

文章编号:1000-8055(2012)11-2436-06

超声速气流中煤油喷雾的热射流强迫点火

席文雄, 王振国, 李 庆, 梁剑寒

(国防科学技术大学 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 长沙 410073)

摘 要: 在来流马赫数为 2、总温为 840 K 的双模态超燃冲压发动机扩张型燃烧室的冷启动工况条件下, 对凹腔上游的煤油横向射流喷雾的热射流强迫点火过程进行了试验研究. 采用高速相机拍摄了点火过程中的煤油喷雾阴影和自发光火焰的动态发展图像, 对比分析了热射流喷射位置和喷射方向对点火试验结果及其凹腔驻留火焰形成的影响. 试验结果表明: 热射流点火主要以凹腔下游热射流与煤油喷雾的掺混燃烧为主要特征; 远场的火焰逆流传播形成凹腔驻留火焰是热射流实现成功点火的主要机制.

关 键 词: 点火; 煤油喷雾; 热射流; 火焰传播; 凹腔驻留火焰

中图分类号: V233.3

文献标志码: A

Forced ignition of kerosene spray in supersonic airflow with hot gas injection

XI Wen-xiong, WANG Zhen-guo, LI Qing, LIANG Jian-han

(Science and Technology on Scramjet Laboratory,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Forced ignition of kerosene spray with hot gas injection was investigated experimentally in an expanding scramjet combustor with incoming air total temperature of 800 K and Mach number 2 which was related to a typical cold start-up condition of dual-model scramjet. The fuel was injected vertically into the crossflow upstream the flame-holding cavity. The kerosene spray shadow and self-luminosity flame evolvment during the process of ignition were observed using high speed camera. The effects of injection scheme such as position and direction of hot jet on the ignition results and cavity-trapped flame generation were compared and analyzed. Results reveal that the enhanced ignition by hot gas injection is characterized by the far-field diffusive burning between spray and hot jet. The trapped flame within cavity is created due to the flame propagation upstream which is the dominant mechanism of successful flame establishment.

Key words: ignition; kerosene spray; hot gas injection; flame propagation; trapped flame within cavity

采用液体煤油燃料的双模态超燃冲压发动机在冷启动工况下燃烧室入口总温较低, 燃料的雾化和沿程蒸发距离较长. 凹腔回流区周围聚集的

稠密喷雾燃料加大了火核生成和传播的困难, 点火能量需求急剧增加^[1-2]. 若采用传统电火花塞, 难以实现可靠点火. 因此, 探索超声速来流条件下

收稿日期: 2012-02-21

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121115.1028.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金(11102230)

作者简介: 席文雄(1984—), 男, 江西高安人, 博士生, 主要研究领域为超燃冲压发动机燃烧过程、冲压发动机设计.

稠密喷雾的点火强化措施对于提高双模态发动机的点火起动的可靠性具有重要意义。

按点火能量的作用方式,强化措施主要分为 2 类,分别为:活性气态燃料的引导点火^[3-4]和外部热源直接注入式的热射流点火^[5-6]。前者系统结构简单,但引导火焰能量受发动机燃烧室结构设计的影响较大;后者热射流可由等离子炬或燃烧火炬产生,点火能量的调节和点火位置的布置较为独立和灵活。其中等离子体射流点火作为一种先进的点火强化措施,已引起了国内外研究者的广泛兴趣^[7-9]。燃烧火炬热射流点火由于操作简单、可控性强,已应用于地面试验研究中^[10-11]。Kobayashi 等^[12-13]对比了氢氧燃烧射流和氧气等离子体射流在超声速条件下的点火性能,研究结果表明:这两种热射流方式点火能量大,对于促进点火和燃烧非常有效。然而,热射流点火能否推广应用于飞行条件需要进一步优化。热射流作用方式对超声速燃烧流场的影响有待更深入地认识^[13]。

本文对超声速气流中稠密喷雾的热射流强迫点火的火核生成和传播过程的研究将有利于加深对热射流点火强化机理的理解,并有助于超燃冲压发动机点火方案的设计。

1 试验系统和方法

1.1 燃烧式加热器

加热器采用酒精、氧气、空气 3 组元燃烧的加热方式。出口气流中 O_2 质量分数为 23%, N_2 质量分数为 60%, CO_2 质量分数为 10.4%, 水的质量分数为 6.3%。表 1 所示为加热器模拟的双模态冲压发动机在起动飞行条件下的燃烧室入口气流工况。

