

碳氢燃料超声速脉冲燃烧实验研究*

张泰昌, 王 晶, 范学军

(中国科学院力学研究所/高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 主动冷却超燃冲压发动机一般使用碳氢化合物作为燃料, 但是碳氢燃料存在点火延迟时间长, 稳定燃烧范围窄等问题, 这就迫切需要开展碳氢燃料点火和稳燃新方法的研究。脉冲燃烧可能是一种拓展超声速燃烧室工作范围的方式, 但在超声速燃烧室内还没有开展相关研究。使用结构简单的脉冲火花塞 (5Hz, 50J/pulse), 在马赫数 2.5 的直联式超声速燃烧室内, 实验研究了乙烯和超临界煤油的超声速脉冲燃烧可能性、燃烧模式及影响因素。乙烯脉冲燃烧实验表明, 在稳定燃烧范围以外存在脉冲燃烧, 并能够提供有效的脉冲推力。乙烯脉冲燃烧主要存在于来流空气总温较低条件下; 随着总温的提高, 脉冲燃烧将进一步引起稳定燃烧; 当总温很高时, 乙烯直接稳定燃烧, 没有观测到脉冲燃烧现象。煤油的实验表明, 本文所用的脉冲式能量补充无法实现超临界煤油的脉冲燃烧, 煤油的脉冲燃烧可能需要更多的热量和自由基。

关键词: 脉冲燃烧; 超声速燃烧; 乙烯; 超临界煤油

中图分类号: V235.21 文献标志码: A 文章编号: 1001-4055 (2014) 06-0788-05

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2014.06.010

Pulse Combustion of Hydrocarbon Fuels in a Supersonic Model Combustor

ZHANG Tai-chang, WANG Jing, FAN Xue-jun

(State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics/Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Hydrocarbon fuel is used in the regenerative cooled scramjet. Due to its disadvantages in ignition delay time and stable combustion range, it is desirable to develop new technology for igniting and stabilizing the hydrocarbon flame. Pulse combustion may be a potential method, but its study in the scramjet combustor has not been paid attention. In this work, pulse combustion of hydrocarbon fuels, ethylene and kerosene, in a Mach 2.5 supersonic model combustor was experimentally investigated using a pulse spark igniter (5Hz, 50J/pulse) located in the center of a cavity, respectively. The results indicate that pulse combustion of ethylene exists outside the stable combustion range, which can provide effective pulse thrust. Pulse combustion of ethylene appears mainly at low air stagnation temperature. Pulse combustion can further induce the stable combustion with increase of air stagnation temperature. No pulse combustion is observed at high air stagnation. Pulse spark igniter in this work is unable to induce pulse combustion of supercritical kerosene, which maybe requires more energy and radicals.

Key words: Pulse combustion; Supersonic combustion; Ethylene; Supercritical kerosene

* 收稿日期: 2013-03-26; 修订日期: 2013-10-08。

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目 (91016005); 国家自然科学基金创新群体项目 (10621202)。

作者简介: 张泰昌 (1981—), 男, 助理研究员, 研究领域为超声速燃烧特性与稳定性。E-mail: taichang@imech.ac.cn

1 引言

超声速燃烧室在宽马赫数范围内维持稳定燃烧是超燃冲压发动机迈向实际运行的重要基础条件之一。碳氢燃料因其具有很好的热沉、操作与携带便利等优势,在飞行马赫数8之下,成为高超声速飞行的潜在燃料。但是,碳氢燃料尤其是煤油的稳定燃烧范围很窄,且随着飞行马赫数的增加进一步变窄^[1,2],极大限制了超燃冲压发动机的实际运用。目前,超声速燃烧室内的稳定燃烧主要是通过连续性地补充能量或活性自由基来提高化学反应速度,降低化学反应时间来实现,具体包括燃料部分裂解^[3,4]、引导氢^[5,6]和等离子体射流^[7]等方法。

