

Y 型喷嘴穿透特性的实验和模型研究

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

摘 要: 为研究某 Y 型喷嘴的穿透特性, 搭建了实验台架系统, 设计了喷嘴的工况参数, 并进行了喷嘴的冷态实验研究。根据实验测量结果, 分析了气液比 (2%~4%) 对穿透深度的影响规律, 提出了新型的无量纲复合动量, 对 M.Y.Leong 穿透深度经验公式进行了改进, 拟合了实验条件下的经验参数。进一步利用液滴运动数学模型对喷嘴的穿透深度进行了计算和分析。

关键词: Y 型喷嘴; 穿透特性; 数学模型

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2011) 03-0038-04

Experimental and model research of penetration characteristic for Y-shape nozzle

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

Abstract: To research the penetration performance of Y-shape nozzle, the experimental system was built, the working parameters of the nozzle were designed and the cold test was conducted under the design conditions. The influence of air-liquid ratio (2%~4%) on the penetration depth was analyzed according to the experiment results. The novel dimensionless complex momentum was presented. M. Y. Leong experiential formula was improved base on the new nondimensional multiple momentum. The experiential parameters was fitted under the experimental condition. All the more, the mathematics model of kenetic droplet was calculated and analyzed.

Keywords: Y-shape nozzle; penetration performance; mathematical model

0 引言

Y 型喷嘴是一种多单元内混式气动喷嘴, 具有出力大、气耗低、调节比宽等优点, 在大型实

验台架和工业燃烧设备上都有广泛的应用。气动喷嘴在保证雾化细度的前提下, 具有足够的穿透深度, 能够保证气液的充分混合, 提高雾化掺混效率。对于火箭发动机和航空发动机来说, 能够保证推进剂的良好雾化和快速蒸发, 从而提高推

收稿日期: 2010-11-12; 修回日期: 2011-01-25

基金项目: 总装备部预研项目

作者简介: 池保华 (1982—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机喷雾燃烧

进剂的化学反应速度, 提高发动机的工作性能。目前, 国内外学者在这方面也开展了很多的研究。M. Y. Leong 研究了射流在横向气流下的穿透深度, 得到了环境压力和复合动量对穿透深度影响的经验公式; Steven J. Beresh 研究了超声速射流在亚音速横向气流中的穿透特性, 分析了射流速度对穿透距离和雾场粒径的影响; 刘静研究了湍流度和附面层厚度对超声速射流液雾穿透深度的影响。本文在 Y 型喷嘴的理论设计基础上, 通过调整喷口形状和尺寸, 得到了雾化好、高穿透距离的一种新型 Y 型喷嘴, 定义了新型的无量纲复合动量, 并提出了这类喷嘴设计的相关经验公式。

1 喷嘴设计

1.1 结构设计

图 1 为所设计喷嘴的结构示意图, 水和压缩空气分别从液体通道和气体通道进入。液体通道位于喷嘴的中心位置, 4 个气体通道呈中心对称分布, 液体通道和气体通道呈 45° 夹角。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, 最后经过喷口喷出, 完成雾化。借鉴 Y 型喷嘴设计的经验公式, 该喷嘴的设计液流量为 216 kg/h ; 喷嘴的流量系数 μ 取 0.9 ; β 推荐值为 0.98 。

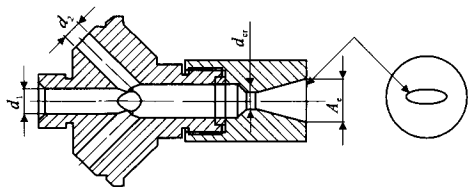


图 1 喷嘴结构示意图

Fig. 1 Structure of spray atomizer

本文主要研究喷嘴的穿透特性, 喷嘴的结构参数主要包括: 液孔直径 d_1 、气孔直径 d_2 、临界直径 d_c 、喷口面积 A_e 。根据实验验证, 相同工况下, 扇形喷雾场比锥形喷雾场能够获得更好的雾化效果和更大的穿透距离。因此, 设计喷口形状

为带导流角的橄榄形喷口。气液混合物通过橄榄形喷口时, 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, 喷雾场横向分布区域可由导流角进行调节。扇形喷雾场中间粒径粗, 四周粒径细。通过调整气液比可以调节雾场液滴的粒径和速度。

