

反压对收口型离心喷嘴液膜厚度的影响

高琦翔¹, 孙 虎¹, 王焕燃², 杨立军¹, 富庆飞¹

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;

2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘要 离心喷嘴液膜厚度是影响喷嘴雾化效果的主要参数之一。对不同背压环境下收口型离心喷嘴内液膜厚度的影响进行了研究。通过搭建反压喷注系统, 利用电导法对收口型离心喷嘴液膜厚度进行测量, 采用陶瓷针规对获得的电压值标定从而得到液膜厚度值, 所得液膜厚度不确定度为 0.017 mm。通过高压舱为喷嘴提供喷注环境, 测量不同喷注压降和反压下的液膜厚度, 从而得出结论: 随着喷注压降的升高, 离心喷嘴液膜厚度呈变薄趋势; 反压的增加会导致气体密度的增加, 使离心喷嘴内空气涡与液膜界面摩擦作用加剧, 导致了液体速度下降, 在相同质量流率的情况下, 促使液膜厚度变大。将实验所得常压环境下的液膜厚度值与经验公式估算值比较, 验证了测量结果的准确性; 通过在现有液膜厚度理论公式的基础上引入反压项, 提出一个全新的液膜厚度经验公式。

关键词 离心喷嘴; 液膜厚度; 背压; 电导法; 经验公式

中图分类号 V434 **文献标识码** A **文章编号** 1672-9374(2023)03-0083-07

Effect of backpressure on liquid film thickness of close-end swirl injector

GAO Qixiang¹, SUN Hu¹, WANG Huanran², YANG Lijun¹, FU Qingfei¹

(1. Beihang University, School of Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract The liquid film thickness of swirl injector is one of the main parameters affecting the atomization effect of the injector. In this paper, the effect of different back pressures on the thickness of liquid film in close-end swirl injector was studied. By setting up a back pressure injection system, the liquid film thickness of close-end swirl injector was measured by conductivity method, and the obtained voltage value was calibrated by ceramic needle gauge to obtain the liquid film thickness value. The uncertainty of liquid film thickness is 0.017 mm. The injection environment was provided for the nozzle through the high-pressure chamber, and the liquid film thickness under different injection pressure drop and backpressure was measured. It is concluded that the liquid film thickness of swirl injector tends to become thinner

收稿日期: 2022-05-10; 修回日期: 2022-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1837211)

作者简介: 高琦翔 (1998—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机喷雾燃烧及喷嘴动力学。

通信作者: 富庆飞 (1983—), 男, 博士, 教授, 研究领域为液体火箭发动机喷雾燃烧。

with the increase of injection pressure drop. The increase of backpressure will increase the gas density, intensify the friction between the air vortex and the liquid film interface in the swirl injector, reduce the liquid velocity, and make the liquid film thickness thicker under the same mass flow rate. The accuracy of the measurement results was verified by comparing the liquid film thickness under atmospheric pressure with the estimated value of empirical formula. Based on the existing theoretical formula of liquid film thickness, a new empirical formula of liquid film thickness is proposed by introducing the backpressure term.

Key words swirl injector; film thickness; backpressure; conductance method; empirical formula

0 引言

离心喷嘴因其结构简单且具有良好的雾化性能,而被广泛应用于液体火箭发动机、燃气轮机及内燃机等热力设备上^[1]。其主要利用切向入口在旋流室中产生圆周流,并通过旋流室收敛部分加速将流动介质从喷口排出,经流体动力不稳定性液膜逐渐变薄最终分解成液滴^[2]。离心喷嘴因其流动介质圆周运动产生的离心力,导致了喷口内液膜的形成,其厚度是控制喷口出口液膜发展和雾化过程的关键因素之一^[3-4]。

为了更清楚地揭示离心喷嘴喷注和雾化间的基本机理,人们进行了许多研究来测量离心喷嘴内的液膜厚度,并发展了多种测量技术,其中主要使用了电导法和直接摄影法^[5]。Jeng 等利用流动可视化技术测量了大尺寸喷注器孔板内部的液膜厚度,以验证计算和数值模拟^[6]。Moon 等使用摄影技术测量了较高喷注压降下离心喷嘴内的液膜厚度,并根据几何光学估计和校正液膜厚度测量中的误差^[3]。Suyari 等利用位于放电孔中的两个电极之间的电导测量了两个电极之间流动路径中的平均液膜厚度^[5]。Inamura 等用接触探针测量了离心喷嘴喷口处的液膜厚度^[7]。Bazarov 使用两个嵌装在喷嘴壁上的环形电极测量了喷口内的液膜厚度^[8]。