研究发现与稳定燃烧一样,脉冲燃烧也可以提供动力,其中最为著名的例子就属二战期间德国的V-1蜂鸣飞弹(buzz bomb)^[8]。研究还发现脉冲燃烧具有较高的燃烧效率和热效率,可以降低二氧化碳和污染物的排放^[9,10]。然而,目前还未见到关于超声速燃烧室内脉冲燃烧的可能性和燃烧特性等方面的研究报道。

本工作将采用脉冲火花塞研究入口马赫数2.5的超声速燃烧室内超声速脉冲燃烧的可能性以及燃烧模式。这是基于以下三个方面考虑:首先,脉冲放电通过提供脉冲性的能量可能引发脉冲燃烧;另外脉冲放电产生的等离子体可以降低点火延迟时间^[11-13]、增强火焰稳定^[14]和提高燃烧性能^[15,16],很可能有助于解决超声速燃烧室内燃料点火和可燃烧范围小等问题;还有火花塞结构简单,便于携带与控制,具有潜在的应用前景。

2 实验装置

实验在中国科学院力学研究所的直联式超燃平台上进行^[17]。它由空气加热器、设备喷管,多功能模型燃烧室以及煤油加热与输运系统组成。由一台计算机实现整个实验的运行,控制与数据实时采集。

空气加热器通过“烧氢补氧”的方式,可以提供总温800~2100K总压0.6~4.5MPa的空气来流条件。实验采用了马赫数2.5的设备喷管,相应的喷管喉道尺寸为16.6mm×70mm。

图1是多功能模型燃烧室,其入口高度与宽度分别为51mm与70mm,总长度约1450mm,包括一个长400mm扩张角为0.7°的隔离段、一个长400mm扩张

角1.3°的燃烧室、以及两个长度分别为300mm和350mm,相应角度2.9°和4°的扩张段。在燃料室相对的壁面上分别安装了一个凹腔,凹腔的前台阶距离燃烧室入口630mm。每个凹腔深度12mm,后掠角45°,长深比约为7。燃料通过一个位于凹腔上游56mm处 $\varphi 4.0\text{mm}$ 的喷孔喷注。诱导气体可以通过两个位于凹腔上游8mm处口径为1.5mm的喷孔喷注。实验采用是单侧喷燃料和诱导气。乙烯脉冲燃烧实验没有使用诱导气体;超临界煤油实验使用乙烯作为诱导气体。脉冲火花塞(徐州燃控科技有限公司)位于凹腔底部中心位置,火花塞前端面与凹腔底面一致。火花塞放电频率为5Hz,峰值电压2500V,50J/pulse。图2为火花塞在空气中放电的照片。

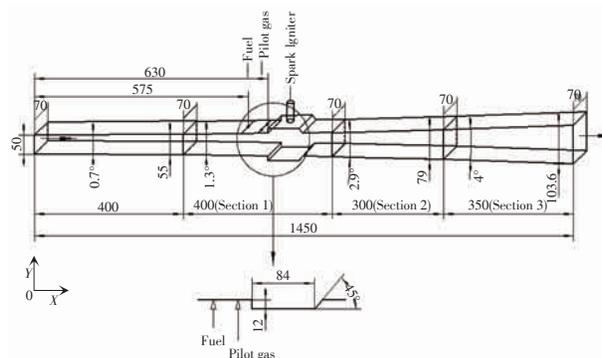


Fig. 1 Schematic of supersonic model combustor (mm)

空气主流的驻点压力与温度分别采用CYB-10S型压力传感器(精度 $\pm 0.1\%$,中航机电科技有限公司,北京)与B型热电偶测量。燃烧室壁面静压采用Motorola MPX22000压力传感器测量。这些压力与温度测量误差均不超过3%。

整个试验装置垂直安装在一个可以上下左右移动的平台。在平台底部,等边安装了三个NS-TH3型重量传感器(最大测量量程达7500N,精度0.2%,天沐公司,上海),用于检测试验过程中整个装置推力的变化。推力和静压参数将用于判定脉冲燃烧的存在。



