

## 反压条件下 Y 型喷嘴的变工况试验

陈鹏飞, 王 丹, 王 玫, 李龙飞

(西安航天动力研究所 液体火箭发动机技术国防科技重点实验室, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 针对燃烧室的变工况需求, 利用反压试验系统开展了 Y 型喷嘴变工况试验, 获得了喷嘴在不同反压环境下的喷注刚性、平均流速及雾化质量。试验结果表明, 在常压环境中, Y 型喷嘴通过掺混气体的方式显著改善了低工况下的喷注刚性和雾化效果, 喷嘴具有较宽的工况调节范围; 在反压环境中, 随着反压升高, 掺混气体对提高低工况下喷嘴喷注刚性的作用减弱, 然而受掺混气体的影响, 喷嘴的平均流速和雾化质量明显改善, 并且在不同流量工况下获得了良好的一致性。在模拟燃烧室工作时, Y 型喷嘴在较宽的流量调节范围内都具有良好的喷注刚性和雾化质量, 其有效的流量调节范围远大于直流喷嘴。

**关键词:** 变工况试验; Y 型喷嘴; 反压试验; 试验研究; 雾化特性

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 06-0025-06

## Experimental study on variable-flow performance of Y-shape nozzle at back pressure

CHEN Pengfei, WANG Dan, WANG Mei, LI Longfei

(National Key Laboratory of Science and Technology on Liquid Propulsion Rocket Engine,  
Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In order to meet the demands of variable flow of the combustor, a variable-flow experiment of Y-shape nozzle was performed with the back pressure testing system to obtain injection rigidity, mean flow velocity and atomization quality in different back pressure environments. The experiment results show that, at normal pressure environment, the passing pattern of mixing gas through Y-shape nozzle has remarkably improved the injection stiffness and atomization effect at low flow rate, and the nozzle has required a wider range of variable flow regulation; at the back pressure environment, the mixing gas effect to improve the injection stiffness of the nozzle at low flow rate decreases with the increase of back pressure, but the average flow velocity and atomization quality are improved remarkably, and a high consistency has got at different flow rate because of the mixing gas effect. While the simulated combustion chamber works, Y-shape nozzle has perfect injection stiffness and atomization quality in a wide flow regulation range, whose effective flow regulation range

收稿日期: 2016-08-09; 修回日期: 2016-09-13

基金项目: 国家 863 项目 2012AA7053022

作者简介: 陈鹏飞 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究领域为火箭发动机喷雾燃烧特性研究

is much wider than that of the orifice nozzle.

**Keywords:** variable-flow experiment; Y-shape nozzle; back pressure test; experimental study; atomization characteristic

## 0 引言

变推力技术在地面试验设备和液体火箭发动机上具有广泛的应用前景。对于喷注面积固定的喷注器,通过改变喷嘴压降的方式获得的工况变比一般小于3:1,进一步增加变工况范围将导致喷嘴在低工况下压降变小、流速变低、雾化变差等问题<sup>[1]</sup>。通过在推进剂中吹入气体的方式来改变气液混合物密度,可以使低工况下的喷注速度和压降维持在可以接受的量级之上,从而实现大范围工况调节<sup>[2]</sup>。Rivard采用这种方法研究了双组元发动机的推力调节范围<sup>[3]</sup>;刘景华等人提出了部分催化过氧化氢的变推力方案,采用自击预混式喷嘴控制气体(或两相流)吹入量来实现推力变化调节<sup>[4]</sup>。上述研究主要从发动机系统层面关注变推力技术,对喷嘴在工况调节过程中的流量和雾化特性变化关注较少。针对地面某试验风洞燃烧室的变工况需求,模拟燃烧室内压力变化,开展了Y型喷嘴在反压条件下冷态试验研究。