通过大量的实验和分析研究,总结了许多预测液膜厚度的经验公式。Simmons 等推导了考虑喷嘴尺寸和喷雾锥角的收口型离心喷嘴液膜厚度的简单方程^[9]。Rizk 推导了液膜厚度作为喷嘴结构尺寸、液体性质和喷注压降函数的理论表达式,并与文献中报告的实验测量结果非常吻合^[10]。然后, Suyari 等通过实验数据修改了方程的系数^[5]。Kim 等通过精确测量检验了液膜厚度与喷口长度的关

系,并通过在现有理论方程中加入孔口长度项,给出了液膜厚度的经验关系式^[11]。Schmidt 等通过利用喷嘴喷口处出口速度的相关性和与离心喷嘴结构尺寸、液体性质和喷注压降有关的函数,定义了液膜厚度^[12]。文献[13-14]分别以水和凝胶为介质测量了敞口型离心喷嘴喷口内液膜厚度,并根据实验结果修正了相应的液膜厚度经验公式。虽然大多数液膜厚度经验公式与大气环境下的实验结果合理匹配,但它们在高压条件下的适用性并未得到验证。在实际应用中,液体火箭发动机燃烧室处于高压状态,而高压条件下的喷雾特性与大气条件下的喷雾特性有很大不同^[15-17]。因此,迫切需要研究不同反压环境对液膜厚度的影响,并确定一个新的经验公式来估算液膜厚度。

1 实验系统

实验系统(见图1)由工作介质供给系统、反压系统、液膜厚度测量系统和数据采集系统组成。高压氮气用于挤压储罐中的介质,迫使供给液通过调节阀进入主管路。为了提供不同的环境压力,设计制造了如图2所示的高压舱。高压舱由304不锈钢制成,高度546 mm,内径154 mm,通过使用另一条氮气供给管路进行充压,最高可以提供3 MPa的环境背压,背压波动范围在5%以内,且具有带气体吹扫功能的3方向光学观察窗口;底部装有阀门,便于调节舱内压力。管路流经模型喷嘴(见图3,结构参数见表1)在高压舱内实现喷注雾化。位于高压舱顶部的压力传感器可实现对舱内压力实时监测,测量范围为0~4 MPa,精度可达0.5%。数据采集系统采用江苏东华校准测试有限公司的DH5922D动态信号测试分析系统,系统采样频率可达256 K,可同时对16路信号实时采集。

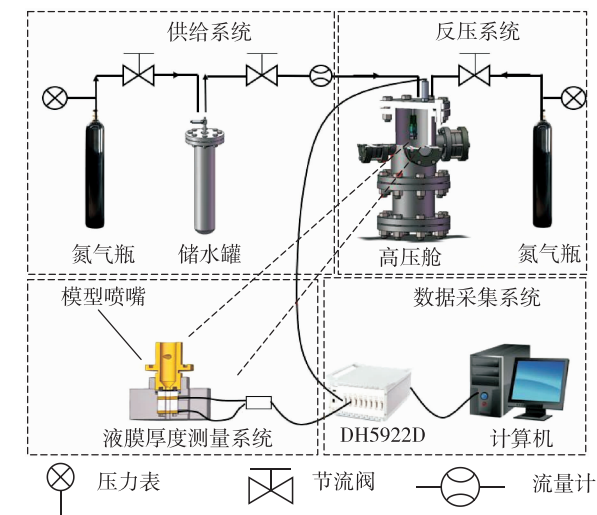


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 The schematic of the experimental system

