

文章编号: 1000-8055(2007)03-0337-05

锥形液膜 Kevin-Helmholtz 波不稳定性的 实验研究

李继保^{1,2}, 岳 明¹, 杨茂林¹

(1. 北京航空航天大学 热动力工程研究所, 北京 100083;

2. 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 采用 PIV 激光粒子测速仪获得了不同喷嘴液压差下锥形液膜子午截面的波动破碎图像. 测得不同液压差下离心喷嘴锥形液膜的各项特性参数, 如液膜半锥角、液膜破碎前长度等. 研究了半锥角和液膜破碎前长度随液压差的变化规律. 根据试验结果, 总结出了计算 C 参数的经验公式, 并利用此关系式求解色散方程, 得到不同液压差下的液膜破碎点扰动波波长. 预测值和实验结果进行了对比, 对比发现: 理论预测值的变化趋势同实验结果完全一致.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 锥形液膜; 色散方程; 液膜破碎前长度

中图分类号: V233. 22

文献标识码: A

Experimental research of instability of kevin-helmholtz wave on conical sheets

LI Ji-bao^{1,2}, YUE Ming¹, YANG Mao-lin¹

(1. Institute of Thermo-Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The fragmenting images of meridian plane of conical liquid sheet under different nozzle pressure were obtained with Particle Image Velocimetry (PIV) system. Also, the characteristic parameters of conical liquid sheet with centrifugal nozzle, such as half-cone angle and breakup length, were measured under different liquid pressures. The variations of nozzle liquid pressure on half-cone angle and breakup length have been analyzed. The empirical formula of parameter C was obtained from experimental results, whereby the dispersion relation was solved to obtain the wavelength at breakup point of sheet under different pressures. The predicted results were compared with experimental results, finding that the trend of predicted data fully corresponds to the experimental results.

Key words: aerospace propulsion system; conical sheet; dispersion relation; breakup length

燃油的雾化通常都是以液柱或液膜的破碎来实现的. 目前广泛应用于燃气轮机、工业窑炉、农

用喷雾器以及航空发动机上的离心式喷嘴则是将燃油展成锥形液膜来实现燃油雾化的. 为了能设

收稿日期: 2006-03-23; 修订日期: 2006-10-11

作者简介: 李继保(1962-), 男, 安徽无为, 沈阳发动机设计研究所研究员, 北京航空航天大学能源与动力工程学院博士生, 主要从事航空发动机燃烧室液雾燃烧方面的研究.

计性能良好的燃油雾化喷嘴,人们对液膜破碎雾化的机理和雾化特性进行了大量的研究.其中的一个方面就是利用线性或非线性理论对液膜做空问不稳定性分析,以探索液膜失稳破碎的规律.

几十年来,对运动薄液膜的空间不稳定性研究已有了许多卓有成效的成果.早在上个世纪50年代,Squire^[1]以及 Hagerty 和 Shea^[2]便研究了平面上无粘液膜上 Kelvin-Helmholtz 波的增长率.1975年 Crapper, Dombrowski 和 Pyott^[3]推导了描述无粘环形液膜上 Kelvin-Helmholtz 波增长率的四阶色散方程.这以后,研究才有了新的进展. Frankel 和 Weihs^[4]研究了液膜形状的改变对液膜稳定性的影响. Rangel 和 Sirignano^[5]对液膜做了非线性稳定性分析. Li 和 Tankin^[6]分析了粘性对液膜空间不稳定性影响. Panchagnula^[7]等在环形液膜不稳定性研究中考虑了旋流因素.

不过,这些研究几乎都是针对平面液膜和环形液膜的,且都没有试验验证. Li 和 Tankin^[6]以及 Capper^[3]等认为锥形液膜的不稳定性分析可以用平面液膜或环形液膜来近似,但他们并没有做进一步的分析.岳明和杨茂林^[8]应用上述思想对简化的锥形液膜进行了不稳定性分析.不过他们的研究也只是理论上的,没有试验证据.

本文利用激光粒子测速仪(PIV)获得不同喷嘴液压差下锥形液膜子午截面的波动和破碎图像;得到了锥形液膜的厚度、半锥角等特征参数.针对几种试验状态,对色散方程进行求解,得到了C参数的经验关系式.再利用此关系式求得不同液压差下液膜破碎点扰动波波长.最后将理论结果和试验结果进行了对比分析.