Y型喷嘴是一种气助雾化喷嘴,具有结构简单、供液量大、调节比宽、雾化质量好等优点<sup>[5]</sup>。针对Y型喷嘴在大气环境中的雾化性能和流动特

性,已经开展了大量的试验和仿真研究。例如,Mullinger等人通过试验研究了Y型喷嘴混合孔内的气液两相流结构<sup>[7]</sup>。艾军等人研究了低压小流量Y型喷嘴混合段的流场结构<sup>[8]</sup>;陈鹏飞等人针对高压大流量Y型喷嘴流场结构进行了仿真计算<sup>[9]</sup>。Bryce等人以燃料油为介质研究了Y型喷嘴的雾化特性<sup>[10]</sup>,Sargean设计了多个Y型喷嘴组合的喷头<sup>[11]</sup>。文献[12]建立了Y型喷嘴雾化粒径的预测模型,文献[13]~[16]也针对Y型喷嘴的冷态雾化特性开展了试验研究。然而,关于Y型喷嘴在反压环境中的大范围变工况特性,尚未见国内外有相关研究报道。本文在模拟燃烧室的压力环境下开展Y型喷嘴大范围变工况特性试验,获得了喷嘴压降、速度和雾化粒径等变化规律,为开展热试试验奠定基础。

## 1 试验装置与测量方法

Y型喷嘴利用反压试验系统开展变工况特性试验。该系统由介质供应系统、反压舱、采集和控制系统等组成,工作原理见图1。反压舱容积50 L,可以形成0.1~4 MPa的反压环境,试验过程中舱内的多余空气和水由舱体下游出口排出。

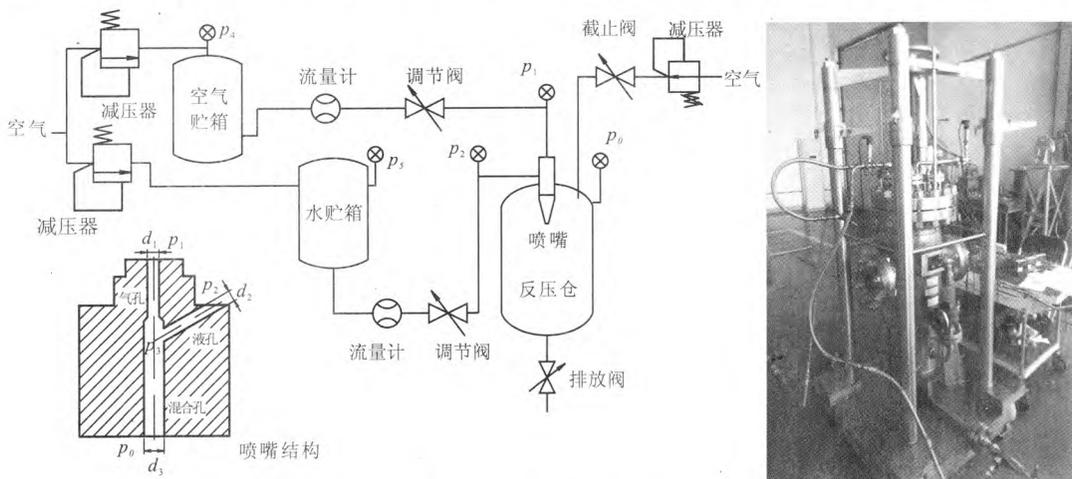


图1 试验系统及喷嘴结构

Fig. 1 Experiment system and structure of Y-shape nozzle

试验介质选取压缩空气和水。试验过程中, 利用减压器控制气、液贮箱的压力, 确保试验介质的稳定供应; 气、液流量通过科氏力质量流量计测量, 压力通过静压传感器测量。主要测量参数包括反压舱环境压力  $p_0$ , 气孔入口压力  $p_1$ , 液孔入口压力  $p_2$ , 气贮箱压力  $p_4$ , 液贮箱压力  $p_5$ , 气流量  $m_1$  和液流量  $m_2$  等。

反压条件下雾化粒径采用高速摄影系统获取。以铜蒸汽激光器发射高能点光源作为背景光, 通过微距镜头拍摄喷嘴下游 150 mm 处雾场边区的粒子图像, 并对每个工况的 5 000 张图片进行统计, 从而获得该处的索特尔平均粒径, 用于衡量喷嘴在不同工况下的雾化效果。

