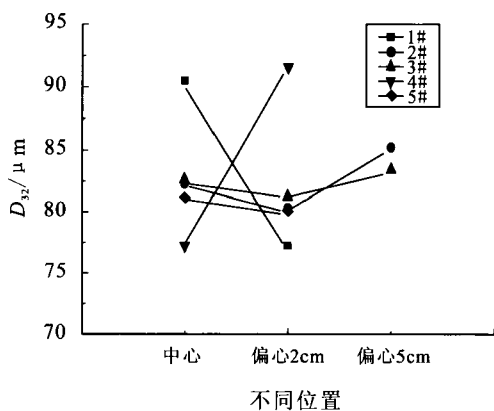
喷嘴中心区域 SMD 较小, 边缘均有不同程度的升高, 4# 喷嘴中心和边区 SMD 相差 12  $\mu\text{m}$  以上, 5# 喷嘴雾化较均匀,  $D_{32}$  随位置变化不大。分析认为: 试验喷嘴气液动量比相差较大, 气、液射流初始撞击时仅能引起液束的变形、扭曲和局部剥离, 部分工况下液核在混合室内会偏离喷嘴中心, 导致中心附近区域 SMD 反而偏大。



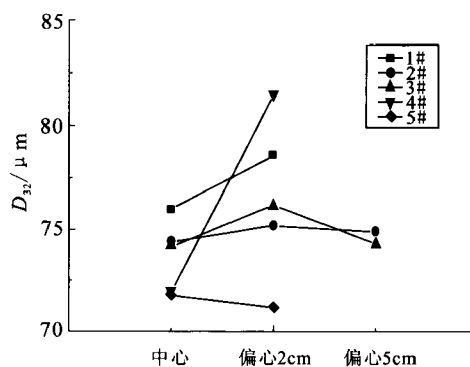
(r=0)



(r=20 mm)

图 5  $D_{32}$  随气液比的变化Fig. 5  $D_{32}$  vs gas-liquid ratio

不同位置

( $\alpha=1.0\%$ )

不同位置

( $\alpha=2.0\%$ )图 6  $D_{32}$  随位置的变化Fig. 6  $D_{32}$  vs different position

### 3.2.2 喷嘴结构影响

在入口结构和混合室一定的情况下, 喷头结构的变化主要是临界面积和出口面积的变化。临界面积指混合室出口面积, 它主要决定着混合室压强的高低和扇形喷雾场流强分布, 出口面积主

要决定雾化粒径分布、雾化角度和喷射速度。

小流量喷嘴工作时, 喷雾场角度与喷嘴导流角度基本一致, 相同区域粒径分布对比如图 7 和图 8 所示。从图中可以看出, 气液比较高时, 5# 喷嘴液滴直径分布更趋近于正态分布, 其小液滴

更多、雾化效果更好；气液比较低时，4# 喷嘴液滴直径分布更均匀，其雾化效果更好。4# 与 5# 喷嘴具有相同的导流角度和导流长度，但 5# 喷嘴平均流量系数 (0.276) 小于 4# 喷嘴平均流