1 试验件和试验设备

试验所用的喷嘴为模型离心式喷嘴,其具体的结构尺寸参见图1.为了获得更为清晰的液膜结构图像,提高试验数据的测量精度,试验所用的模型喷嘴要比一般发动机中实际使用的喷嘴大,按几何相似,取其旋流室直径为6 mm,唇口直径则为2 mm.

试验台主要包括可调高度的喷嘴固定支架、高压气瓶、耐压水罐、气控制阀门、气管路、液控制阀门、液管路以及接液桶等.高压气体从气瓶中经气管路进入耐压水罐,为水罐中的液体提供压力.水罐中的液体则经由液管路流入喷嘴.喷嘴入口处装有一只压力表,用于记录喷嘴的进口压力.测量系统为激光粒子图像测速仪,简称PIV.由激光发生器发出的脉冲激光光束片沿锥形液膜子午轴

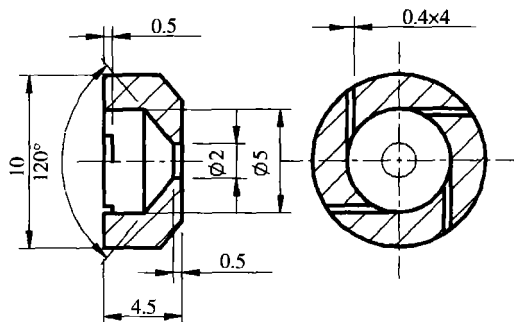


图1 试验喷嘴结构示意图

Fig. 1 Sketch of the model swirl atomizer

线侧向射入. CCD 数字照相机放于激光束外侧正对液膜子午轴线的位置,其镜头拍摄方向同激光入射方向成90°夹角.计算机控制同步器协调激光脉冲的发送和数字相机的拍摄.数字相机拍的数字图像被传回计算机进行实时处理.试验台结构示意图如图2.

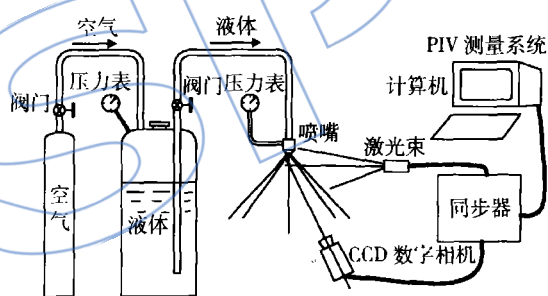


图2 实验台结构示意图

Fig. 2 Set-up schematic of the experiment

2 试验测量

实验是要用数字成像技术拍摄下液膜子午截面在扰动波影响下波动和破碎的瞬时图像以便进一步分析.因此,能否获得清晰的液膜内外表面随时间变化的瞬时图像是实验成功的关键.由于实验不可能在暗室中进行,周围总有各种复杂的环境背景光线存在,而要获得清晰的图像就必需剔除背景杂光的干扰.为此,我们在实验用水中加入荧光剂,让液膜在激光的照射下受激发光.再在CCD数字相机前加上滤光透镜,将所有非受激光线统统滤去.这样,便可以剔除背景杂光获得清晰的液膜波动破碎图像了.

喷嘴的液压差利用气瓶上的卸压阀进行调节.实验中选取了0.05,0.1,0.2,0.4,0.6 MPa以及0.75 MPa等六种不同的液压差,分别对这六种液压差下的锥形液膜进行了测量.每一种工况进行了四十次连续测量. PIV在测量时每次都

会拍两幅图像,分别对应两台激光器发出的激光脉冲.由此,每种工况便可得到八十幅锥形液膜波动破碎图像.

液膜的各项参数,如液膜厚度、液膜破碎前长度等,可从实验摄得的图像中直接量取.不过,从图像中直接量得的其实是像素点数,而非实际的长度值.为此,需要在实验最后于喷嘴子午面同一平面处放置一刻度尺,单独拍摄一幅刻度尺图像,以此获得像素点和液膜实际尺寸间的对应关系.再利用此关系将锥形液膜图像中量得的像素点数目值转化为实际的长度值.