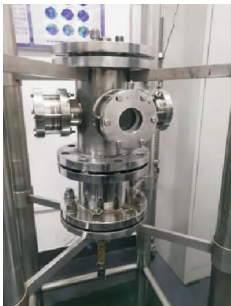


图 2 高压舱实物图

Fig. 2 High pressure chamber

采用电导测量法测量喷口处液膜厚度,两个环形电极安装在离心喷嘴出口附近,如图 3 所示,根据电导的定义,当喷注介质在两个电极之间流动时,由于液膜厚度的变化,两个电极之间的电阻 R_{ring} 变化可表示为

$$R_{\text{ring}} = \rho L / S \tag{1}$$

式中: ρ 为环形液膜电阻率; L 为环形液柱长度; S 为液柱的环形截面积,其可表示为

$$S = \pi [r^2 - (r - h)^2] \tag{2}$$

式中: r 表示喷口出口半径; h 为液膜厚度。

将式(2)代入式(1)中,便可得到液膜厚度与液柱电阻的关系为

$$h = r - \sqrt{r^2 - \rho L / (\pi R_{\text{ring}})} \tag{3}$$

因此,可通过测量液体电阻来获得液膜厚度值。

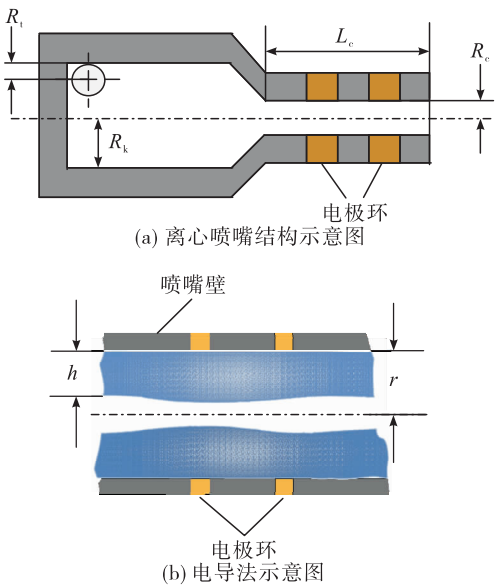


图 3 离心喷嘴结构及电导法示意图

Fig. 3 Schematic of the conductance method and the swirl injector

表 1 实验离心喷嘴结构尺寸

Tab. 1 Geometry of experimental injector

R_c/mm	R_i/mm	R_k/mm	L_c/mm	n	A
1	0.8	3.2	10	2	1.87

注: n 为离心喷嘴切向孔个数; A 为离心喷嘴几何特性数。

为了校准液膜测量系统,在旋流室的轴线上插入不同直径($\varphi 1 \sim 1.8 \text{ mm}$, 每隔 0.05 mm 取一根)的陶瓷针规。将上游阀门适当开启,以保证喷注压强不会使产生的气核直径大于陶瓷针规,当喷注介质在不同尺寸校准棒与喷口壁之间填充时,产生不同厚度的液膜,对应输出不同电压信号值,如图 4 所示。

采用电导法测量液膜厚度的方法存在若干不确定度。首先,在标定液膜厚度时采用了陶瓷针规作为标定棒,该标定棒的加工本身存在一定误差,其加工公差为 0.001 mm ,假设其误差服从正态分布;不确定度的另一个来源为测试环境的变化,如测试介质电导率的变化等,为了减小该类不确定度,本实验测试介质采用自行调配的盐水溶液(10 L 蒸馏水加 1 g 盐)进行实验;另一个不太重要的不确定度引入源于该方法本身,其所测液膜厚度实际为两电极间平均液膜厚度,由于两电极间距离远小

于表面波波长,因此可认为电极间液膜厚度为常数。测量的不确定度可分为 A 类不确定度和 B 类不确定度。A 类不确定度采用统计分析的方法对被观测数据评定,主要由测量重复性引起,即为多次测量所得液膜厚度的标准差;B 类不确定度一般先

确定影响量引起被观测值变化的范围,即标定棒、环境因素等不确定度来源的置信区间宽度,再与置信系数相除便可求得。由表 2 可以看出,测量液膜厚度的合成不确定度为 0.017 mm,符合一般传感器要求。

