

文章编号: 0258-1825(2009)增刊-0077-07

# 超临界与热裂解煤油超声速燃烧性能优化研究

范学军, 俞刚, 李建国, 仲峰泉

(中国科学院力学研究所, 北京北四环西路15号, 100190)

**摘要:** 本文在马赫数 2.5 超燃模型燃烧室中研究与比较了室温、超临界态与热裂解煤油的超声速燃烧特性。针对单路燃料喷注燃料当量比的受制于容易引起边界层分离, 从而导致燃烧静压向上游迅速传播跑出隔离段这一问题, 以超临界态煤油为例, 研究与比较了不同的喷油位置及其组合对燃烧室性能的影响, 并讨论了相应的燃烧室性能优化方法。

**关键词:** 吸热碳氢燃料; 超声速燃烧; 超临界态; 热裂解

**中国分类号:** V211.3 **文献标识码:** A

## 0 引言

飞行器的热管理(thermal management)是高超声速飞行的核心问题之一。对于一个马赫数 6 以上的超燃冲压发动机, 燃烧室壁面绝热温度可以高达 3000K 以上, 表面最大热流密度可以达到  $200\text{W}/\text{cm}^2$ , 即使先进的材料体系也难以长时间承受这样恶劣的热环境。国内外研究表明, 理想的热防护方案之一是采用机载燃料对发动机进行主动冷却<sup>[1-3]</sup>。目前看来, 也只有这一方法能够同时为发动机的性能与热防护提供足够的设计余度。

由于采用燃料作为冷却剂, 燃料的温度将随着飞行速度的提高而增加。在飞行的启动阶段或低马赫数飞行时, 燃料吸收的热量很少, 燃料仍处于液态。随着速度增加时, 燃料吸热量增加, 温度上升。当超过燃料的临界温度后, 将变成超临界态(为了保证高温下一定的燃料流量, 燃料一般需要在超临界压力下喷注, 因此燃料在加热过程中将不经历两相区, 直接进入超临界态)。如果温度进一步增加, 燃料将发生裂解, 生成分子量较小的裂解气体。

液体燃料喷注后, 要经过射流破碎、雾化、蒸发、混合等过程后才开始燃烧阶段, 整个混合与燃烧比较缓慢。超临界流体具有很多独特的性质, 比如具有类

似液体的密度、类似气体的扩散特性以及对固体颗粒例如结碳极高的溶解度等特性<sup>[4]</sup>。超临界态与部分裂解燃料无需经过雾化气化过程, 就可以直接转化成气态与空气混合, 混合效率大幅提高。而且对于裂解燃料, 由于产物中存在一定含量的氢与乙烯等成份, 化学反应速度极快, 可以克服液态碳氢燃料化学反应速度慢的缺点, 有助于大幅提高超声速燃烧性能。对于不同的飞行马赫数与不同的飞行阶段, 各种不同状态与不同组分的燃料存在于喷注、混合与燃烧过程中, 因此有必要弄清燃料的这些变化对整个燃烧过程和推力性能的影响, 以摸索提高超燃冲压发动机性能的途径。

本文将利用力学所现有的直联式超燃试验平台与煤油加热/裂解系统<sup>[5]</sup>, 研究超临界态与热裂解煤油的超声速燃烧性能, 并与液态煤油相比较。在此基础上, 以超临界态煤油为例, 采用改变喷油位置与分布式喷油等方式, 研究气化燃料超声速燃烧性能优化的途径。

## 1 实验装置

### 1.1 直联式超燃试验平台

直连式超燃试验平台由空气加热器、马赫数 2.5 设备喷管, 多功能模型燃烧室以及相关的控制与测量

收稿日期: 2008-05-31; 修订日期: 2009-02-05.

基金项目: 国家自然科学基金(10672169, 10621202)资助.

作者简介: 范学军(1967-), 研究员, 研究领域为超声速燃烧、碳氢燃料主动冷却、气体动力学、流动稳定性和流动控制等.