Fig. 2 Discharging of 50J/pulse spark plug

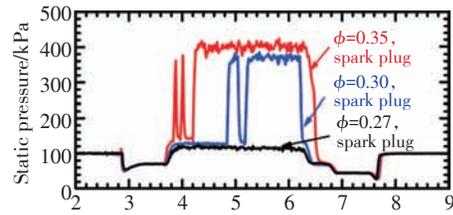
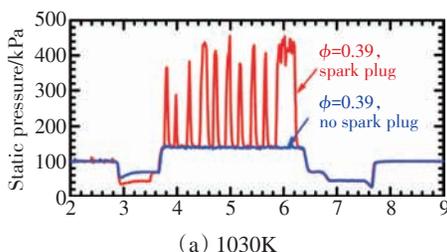
乙烯纯度 99.5% (Linggas Ltd, 天津)。超临界煤油的制备采用煤油二级加热与运输系统^[4]。其中, 第一级采用储热式加热方式, 可以把约 1.5kg 煤油预加热到约 570K 而不产生结碳。第二级加热器采用连续运行方式, 实验前将加热器中的管道预热至 750K。实验时, 第一级预加热的煤油通过第二级加热器的管道, 吸收热量, 然后进入燃烧室。因为在第二加热器的驻留时间很短, 约 4s, 煤油的裂解和结碳均可以忽略。加热和运行过程中, 压力均维持在超临界压力。

3 实验结果与讨论

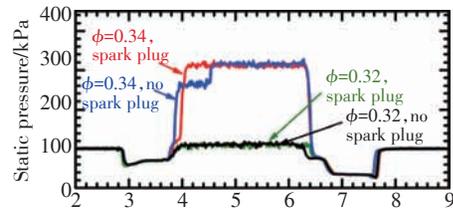
3.1 乙烯脉冲燃烧

在来流马赫数 2.5, 滞止压力 1.33MPa 条件下, 研究了三个不同滞止温度 (1030, 1070, 1830K) 时乙烯的脉冲燃烧。

图 3(a) 为来流空气滞止温度 1030K 时, 在有和无脉冲火花塞放电两种情况下乙烯燃烧的壁面静压随时间分布。选择壁面静压最高处 ($x=700\text{mm}$) 作为对比位置。乙烯当量比为 0.39。来流流场从 3s 开始建立, 静压从 100kPa 迅速下降, 很快达到稳定, 说明流场迅速建立。乙烯从 3.5s 开始喷入。没有火花塞放电时, 壁面静压在 3.7s 处从 70kPa 跳跃到 140kPa, 并一直维持到 6.3s。这说明垂直喷入超声速气流流场的乙烯在 3.7s 时达到平衡, 建立新的稳定流场。当火花塞放电时, 壁面静压从 3.7s 开始出现频率 5Hz 的脉冲峰, 峰值约为 400kPa; 6s 时, 所有进气阀门开始关闭, 由于阀门存在不同的延迟, 造成静压在 6.3s 先降到 140kPa, 然后继续降低; 在 7.7s 时恢复到 100kPa, 表明实验结束。图 4 为这一过程中所记录的推力变化情况。与图 3(a) 中静压的结果对应, 没有火花塞打火时, 超声速流场建立后, 产生 1200N 稳定的气动推力; 有火花塞打火时, 在气动推力基础上增加了 5Hz 连续脉冲式推力, 峰值增量约 800N。图 3(a) 和图 4 充分说明存在脉冲燃烧, 而且可以有效产生有效推力。



(b) 1070K



(c) 1830K

Fig. 3 Histories of static pressure at $x = 700\text{ mm}$ for the pulsed combustion of ethylene at three vitiated air stagnation temperature

