基于凹槽火焰稳定器的煤油超声速燃烧试验

王 辽 韦宝禧 章成亮 徐 旭

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 在直联式超声速燃烧试验台上进行了煤油的超声速燃烧试验, 使用了 4种不同结构的凹槽火焰稳定器和多种直径的煤油喷嘴, 煤油当量比 0.24~1.32, 引导氢当量比 0.53, 在多种工况下均实现了煤油的成功点火和稳定燃烧. 通过测量燃烧室壁面静压分布比较不同工况下煤油燃烧性能. 研究发现: 凹槽结构对煤油的点火性能影响较大, 较大的凹槽长深比更有利于煤油的点火, 部分凹槽能在无引导氢条件下实现煤油自燃点火; 试验中使用的 4种凹槽均有较好的火焰稳定效果, 煤油燃烧时燃烧室壁面压力平稳; 煤油当量比是影响煤油燃烧性能的最主要因素. 在煤油当量比相同的条件下, 较高的喷注压力能够提高煤油的燃烧性能.

关 键 词: 冲压发动机; 超声速燃烧; 煤油; 凹槽火焰稳定器

中图分类号: V 434+.13

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)08-0907-04

Experimental investigation of kerosene supersonic combustion based on cavity flameholder

Wang Liao Wei Baoxi Zhang Chengliang Xu Xu

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract Experimental investigation of kerosene supersonic combustion was performed on direct-connect supersonic combustion test facility by using four different configurations of cavity flameholders and multi-diameter kerosene injectors. Kerosene equivalence ratio varies from 0.24 to 1.32 and polite hydrogen equivalence ratio was 0.53. Successful ignition and sustain combustion were achieved in multi test conditions. The distribution of wall static pressure was measured to validate the combustion performances under different test conditions. The experimental results show the four cavity flameholders used in the test have excellent flame holding effects. The configuration of cavity has great influence on the ignition of kerosene in supersonic airstream. Larger length depth ratio was better for the kerosene ignition, and with several cavities, kerosene can achieve self-ignition without pilot hydrogen. equivalence ratio is the most important influencing factor of kerosene combustion capabilities. At same kerosene equivalence ratio, higher injection pressure can improve the kerosene combustion effects.

Key words ramjet engines; supersonic combustion; kerosene; cavity flameholder

燃料喷射、点火和火焰稳定是超燃冲压发动机燃烧室设计中的 3个关键问题. 一个好的燃料喷射方案能使燃料和来流空气快速混合同时使燃烧室总压损失尽可能小; 对点火方式的要求则是稳定可靠, 它是发动机能否工作的关键; 燃烧的火焰稳定在很大程度上决定了超燃冲压发动机的性能. 解决好这 3个问题一直是国内外研究的重点.

煤油由于能量密度高, 便于储运等优点, 被普遍认为是超燃冲压发动机的理想燃料. 但由于超燃冲压发动机燃烧室内超声速流动的特点决定了燃料的驻留时间会很短, 而煤油的点火延迟时间长, 反应速度慢, 并且在点火和燃烧前还必须经过雾化、蒸发、混合过程[1]. 这使得燃料喷射、点火和火焰稳定问题显得更加突出.

收稿日期: 2007-07-20

作者简介: 王 辽(1982-), 男, 贵州贵阳人, 硕士生, wangliao@sa.buaa.edu.cn.

平面凹槽火焰稳定器以其在超声速条件下良好的火焰稳定效果而受到了广泛的关注[2-3]. 与普通冲压发动机使用的侵入式火焰稳定器不同, 凹槽火焰稳定器非侵入式的结构使其对气流影响较小, 更适合于超燃冲压发动机燃烧室内的超声速气流. 而且点火和燃料喷射装置完全可以集成在凹槽上, 大大简化了结构. 不同结构的凹槽根据气流流过时不同的流动状态可以分为开式和闭式[4]. 研究发现, 闭式凹槽阻力系数较开式凹槽的大很多[5], 开式凹槽更适合做超燃冲压发动机的火焰稳定器.

1 试验设备

本文试验是在北航直联式超声速燃烧试验台上进行的, 它主要由空气加热器、拉法尔喷管、超燃燃烧室等组成.

1.1 空气加热器, 拉法尔喷管

空气加热器是超燃实验系统的关键设备, 本文研究使用燃烧加热方式, 以氢气为燃料, 通过燃烧氢气对空气加温, 并补进氧气, 使燃气中氧的质量分数保持为 23%. 加热后的燃气通过拉法尔喷管进行膨胀加速, 用以模拟飞行高度 30 km, 飞行马赫数为 6时超燃冲压发动机燃烧室入口的气流条件. 试验时燃气流量约为 1.5 kg/s, 经理论计算, 拉法尔喷管出口的燃气总温约为 1900 K, 总压 2.0MPa, 核心区马赫数约为 2.0.

1.2 超声速燃烧室

超声速燃烧室由 4部分组成: 隔离段、一段燃烧室、二段燃烧室和三段燃烧室, 采用单边扩张结构, 全长 1 500 mm, 入口截面尺寸 54mm(高) × 32mm(宽), 燃烧室一段和三段分别有 5°和 3°的扩张角, 如图 1所示. 三段燃烧室可以拆卸并任意组合, 而且每段燃烧室均布置了上下两个燃料喷射装置安装点, 用于不同的试验条件. 本文试验仅在一段燃烧室底部安装了燃料喷射装置. 燃烧室 4个壁面各设置了 42处壁面静压测量点, 用以测量试验时的壁面静压分布.