量系数 (0.346)，说明矩形截面造成的流动损失要大于橄榄型截面。进一步地，可以定性认为，矩形截面对两相流的扰动随气液比的增大而增大。

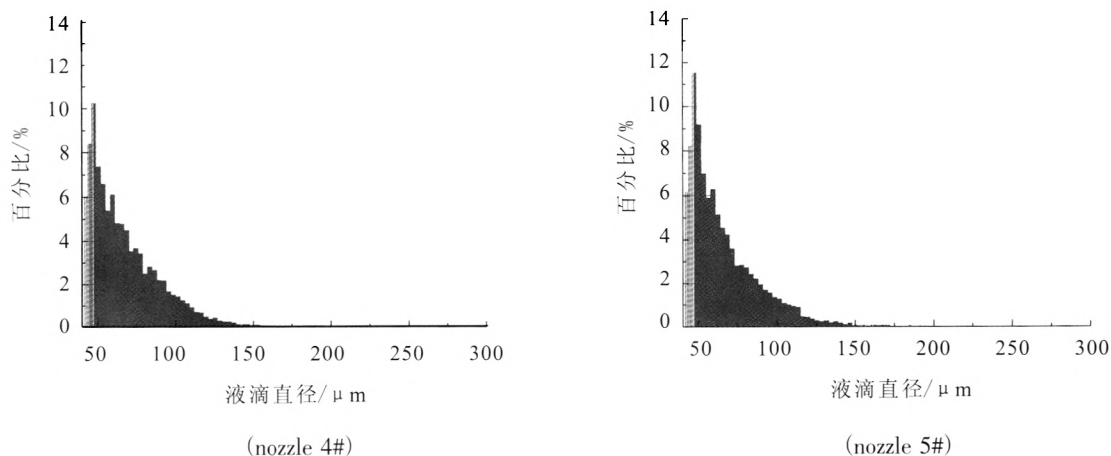


图 7 不同喷嘴的雾化特性 ( $\alpha=2.1\%$ ,  $r=0$ )

Fig. 7 Atomization characteristics of different nozzles ( $\alpha=2.1\%$ ,  $r=0$ )

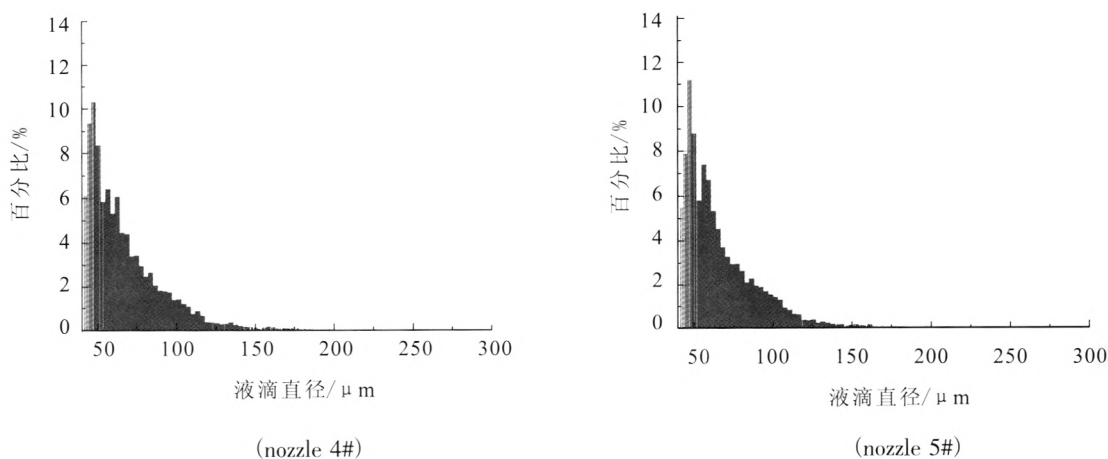


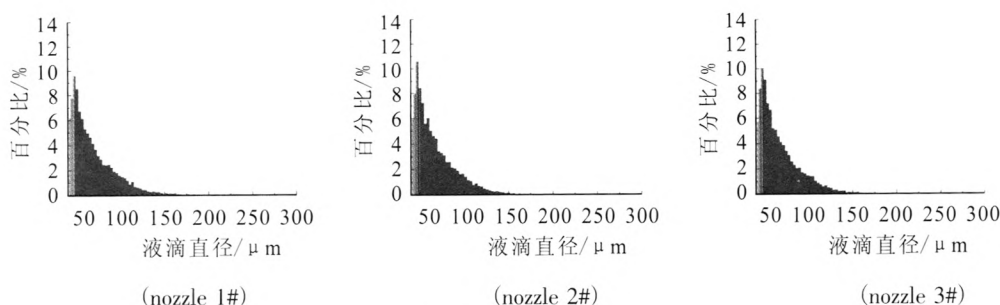
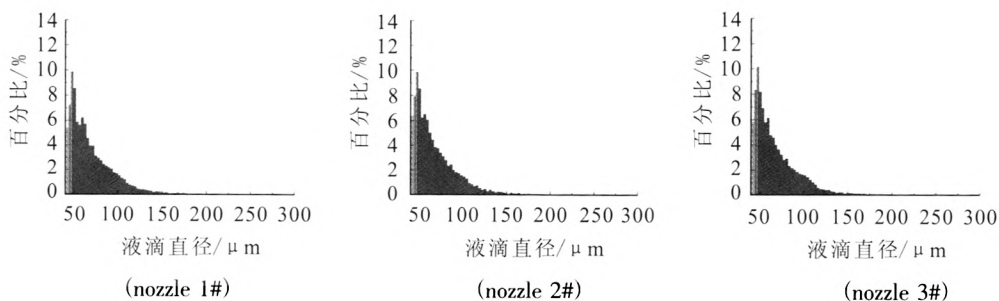
图 8 不同喷嘴的雾化特性 ( $\alpha=1.0\%$ ,  $r=0$ )