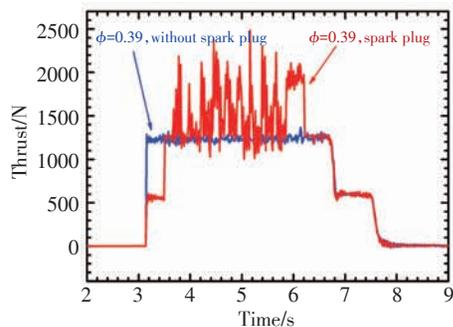


Fig. 4 Histories of thrust at the air stagnation temperature of 1030K

图 3(b) 为来流空气滞止温度 1070K 时, 三个乙烯当量比 (0.27, 0.30 和 0.35) 在有火花塞放电情况下燃烧静压时间分布。当 $\varphi_{\text{C}_2\text{H}_4} = 0.27$, 静压维持在 110kPa, 说明没有发生任何燃烧。当 $\varphi_{\text{C}_2\text{H}_4} = 0.30$, 乙烯通入之后的 1s 多, 静压维持在 120kPa, 脉冲火花塞放电没有引起静压变化, 在 5s 出现一个很强的脉冲燃烧峰后, 下一个脉冲燃烧将其自身完全引燃, 静压稳定在 370kPa, 形成稳定燃烧。当 $\varphi_{\text{C}_2\text{H}_4}$ 为更高当量比 0.35 时, 乙烯刚通入不久燃烧静压就产生两个脉冲峰, 随后稳定燃烧。原因可能是乙烯当量比增加导致其火焰传播速度增加, 初始火核形成后, 火焰传播速度快的更容易传播出去, 达到自维持, 最终稳定燃烧。

图 3(c) 为来流空气滞止温度 1830K 时, 通过对比有无脉冲火花塞放电两种情况下乙烯燃烧在 $x =$

700mm 处产生的静压,观测脉冲火花塞放电的影响。当 $\varphi_{C_2H_4} = 0.32$,不论有无火花塞放电都没有发生任何燃烧。当 $\varphi_{C_2H_4} = 0.34$,不论有无放电,最终都达到稳定燃烧。可以看出在 1830K 时,没有任何脉冲燃烧的迹象,并且此时脉冲放电的作用可以忽略。

对比三个不同滞止温度下的脉冲燃烧结果,可以看出:首先,火花塞打火可以促使乙烯产生脉冲燃烧;其次脉冲燃烧表现两种模式,连续脉冲燃烧和脉冲引导并辅助稳定燃烧;最后,脉冲放电在较低温时更能显示其促进点火和稳燃的作用。以下通过分析 Da 数对这些现象给出定性的解释。 Da 数是流动特征时间与化学特征时间的比值,常用其描述超声速燃烧稳定问题。根据 Driscoll 等提出的非预混乙烯的 Da 数计算公式^[18]

$$Da = \frac{H/U}{\frac{\alpha_0}{S_{L0}} \left(\frac{T}{300K} \right)^{-1} \left(\frac{p}{1 \text{ atm}} \right)^{-1}}$$

式中 H 为凹腔高度, U 是主流流速, T 是主流静温, p 为静压, α_0 和 S_{L0} 分别是温度 300K 一个大气压下热扩散系数和化学当量比时预混层流火焰速度。由此公式可以计算出以上实验条件对应的 Da 数,结果列于表 1。

从表中可以看出,总温越高, Da 数越大,表明化学反应速度相对于流动速度要更快。火花塞脉冲放电会在短时间内产生很高温度和活性自由基,使化学反应得到一定地加快,进而增大 Da 数。如果初始 Da 数较小,如总温 1030 和 1070K 时, Da 数分别为 1.98 和 2.02,有限的增大 Da 可以得到体现:1030K 时,在每个脉冲时间段内,进入稳定燃烧区,产生相应推力,但没有自维持,从而出现脉冲式推力;1070K 时有所不同,脉冲燃烧可以引起自维持,进而稳定燃烧,此时脉冲放电是否拓展了稳定燃烧极限,还需要进一步与稳定燃烧极限数据对比。如果 Da 数一开始就较大,如总温 1830K 时 Da 数为 2.58,有限增大 Da 则没有明显效果,这应该就是高温时既没有脉冲燃烧,也没有脉冲诱导稳定燃烧出现的原因。

