超临界煤油超声速燃烧特性实验*

范学军, 俞 刚

(中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

摘 要: 针对各种温度、压力下, 马赫数 2.5流场中超临界煤油的超声速燃烧性能进行了实验研究。研制并测试了一个新型二级煤油加热系统, 该系统能够把 0.8 kg的煤油在 5.5MPa压力下加热至至 950K而不产生严重的结碳。超声速燃烧试验表明, 在相同的来流和燃料当量比条件下, 超临界煤油的燃烧效率比室温煤油提高 10% ~ 15%, 与氢气泡雾化的燃烧效率相当。

关键词: 煤油; 超音速燃烧; 超临界态+; 二级加热器+

中图分类号: V511+.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2006) 01-0079-04

Experiments on supersonic combustion of supercritical kerosene

FAN Xue-jun, YU Gang

(Inst of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080, China)

Abstract Characteristics of supersonic combustion by injecting supercritical kerosene fuel into a Mach 2.5 crossflow at various preheat temperatures and pressures were investigated experimentally. A two-stage heating system has been designed and tested, which can prepare heated kerosene of 0.8 kg up to 950 K at pressure of 5.5 MPa with minimum/negligible fuel coking. Supersonic combustion tests under the similar stagnation conditions and kerosene equivalence ratios demonstrated that the combustion efficiency when using supercritical kerosene injection increased approximately 10% ~ 20% over that using liquid kerosene injection, while it was comparable to that using effervescent atomization.

Key words Kerosene; Supersonic combustion; Supercritical state+; Two-stage heater+

1 引 言

在实际的超声速冲压发动机运行过程中, 液体碳氢燃料 (如航空煤油) 既是燃料也作为冷却剂去吸收燃烧和高超声速飞行环境下巨大的气动加热施加于机体的热量[1]。因此燃料温度将随飞行的不同状态发生变化。在飞行的启动阶段, 燃料吸收的热量很少, 基本可以认为是处于常温液态, 但当飞行速度超过某一临界值时, 燃料的温度有可能超过其沸点或临界点而以气态或超临界态进入燃烧室。超临界流体具有很多独特的性质, 比如类似液体的密度和类似气体的扩散特性[2]。这些特性如何影响燃料的加热、喷射、混合与燃烧等过程, 有待进一步研究。

另外, 由于燃料状态的变化, 往往伴随着燃料密度的急剧变化, 不同状态下燃料的流量将可能有数量级的差异, 如何控制各种状态下燃料的流量, 也是超声速燃烧研究中的一个关键问题。

关于液体燃料的注射, 我们已经利用气液雾化技术使燃料达到了较高的雾化水平[3], 使燃料更快地气化, 促使了燃料与空气的混合与燃烧, 从而改进了液体碳氢燃料超声速燃烧的总体性能。当液态燃料因为吸热而变成气体时, 燃料在大气和超声速流场环境中的射流形态, 我们已经通过直接照相和纹影等方法作了初步研究[4], 但燃料的相变如何影响超声速燃烧的特性目前仍不清楚。

采用气化或超临界燃料喷注的一个显著优点是

* 收稿日期: 2005-04-26; 修订日期: 2005-08-29。
基金项目: 国家自然基金重点基金资助项目 (10232060)。
作者简介: 范学军 (1967—), 男, 博士, 研究领域为超声速燃烧, 气体动力学, 流动稳定性和流动控制等。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

省略了燃料在燃烧室中的雾化与气化过程,因而大大缩短了燃料与空气混合的时间并提高了混合水平,而混合的增强有助于拓展熄火极限、促进点火及提高燃烧效率,从而扩张了稳定燃烧的范围。但目前有关气化、超临界燃料燃烧的实验研究非常缺乏。本文在液体碳氢燃料超声速燃烧研究的基础上,进一步开展超临界态燃料的超声速燃烧研究,并把相关结果与液体和液体雾化燃料的燃烧特性作进一步的比较。

2 实验装置

2.1 超燃模型燃烧室

超临界煤油的燃烧试验在一个马赫数 2.5的超燃模型燃烧室中进行。气流的高温、高压通过一个"烧氢补氧"加热器来实现,合成气流中的氧气含量与正常空气的氧含量相当,气流最高总压可达 4.5MPa,最高总温 2100K,最大流量 1.5kg。所有气源的流量通过音速喷管流量计及相应的压力来控制。合成气流的总温采用 B-型热电偶测量并针对辐射、传导和热惯性等误差进行了修正,最大测量误差不超过 3%。