3 数据处理方法

试验所获图像(如图3)其实就是锥形液膜沿子午轴线的纵向剖面图.因此,锥形液膜的各项参数可通过对所摄图像的简单处理获得.其中液膜破碎前长度等长度量需先从液膜图像上量得像素点值,再利用图像像素和实际长度间的对应关系将像素点数目转换为实际的尺寸.液膜表面扰动波的运动状况参数需分析获得.扰动波波长也需要采用同液膜破碎前长度类似的方法,将像素数值转为实际尺寸值.扰动波的其他参数可由分析计算求出.波数 k 的计算式为:

$$k = 2\pi/\lambda \quad (1)$$

其中 λ 为波长.波速可用下式计算:

$$c = ds/dt \quad (2)$$

其中 dt 为相邻两脉冲的时间间隔,也即同一次测量中两幅图像拍摄的时间间隔,在试验中通过 In-sight™ 软件设定. ds 为同一段扰动波在一次测量中拍到的位置变化量,即扰动波沿液膜展向的位移.为了消除偶然误差,上述参数均取多次测量的平均值.

液膜破碎前长度取为液膜破碎点到喷嘴出口处的长度.液膜破碎点波长取液膜破碎点前一个扰动波的波长.

试验中用到的设定值和转换系数具体数值如下:

- 像素值同实际尺寸的转换系数为 0.108 43 mm/像素;
- 相邻两脉冲间隔时间,即 dt 为 0.03 s.

4 试验结果分析

4.1 喷嘴液压差对液膜半锥角的影响

液膜半锥角有两种定义^[9]:

(1) 从喷嘴出口中心点做液膜外包络线的切线,此切线和液膜锥中心线的夹角即为半锥角.由于液膜锥在离开喷嘴后会有一定程度的收缩,因而此半锥角将直接影响到燃料在燃烧空间中的分布特性.

(2) 从喷嘴出口中心点做距离喷嘴端面 l 处的液膜曲面上一点的连线,半锥角即此连线和液膜锥中心线的夹角.这是一种工程上常用的表示方法,称为条件雾化半锥角.文献[9]中建议,对小流量喷嘴 $l = 40 \sim 80$ mm,对大流量喷嘴 $l = 100 \sim 250$ mm.本文统一选取液膜破碎前长度为 l .

为了简便起见,本文中称第一种定义的半锥角为液膜半锥角,第二种定义的半锥角为雾化半锥角.

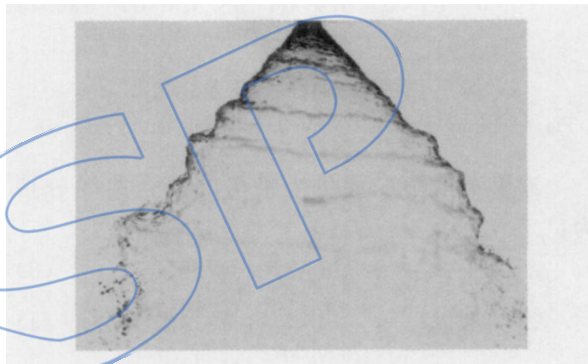


图3 液压差 0.1 MPa 下锥形液膜子午截面典型图
Fig.3 Typical image of conical sheet under different liquid pressure 0.1 MPa

图4显示了两种半锥角随喷嘴液压差的变化:方点线所示为液膜半锥角;圆点线所示雾化半锥角.从图上可以看出,方点线近乎是一条水平线,显示出喷嘴的液膜半锥角几乎不随液压差变化.由于液膜半锥角是由喷嘴出口液膜轴向和径向速度的比值决定.此角度变化很小,说明液膜从喷嘴喷出时其轴向和径向速度比主要是受喷嘴几何的影响,而与液压差关系不大.圆点线表示的雾化半锥角则随液压差有明显的变化,随着液压差的升高而不断增加,且在液压差较小时,变化尤为显著.雾化半锥角在低液压差(如 0.05 MPa)时很小,要比液膜半锥角小许多.这主要是因为此时液膜表面张力引起液膜的塌缩所致.以后,随着液压差的增加,液膜完全打开,雾化半锥角液也便增大到同液膜半锥角相当的水平.此后,雾化半锥角随着液压差的增加,其增幅逐步放缓,但仍保持一定程度的增长,并很快在数值上超过液膜半锥角.雾化半锥角大于液膜半锥角的主要原因是由于雾化

半锥角除受液膜的制约外,还受到液膜扰动波的影响.当液压差较大时,扰动波增强,增加了液膜的波动幅度,扩大了液雾存在的范围,从而加大了雾化半锥角.由此可见,雾化半锥角虽然主要也是由喷嘴几何结构决定,但液压差会通过表面张力和扰动波对其产生影响.