1.2 气液比设计

射流的穿透距离不仅受到雾场液滴粒径和速度的限制, 也受到垂直高度的限制, 本实验中以 0.5 m 的垂直高度为基准计算雾场的穿透距离。参考 M.Y.Leong 上、下边缘经验公式

$$\frac{X}{D} = 1.35 \cdot q^{0.447} \cdot \left(\frac{Z}{D} \right)^{0.167} \quad (\text{上边缘})$$

$$\frac{X}{D} = 0.504 \cdot q^{0.603} \cdot \left(\frac{Z}{D} \right)^{0.412} \quad (\text{下边缘})$$

式中: X 为穿透距离; D 为喷口当量直径; Z 为垂直高度; q 为无量纲复合动量。以 $X=3.0 \text{ m}$ 为例进行反算, 得到气液比 α 为 3.2% (上边缘) 和 86.6% (下边缘)。可见, 要达到高的穿透距离, 要么气液比较低, 要么气液比很高。一方面, 由于经验公式中没有考虑气动阻力影响, 当气液比很高时, 喷雾场 SMD 很小, 气动阻力相应很大, 此时计算得到的穿透深度误差很大; 另一方面, 气液比大于 10% 时, 雾化粒径将趋于稳定, 过高的气液比对雾化效果没有明显的提高。对于所设计的 Y 型喷嘴, 选择较低的气液比, 取值范围为 $2\% \sim 4\%$ 。

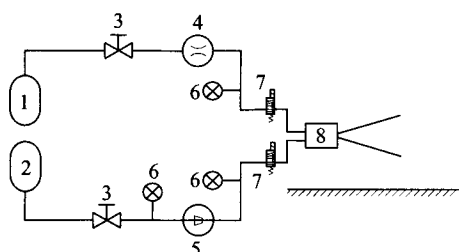
2 喷雾实验

2.1 实验系统

雾化实验台系统的结构如图 2 所示。主要由空气储箱、水储箱、截止阀、电磁阀、流量计、孔板、压力传感器和管道附件等组成。实验系统中以水为工作介质, 以空气为雾化介质。水流量用流量计控制, 空气流量较小, 用超音速孔板控制。实验前, 对超音速孔板进行标定, 流量特性为 $Q=0.5 (p+0.1)$, 误差在 5% 以内。

实验开始时, 分别通入压缩空气和水, 调节

两路控制阀使喷嘴达到预定工况,记录喷嘴工况参数,测量喷雾场在 0.5 m 垂直距离上的穿透深度。反复开关电磁阀,多次测量穿透深度后取平均值。调节空气路控制阀,改变气液比后重复上述实验。



1.水贮箱; 2.空气贮箱; 3.截止阀; 4.质量流量计;
5.孔板流量计; 6.压力传感器; 7.电磁阀; 8.试验喷嘴

图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

2.2 实验结果分析

2.2.1 穿透特性

喷嘴不同工况下的穿透深度见表 1。可以看出,在液流量不变的情况下,喷嘴的穿透深度并不是随着气液比单调增大或者减小,而是存在一个极大值。分析认为,喷嘴所形成的扇形喷雾场,中间粒径粗,四周粒径细,决定穿透深度的主要是雾场中间粒径的速度和大小。随着气液比增加,一方面混合室压力增大,雾场液滴的速度越来越大,穿透距离增大;另一方面,混合室内液体和气体的相互作用越强,湍流波动破碎和气动破碎作用越强,雾场 SMD 减小,液滴受到的气动阻力越来越大,穿透距离减小。穿透深度随气液比的变化趋势是气动阻力和液滴速度相互作用的结果。

表 1 不同工况下的穿透深度

Tab. 1 Penetration depth under different working conditions

液流量/(g·s ⁻¹)	气液比	穿透深度/m
58.2	2%	3.2
59.4	3%	3.8
60.3	4%	3.5

定义无横向气流条件下的新型无量纲复合动量: $q_2 = \frac{\alpha(\rho v^2)_w + (1+\alpha)(\rho v^2)_g}{\rho_w g Z}$, 其中下标 w、g 分别表示水和空气。

由于 M.Y.Leong 关于穿透深度的计算公式没有考虑气液比的影响,在估算穿透深度过程中存在较大误差。因此,对其进行改进时,添加气液比的影响,构造穿透深度的经验公式形式为

$$\frac{X}{D} = (\arctan \alpha)^a \cdot q_2^b \cdot \left(\frac{Z}{D}\right)^c$$

