

文章编号:1001-2486(2011)06-00124-05

高速气流条件下的喷嘴与火焰稳定器匹配特性研究*

段小龙¹,毛根旺¹,马天举²,洪流²

(1. 西北工业大学航天学院,陕西 西安 710072; 2. 西安航天动力研究所,陕西 西安 710100)

摘要:针对亚燃冲压发动机燃烧室内部流动特点,在二元稳定器气流试验装置中使用拍摄 OH 基自发光辐射的方法,研究了火焰稳定器与喷嘴以不同间距匹配情况下的燃烧特性,利用气液两相流模型数值仿真手段,分析了试验工况下燃油雾化液滴与稳定器后方油气比的分布情况。通过对比分析认为,高速气流条件下喷嘴与火焰稳定器间距变化对反应流场影响明显,喷-稳距离增大使火焰前沿位置靠近稳定器尾缘,气流速度较低时出现回火。喷-稳距离减小能够避免回火现象,且气流速度较高时火焰悬停距离大。喷-稳距离增大有利于燃油液滴的蒸发和掺混是影响匹配试验火焰前沿位置靠近稳定器的根本因素。

关键词:喷嘴;火焰稳定器;匹配;燃烧特性;OH 基自发光辐射;数值模拟

中图分类号:V231.2 **文献标识码:**A

The Investigation of Matching of Injectors and Flameholder in High Speed Airflow

DUAN Xiao-long¹, MAO Gen-wang¹, MA Tian-ju², HONG Liu²

(1. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

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

Abstract: Based on the flow characteristics of ramjet combustion chamber, combustion characters match of the flameholder and injectors is investigated by means of photography of using OH spontaneous radiation, and the two-phase flow numerical simulation. The influence of distance between the flameholder and the injectors on the fuel-air equivalence ratio distribution behind the flameholder is analyzed. The experiment results indicate that the space between the flameholder and injectors has significant influence on the reaction flow. When the space between the flameholder and injectors increased, the flame was closed to flameholder. And the flame flashed back when the velocity of air was low. when the space between the flameholder and injectors shortened, the flame flash back could avoided and the lift-off distance of the flame became small. The flame located close to the flameholder was due to improved vaporization and mixing at a big space between the flameholder and injectors.

Key words: injector; flame holder; match; combustion characteristics; OH spontaneous radiation; numerical simulation

亚燃冲压发动机燃烧室中气流速度一般为 0.2~0.3Ma,其主要稳焰手段是在燃烧室内布置具有合理阻塞比的火焰稳定装置。发动机工作时,经喷油装置雾化的燃油与高速来流掺混形成可燃混气,火焰稳定器后方的回流区为燃油混气成功点火并维持稳定燃烧提供了必要条件。燃油雾化与稳定器的匹配特性对点火成功后反应流场、火焰稳定以及高效燃烧有重要影响,如果喷嘴与稳定器的匹配性欠佳,极易出现回火,造成稳定器局部高温,引起火焰稳定器变形、裂纹甚至发生烧蚀故障。因此,开展高速气流条件下的喷嘴与火焰稳定器匹配特性研究对改进燃烧室设计、延

长发动机寿命尤为必要。

国内外学者在相关领域进行了广泛的研究, Martin^[1]使用 PIV 的方法对旋流喷嘴的燃烧特性进行试验研究,获得了不同喷口结构下的燃烧火焰形状。Barata^[2]使用高速摄影方法研究了燃油垂直喷射入高速流场后的壁面冲击与雾化过程,利用试验结果修正液滴碰壁模型。Patel^[3]采用大涡模拟计算得到了燃料自旋流静态喷嘴喷出后的混合速率以及化学反应速率。顾善建^[4]采用电加热取样感头测量了稳定器尾缘油气比,研究直流喷嘴与稳定器匹配时的燃油浓度分布。岳连捷^[5]在低速风洞中利用 PIV 系统,对 V 型槽火焰