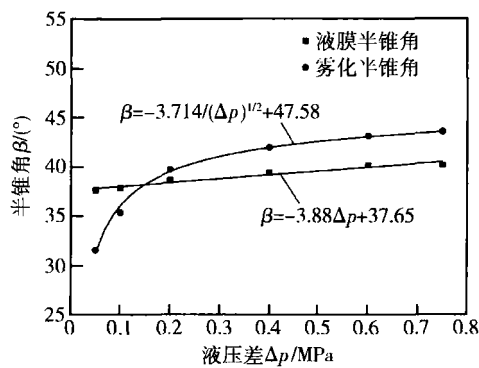


图 4 液膜半锥角随液压差的变化

Fig. 4 Spray cone half-angle vs different liquid pressure

液膜半锥角和雾化半锥角的拟合曲线分别为:

$$\beta_{\text{液膜}} = 3.88\Delta p + 37.65 \tag{3}$$

$$\beta_{\text{雾化}} = -\frac{3.714}{\sqrt{\Delta p}} + 47.58 \tag{4}$$

其中,β为半锥角,单位取度;Δp为液压差,单位取 MPa.

4.2 喷嘴液压差对液膜破碎前长度的影响

图 5 显示了液膜破碎前长度随液压差的变化.当液压差较小时,液膜破碎前长度随着液压差的增加急剧减小;而当液压差较大(大于 0.4 MPa)后,减小迅速趋缓.由此可见,随着液压差的增加,扰动波的波动明显加剧,液膜破碎加快,破碎前长度缩短.当液压差较大时,液膜破碎点已接近喷嘴唇口.此时唇口对抗动波的影响开始起作

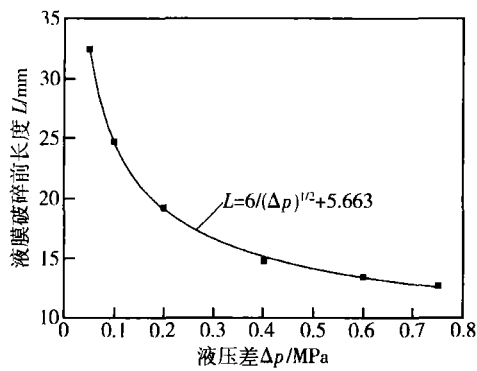


图 5 液膜破碎前长度随液压差的变化

Fig. 5 Break-up length vs different liquid pressure

用,对抗动波的进一步加剧产生阻碍,从而使得破碎前长度逐渐趋于稳定.

从图中观察,液膜破碎前长度应同液压差二次方之一次方的倒数成正比,由此得到拟合曲线如下:

$$L = \frac{6}{\sqrt{\Delta p}} + 5.663 \tag{5}$$

式中,L为破碎前长度,单位取 mm;Δp为液压差,单位取 MPa.

5 波动理论的验证分析

5.1 参数 C 的经验关系式

选取试验中的几种状态(状态参数见表 1)对文献[8]中的色散方程进行求解,求得不同液压差下液膜扰动波增长率随波数的变化规律.根据液膜破碎理论^[10]扰动波增长率最大时液膜破碎,由此可以得到液膜破碎时的波数 k_b .

利用文献[8]中(14)式得:

$$C = (s - s_0) \frac{k}{2\pi} \tag{6}$$

将 k_b 代入(6)式便可得到相应的 C 值,见表 1.拟合各 C 值,即可得到 C 的经验关系式:

$$C = 2.564 \frac{\Delta p}{p_c} + 1.14 \tag{7}$$

式中,Δp为液压差;p_c = 1 MPa,为压力常数.此式为通过实验参数总结的求取 C 的经验关系式.

表 1 不同压差下色散方程的求解参数

Table 1 Parameter under different liquid pressure for solving dispersion relations			
液压差/ MPa	0.05	0.1	0.2
速度/ (m/ s)	14.266	20.175	28.534
半锥角/ (°)	37.65	37.87	38.66
h_0 / mm	0.21	0.21	0.21
a_0 / mm	0.79	0.79	0.79
C	1.268	1.396	1.653
s_0 / mm	1	1	1
液压差/ MPa	0.4	0.6	0.75
速度/ (m/ s)	40.350	49.420	55.252
半锥角/ (°)	39.43	40.2	40.23
h_0 / mm	0.21	0.21	0.21
a_0 / mm	0.79	0.79	0.79
C	2.166	2.678	3.063
s_0 / mm	1	1	1

由经验关系式(7)式可知:首先, C 值同喷嘴的结构形式有关,因此,本文实验所得到的 C 值要比文献[8]中的估计值高得多;其次, C 还与喷嘴的液压差成比例,压差越高, C 值也越大。