## 2 喷嘴结构与理论分析

标准 Y 型喷嘴典型结构如图 1 所示, 喷嘴由气孔、液孔和混合孔组成, 气液在混合孔内撞击掺混。喷嘴液流量的计算公式为<sup>[5]</sup>

$$m_2 = \mu A_2 \sqrt{2\Delta p \rho_2} \quad (1)$$

$$\Delta p = p_2 - p_3$$

式中:  $\mu$  为流量系数;  $A_2$  为液孔流通面积,  $\rho_2$  为液体密度;  $p_3$  为混合点压力。

当 Y 型喷嘴气流量为零时, 由于混合孔直径大, 流速低, 内部流阻可以忽略, 因此

$$\Delta p = p_2 - p_3 \approx p_2 - p_0 = \Delta p_2 \quad (2)$$

$\Delta p_2$  为液孔入口压力和环境压力之差。

将式 (2) 代入式 (1) 可得:

$$\mu = \frac{m_2}{A_2 \sqrt{2\Delta p_2 \rho_2}} \quad (3)$$

根据公式 (3) 可以在气流量为零的情况下对液孔的流量系数进行标定。获得流量系数后, 混合点压力  $p_3$  可以通过试验数据计算获得:

$$p_3 = p_2 - \frac{1}{2\rho_2} \left( \frac{m_2}{\mu A_2} \right)^2 \quad (4)$$

当气流量不为零时, 混合孔处于两相流状态, 通过改变气孔的工作参数可以使  $p_3$  在较大范围内变化, 从而实现液流量的大范围调节。假设

混合孔内两相流为均相流动, 选取混合点参数作为描述混合孔流动状态的特征参数, 用于比较喷嘴在变工况条件下的喷射速度。混合孔内均相流动的流体密度表示为

$$\rho_3 = \frac{m_1 + m_2}{m_1/\rho_1 + m_2/\rho_2} \quad (5)$$

式中  $\rho_1$  为混合点气体密度。

混合孔内均相流动的平均流速表示为

$$u_3 = \frac{1}{A_3} \left( \frac{m_1}{\rho_1} + \frac{m_2}{\rho_2} \right) \quad (6)$$

式中  $A_3$  为混合孔流通面积。

为便于分析计算, 对试验结果进行无量纲化处理:

$$m_2^* = \frac{m_2}{m_0}, p_2^* = \frac{\Delta p_2}{p_0}, p_1^* = \frac{p_1}{p_0}, p_3^* = \frac{p_3}{p_0} \quad (7)$$

式中:  $m_0$  为喷嘴额定流量, 本文  $m_0$  取 150 g/s, 流量调节范围为 10%~100%, 无量纲化处理后,  $m_2^*$  可以表示喷嘴工况变化范围;  $p_1^*$  和  $p_3^*$  表示喷嘴气孔入口和混合点的相对压力,  $p_2^*$  表示喷嘴的喷注刚性。喷注刚性常用来表征喷嘴抗室压波动的能力, 喷注刚性越高, 喷嘴对室压波动的敏感度越低, 越容易保持稳定工作状态。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 常压环境中的变工况特性

Y 型喷嘴在常压环境中的变工况特性如图 2 所示。从图中可以看出, 在常压环境中, 气体掺混作用对喷嘴的流量和雾化特性影响都较大。在 10% 工况下, 气流量为 0 g/s 时, 喷嘴的  $p_2^*$  为 0.16; 气流量为 16 g/s 时,  $p_2^*$  约为 2.00, 喷嘴在低工况下的喷注刚性显著增强。从速度变化曲线可以看出, 在掺混气体之后喷嘴的平均流速  $u_3$  大幅提高; 并且随着  $m_2^*$  减小,  $u_3$  逐渐增大。从雾化结果来看, 当气流量为 0 g/s 时, 喷嘴的雾化粒径较大, 并且在低工况下的雾化质量显著恶化。在掺混气体之后, 喷嘴的雾化效果改善非常

明显,以13%工况为例,在掺混4.5 g/s的气体之后,粒径减小至100 μm以下,这与文献[12-16]的研究结果一致。

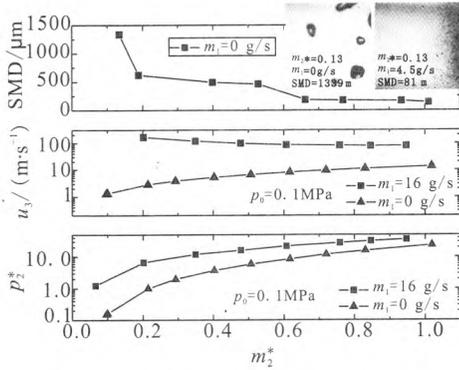


图2 常压环境中喷嘴的流量和雾化特性  
Fig. 2 Flow and atomization characteristics of nozzle in atmosphere