* 收稿日期:2011-04-28

基金项目:第二炮兵装备研究院资助项目

作者简介:段小龙(1975—),高级工程师,博士生。

稳定器的尾迹流动进行了测量,分析认为近尾大尺度旋涡在火焰传播中起到了固定点火源与传递热量的作用。

传统的光学诊断、测量探头等试验或数值模拟^[6]的方法,很难直观地给出火焰前沿的位置。本文使用 OH 基辐射光谱拍摄技术,清楚地得到了喷-稳间距变化时稳定器后的火焰形状和火焰前沿位置;通过试验结果与数值仿真结果的定性比较,获得了高速气流条件下喷嘴与稳定器匹配工作特性。

1 试验系统

1.1 试验装置

试验台主要由高压供气系统、供油系统、燃气发生器系统、试验段(包括整流段、试验测量段)、补氧系统、摄像系统和测量系统组成,试验系统简图如图 1 所示。试验台通过燃气发生器产生高温气流,经圆转方喷管在试验段内形成亚音速气流,试验段内为 105mm × 80mm 矩形气流通,试验时高速气流含氧量 23%,温度为 900K,通过可调喷管控制试验段压力和气流速度。试验段在水平方向以及垂直方向均开有测量窗,选用耐高温石英玻璃封闭,UV 相机从稳定器正上方测量窗进行拍摄;试验段的入口和出口分别布置总、静压测点及温度测点,以确定气流参数。

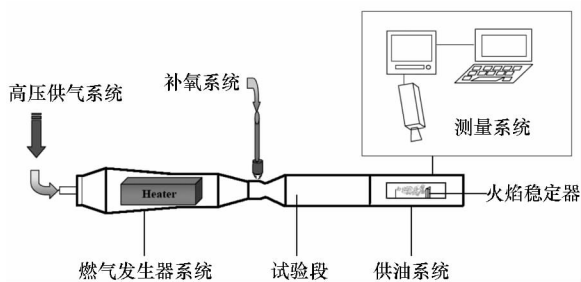


图 1 试验系统简图

Fig. 1 Layout of the test system

1.2 光学测试系统

相关研究表明^[7-9],烃类燃料高温燃烧产物中的紫外辐射主要来自 OH 基的自发光辐射,自发辐射波峰在 309 nm 附近,OH 基辐射强度与火焰中的放热速率有关,探测 OH 基辐射可以判断火焰前沿与高温燃烧区位置。试验时,使用 Hisense MKII ICCD UV 相机对 OH 基进行了探测,镜头前配置窄带滤波片,中心波长为 310nm,FWHM 为 10nm,调节图像增强器光电倍增管的增益获得 OH 基强度分布图像,根据 OH 基自发辐射强度来定性得到稳定器后温度场定性分布和

火焰前沿位置,为火焰稳定和演化提供图像与数据支持。

2 试验件和匹配试验方案

喷嘴和火焰稳定器匹配试验件结构如图 2 所示。试验件安装在试验段矩形气流通内,上方观察窗距火焰稳定器顶端 20mm,拍摄区域为稳定器以及其后反应区;试验使用的火焰稳定器半角为 10.5°,稳定器的阻塞比为 0.45;点火器布置在稳定器的槽内,距离稳定器后缘 6mm,沿稳定器轴向插入,插入深度为 40mm。燃油喷嘴供油管中心到稳定器迎风端前缘的距离可调,喷油杆分别安装在喷嘴位置 A、B 两点。定义喷-稳匹配系数 D ,且

$$D = L/H$$

其中: L 为喷油杆轴线距离稳定器迎风端前缘的距离, H 为试验采用稳定器槽宽。

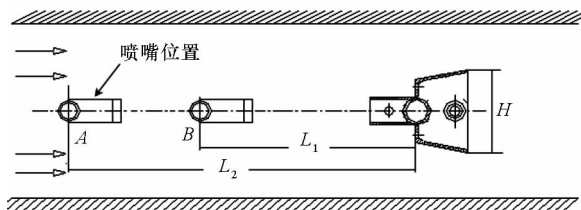


图 2 喷嘴与火焰稳定器位置示意图

Fig. 2 Schematic configuration of nozzle and the flameholder

匹配试验主要对不同高速气流条件下,离心喷嘴与火焰稳定器以不同间距匹配计 12 个工况的燃烧情况进行了研究,试验工况如表 1 所示。

表 1 离心喷嘴与火焰稳定器匹配方案

Tab. 1 Layout of matching on flame holder and injectors

试验工况	来流 (Ma)	燃料喷注方式	喷-稳匹配系数(D)	余气系数
Case I	0.166	离心喷嘴顺喷	4.2\2.6	≈2.4\1.9
Case II	0.228	离心喷嘴顺喷	4.2\2.6	≈2.3\1.9
Case III	0.394	离心喷嘴顺喷	4.2\2.6	≈2.3\1.8