超声速燃烧室总长 1090mm,主要由三部分组成,即一个近似等截面的进口隔离段(1°的扩张角用于边界层修正)和两个扩张角分别为 2.9°和 4.0°的扩张段,进口横截面为 51mm×70mm,如图 1所示。煤油、引导氢喷嘴以及凹腔火焰稳定装置采用可拆换的一体化模块设计。凹腔深度为 12mm,斜坡倾斜角 45°,总体长高比约为 7。图中标明,煤油与引导氢垂直喷入主流。引导氢通过 5个 1.0mm直径的小孔喷射,室温与超临界煤油分别通过 5个 0.5mm和 0.9mm的小孔喷射。

整个试验设备穿过一个光学防震平台垂直安装,可以作水平与垂直移动。各种温度、压力和阀门的控制以及数据的采集等通过自制的计算机控制与数据采集系统来完成。稳定的马赫数为 2.5的超声速气流在系统启动约 2.5s后达到,可连续运行约 7s。

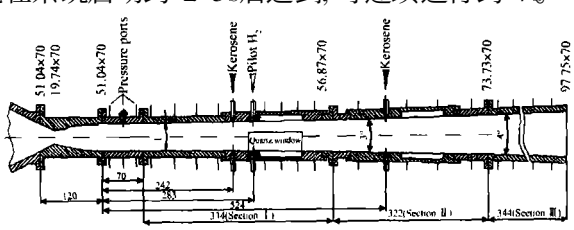

Fig 1 Schematic of supersonic model combustor with kerosene/pilot hydrogen injection(mm)

2.2 煤油加热与输运系统

在设计煤油加热系统时碰到的一个主要问题是如何防止煤油在加热过程中因碳颗粒沉积而形成大量"结碳"。一般情况下,煤油结碳的速率与温度的指数以及煤油在高温区的驻留时间成正比[5]。减少煤油结碳量的一个有效途径是缩短驻留时间。为此,本文专门设计了一个二级电加热系统,其基本思路是:燃烧试验前,首先把大量煤油通过一级加热器加热到一个较高但结碳可以忽略的温度,同时把第二级加热器预热至需要的高温;实验开始时,让一级加热后的煤油迅速通过第二级加热器并喷入燃烧室;由于煤油在二级加热器中的停留时间很短,煤油结碳并不严重。

整个加热装置见图 2。第一级加热器采用储热式电加热系统,加热器为一个直径约 20cm的圆柱体,由内径 20mm,壁厚 1.5mm,长度约 10m的不锈钢管盘绕而成,采用 5条 960W的加热带加热。第二级加热器管道结构与第一级一样,但通过在两端连接 80~100V的直流电直接通电加热,电源采用 250kW脉冲电焊机电源。第二级加热器与燃烧室之间用直径 10mm的粗管连接。加热系统的温度通过两组 K型热电偶 TC11-14及 TC21-24来监测与控制。一级加热器的最高温度设置为 570K,加热容量 0.8kg,加热时间 10~15min;二级加热器的加热能力可以达到 950K以上,加热时间为 1~2s。

两个 Swagelok SS6UM型号的气动阀安装于两级加热器和第二级加热器与燃烧室之间,用来灵活控制两级加热器的开启和关闭,见图 2。根据实验的具体需要,两级阀门可以设置不同的开启延时时间,从而使加热煤油在喷射前能够达到一个比较稳定的温度和压力。鉴于加热器的高温高压环境,两级加热器均安装了用于卸压的膨胀阀,并设置了相应的最高压

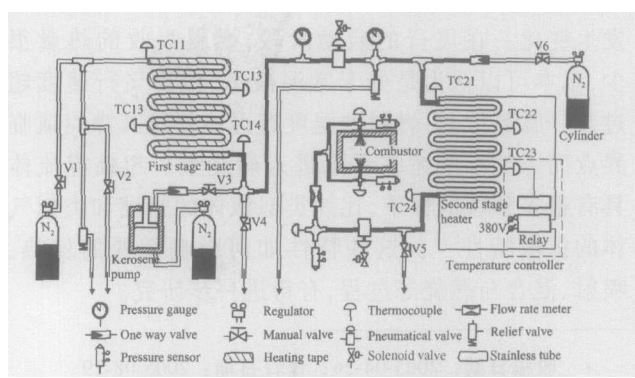

Fig 2 Schematic of kerosene delivery and heating system

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

力,以保证系统的安全性。尽管采取了各种措施,煤油在高温下的结碳仍然比较严重,尤其是经过长时期的运行,结碳有可能累积。为此,每次运行后,在加热器没有冷却之前,需采用少量空气对加热管道进行“烧蚀”清洗,以保证系统的可靠性和安全性。