系统组成。整个实验的运行、控制与数据采集可实时显示,并由一台计算机完成。

烧氢补氧空气加热器可以为设备提供总温  $T_0 = 1750 \pm 50\text{K}$ 、总压  $P_0 = 1.12 \pm 0.02\text{MPa}$ 、最高流量

1.5kg 的高温试验气体。根据实验需要,设计了入口宽度与高度分别为  $70\text{mm} \times 51\text{mm}$  以及  $51\text{mm} \times 70\text{mm}$  两个多功能模型燃烧室以及相应的马赫数 2.5 喷管,图 1 中仅给出了第一个燃烧室的示意图。

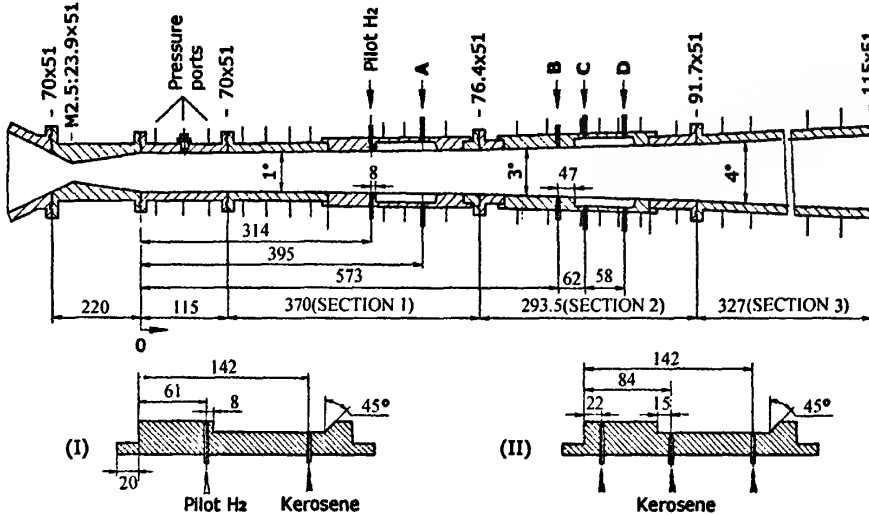


图 1 超声速模型燃烧室及喷油堵块结构示意图。图中尺寸为毫米

Fig. 1 Schematic of supersonic model combustor with kerosene/pilot hydrogen injection. All length dimensions are in mm

每个燃烧室由三段组成,包括一个长度为  $115\text{mm}$  的等截面隔离段、一个扩张角  $1^\circ$  的燃烧室、以及两个角度分别为  $3^\circ$  和  $4^\circ$  的扩张段,总长为  $1105.5\text{mm}$ 。图中,隔离段截面起点“0”将作为壁面静压测量曲线的原点。设计了两对串联的可以互换的燃料喷注与凹腔火焰稳定一体化模块,每个凹腔的深度为  $12\text{mm}$ ,并带  $45^\circ$  的后掠角,长深比约为 7。在两个喷油模块上,距离隔离段入口  $395, 573, 635, 693\text{mm}$  位置上,分别安装了 4 组  $9\text{mm} \times 1.0\text{mm}$  的喷油孔,上下两排相当安装,在图 1 中,分别标记为 A-D。燃料喷注方向均垂直于燃烧室壁面。在第一个凹腔上游,安装了上下两排  $5\text{mm} \times 1.0\text{mm}$  的喷孔用于引导氢注射。试验中引导氢的当量比基本恒定,约 0.09。

空气主流的驻点温度与压力测量分别采用 B 型热电偶与 CYB-10S 型压力传感器测量。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,以等边三角形安装了三个上海天沐公司的 NS-TH3 型重量传感器,用于测量试验过程中推力的变化。该系统最大测量量程达

$7500\text{N}$ ,精度 0.2%。图 2 给出了一次试验中典型的推力变化情况。空气主流在“a”点开启,推力读数迅速增加,经约  $1\text{s}$  时间达到平衡值,引导氢在  $3.5\text{s}$  进入燃烧室与空气流发生自燃,形成引导火焰。煤油在燃烧相对稳定的“b”点注入并燃烧,到“c”点时达到稳定状态。煤油一旦被氢引导火焰点燃,引导氢即可停止,煤油的燃烧仍能维持稳定进行。经过一段时间的稳定燃烧后,在“d”点结束燃料喷注,推力迅速下降到“e”点。推力增益定义为 c-d 之间的平均推力读数减去“b”点推力读数。该参数将用于试验中燃烧室性能的评估。