3.2 超临界煤油脉冲燃烧

在来流空气马赫数 2.5,总温 1150~1850K 条件下,进行了超临界煤油脉冲燃烧实验。因为在当前实验条件下,无论有无脉冲火花塞放电都无法将煤油点燃,因此使用乙烯做为引导气体。

图 5 为来流总温 1150K 条件下,燃烧室内 $x=650\text{mm}$ 处超临界煤油燃烧壁面静压的时间分布图。诱导乙烯 5 秒时关闭。此条件下的超临界煤油贫油熄火极限在当量比 0.25 附近^[4]。由图可以看出,在煤油贫油熄火极限以下的当量比 0.24 时,即使有脉冲火花塞放电,也无法稳定燃烧,而且也未发现脉冲燃烧的迹象;而在煤油贫油熄火极限以上的当量比 0.26 时,即使没有火花塞放电,煤油也能稳定燃烧。在其它来流总温条件下也进行了测试,发现了类似结果。

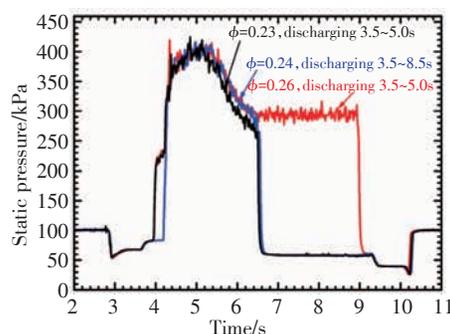


Fig. 5 Histories of static pressure for the pulsed combustion of kerosene at the air stagnation temperature of 1150K

图 6 是在来流总温 1150K 条件下,诱导乙烯一直开启时,超临界煤油燃烧在 $x = 650\text{mm}$ 处静压的时间分布。诱导乙烯 3.5s 通入,火花塞 3.5s 开始放电,780K 当量比 0.14 的超临界煤油 4.0s 喷入,控制乙烯和煤油的阀门以及脉冲火花塞同时在 8.5s 关闭。乙烯当量比 0.133 时,没有发生燃烧,而当量比 0.150 时,静压图上出现间断性的弱峰。这表明如果乙烯不被点燃,煤油无法被点燃,而一旦乙烯被点燃,煤油也会达到稳定燃烧,没有出现强的脉冲燃烧峰。当量比进一步提高到 0.157 时,弱峰消失。这可能是由于乙烯反应产生的热量和自由基远多于脉冲火花放电所产生的量,脉冲火花塞放电只能起到增强局

Table 1 Experimental conditions and calculated Da numbers

H/m	Ma	T_0/K	T/K	p/kPa	$\alpha_0/(\text{m}^2/\text{s})$	$S_{L0}/(\text{m}/\text{s})$	Da
0.012	2.5	1030	492	78	9.27×10^{-6}	0.78	1.98
0.012	2.5	1070	511	78	9.27×10^{-6}	0.78	2.02
0.012	2.5	1830	874	78	9.27×10^{-6}	0.78	2.58

部燃烧的作用,对整体燃烧贡献小,当乙烯当量比从0.150提高到0.157,乙烯燃烧产生的热量和自由基变得更多,脉冲火花塞放电的作用可完全忽略。除此之外,还对不同当量比的超临界煤油在不同来流总温条件下进行了实验,得到相似的结果。

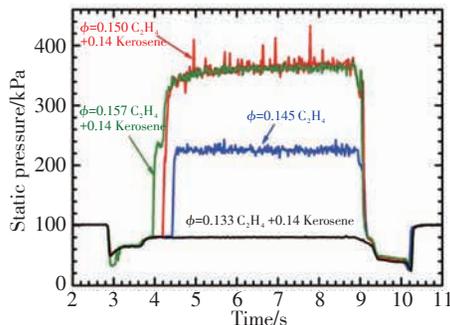


Fig. 6 Histories of static pressure with different pilot ethylene concentrations at the stagnation temperature of 1150K

4 结论

本文使用 $Ma=2.5$ 的直联式模型超声速燃烧室实验研究了乙烯和超临界煤油两种碳氢燃料的脉冲燃烧。主要获得以下结论:

(1) 乙烯脉冲燃烧实验表明,在其稳定燃烧范围以外存在脉冲燃烧,并能够提供有效的脉冲推力。

(2) 来流空气滞止温度较低时,火花塞打火可以有效地促使乙烯脉冲燃烧;滞止温度提高后,脉冲燃烧将引起稳定燃烧;当滞止温度很高时,乙烯可以直接以稳定燃烧,没有观测到脉冲燃烧现象。

(3) 煤油实验表明,所用频率为 5Hz, 50J/pulse 脉冲式能量补充无法实现超临界煤油脉冲燃烧,煤油脉冲燃烧可能需要更多的热量和自由基。

参考文献:

- [1] Ozawa R I. Survey of Basic Data on Flame Stabilization and Propagation for High Speed Combustion Systems [R]. U.S. Air Force AFAPL Technical Report TR-70-81, 1970.
- [2] Wang J, Fan X J, Zhang T C. et al. Measurements of the Blowout Limits of Supercritical Aviation Kerosene in a Supersonic Combustor [R]. AIAA 2011-6108.
- [3] Colket M B, Spadaccini L J. Scramjet Fuels Autoignition Study [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17 (2): 315-323.
- [4] Fan X J, Yu G, Li J G, et al. Combustion and Ignition of Thermally Cracked Kerosene in Supersonic Model Combustors [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23 (2): 317-324.
- [5] Vinogradov V, Kobigsky S, Petrov M. Experimental Investigation of Liquid Carbonhydrogen Fuel Combustion in Channel at Supersonic Velocities [R]. AIAA 92-3429.
- [6] Kay I W, Peshke W T, Guile R N. Hydrocarbon-Fueled Scramjet Combustor Investigation [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1992, 8(2): 507-512.
- [7] Kimura I, Aoki H, Kato M. The Use of a Plasma Jet for Flame Stabilization and Promotion of Combustion in Supersonic Air Flows [J]. *Combustion and Flame*, 1981, 42 (2): 297-305.
- [8] Reynst F H. Pulsating Combustion-The Collected works of F. H. Reynst [M]. New York: Pergamon Press, 1952.
- [9] Putnam A A, Belles E, Kentfield J A C. Pulse Combustion [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1986, 12 (1): 43-79.
- [10] Richards G A, Morris G J, Shaw D W, et al. Thermal Pulse Combustion [J]. *Combustion Science and Technology*, 1993, 94(1): 57-85.
- [11] Wang F, Liu J B, Sinibaldi J, et al. Transient Plasma Ignition of Quiescent and Flowing Air/fuel Mixtures [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, 33(2): 844-849.
- [12] Lou G, Bao A, Nishihara M, et al. Ignition of Premixed Hydrocarbon-Air Flows by Repetitively Pulsed, Nanosecond Pulse Duration Plasma [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 3327-3334.
- [13] Do H, Cappelli M A, Mungal M G. Plasma Assisted Cavity Flame Ignition in Supersonic Flows [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(9): 1783-1794.
- [14] Pilla, G, Galley D, Lacoste D A, et al. Stabilization of a Turbulent Premixed Flame using a Nanosecond Repetitively Pulsed Plasma [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, 34(6): 2471-2477.
- [15] Starikovskaya S M. Plasma Assisted Ignition and Combustion [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 34 (6): 265-299.
- [16] Mintusov E, Serdyuchenko A, Choi I, et al. Mechanism of Plasma Assisted Oxidation and Ignition of Ethylene-Air Flows by a Repetitively Pulsed Nanosecond Discharge [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32 (2): 3181-3188.
- [17] Fan X J, Yu G, Li J G, et al. Effects of Entry Conditions on Cracked Kerosene-Fueled Supersonic Combustor Performance [J]. *Combustion Science and Technology*, 2007, 179 (10): 2199-2217.
- [18] Rasmussen C C, Driscoll J F. Blowout Limits of Flames in High-Speed Airflows: Critical Damkohler Number [R]. AIAA 2008-4571.

(编辑:梅 瑛)