2 3　超临界态煤油的流量

对超临界或者接近临界点的流体,由于其物性随温度和压力急剧变化,流量的理论计算和测量工作都非常困难。尤其是对于煤油这样的多组份混合物,对其物性的研究本身就已经很复杂,目前还没有比较简单可靠的方法可以提供流量计算的理论依据。考虑到超临界流体与气体一样,只要温度足够高,均可以加速到声速而不发生凝结,因此气态和超临界态的煤油流量应该可以通过音速流量计来测量。为此我们发展了一个新的计算方法,采用了“替代煤油”的概念和适用于计算真实流体效应的“广义对应状态法则”,结果表明该方法可以准确地预测超临界煤油的流量[6]。图 3为不同压力下大庆 RP-3航空煤油的密度等压线,临界温度和压力的计算值分别为 610K和 2.4MPa,而通常航空煤油的临界参数大致为 630K和 2.2MPa,两者非常接近。温度和压力分别超过临界温度和压力的状态称为超临界态。从图 3可看出,在等压情况下,超临界态可以不经相变而连续过渡到液态和气态。图 4是在图 3数据的基础上采用数值等熵加速得到的声速喷管单位面积流量随温度的变化曲线以及相应的测量值,两者吻合很好。标定后的声速喷管流量计安装在第二级加热器与燃烧室之间,流量由上游煤油的总温和总压来确定。

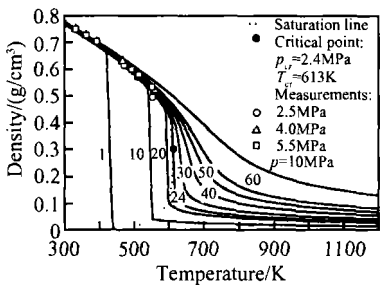

Fig 3　Density-temperature isobars of the three-species kerosene surrogate

3　超临界煤油燃烧特性

根据超临界态的特点,室温煤油在超临界压力下可以不经相变直接从液态穿过超临界区加热到气态,

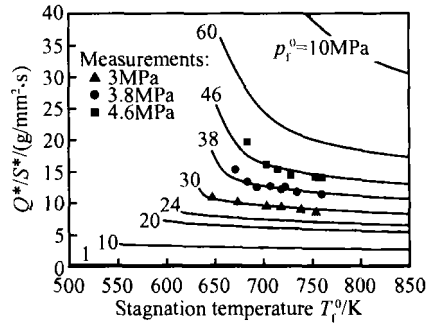

Fig 4　Mass flow rates per unit throat area of kerosene surrogate

省略了气化与雾化过程,与空气的混合将比液体喷射更为迅速,因而超临界煤油喷射的燃烧特性要比液态喷射有很大的提高。纹影实验显示[4],随着煤油温度的提高,煤油射流的气化速度急剧上升,可以更好地和空气混合;在相同油压下,在实验所采用的温度范围内(290~550K),煤油的穿透深度基本相同。更高温度下的纹影试验正在进一步开展。

实验中,空气的气流条件近似模拟马赫数 6的实际飞行条件且基本保持恒定,燃烧室隔离段入口马赫数为 2.5,总温和总压约为 1750K和 1.15MPa,燃烧室内的静温和静压分别为 800K和 0.07MPa,而空气流量约为 1300g/s。在所有实验中,为帮助煤油点火,均采用当量比约为 0.07~0.1的诱导氢。

实验首先比较了超临界煤油与冷煤油的燃烧特性。图 5给出了当量比为 0.37~0.38时,两种喷注方式的超声速燃烧试验中典型的壁面静压曲线。超临界煤油喷注时的温度在 730~740K之间,压力保持在 3.8MPa。室温煤油的喷射压力约为 1.9MPa。从图 5可以看出,相较于室温煤油,超临界煤油的燃烧性能有了显著的提高。尽管燃烧室压力上升较高,但压力分布并没有向上游扩展,上游流场没有受到影响。该图也表明,实验数据具有较好的重复性。