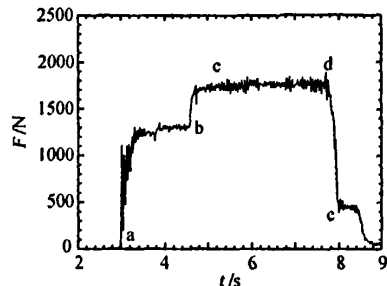


图 2 推力读数随时间变化的典型曲线

Fig. 2 Typical time history of thrust value during experiment

## 1.2 煤油多级加热与裂解系统

超临界或裂解煤油通过如图3所示的煤油二级加热与运输系统获得。其中,第一级采用储热式加热方式,可以把约0.8kg煤油加热到约570K而不产生明显的结碳,加热时间约需10-15分钟。第二加热器采用连续运行方式,实验前预热至实验需要的温度。煤油通过该加热器的驻留时间很短,约1-4秒钟,煤油的裂解和结碳均可以忽略。加热过程中,压力均维持在超临界压力。试验结果表明,超临界压力可以有效地减少结碳在壁面上的形成。加热器的运行与控制分别由装在第一,第二级加热器出口的两台

高温气动阀(Swagelok, model SS10VM)完成。运行时,第一级加热器将煤油在指定的压力下加热到570K,第一个气动阀打开,热煤油进入第二级加热器,第二个气动阀并不马上打开,根据加热温度的不同,设定一个2-4秒的延迟,以使压力与温度达到一个稳定值。

为了监视管壁和管内煤油的温度,对加热器的温度分布进行负反馈控制,图3所示的加热器上安装K型热电偶TC11-13, TC21-27。有的焊在管壁,有的插入管的内部,用于监测煤油与加热器壁面的温度。

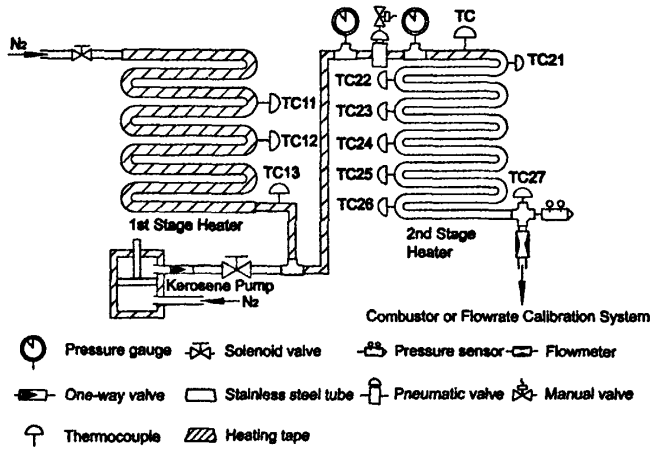


图3 煤油二级加热与运输系统

Fig. 3 Schematic of two - staged kerosene delivery and heating system

## 1.3 煤油流量标定

超临界与热裂解煤油的采集与流量标定采用一个专门的装置来进行,如图4所示。流量计安装于第二级加热器出口。高温煤油经过流量计以后通入一个安装于水箱中的热交换器进行冷却。冷却后混合物中较重的成份凝结成液体直接收集,较轻的气态分子由一个气体收集器收集。该气体收集器为一个倒置于水箱中的圆筒。由一个直径为0.5m,高为1.0m的容器和固定在它内部的一个开口朝下直径为0.4m,高为0.5m的容器组成。在试验前灌水使水平