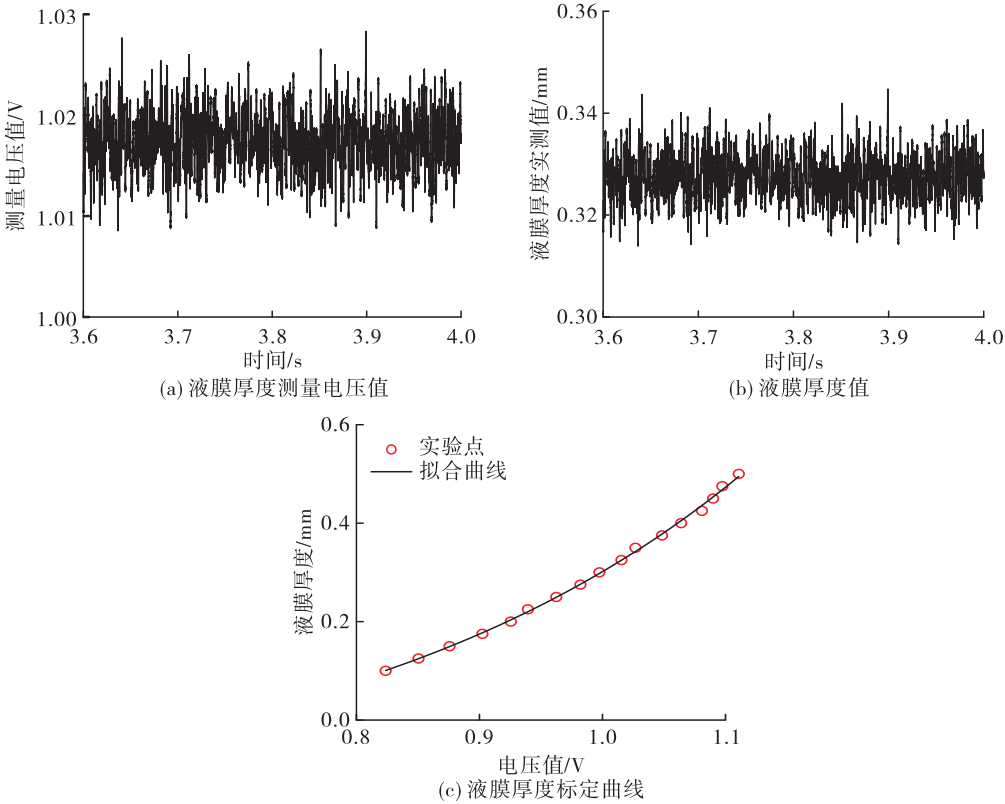


图 4 液膜厚度实测值及其标定曲线
Fig. 4 Measurement value of liquid film thickness and calibration curve

表 2 液膜厚度测量不确定度
Tab. 2 The uncertainty of film thickness measurement

不确定度来源	不确定度组成			
	置信区间半宽度/ μm	置信系数 k	A 类标准不确定 $u_A/\mu\text{m}$	B 类标准不确定度 $u_B/\mu\text{m}$
标定棒	1	$\sqrt{3}$	—	0.6
环境因素	—	—	—	0
测试重复度	—	—	17	—
合成不确定度/ μm	17			

注: $u_{\text{combine}} = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$, $u_B = a/k$ 。

2 实验结果

基于上述搭建的实验系统,在不同反压环境、不同喷注压降下,对实验用离心喷嘴进行雾化实

验,其在不同反压下的喷注照片如图 5 所示。利用电导法对实验所用离心喷嘴液膜厚度进行了测量,测量结果如图 6 所示。实验结果表明,随着喷注压降的提高,离心喷嘴内液膜厚度呈减小的趋势,与

文献[5、10-11]的研究结果一致:液膜厚度与压降呈现出 $h \sim \Delta p^{-0.25}$ 的数量关系,表明压降和液膜厚度呈负相关。随着环境压力的升高,液膜厚度也随之变大,与文献[18-20]中的结果一致。环境压力的升高导致了气体密度的增加,气液密度比的增加使得

角动量损失系数减小,水利损失系数增加,进而使流量系数变大,液膜变厚^[19]。在压降一定的情况下,气液界面摩擦加剧,导致液体速度的降低,在保证相同质量流率的情况下,为了抵消气液界面减小的平均轴向速度,促使液膜变厚。