式中: X 为穿透距离; α 为气液比; D 为喷口当量直径; Z 为垂直高度; q 为新型无量纲复合动量。根据实验结果,拟合得到经验公式参数如下: $a=-3.983$, $b=9.382$, $c=-20.137$ 。该经验公式仅适用于气液比在 2%~4% 的工况条件。

2.2.2 数学模型

通过分析液滴的运动来研究喷嘴的穿透特性。作出如下假设: 1) 液滴始终保持球形; 2) 液滴互不碰撞; 3) 仅考虑重力和阻力影响,忽略液滴所受其它力作用; 4) 环境中大气保持静止。建立水平方向上液滴动量方程

$$m \frac{du}{dt} = -f_D$$

式中: t 为时间; u 为液滴速度; m 为单液滴质量; f_D 为液滴所受阻力,计算方法如下

$$m = \rho_l \pi d^3 / 6, f_D = \frac{1}{8} C_d \pi d^2 \rho_e u^2$$

式中: ρ_l 和 ρ_e 分别为液滴和大气密度; d 为液滴直径; C_d 为阻力系数,按照如下公式计算

$$C_d = \begin{cases} 0.44; & Re > 1000 \\ \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{Re^{2/3}}{6}\right); & 1 < Re \leq 1000 \\ \frac{24}{Re}; & Re \leq 1 \end{cases}$$

利用上述公式对液滴运动方程进行推导,可得

$$\frac{du}{dt} = -\frac{3C_d \rho_e}{4\rho_l} u^2$$

液滴在时间 t_0 内的水平位移为 $S=\int_0^{t_0} udt$ 。显然，决定雾场穿透距离的是最大液滴的水平运动，通过数值分析方法对最大液滴的运动模型进行求解，即可得到喷雾场的穿透距离。试验条件下最大液滴穿透距离的计算结果见表 2。

表 2 最大液滴的穿透深度

Tab. 2 Penetration depth of maximal droplets

气液比/%	液滴速度/(m·s ⁻¹)	最大粒径/μm	穿透深度/m
2	61.2	476	3.16
3	73.3	431	3.33
4	79.6	388	3.02

由表 2 中结果可以看出，最大液滴的穿透深度随气液比的变化趋势和试验结果保持一致。随着气液比增大，计算结果误差在 1.3%~13.7% 范围内变化。决定喷嘴穿透距离的关键因素是液滴的最大粒径与速度，与喷雾场平均粒径和均匀度无关。

3 结论

设计并加工了一种新型的扇形雾化喷嘴，搭建了实验台架系统，并对其进行了穿透特性研究。通过实验测量和拟合，分析了气液比对穿透深度的影响规律；在提出了一种新型无量纲复合

动量的基础上，改进了 M. Y. Leong 穿透深度经验公式,拟合了实验条件下的经验参数。进一步地，以液滴运动的数学模型为基础，对喷雾场的穿透距离进行了计算和分析。

参考文献：

[1] LEONG M Y, MCDONELL V G. Effect of ambient pressure on airblast spray injected into a crossflow, AIAA 98-3093 [R]. USA: AIAA, 1998.

[2] BERESH Steven J, HENFLING John F. Penetration of a transverse supersonic jet into a subsonic compressible cross flow [J]. AIAA Journal, 2005, 43 (2): 379-389.

[3] 刘静, 徐旭. 超声速横向气流中喷雾的数值模拟[J]. 火箭推进, 2006, 32(5): 32-36.

[4] 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.

[5] XUE J, JOG M A, JENG S M. Effect of geometric parameters on simplex atomizer performance, AIAA 2002-3710 [R]. USA: AIAA, 2002.

[6] 王达文, 孙荣权. 高雾化质量喷嘴的设计研究[J]. 沈阳大学学报, 2001, 13(4): 55-57.

[7] 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.

[8] 樊未军, 萧琦, 杨阳 等. 旋流多级气动喷嘴设计和喷雾特性研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(3): 391-393.

[9] 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.

[10] 龚景松, 傅维镛. 旋转型气-液雾化喷嘴的雾化特性研究[J]. 热能动力工程, 2006, 21(6): 632-634.

(编辑：陈红霞)