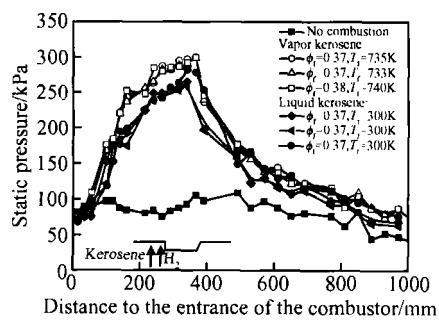

Fig 5　Comparison of static pressure distributions with supercritical and liquid kerosene injections

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

采用一维超声速燃烧室模型[7],可以进一步估计各种喷注模式下煤油燃烧的总体效率。尽管这一简单模型不包括流场中激波、膨胀波以及边界层的相互作用,计算得到的效率绝对值存在一定的误差,但仍然可以用来比较效率的相对变化。对于图 5的压力分布,该模型给出超临界煤油的燃烧效率约为 86% ~ 88%,而同样条件下液体煤油的燃烧效率只有 65% ~ 75%,两者相比,效率总体上提高了 10% ~ 15%。

实验进一步比较了加热煤油喷射与液态煤油氢气泡雾化喷射对燃烧性能的影响。图 6给出了当量比 0.44~0.45时,超临界煤油与 2.5%氢气泡雾化超声速燃烧试验中典型的壁面静压曲线比较。超临界煤油喷注时的温度与压力分别为 740K与 4.6MPa。氢气泡雾化的燃烧数据取自以前的实验[8],煤油压力约为 2.5~3.5MPa,而氢气流量约 1.28g/s。实验显示,超临界煤油的燃烧压力可以与氢气泡雾化相当,甚至要略为高一些。而平均来说,图 6中,超临界煤油的燃烧效率约为 87%,稍高于冷煤油氢气泡雾化 84%的燃烧效率。

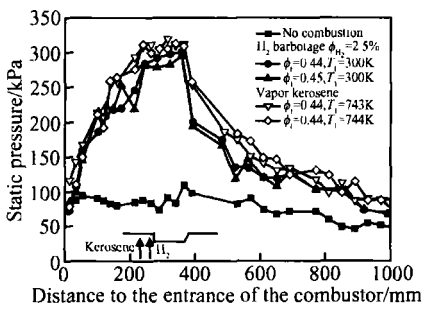

Fig 6 Comparison of static pressure distributions for supercritical kerosene injection and effervescent atomization with hydrogen barbotage

4 结 论

(1)超临界煤油的燃烧效率要比冷煤油有 10% ~ 15%提高,甚至要稍高于氢气泡雾化的燃烧效率。

(2)由于在相关实验条件下,煤油加热对火焰绝热温度的提高非常有限,只有 1~2K,超临界煤油超燃效率的提高主要归因于气化与雾化过程的省略。

(3)本文关于大庆 RP-3航空煤油的研究只是吸热碳氢燃料超燃研究方面一个替代性前期工作,考虑到燃料的热沉、结碳及裂解等性能要求,大庆 RP-3航空煤油目前还不能满足超燃冲压发动机的实际需要,但相关研究能够给新型吸热碳氢燃料的研究提供方向性的指导意见。

参考文献:

[1] Lander H, Nixon A C. Endothermic fuels for hypersonic vehicles[J]. *Journal of Aircraft*, 1971, 8(4).

[2] Yang V. Modeling of supercritical vaporization, mixing and combustion processes in liquid-fueled propulsion system [J]. *Proceeding of the Combustion Institute*, 2000, 28: 925 ~ 942.

[3] Yu G, Li J G, Yang S R, et al. Characteristics of kerosene combustion in supersonic flow using effervescent atomization[R]. *AIAA* 2002-5225.

[4] Yu G, Li J G, Zhao Z, et al. Investigation of vaporized kerosene injection in a supersonic model combustor[R]. *AIAA* 2003-6938.

[5] Edwards T. Liquid fuel and propellant for aerospace propulsion: 1903~2003[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19(6).

[6] Yu G, Li J G, Zhang X Y, et al. Experimental investigation on flameholding mechanism and combustion performance in hydrogen-fueled supersonic combustors[J]. *Combustion Science and Technology*, 2002, 174(3): 1~27.

[7] Yu G, Li J G, Chang X Y, et al. Fuel injection and flame stabilization in a liquid-kerosene-fueled supersonic combustor[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19(5).

(编辑:张雅凤)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net