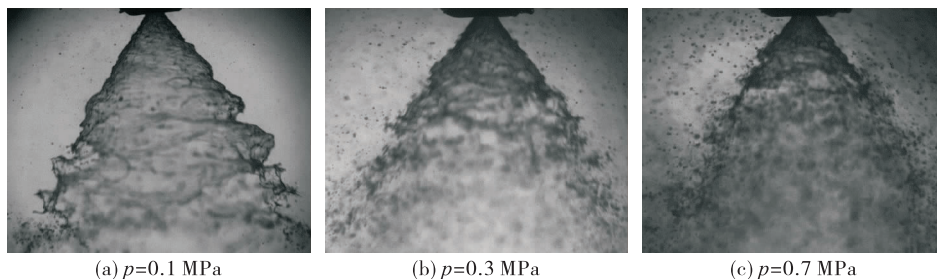


图5 不同反压下的喷雾图像

Fig. 5 Spray images under different backpressure

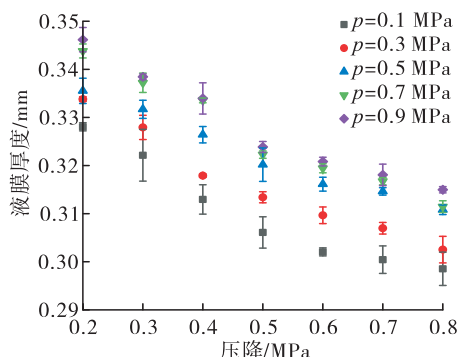


图6 不同反压、不同压降对液膜厚度的影响

Fig. 6 Influence trend of different backpressure and pressure drop on liquid film thickness

前人对离心喷嘴液膜厚度的研究多集中于常压环境下,Rizk 等推导了液膜厚度作为喷嘴结构尺寸、液体性质和喷注压降函数的理论表达式^[10],之后 Suyari 等通过实验数据对其表达式系数进行了修正^[5],Kim 等通过在现有理论方程中加入孔口长度项,得出了液膜厚度的经验关系式^[11]。为验证所得实验数据的准确性,故选取反压 0.1 MPa(常压环境),不同喷注压降下测得的液膜厚度实验值,与前人所得液膜厚度公式比较(见图7),结果表明:基于该电导法测量的收口型离心喷嘴液膜厚度与文献[5]所得液膜厚度经验公式吻合较好。

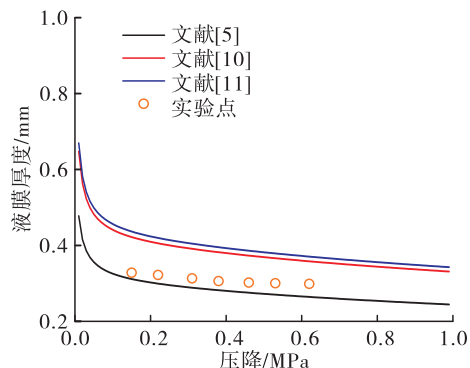


图7 实验所测液膜厚度与液膜厚度经验公式估算值对比

Fig. 7 Comparison between measured liquid film thickness and estimated liquid film thickness from others

然而,这些液膜厚度公式均未考虑反压的影响,图6的结果表明反压的增加会导致液膜厚度的增加,因此,通过在现有液膜厚度理论方程^[10]的基础上,引入反压的影响,并对常数项进行修正,导出一个新的液膜厚度经验公式,即

$$h = 2.94 \left(\frac{d_o m \mu_1}{\rho_1 \Delta p} \right)^{0.25} \left(\frac{p}{p_o} \right)^{0.021} \quad (4)$$