面达到倒置容器底部之上,其水面高度可由壁面的刻度读出。气体体积根据气体排出水的体积来决定。气体的成份收集起来通过色谱仪进一步分析。由此可以得到气体产物的平均分子量、密度以及总质量。裂解煤油的流量通过收集到的液体和气体的总质量除以喷油时间得到。裂解煤油收集装置的示意图见图4。裂解气体的密度也可以采用精密天平,根据一定体积(实验中采用5升容量采样袋)气体的重量以及相应空气的浮力来计算。实验结果表明,两种方法得到的测量数据基本吻合。

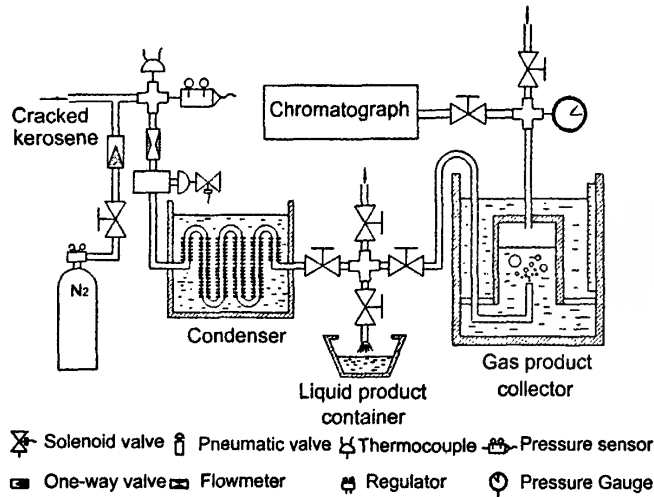


图4 煤油流量标定与气体成份收集系统

Fig. 4 Schematic of a system for flow rate calibration and gaseous products collection

超临界与热裂解煤油的流量标定数据见图5,为了确定流量与温度的关系,图中流量均以3.5MPa压力为基准,即除以相应的裂解压力(MPa)再乘上3.5MPa。从图中可以看出,当用压力归一化以后,超临界与热裂解煤油的流量基本上收敛到同一条曲线上。

图5中也给出了一条针对没有裂解煤油替代模型的计算曲线。该替代模型,按摩尔数计,包含63%的正十二烷,30%的三甲基环己烷以及7%的丙基苯。计算方法采用广义的对应状态法则。在煤油发生裂解前,该模型的计算结果与实验结果吻合得很好,但随着裂解的发生,偏差逐渐增加。

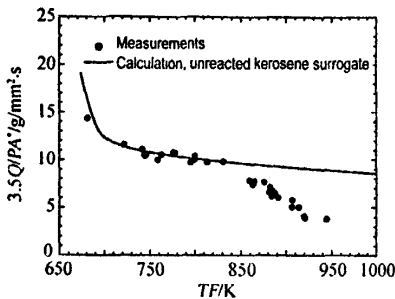


图5 超临界与裂解态煤油流量标定曲线,  
图中压力P单位为MPa

Fig. 5 Comparison of measured fuel mass flow rates per unit throat area and calculated values based on a kerosene surrogate at varying fuel temperatures

根据单路或两路喷油试验需要,第二级出口处安装了一路或两路供油通道,每路煤油的流量均由一个音速喷管及其上游的压力与温度测量决定。为了适应不同的流量要求,实验中采用了1.92mm,2.0mm,2.15mm,2.55mm,2.81mm及3.08mm等多种口径的流量计用于裂解煤油流量控制与测量。经过标定后流量计的测量误差控制在5%以内。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 室温、超临界、裂解态燃料燃烧性能比较

试验首先在Mach2.5高度51mm模型燃烧室中进行。来流空气总压 $1.12 \pm 0.02$ MPa,总温 $1750 \pm 50$ K,流量 $1200 \pm 20$ g/s。采用三种物态的煤油进行相关试验,即室温条件下的液态,735K的超临界态和温度为815K-886K的热裂解煤油,煤油的流量保持在约37g/s左右,当量比约0.42。为了与以前室温煤油的燃烧数据相比较,煤油在距离入口约253mm凹腔上游处喷注。