表 1 加热器模拟工况条件
Table 1 Simulated condition by air heater

参数	数值
质量流量 $q_m/(kg/s)$	2.0
总温 T_t/K	840
静温 T_e/K	500
总压 p_t/kPa	600
静压 p_e/kPa	81
来流速度 $V/(m/s)$	860
马赫数 Ma	2.0

1.2 模型燃烧室

如图 1 所示为用于试验的扩张型双模态燃烧室结构简图。喷管出口截面尺寸为 54.5 mm × 75 mm(高 × 宽)。隔离段全长 400 mm,扩张燃烧室长 600 mm,扩张角度为 2.5°,采用凹腔作为火焰稳定器。在隔离段扩张截面处依次设置 2 处间隔约为 80 mm 的观察窗口。采用高速摄像机记录燃烧室内的点火燃烧过程。为使火焰图像和喷雾阴影能够同时成像,采用白色发光二极管(LED)平板光源作为背景光源。相机拍摄频率设定为 9 300 帧/s,曝光时间为 0.1 ms。在燃烧室扩张段入口处设置压力传感器,用于监测燃烧室内的压力响应。

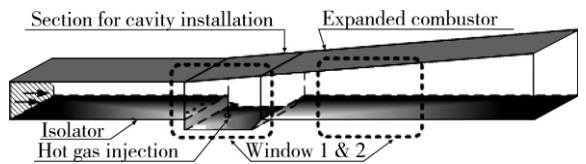


图 1 双模态燃烧室简图

Fig. 1 Schematic of dual-model combustor

图 2 为用于试验的具有不同热射流喷注位置和喷注方向的凹腔构型。凹腔深度为 15 mm,长深比为 7。距凹腔前缘 10 mm 处设置 5 个并行排列的孔径为 0.5 mm 的喷注孔,用于煤油燃料的横向喷注。试验在相同的煤油喷射工况下进行,喷前压力为 2 MPa,质量流量为 36 g/s。

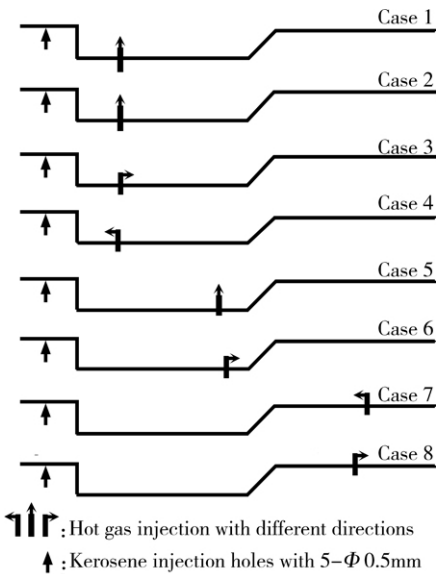


图 2 不同热射流喷射位置和喷射方式下的凹腔构型

Fig. 2 Schematic of cavity configurations with different hot gas injection positions and directions

为了对比热射流喷射位置和喷射方向对点火过程的影响,分别在距离凹腔台阶面 40,80,200 mm 三处位置设置了热射流喷射安装孔.文中设计了 8 种不同喷射方式的试验,考查了横向喷注、顺流喷注、逆流喷注 3 种注射方式的影响.图 2 给出了各种试验构型的示意图.其中,Case 2,Case 5 的热射流喷口伸至凹腔剪切层内,其余构型条件下热射流喷口都贴近于燃烧室壁面.

1.3 热射流火炬

热射流采用氧气和含水酒精燃烧方式产生.通过配置酒精浓度可以调节热射流的气流温度.本文中通过热力计算和试验调节,燃气温度约为 1500 K,热射流质量流量为 60 g/s,火炬腔设计室压为 0.9 MPa.热射流采用等直喷孔,喷口直径为 7 mm.图 3 为热射流火炬的现场安装示意图.