式中: p 表示反压; p_o 代表常压。

图8显示了液膜厚度测量结果与式(4)估算值的比较,可以看出测量结果与经验公式估算出的液膜厚度误差非常小。

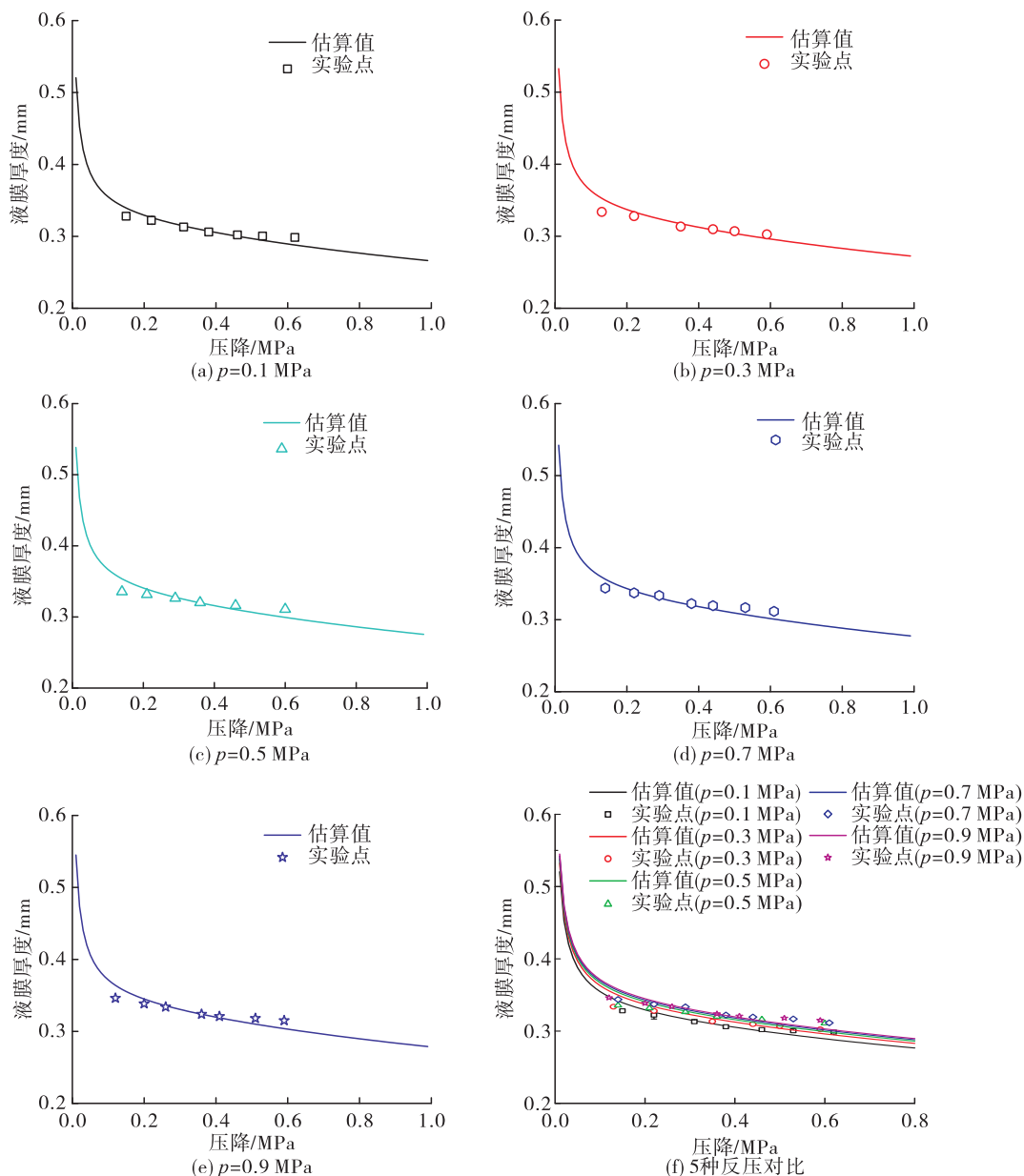


图8 实验所测液膜厚度与新液膜厚度经验公式估算值对比

Fig. 8 Comparison between measured liquid film thickness and estimated liquid film thickness from new equation

3 结论

本文通过搭建反压环境下离心喷嘴喷注系统,利用电导法对收口型离心喷嘴液膜厚度进行测量,测量所得液膜厚度不确定度为 0.017 mm。通过高压舱改变环境压强,实现了不同反压环境下对收口型离心喷嘴液膜厚度的影响研究,研究发现:

1) 随着喷注压降的升高,收口型离心喷嘴内液

膜厚度呈变薄趋势。

2) 环境压力的升高,导致了气体密度的增加,使得喷口内空气涡与液膜界面处的剪切效果增强,导致了液体速度下降,在相同质量流率的情况下,促使液膜厚度变厚。

3) 通过在文献[10]液膜厚度理论方程的基础上,引入反压项,并对常数项进行修正,提出一个新的液膜厚度经验公式。

参考文献

- [1] KANG Z, WANG Z, LI Q, et al. Review on pressure swirl injector in liquid rocket engine [J]. *Acta Astronautica*, 2018, 145: 174-198.
- [2] KIM D, IM J H, KOH H, et al. Effect of ambient gas density on spray characteristics of swirling liquid sheets [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(3): 603-611.
- [3] MOON S, ABO-SERIE E, BAE C. Liquid film thickness inside the high pressure swirl injectors: Real scale measurement and evaluation of analytical equations [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, 34(2): 113-121.
- [4] 邱贵霞, 侯力, 易宗礼, 等. 离心喷嘴喷口结构参数对雾化性能的影响分析 [J]. *推进技术*, 2020, 41(12): 2782-2789.
- [5] SUYARI M, LEFEBVRE A H. Film thickness measurements in a simplex swirl atomizer [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1986, 2(6): 528-533.
- [6] JENG S M, JOG M A, BENJAMIN M A. Computational and experimental study of liquid sheet emanating from simplex fuel nozzle [J]. *AIAA Journal*, 1998, 36(2): 201-207.
- [7] INAMURA T, MIYATA K, TAMURA H, et al. Spray characteristics of swirl coaxial injector and its modeling [C]// 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2001.
- [8] BAZAROV V. Dynamics of liquid injectors [Z]. 1979.
- [9] SIMMONS H C, HARDING C F. Some effects of using water as a test fluid in fuel nozzle spray analysis [J]. *Journal of Engineering for Power*, 1981, 103(1): 118-123.
- [10] RIZK N K, LEFEBVRE A H. Internal flow characteristics of simplex swirl atomizers [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1985, 1(3): 193-199.
- [11] KIM S, KIM D, YOON Y, et al. Effect of geometry on the liquid film thickness and formation of air core in a swirl injector [C]// 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2007.
- [12] SCHMIDT D P, NOUAR I, SENECAI P K, et al. Pressure-swirl atomization in the near field [EB/OL]. <https://sae-mobilus.sae.org/content/1999-01-0496/>, 1999.
- [13] FU Q F, YANG L J, QU Y Y. Measurement of annular liquid film thickness in an open-end swirl injector [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2011, 15(2): 117-124.
- [14] FU Q F, GE F, WANG W D, et al. Spray characteristics of gel propellants in an open-end swirl injector [J]. *Fuel*, 2019, 254: 115555.
- [15] 吴高杨, 郑刚, 聂万胜, 等. 螺旋离心式喷嘴内部流动过程数值仿真研究 [J]. *火箭推进*, 2015, 41(4): 13-18.
- WU G Y, ZHENG G, NIE W S, et al. Numerical simulation of flow process in screw centrifugal nozzle [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2015, 41(4): 13-18.
- [16] 曹智程. 反压环境舱的设计及在雾化实验中的应用 [J]. *火箭推进*, 2007, 33(4): 28-31.
- CAO Z C. Design and application of pressure environmental chamber in atomization test [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2007, 33(4): 28-31.
- [17] 吴晋湘, 刘卫东, 周猛, 等. 反压条件下同轴式喷嘴雾化特性的试验研究 [J]. *航空动力学报*, 1994, 9(4): 431-434.
- [18] CHEN X D, YANG V. Effect of ambient pressure on liquid swirl injector flow dynamics [J]. *Physics of Fluids*, 2014, 26(10): 102104.
- [19] 陈晓东, 刘宇, 杨威迦. 背压对液体离心喷嘴内液膜厚度的影响 [J]. *航空动力学报*, 2010, 25(1): 198-202.
- [20] KENNY R J, HULKA J R, MOSER M D, et al. Effect of chamber backpressure on swirl injector fluid mechanics [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2009, 25(4): 902-913.