图6给出了上述三种物态下燃烧室内的静压分布曲线。这些静压分布曲线表明随着燃料温度的提高、物态的变化,燃烧室内静压分布曲线的总体高度在不断上升。与室温煤油相比,超临界态煤油的燃烧静压要提高约15%,而热裂解煤油在此基础上进一步10%以上。这表明燃烧强度随着物态的改变在

不断地增加,但是燃料的总量并没有增加,因此即单位流量燃料的燃烧性能得到了大幅提升。然而根据估算,燃料温度增加引起燃烧室气体温度的增加非常有限,表明燃烧性能的提高并不是煤油本身焓值的提高引起的,而只能是混合得到了改进或者燃料成份变化等原因引起。

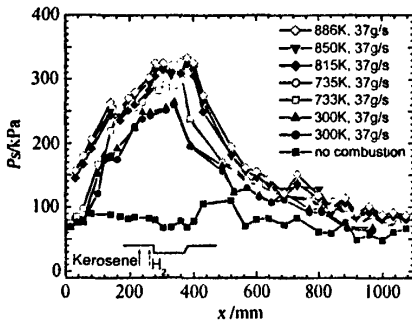


图6 热裂解、超临界态及冷煤油燃烧静压分布比较

Fig. 6 Comparison of static pressure distributions with supercritical, liquid and thermally cracked kerosene injections

从图6也可以看出,对于热裂解煤油,由于燃烧强度过大,即使在这一当量比不高的情况下,燃烧室入口静压也因边界层分离而开始抬高,使入口气流条件发生变化。为了在避免出现这种情况下进一步提高燃料的当量比,后续试验中喷油位置将向向下游移动,同时采用入口高度为70mm的燃烧室。

### 2.2 燃料当量比对燃烧室性能影响

试验在 Mach2.5、高度70mm的模型燃烧室中完成。空气气流条件基本保持不变,即总压  $1.12 \pm 0.01\text{MPa}$ ,总温  $1750 \pm 50\text{K}$ ,空气流量  $1200 \pm 20\text{g/s}$ 。超临界煤油温度  $765 \pm 10\text{K}$ ,压力  $4.0 - 4.98\text{MPa}$ ,流量约  $42 - 114\text{g/s}$ ,对应当量比  $0.52 - 1.43$ 。燃料从第一个凹腔底部位置A处喷注。

图7给出了5种不同当量比下的燃烧静压分布。从图中可以看出,燃烧静压随着当量比的增加而不断提高。相应的推力测量结果表明,对应燃料当量比  $0.52, 0.60, 0.65, 0.91$  与  $1.41$ ,单位空气流量的比推力增益(燃烧前后推力增益除以空气流量)分别为  $242\text{m/s}, 297\text{m/s}, 322\text{m/s}, 370$  与  $369\text{m/s}$ 。

从图中也可以看出,当燃料当量比从  $0.6$  增加到  $0.65$  时,燃烧反压开始向上游传播,进入主流喷管的扩张段,使来流条件发生变化。在实际发动机运行条

件下,这种情况应尽量避免,因为这有可能导致发动机不起动。因此尽管超临界燃料喷注可以提高燃烧强度,但该喷注位置上燃料当量比的提高受制于边界层的分离而不能超过约  $0.6$ ,使燃烧室实际的推力增益最多达到约  $297\text{m/s}$ 。

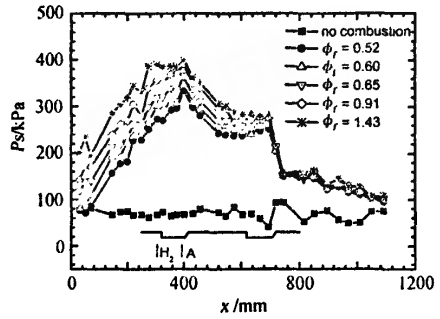


图7 不同燃料当量比燃烧静压分布比较

Fig. 7 Comparison of static pressure distributions with fuel injections at various equivalence ratios