5.2 理论预测值和试验值的对比

利用(7)式求得各液压差下的 C ,再由色散方程即可求出液膜破碎点扰动波波长,并将求得的结果和试验值进行对比,结果见图6。

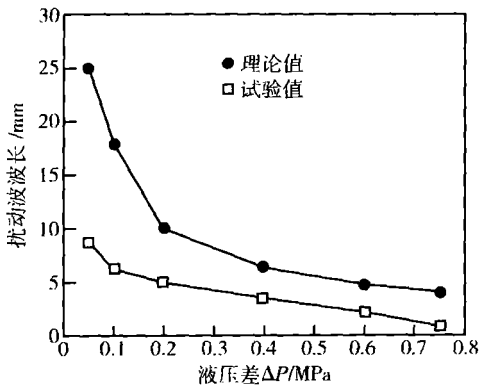


图6 液膜破碎点扰动波波长理论预测值和实验值的对比图

Fig.6 Wave length of disturbance wave at breakup point comparison

图6为不同液压差下破碎点处扰动波波长预测值和实验值的对比图。由图可见,随着液压差的增大,不稳定理论预测的扰动波波长迅速减小,当液压差大于0.4 MPa后,减小逐步趋缓。理论结果的变化趋势同实验结果完全一致,不过理论结果在数值上都偏大,尤其是在压差较低时。这一方面是因为实验由于测量上的困难,测得的波长是液膜破碎点稍前一点处的波长,即实验结果比真实值偏小;另一方面也说明用分段环形液膜来近似锥形液膜^[3,8]可用于定性分析,但定量上会引起较大的误差,需要建立更好的锥形液膜破碎的物理模型。

6 结 论

(1)利用PIV激光粒子测速仪获得了0.05 MPa,0.1 MPa,0.2 MPa,0.4 MPa,0.6 MPa以及0.75 MPa等六种不同的喷嘴液压差下锥形液膜子午截面的波动破碎图像。测得不同液压差下锥形液膜的各项特性参数,如液膜半锥角、液膜破碎

前长度等。

(2)研究了两种半锥角随液压差的变化。研究发现:液膜半锥角主要由喷嘴几何结构决定,液压差对它的影响不大;而雾化半锥角则同时受喷嘴几何结构和液压差的影响。液膜破碎前长度则受液压差的影响较大,和液压差的开方成反比。

(3)利用试验结果,总结出了计算 C 参数的经验公式,并进一步求得了不同液压差下的液膜破碎点扰动波波长。此结果和实验值进行了对比。对比发现:理论预测值的变化趋势同实验结果完全一致,不过理论结果在数值上都偏大。这说明用分段环形液膜来近似锥形液膜可以得到正确的定性分析结果,但定量上存在较大的误差,需要建立更好的锥形液膜破碎的物理模型。

参考文献:

- [1] Squire H B. Investigation of the instability of a moving liquid film[J]. Brit. J. Appl. Phys. 1953, 4:167-169.
- [2] Hagerty W W, Shea J F. A study of the stability of plane fluid sheets[J]. J. Appl. Mech. 1955, 22:509-514.
- [3] Crapper G D, Dombrowski N, Pyott G A D. Kelvin-Helmholtz wave growth on cylindrical sheets[J]. J. Fluid Mech. 1975, 68:497-502.
- [4] Frankel I, Weihs D. Influence of viscosity on the capillary instability of a stretching jet[J]. J. Fluid Mech. 1987, 185:361-383.
- [5] Rangle R H, Sirignano W A. The linear and nonlinear shear instability of a fluid sheet[J]. Phys. Fluids, 1991, A 3(10):2392-2400.
- [6] LI Xiaoguo, Tankin R S. On the temporal instability of a two-dimensional viscous liquid sheet[J]. J. Fluid Mech. 1991, 220:425-443.
- [7] Panchagnula M V, Sojka P E, Santangelo P J. On the three dimensional instability of a swirling, annular, inviscid liquid sheet subject to unequal gas velocities[J]. Phys. Fluids, 1996, 8(12):3300-3312.
- [8] 岳明,杨茂林.锥形液膜空间稳定性分析[J].航空动力学报,2003,18(6):794-798.
- YUE Ming, YANG Maolin. On the spatial instability of a conical sheet[J]. J. of Aerospace Power, 2003, 18(6):794-798.
- [9] 侯凌云,侯晓春.喷嘴技术手册[M].北京:中国石化出版社,2002年.
- [10] Dombrowski N, Johns W R. The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets[J]. Chem. Eng. Sci., 1963, 18:203-214.