常压环境下的试验结果表明,在常压环境中,Y型喷嘴在低工况下喷注刚性强,雾化效果好;喷嘴具有较宽的流量调节范围。

3.2 反压环境中的变工况特性

通过改变反压舱的环境压力  $p_0$ , 研究了环境压力对喷嘴流量特性的影响,如图3所示。从图中可以看出,在相同的低工况流量条件下,随着反压增大,  $p_2^*$  减小,喷注刚性降低,这与反压环境中的气体密度增大有关。随着反压升高,气体密度增大、混合孔流速降低,混合点的相对压力  $p_3^*$  逐渐降低并趋近于1,这导致了高反压环境中掺混气体对喷嘴喷注刚性的改善作用比较有限。

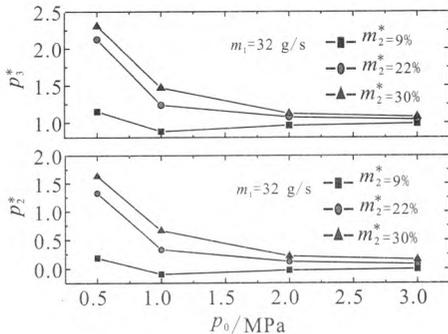


图3 低工况下喷嘴的压力变化  
Fig. 3 Pressure change of nozzle at low flow rate

图4给出了喷嘴在不同反压环境中平均流速的变化规律。从图中可以看出,当反压较小时,低工况下的平均流速较高,随着液流量增大,平均流速减小;当反压较高时,低工况下的平均流速相对较低,不同液流量下的平均流速差异较小。从式(6)可以看出,由于气体密度较小,气流量对平均流速的影响较大。实验过程保持气流量不变,在高反压环境中,混合孔内的压力和气体密度随液流量变化不大,因此不同工况下的平均流速一致性较好。

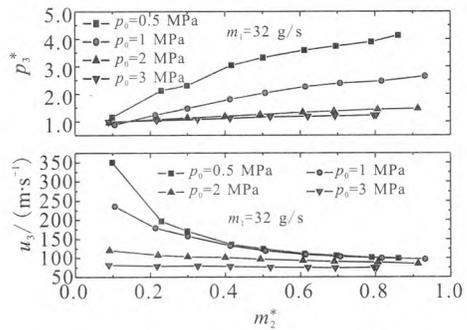


图4 环境压力变化对喷嘴速度的影响  
Fig. 4 Influence of variation of back pressure on flow velocity of nozzle

在相同的反压环境中,气流量变化对喷嘴流量特性的影响如图5所示,图中对比了喷嘴在2 MPa反压环境中,气流量分别为0 g/s, 16 g/s和32 g/s的流量特性。

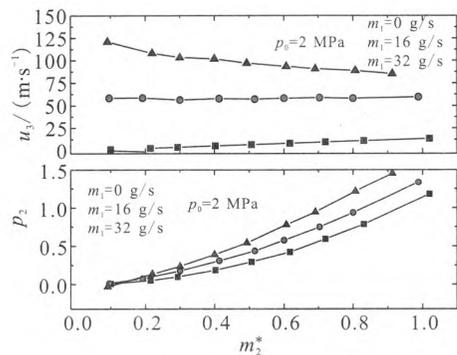


图5 反压环境中喷嘴的流量特性  
Fig. 5 Flow characteristic of nozzle at pressure chamber

从图中可以看出,在较高的反压下,气流量增大对于低工况下喷注刚性的改善作用比较有

限。以 10% 工况为例, 气流量 0 g/s, 16 g/s 和 32 g/s 对应的  $p_2^*$  分别 0.008, 0.009, -0.031,  $p_2^*$  为负值表明液孔入口压力低于反压环境压力。图 5 还给出了气流量变化对平均流速的影响。从图中可以看出, 喷嘴在掺混气体之后, 平均流速显著增大; 当气流量为 0 g/s 时, 平均流速随着液流量增大呈上升趋势; 当气流量达到 32 g/s 时, 平均流速随着液流量增大呈下降趋势。