### 2.3 提高燃料当量比与推力增益的途径

为了进一步提高燃料当量比与相应的推力增益,分别测试了不同位置喷油与两路燃料喷注对燃烧性能的影响。来流空气保持与图7中类似的气流条件。煤油温度与压力基本保持不变,即约  $765 \pm 10\text{K}$  与  $4.90 \pm 0.03\text{MPa}$ 。煤油流量约  $70\text{g/s}$ ,对应当量比为  $0.90$ 。煤油流量计口径  $3.08\text{mm}$ 。

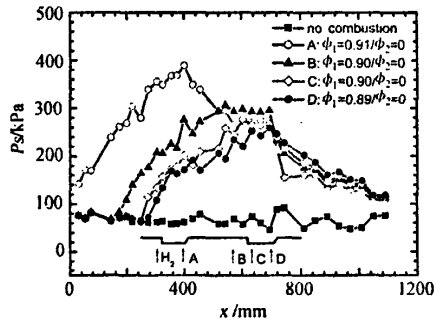


图8 不同喷油位置燃烧静压分布比较

Fig. 8 Comparison of static pressure distributions with fuel injections at different locations

图8给出A、B、C与D四个不同位置喷油时燃烧静压的对比情况。从图中可以看出,随着喷油位置向下游移动,燃烧压力呈现单调下降趋势,尤其是从A移动到B位置时,燃烧压力下降幅度很大,而从B到

D变化比较缓慢。其主要原因是喷油位置A与BCD在不同扩张角度的试验段上,A处扩张角为 $1^\circ$ ,而BCD处在 $3^\circ$ 扩张角的试验段上。较大的扩张角使高温燃气迅速膨胀,燃烧静压相应下降,但由于扩张角的加大,推力性能并不会成比例下降。而对于BCD三处的燃料喷注,由于处在相同扩张角的试验段上,当喷油向下游移动时,燃料在燃烧室内的驻留时间缩短,导致与空气的混合与燃烧不够充分,相应燃烧静压也随之下降。

由于煤油的当量比较高,达约0.90,大于前面提到的0.6左右的临界值,在位置A处喷油时,出现反压进入喷管的现象。但随着喷油位置向下游BCD移动以及喷油处扩张角的提高,燃烧静压抬升起点也相应下移,燃烧室入口气流条件得以保持。

从推力增益来,当喷油位置从A移动到BCD过程中,比推力增益分别为 $370\text{m/s}$ 、 $347\text{m/s}$ 、 $310\text{m/s}$ 与 $285\text{m/s}$ 大致呈下降趋势。考虑到反压向上游传播的因素后,喷油位置向下游适度移动可以进一步提高燃料最大当量比,使实际的比推力增益得到提高:从图7中A处对应当量比0.6时的 $297\text{m/s}$ 提高到图8中B处对应当量比0.9的 $347\text{m/s}$ ,提高幅度约17%。

从上面的试验可知,在单路喷油的情况下,同样条件下,喷油越往上游移动其燃烧静压越高,但超过一定程度后,会导致燃烧室压力向入口传播。为了提高燃烧性能的同时,尽量避免这种反压向上游传播,采用两路喷油开展了一系列试验。

试验在与图8相同的气流条件下进行。但经由位置A喷注的燃料流量降低了约43%,用于其他位置的喷注。燃料温度 $765 \pm 10\text{K}$ ,压力 $5.09 \pm 0.06\text{MPa}$ ,总当量比 $0.89 \pm 0.01$ 。

图9给出三种不同喷油位置组合A+B,A+C以及A+D喷油时的燃烧静压曲线。从图中可以看出,尽管单独喷油时,燃烧静压的差别相当大,组合喷油的燃烧静压非常接近。总的静压水平比在A处单独喷油略低,但比下游B-D三处单独喷油要高出许多。同时,与A处单独喷油时相比,反压向上游的传播也得到了明显缓解。

从比推力增益来看,A+B、A+C与A+D三种组合的比推力增益分别为 $330\text{m/s}$ 、 $348\text{m/s}$ 与 $351\text{m/s}$ ,变化幅度不大,但随着第二路喷油位置的下移,略有提高。与图8相比,A+B组合比单独B处喷油的比推力增益略低5%,但A+C与A+D组合要比单独C