3 试验结果与分析

在前方高速来流稳定的条件下,试验中首先点燃稳定器单独供油,保证其供油量不变,稳定工作 2s 后,前方喷嘴喷入煤油,再工作 2s 后关机。试验时,在来流不变的条件下,通过改变喷嘴的位置来研究离心喷嘴与火焰稳定器匹配关系对火焰前沿位置的影响。

3.1 图像尺寸标定

UV 相机拍摄的 OH 基图像表示 OH 基自发

光强度值,存在 OH 基自发光的区域能够定量地反映火焰位置。OH 基自发光的强度与反应剧烈程度相关,强度高的地方代表温度高度的区域。如果使用 OH 基自发光强度定量分析温度场和燃烧效率,则需要进行标定工作。为了定量分析稳定器后火焰的位置变化,试验取 OH 基发光强度为 400 作为火焰前沿的标准,对瞬时火焰进行平均处理,分析火焰形状和火焰前沿位置。

3.2 匹配试验结果分析

通过对试验工况 I ~ III UV 相机拍摄到的

OH 基图像进行处理,我们可以清楚地看到稳定器后方燃烧反应区的边界情况(如表 2)。对比各工况图像,当余气系数在 2.4 附近时,改变喷嘴与稳定器之间间距,来流马赫数相同工况稳定器后方火焰边界存在明显差异,喷-稳匹配系数 D 为 4.2 时火焰前沿位置比较靠近稳定器尾缘,当喷-稳匹配系数 D 减小为 2.6 后,火焰前沿位置均明显向远离稳定器尾缘方向移动;在来流马赫数偏低($Ma = 0.166$)且喷-稳匹配系数 D 为 4.2 时,稳定器后方燃烧区出现回火。

表 2 稳定器后的火焰特性($\alpha = 2.4$)

Tab. 2 Flame properties behind the flame holder ($\alpha = 2.4$)

序号	喷-稳匹配系数(D)	OH 分布	火焰外形
Case I $Ma = 0.166$	4.2		
	2.6		
Case II $Ma = 0.228$	4.2		
	2.6		
Case III $Ma = 0.394$	4.2		
	2.6		

表 3 为试验余气系数在 1.9 附近时火焰特性和火焰照片,可以看到稳定器后方化学反应强度明显增大;当试验喷-稳匹配系数 D 为 4.2,且来流马赫数较低 ($Ma = 0.166$) 时,试验段内同样出现强烈回火,火焰将稳定器完全包围,试验完毕关

机后稳定器局部烧红。改变喷嘴与稳定器之间间距即匹配系数变为 2.6 后,稳定器后方火焰边界变化明显:火焰锋面向后移动,稳定器始终处于高温火焰以外,试验后稳定器未见有烧红现象。

表 3 稳定器后的火焰特性和火焰照片 ($\alpha = 1.9$)

Tab.3 Flame properties and photograph behind the flame holder ($\alpha = 1.9$)

序号	喷-稳匹配系数 (D)	OH 分布	火焰外形	试验时观察窗拍摄的照片
Case I $Ma = 0.166$	4.2			
	2.6			

定义火焰前沿与稳定器背风面尾缘之间的距离为火焰悬停距离,对匹配试验得到的各工况火焰悬停距离进行统计如图 3。从统计结果看,当喷-稳间距离小时,火焰悬停距离偏大;随着油气比的增加,火焰前峰向稳定器尾缘方向移动,喷-稳间匹配系数 D 为 4.2 的工况在气流速度较小且油气比较高的 4 个工况均出现稳定器回火。