图 6 对比了 Y 型喷嘴在不同气流量下的雾化特性。当气流量为 0 g/s 时, 喷嘴的雾化粒径约 500  $\mu\text{m}$ , 随着反压升高和液流量增大, 粒径均呈减小趋势; 当气流量为 5.5 g/s 时, 雾化粒径约 150  $\mu\text{m}$ , 随着反压升高, 粒径呈增大趋势, 而液流量变化对粒径的影响很小。

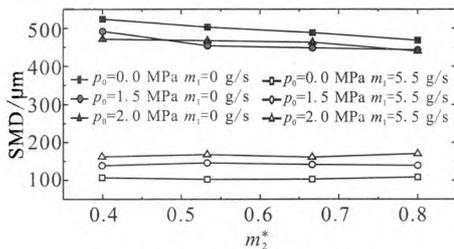


图 6 不同反压条件下的粒径

Fig. 6 Atomized partical size in different pressure condition

反压环境下的试验结果表明, 随着反压升高, Y 型喷嘴在低工况下的喷注刚性变差, 掺混气体对于提高低工况下喷注刚性的作用有限; 然而在掺混气体的作用下, 喷嘴的平均流速和雾化质量明显改善, 并且在不同流量工况下的平均流速和雾化粒径的一致性较好。

### 3.3 模拟燃烧室工作条件下的变工况特性

在燃烧室喉部面积固定的情况下, 燃烧室的压力随着推进剂流量增大而升高, 如图 7 所示。图 7 还给出了喷嘴在 3 种不同调节方式下的气流量变化规律。调节方式 4# 和 5# 分别维持气流量 8 g/s 和 16 g/s 不变, 方式 6# 维持气贮箱供应压力不变, 喷嘴气流量随着液流量增大而减小。

图 8 为喷嘴在不同调节方式下的流量和雾化特性。从  $p_2^*$  的变化规律可以看出, 在模拟燃烧室工作时, Y 型喷嘴在较宽的流量调节范围内喷

注刚性超过 0.2。采用方式 5# 和 6# 调节时, 在 6% 工况下对应的  $p_2^*$  已经较高, 分别为 0.73 和 1.05; 方式 4# 在 6% 工况下的  $p_2^*$  小于零, 当工况增大至 12% 时,  $p_2^*$  增大至 0.22, 喷注刚性变强。在高工况条件下, 液流量和反压均较大, 三种调节方式对应的  $p_2^*$  都在 1.2 左右, 差异不大。从混合孔的平均流速变化趋势可以看出, 平均流速随着液流量增大呈减小趋势; 调节方式变化对低工况下的平均流速影响较大, 对高工况的平均流速影响较小。

由于反压条件下雾化数据的获取难度较大, 本文仅对比了气流量为 0 g/s 和 4.5 g/s 时的粒径变化规律。从图中可以看出, 当气流量为 0 g/s 时, 喷嘴雾化粒径较大, 且液流量低于 40% 工况之后雾化效果显著恶化; 当气流量为 4.5 g/s 时, 喷嘴雾化粒径较小, 并且不同工况下的粒径基本保持一致, 雾化效果稳定。

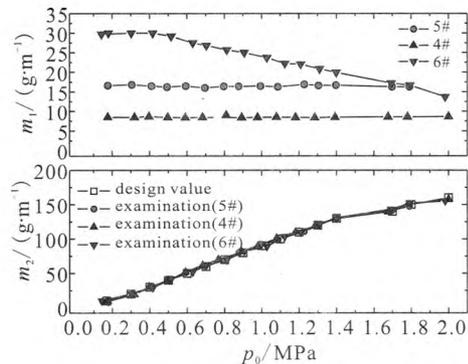


图 7 喷嘴变工况调节方式

Fig. 7 Regulating method for variable flow of nozzle

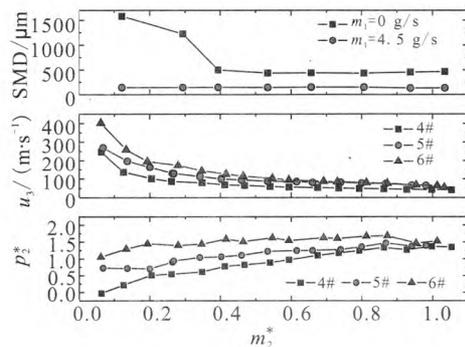


图 8 喷嘴在模拟燃烧室内的变工况特性

Fig. 8 Variable-flow characteristics of nozzle in simulated chamber

## 4 结论

利用反压试验系统开展了 Y 型喷嘴大范围变工况试验, 对比了喷嘴在不同反压环境和气流量下变工况特性, 得到如下结论:

1) 在常压环境中, Y 型喷嘴通过掺混气体的方式显著改善了低工况下的喷注刚性和雾化效果, 喷嘴具有较宽的工况调节范围。

2) 在反压环境中, 随着反压升高, Y 型喷嘴在低工况下的喷注刚性逐渐变差, 在较高的反压环境中通过掺混气体来提高低工况下喷注刚性的作用有限; 然而在掺混气体的作用下, 喷嘴的平均流速和雾化质量均得到明显改善, 并且在不同流量工况下的平均流速和雾化粒径的一致性较好。

3) 由于模拟燃烧室具有低工况下室压较低, 高工况下室压较高的特点, Y 型喷嘴在较宽的流量调节范围内都具有良好的喷注刚性和雾化质量, 其流量调节范围远大于直流喷嘴。

### 参考文献:

- [1] WELTON D E, BENSKY M S, HILAND J. Variable-thrust liquid propellant rocket engines: AIAA 1963-0268 [R]. USA: AIAA, 2006.
- [2] DRESSLER G A. Summary of deep throttling rocket engines with emphasis on Apollo LMDE: AIAA 2006-5220[R]. USA: AIAA, 2006.
- [3] RIVARD J G. New techniques for throttleable bipropellant rocket engines: AIAA1965-0560[R]. USA: AIAA, 1965.
- [4] 刘景华, 谭建国, 杨涛, 等. 部分催化过氧化氢变推力发动机的稳定性分析[J]. 航空动力学报, 2007, 22(11): 1954-1957.
- [5] 侯凌云, 侯晓春. 喷嘴技术手册 [M]. 2 版. 北京: 中国石化出版社, 2007.
- [6] LEFEBVRE A H. Atomization and sprays[M]. America: Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- [7] MULLINGER P J, CHIGIER N A. The design and performance of internal mixing multi-jet twin fluid atomizers [J]. Journal of the Institute of Fuel, 1974 (47): 251-261.
- [8] 艾军, 张松寿, 黄为民. Y 型介质雾化烧嘴混合段流场的数值计算[J]. 上海机械学院学报, 1987, 9(3):19-54.
- [9] 陈鹏飞, 费俊, 李龙飞, 等. 大流量标准 Y 型喷嘴内部流动特性的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2014, 29(6): 688-691.
- [10] BRYCE W B, COX N W, JOYCE W I. Oil droplet production and size measurement from a twin-fluid atomizer using real fluids [C]// Proceedings of the 1st International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. Tokyo: [s.n.], 1978: 259-263.
- [11] SARGEANT M. Blast atomizer developments in the central electricity generating board [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. Madison: [s.n.], 1982: 131-135.
- [12] SONG Yubao, ZHANG Mingchuan. Mathematical modeling and experimental verification of interior gas-liquid flows and outflow atomization process for Y-jet nozzles[J]. Atomization and sprays, 2004, 14(6): 437-458.
- [13] 马其良, 张松寿. Y 型喷嘴油雾两相流中雾化细度的差异性研究[J]. 工业炉, 1998 (1): 9-12.
- [14] 马其良, 张松寿, 王国华, 等. 大容量 Y 型气体雾化油喷嘴的结构特点及冷态试验研究[J]. 动力工程, 1998, 18 (5): 32-35.
- [15] 李广军, 王新军, 向宇, 等. 燃油喷嘴气液两相流雾化特性研究[J]. 热能动力工程, 1999, 14(4): 253-256.
- [16] 周月桂, 曹威城, 柳瑶斌, 等. 大流量单混合孔 Y 型喷嘴的雾化特性[J]. 动力工程, 2007, 27(6): 980-984.

(编辑: 陈红霞)