与D处喷油分别提高约12%与23%。总的来说,上游喷注燃料的燃烧有助于下游喷注燃料的燃烧。其原因可能是上游燃料的燃烧产物中包含相当多的燃烧中间产物与自由基,这些中间产物与自由基对下游燃料的燃烧有很大的帮助。

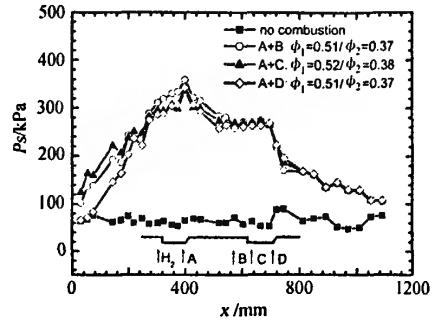


图9 不同喷油位置组合下燃烧静压分布比较  
Fig. 9 Comparison of static pressure distributions with two-staged fuel injections

### 3 结论

本文利用马赫数2.5超燃模型燃烧室与二级燃烧加热与裂解系统,研究与比较了室温、超临界态与热裂解煤油的超声速燃烧特性。试验表明,在相同条件下,与室温煤油相比,超临界与热裂解煤油的燃烧静压要分别提高约15%与20%。但由于边界层分离引起的反应向上游传播这一现象的限制,单路喷油时,超临界态与裂解燃料的流量以及相应的推力增益无法进一步提高。为此,以超临界态煤油为例,研究了不同喷油位置及其组合的超声速燃烧特性。试验结果表明,喷油位置向下游移动可以有效地避免燃烧反压向上游传播,但在燃烧室长度一定的条件下,燃烧与推力性能会受到一定影响;而采用分布式喷油技术,则可以在保证燃烧反压基本不向上游传播的同时,进一步提高燃料当量比,并使推力增益获得最大幅度约23%的提升。

### 致谢

本研究得到了国家自然科学基金面上项目(项目批准号10672169)和国家的科学基金创新研究团体科学基金项目(10621202)的资助。作者在此感谢卢锡年研究员在设备运行和加热器研制等方面的独特工作与帮助,同时也感谢李英、孟令瑾、魏雪松、王

景泉与黄鹏等同志在技术与具体试验上的大量支持。

#### 参 考 文 献:

- [1] LANDER H and NIXON A C. Endothermic fuels for hypersonic vehicles [J]. *Journal of Aircraft*, 1971, 8(4): 200 - 207.
- [2] TISHKOFF J M, DRUMMOND J P, EDWARDS T and NEJAD A S. Future direction of supersonic combustion research; air force/NASA workshop on supersonic combustion [R]. AIAA Paper 97 - 1017, 1997.
- [3] EDWARDS T. Liquid fuel and propellant for aerospace propulsion: 1903 - 2003 [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19(6): 1089 - 1107.
- [4] YANG V. Modeling of supercritical vaporization, mixing and combustion processes in liquid - fueled propulsion system [A]. Proceeding of the Combustion Institute [C], Vol. 28, 2000, pp. 925 - 942.
- [5] FAN X J, YU G, LI J G, ZHANG X Y and SUNG C J. Investigation of vaporized kerosene injection and combustion in a supersonic model combustor [J]. *J. Propulsion and Power*, 2006, 22(1): 103 - 110.

## Performance optimization for supersonic combustion of supercritical and cracked kerosene

FAN Xue - jun, YU Gang, LI Jian - guo and ZHONG Feng - quan

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 15 Beisihuanxi Road, Beijing, 100190*)

**Abstract:** Combustion of liquid, supercritical and thermally - cracked kerosene was experimentally investigated and compared in a Mach 2.5 model combustor. It was found that the increase in the fuel flow rate and the pressure rise with the single - staged injection was limited by the upstream propagation of boundary layer separation due to excessive heat release. To solve this problem, experiments with combustion of supercritical kerosene injected at different locations and their combinations were conducted and compared in the Mach 2.5 model combustor. Performance optimization of the model combustor has been proposed based on these studies.

**Key Words:** endothermic fuel; supersonic combustion; supercritical state; thermal cracking