器尾缘附近气相燃油分布变得较为均匀,有利于提高化学反应速率,火焰前沿位置向靠近稳定器尾缘方向移动,此时前方气流速度偏低时,火焰前沿会越过稳定器尾缘,造成回火。

3.3 数值仿真分析

基于 CFD-ACE + 计算平台,采用将空气作为连续相,燃油液滴作为弥散相的颗粒随机轨道模型,对喷-稳匹配性能试验燃油雾化两相流问题进行仿真计算。计算选取包含试验台二元火焰稳定器和喷油杆的一段矩形通道建模,将流场近似为不可压流动 ($Ma \leq 0.3$),采用 SIMPLEC 算法求解有限差分方程,在两相各自计算后再考虑两相间的质量、动量与能量源项耦合求解。

计算时,湍流模型采用程重整化群 $k-\epsilon$ 模型,标准壁面函数处理近壁区域黏性流动。根据静态雾化试验测量结果,初始雾角为 70° ,液滴分布满足指数为 3.5 的 R-R 分布。采用波致破碎模型描述喷嘴模型的初始雾化过程,RT (Rayleigh-Taylor) 表面波不稳定性模型描述液滴在连续运动中伴随发生的二次雾化现象。通过计算,得到了匹配试验工况气流条件下,喷-稳间距变化对燃油雾化以及稳定器后方燃油分布影响的仿真结果。

图 4 表示了喷-稳匹配系数 D 为 2.6、3.2、4.2 工况,试验通道距稳定器尾缘 2mm 位置轴向切面的燃油平均油气比分布曲线,计算工况和匹配试验 Case II 工况基本一致:来流马赫数为

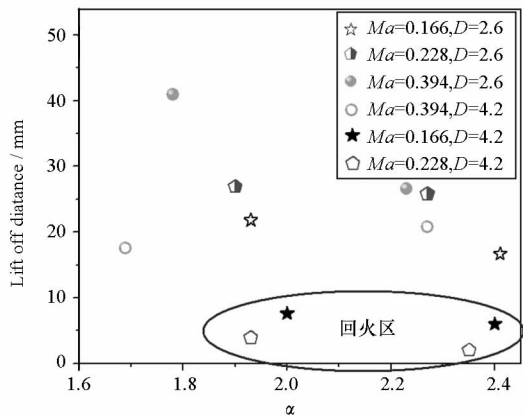


图 3 火焰悬停距离

Fig. 3 Lift-off distance of the flame

对得到的匹配试验现象分析认为,当喷-稳距离较小时,喷嘴喷射出来的液滴受热时间以及与来流的掺混时间缩短,造成稳定器后方油气混合物的均匀性变差,直接影响燃烧湍流火焰传播速度,从而使得稳定器近尾当地气流速度大于湍流火焰传播速度,表现为相同来流马赫数时火焰前沿位置向远离稳定器尾缘方向移动。而当喷-稳距离变大后,燃油与来流空气掺混较好,使稳定

0.23, 余气系数 1.8。

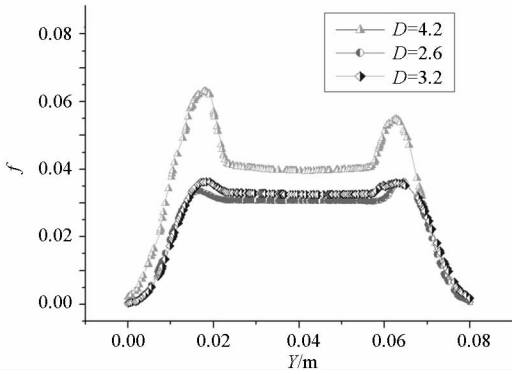


图4 稳定器尾缘燃油油气比分布

Fig.4 Fuel-air ratio distributions behind the flame holder

从计算结果可以看出,在喷-稳匹配系数 D 为 4.2 时,稳定器尾缘附近存在两个局部相对富油区域,曲线呈双峰形态,燃油油气比分布总体明显高于其余两种喷-稳间距缩短的工况;喷-稳匹配系数 D 为 2.6 和 3.2 两种情况燃油分布则相对偏低。

图5为计算得到的匹配试验 Case II 工况的燃油随机液滴群组自喷嘴喷出后在 3 种喷-稳间距下的速度变化曲线。仿真结果显示,在与稳定器发生碰撞前,喷-稳匹配系数 D 为 4.2 工况燃油液滴具有更大的速度,这正是由于液滴在碰壁前受气流充分夹带,加速时间较长所致。其余两种工况液滴速度相差较小,液滴基本未来得及被加速就与稳定器发生了碰撞。