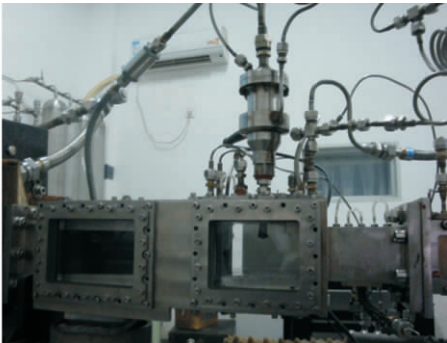


图 3 热射流现场安装示意图
Fig. 3 Photograph of hot gas injection installation

2 试验结果及分析

2.1 点火试验结果

试验过程中将点火时序分为 3 个阶段:热射流注入掺混阶段;热射流辅助煤油点火燃烧阶段;煤油单独喷射燃烧阶段.当热射流关闭后,煤油能够单独稳定燃烧则表明热射流点火成功.试验中发现,根据热射流点火的作用时序,1 次成功的点火过程由 3 个子过程构成.首先,热射流和喷雾燃料相互接触,在高温射流火焰的作用下,射流尾迹区域内形成大面积的喷雾火焰;其次,形成的初始喷雾火焰向凹腔内低速回流区传播,形成凹腔内的驻留火焰;最后,热射流撤去,凹腔内驻留火焰发挥火焰稳定源作用维持煤油的稳定燃烧,实现成功点火.

图 4 为不同热射流注入方式下的点火试验结果.本文试验的 8 种射流构型中,共有 4 种试验构

型(Case 2, Case 5, Case 6, Case 7)实现了成功点火.其共同特点表明,热射流在凹腔内的喷注位置不是影响点火的关键因素.与单点激励下的火花点火火核发展的局部近场特征^[14-15]不同,喷雾初始火核并不产生于凹腔的低速回流区中.热射流与喷雾轨迹在下游远场处的掺混燃烧是喷雾初始火焰产生的主要方式.

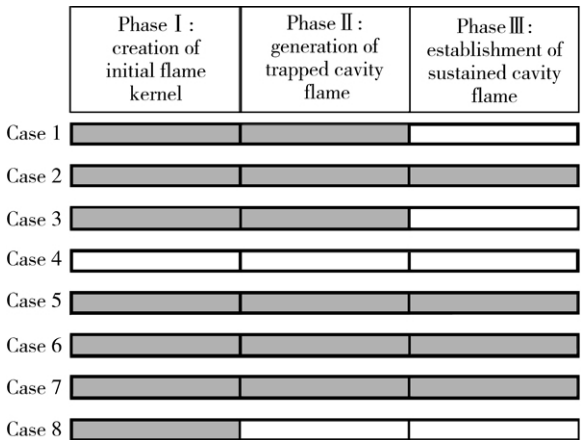


图 4 不同热射流注入方式下的点火结果
Fig. 4 Results of different hot gas injection schemes

点火失效的 3 种不同的情形,分别对应于:无法形成初始火核的情形(Case 4);能形成初始火核但无法形成凹腔驻留火焰(Case 8);既能形成初始火核又能形成凹腔驻留火焰但无法形成稳定的自持火焰(Case 1, Case 3).通过对比各种射流方式在点火过程中的作用方式,可分析出点火失效的原因.试验 Case 4 中的射流喷出后,射流能量在凹腔角回流区内迅速耗散,未形成热射流火焰和喷雾阴影的有效接触区域,无法形成初始火核.试验 Case 8 热射流在凹腔下游的顺流喷注条件下,热射流与煤油喷雾的蒸发、掺混的促进作用强度不够,形成的喷雾初始火焰强度弱,未能形成有效的边界层分离,从而实现火焰逆传以保证凹腔驻留火焰的形成.试验 Case 1 和 Case 3 的热射流喷口布置于凹腔内,并靠近凹腔前部,热射流关闭后却无法得到稳定的燃烧火焰,这是由于热射流腔体内的低能燃气被抽吸至凹腔回流区中,稀释凹腔内的高温驻留火焰,使火焰熄灭.因此,为保证点火成功,应避免形成的凹腔驻留火焰受热射流尾气效应的影响.