Fig.8 Atomization characteristics of different nozzles ( $\alpha=1.0\%$ ,  $r=0$ )

大流量喷嘴工作时，喷嘴出口导流角对喷雾场角度的影响各不相同，1# 喷嘴喷雾场角度与喷嘴出口导流角基本一致，2# 喷嘴喷雾场角度比喷嘴出口导流角小约  $5^\circ$ ，3# 喷嘴喷雾场角度比喷嘴出口导流角小约  $10^\circ$ 。不同喷嘴相同区域粒径分布对比如图 9 和图 10 所示。

从图中可以看出，气液比较高时，3# 喷嘴平

均 SMD 最小，雾化特性最好；气液比较低时，2# 喷嘴液滴直径分布更均匀，雾化效果更好。随着喷嘴导流角由  $30^\circ$  增加到  $100^\circ$ ，流量系数先增加后减小，流动损失也呈抛物线变化。这说明在设计工况下，橄榄型喷口导流角小于  $60^\circ$  的范围内，存在一个导流角最佳值，既能满足喷雾场角度与导流角一致，又能达到最好雾化效果。

图 9 不同喷嘴的雾化特性 ( $\alpha=2.0\%$ ,  $r=0$ )Fig.9 Atomization characteristics of different nozzles ( $\alpha=2.0\%$ ,  $r=0$ )图 10 不同喷嘴的雾化特性 ( $\alpha=1.5\%$ ,  $r=20\text{mm}$ )Fig.10 Atomization characteristics of different nozzles ( $\alpha=1.5\%$ ,  $r=20\text{mm}$ )

## 参考文献:

- [1] SRIDHARA S N, RAGHUNANDAN B N. Studies on the performance of airblast atomizer under varying geometric and flow conditions, AIAA 99-2460 [R]. USA: AIAA, 1999.
- [2] 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.
- [3] RIZK N K, LEFEBVRE A H. Influence of airblast atomizer design features on mean drop size, AIAA 82-1073 [R]. USA: AIAA, 1982.
- [4] 章梓雄, 董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [5] 石玉文. 气动喷嘴雾化特性的数值研究[J]. 汽轮机技术, 2007, 49(4): 294-295.
- [6] 徐行, 郭志辉, 顾善建. 新型气动雾化喷嘴喷雾特性的实验研究[J]. 航空动力学报, 1997, 12(3): 295-334.
- [7] REITZ R D, BRACCO F V. Mechanism of atomization of a liquid jet[J]. Phys. Fluids, 1982, 25(10): 1730-1742.
- [8] CROESLER T, LEFEBVRE A H. Studies on aerated-liquid atomization[J]. International J. of Turbo and Jet Engines, 1989 (6): 221-229.

(编辑: 王建喜)

## 4 结论

设计并加工了 5 种不同的扇形雾化喷嘴, 搭建了试验台架系统, 进行了喷嘴的雾化特性试验研究, 从流量特性和雾化特性方面对试验结果进行了对比和分析, 得到如下结论:

1) 随气液比增加, 扇形喷嘴流量系数随之减小。相同导流角时, 扇形喷嘴流动损失随出口横截面长宽比的增大而增大; 相同出口长宽比下, 扇形喷嘴流动损失随导流角的增大而增大。

2) 扇形喷嘴结构一定时, 气液混合动量比越大, 气液混合越好, 喷雾场平均索太尔直径愈小。

3) 矩形截面造成的流动损失要大于橄榄型截面, 矩形截面对两相流的扰动随气液比的增大而增大。

4) 设计工况下, 橄榄型喷口导流角小于  $60^\circ$  的范围内, 存在一个最佳值, 既能满足喷雾场角度与导流角一致, 又能达到最好的雾化效果。