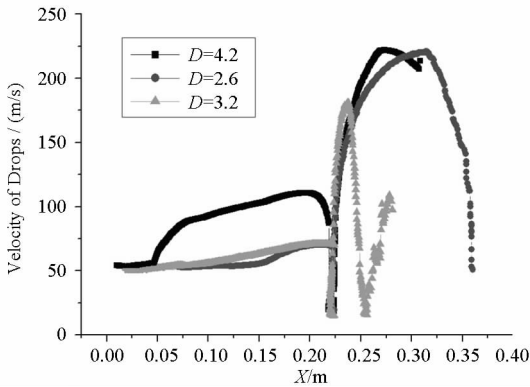


图5 液滴运动速度变化曲线

Fig.5 Velocity variety with different condition

数值仿真结果显示,在喷-稳间距较大时,稳定器尾缘可直接参与燃烧的气相燃油分布明显高于其余工况;而在匹配试验中存在火焰前沿距离稳定器较近,在来流马赫数偏低时易出现回火的试验事实。数值仿真结果从燃油雾化、浓度分布的角度验证了匹配试验中所得到的现象与规律:燃油经喷嘴雾化后,液滴被高速来流夹带,如果喷-稳距离较大,会使雾化的液滴获得更高的速度,

对燃油液滴的蒸发与掺混有利,使稳定器尾缘油气环境有利于燃烧反应的发生;而喷-稳距离缩短后,液滴尚未蒸发完全就运动至火焰稳定器后,稳定器尾缘附近气相燃油分布相对较少且不均匀,影响了湍流火焰传播速度,使火焰前沿位置远离稳定器尾缘;同时,未蒸发完全的燃油液滴对稳定器也起到了一定的冷却保护作用。

4 结论

通过对高速气流条件下喷嘴与火焰稳定器匹配特性的试验研究,以及对燃油雾化情况的数值分析,初步得到以下结论:

(1) 在高速气流条件下,喷嘴与火焰稳定器的间距对其后方的反应流场有重要影响,喷-稳距离增大时,火焰前沿位置向稳定器尾缘靠近,火焰悬停距离较小,气流速度较低时,工况会出现回火。喷-稳距离减小可使火焰悬停距离增大,能够避免稳定器回火现象。

(2) 喷-稳距离增大对燃油液滴的蒸发和掺混有利,从而影响稳定器后方燃油浓度分布;燃油浓度分布是影响匹配试验火焰前沿位置的根本因素。

参考文献:

- [1] Martin B, Ashwani K. Combustion Characteristics of Pressurized Swirling Spray Flame and Unsteady Two-Phase Exhaust Jet [R]. AIAA 2006 - 377, 2006.
- [2] Barata J M M, Silva A R R. Experimental Study of Spray Dispersion and Wall Interaction [R]. AIAA - 2009 - 5158, 2009.
- [3] Patel N, Menon S. Large-eddy Simulation of Swirl-Stabilized Spray Combustion [R], AIAA - 2006 - 154.
- [4] 顾善建,杨茂林,黄勇,等. 直射式喷咀垂直跨流喷油与沙丘驻涡稳定器匹配的实验研究[J]. 航空动力学报, 1994, 9(1): 79 - 82.
- [5] 岳连捷,杨茂林,樊未军,等. 火焰稳定器稳焰机理的非定常观点探讨[J]. 航空动力学报, 2001, 16(4): 340 - 344.
- [6] 马天举,栾希亭,洪流. 高速气流场燃油雾化液滴分布数值研究[J]. 火箭推进, 2009, 35(3): 21 - 25.
- [7] Goldfeld M M. Application of OH Radical Radiation for Determination of Kerosene Combustion Efficiency [R]. AIAA 2001 - 1820, 2001.
- [8] 耿辉,翟振辰,桑艳. 利用 OH-PLIF 技术显示超声速燃烧的火焰结构[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(2): 1 - 6.
- [9] 洪流,杨国华. 来流马赫数和余气系数对蒸发式火焰稳定器燃烧特性的影响[J]. 航空工程进展, 2010, 1(2): 173 - 177.