2.2 喷雾与热射流近场作用特征

热射流的喷雾点火特征主要表现为热射流高温火焰与煤油射流喷雾之间的掺混燃烧过程.热

射流温度高、火焰散布区域大,与喷雾作用时,可通过促进煤油液滴的蒸发过程而显著改善稠密喷雾的点火性能. 为保证点火的成功进行,首先应使热射流与喷雾轨迹在空间上相互接触,充分混合.

图 5 为 Test1,Test2,Test5 所对应的喷射位置下的喷雾与射流火焰的近场相互作用流场. 左图表示的是喷雾点火前的流场形态;右图表示的是喷雾火焰被点燃并形成凹腔驻留火焰后的分布形态. 图 6 所示为 Test1 工况下的火焰展向分布特征. 结合图 5(a)和图 6(a)可以看出,热射流横向注入主流后,在热射流喷口下游附近区域仍维持较高的温度分布,并在向下游的对流输运中不断耗散. 在射流热火焰的局部冲击作用下,燃料液滴迅速蒸发完毕. 不同的喷射方式对液滴燃料的蒸发程度具有不同的影响. 图 5(b)相比于图 5(a),喷口附近喷出的热射流具有更大的射流量,因此喷雾辅助蒸发作用更为强烈. 图 5(c)由于在凹腔剪切层下游喷雾扩散面积增大,热射流只能作用于相互接触的局部区域,因此图中能观察到尚未完全蒸发的喷雾阴影.

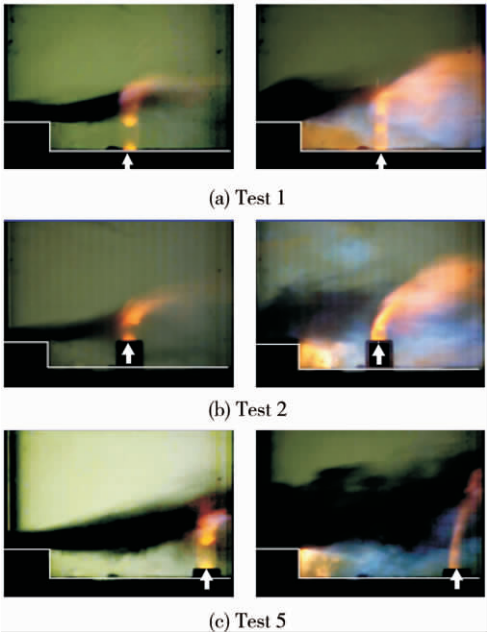


图 5 不同热射流注入方式下的喷雾轨迹和热射流的近场作用特征

Fig. 5 Characteristic of near-field interaction between spray and hot jet with various injection schemes

喷雾和热射流相互接触后,经过短暂的延迟在下游形成喷雾火焰(如图 6(c)). 图 5 中显示的热射流火焰轨迹由点火前的间断结构变为连续的

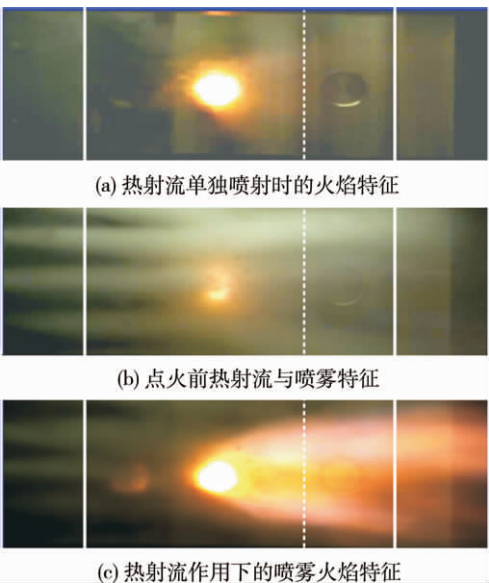


图 6 热射流点火的火焰展向分布

Fig. 6 Spanwise flame distribution of hot jet ignition

明亮火焰. 这是由于喷雾火焰形成后,燃烧放热使得燃烧室气流出现壅塞,流速降低,静压升高,减弱了热射流在喷口处的膨胀效应. 同时,煤油的喷雾轨迹也发生了改变,喷雾散布区域显著增大,并表现出不稳定特征.

图 7 为热射流与喷雾阴影未发生直接接触、高速时的形态特征,分别对应于 Test4 和 Test3. 结合以上的点火试验结果可知,Test4 由于热射流直接作用于凹腔角回流区,高速的射流火焰改变了回流区结构,使得凹腔难以生成局部火焰. 同时,热射流与凹腔前壁面的碰撞作用使得热射流耗散加剧,无法在向下游输运的过程中仍保持足够的喷雾点火能量. 图 7(b)显示了喷雾和热射流未直接相互作用,通过下游的扩散过程实现喷雾点火,形成凹腔驻留火焰的情形.

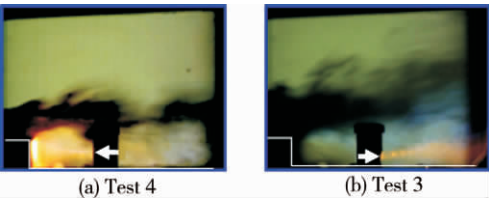


图 7 喷雾与热射流火焰未相互接触时的图像

Fig. 7 Images of spray and hot jet without direct interaction

综上对比可以认为,凹腔驻留火焰不是由于热射流和喷雾之间的近场作用形成的,而是由热射流和喷雾在下游的扩散燃烧形成初始火焰,并

建立燃烧室压力反馈,火焰逆流传播形成.

2.3 远场效应下的初始火核传播过程

热射流点火的远场效应可由试验 Case7 的火焰动态发展过程(见图 8)得到更进一步证实.同时,该喷射构型可排除关闭瞬间射流尾气效应对凹腔驻留火焰的影响.图 8(f)显示的是关闭背景光后,火焰长时间稳定情况下的火焰自发辐射图像.

从动态图像图 8 可以看出,热射流的逆向喷射大大强化了热射流和煤油喷雾的掺混过程,使得煤油喷雾能够在较短的 20 ms 延迟时间后在下游区域内形成煤油喷雾的初始火核,并沿着边界层向上游凹腔传播.存在 2 种正反馈机制强化了火焰在煤油喷雾中的逆流传播过程:煤油掺混燃烧热释放产生的压力上升和热射流逆向喷射作用导致的边界层厚度增厚.至此,可以得出结论,下游远场的掺混燃烧效应和火焰向凹腔内的逆流传播过程是热射流辅助喷雾点火的主要机制.因此,在凹腔低速回流区形成初始火核对热射流点火来说不是必要条件.

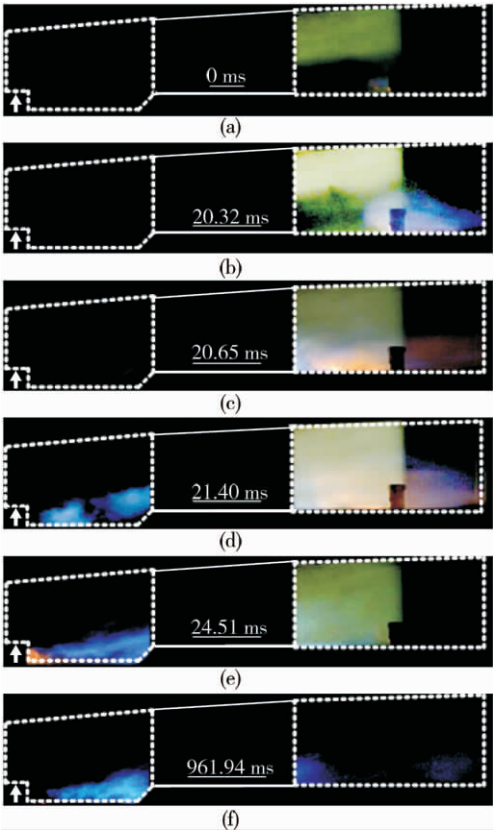


图 8 下游热射流喷射形成的初始火核传播过程

Fig. 8 Propagation of initial kernel created by downstream hot gas injection

3 结 论

本文在来流马赫数为 2、总温为 840 K 的双模态超燃冲压发动机扩张型燃烧室的冷起动工况条件下,对凹腔上游的煤油横向射流喷雾的热射流强迫点火过程进行了试验研究.采用高速相机拍摄了点火过程中的煤油喷雾阴影和自发光火焰的动态发展图像,对比分析了不同的热射流喷射位置和喷射方向下的点火试验结果及其喷雾和火焰的相互作用特征.通过研究,本文获得的结论如下:

- 1) 热射流与喷雾的近场作用特征表明:热射流通过对喷雾液滴的掺混、蒸发过程的促进作用来强化点火性能.
- 2) 凹腔驻留火焰不是由于热射流和喷雾之间的近场作用形成的,而是由热射流和喷雾在下游的扩散燃烧形成初始火焰,并建立燃烧室压力反馈,火焰逆流传播形成.
- 3) 为保证点火成功,应避免已形成的凹腔驻留火焰受热射流尾气效应的影响.

参考文献:

[1] Aggarwal S K. A review of spray ignition phenomena: present status and future research[J]. Progress in Energy and Combustor Science,1998,24(6):565-600.

[2] Marchione T, Ahmed S F, Mastorakos E. Ignition of turbulent swirling n-heptane spray flames using single and multiple sparks[J]. Combustion and Flame,2009,156(1):166-180.

[3] ZHANG Man, HU Zhiwei, LUO Kaihong, et al. LES of kerosene spray combustion with pilot flame in a model dual mode ramjet chamber[R]. AIAA-2009-5385,2009.

[4] Michael G O, Sharam T, Corin S. Flame-holding configurations for kerosene combustion in a Mach 1.8 airflow[J]. Journal of Propulsion and Power,1998,14(4):456-461.

[5] Situ M, Wang C, Lu H P, et al. Hot gas piloted energy for supersonic combustion of kerosene with dual-cavity[R]. AIAA-2001-0523,2001.

[6] Lance S J, Campbell D C, Thomas A J. Plasma-assisted ignition in scramjets[J]. Journal of Propulsion and Power,2008,24(4):641-654.

[7] Timothy C W, Walter F O B, Northam G B. Plasma torch igniter for scramjets[J]. J. Propulsion,1989,5(5):548-554.

[8] 宋文艳,刘伟雄,贺伟,等.超声速燃烧室等离子体点火实验研究[J].实验流体力学,2006,20(4):20-24.

SONG Wenyan, LIU Weixiong, HE Wei, et al. Experimental investigation of plasma ignition in supersonic combustor [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics,2006,20

(4):20-24. (in Chinese)

[9] 李飞,余西龙,顾洪斌,等. 超声速气流中煤油射流的等离子体点火实验[J]. 航空动力学报,2012,27(4):824-831.
LI Fei,YU Xilong,GU Hongbi,et al. Experiment on kerosene fueled scramjet ignition by using plasma torch[J]. Journal of Aerospace Power,2012,27(4):824-831. (in Chinese)

[10] 丁猛,余勇,梁剑寒,等. 碳氢燃料超燃冲压发动机点火技术试验[J]. 推进技术,2004,25(6):566-569.
DING Meng,YU Yong,LIANG Jianhan,et al. Experimental investigation of ignition technology in liquid hydrocarbon fueled scramjet combustor[J]. Journal of Propulsion Technology,2004,25(6):566-569. (in Chinese)

[11] 潘余,刘卫东,梁剑寒,等. 模型超燃冲压发动机内着火过程分析[J]. 力学学报,2009,41(4):455-462.
PAN Yu,LIU Weidong,LIANG Jianhan,et al. On the ignition process in a model scramjet combustor[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2009,41(4):455-462. (in Chinese)

[12] Kobayashi K,Tomiokata S,Mitani T,et al. Ignition by an H₂/O₂-microburner in a supersonic airflow[R]. AIAA-2001-1763,2001.

[13] Kobayashi K,Tomiokata S,Mitani T. Supersonic flow ignition by plasma torch and H₂/O₂ torch[J]. Journal of Propulsion and Power,2004,20(2):294-301.

[14] Ahmed S F,Balachandran R,Marchione T. Spark ignition of turbulent nonpremixed bluff-body flames[J]. Combustion and Flame,2007,151(1/2):366-385.

[15] Ahmed S F,Balachandran R,Mastorakos E. Measurements of ignition probability in turbulent non-premixed counter-flow flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2007,31(1):1507-1513.