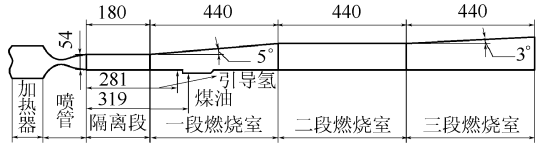


图 1 燃烧室结构示意图

1.3 凹槽火焰稳定器

本试验所用凹槽火焰稳定器均为开式, 集燃料喷射、点火和火焰稳定于一体, 煤油和引导氢均用单孔垂直喷射, 见图 2 凹槽火焰稳定器 *A*, *B*, *C* 对应长深比 *L*/*D* 分别为 3, 6, 9, 其上引导氢和煤油喷孔距隔离段入口均为 281 mm 和 319mm, 用以研究不同凹槽长深比对煤油点火和燃烧性能的影响. 凹槽火焰稳定器 *D* 在火焰稳定器 *C* 的基础上增加了两个煤油喷点, 用于研究煤油喷点在凹槽内的位置对煤油点火和燃烧性能的影响.

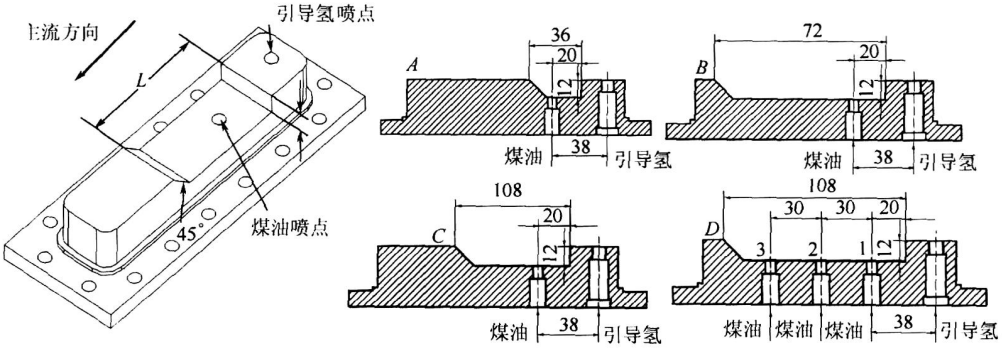


图 2 凹槽火焰稳定器结构

2 试验及结果分析

2.1 试验工况

本文采用了两种不同的点火方式. 引导氢自燃点火: 先向燃烧室喷注引导氢 1 s, 之后喷注煤油, 让其共同燃烧 0.5 s, 关闭引导氢, 维持煤油的稳定燃烧; 无引导氢点火: 直接向燃烧室中喷入煤油. 本文使用不同直径的喷嘴, 就上述两种点火方式分别在不同结构的凹槽火焰稳定器上进行了一系列试验.

2.2 凹槽结构对煤油点火性能的影响

对于引导氢自燃点火方式, 试验中所有工况煤油均实现了成功点火和稳定燃烧, 说明引导氢当量比 $\phi_H = 0.53$的引导氢释放的热量足以使煤油成功点燃, 并且在关闭引导氢之后煤油能够维持稳定燃烧, 试验中使用的凹槽均有比较好的火焰稳定效果.

对于直接喷入煤油的点火方式. 试验发现: 对

于凹槽 *A*, 所有工况煤油均没有点燃; 对于凹槽 *B*, 煤油只在煤油当量比 ϕ_K = 1.32时成功点燃; 对于凹槽 *C*, 煤油在所有当量比下均成功点燃; 对于凹槽 *D*, 1号喷点煤油在所有当量比下成功点燃, 2号和 3号喷点所有当量比煤油均没有点燃.

煤油作为超燃冲压发动机燃料的一大劣势就是其点火延迟时间相对于其在超声速燃烧室内的驻留时间长很多. 使用凹槽火焰稳定器能在凹槽内制造低速漩涡区, 增加煤油在燃烧室内的停留时间, 这对煤油的点火和稳定燃烧起到了主要作用. 同时凹槽内气流部分滞止, 当地静温上升, 煤油的点火延迟时间会随着温度的上升而大幅缩短[6]. 如文献[6]所述温度为 1000K 时煤油的点火延迟时间比 2000K 时大 10^4 以上, 这对煤油的点火和稳定燃烧是十分有利的.

试验中对于凹槽 *C*, 由于其能提供足够长的低速漩涡区, 所以实现了所有当量比下煤油的成功点火和稳定燃烧. 对比凹槽 *D*, 使用 1号喷点时其结构与凹槽 *C* 完全相同, 试验结果也相近, 使用 2号和 3号喷点时, 试验结果却完全不同. 这是由于喷点位置的改变, 缩短了煤油喷点与凹槽后缘的距离, 这是决定煤油驻留时间的有效距离. 凹槽 *D* 使用 2号和 3号喷点时有效距离和凹槽 *B*、凹槽 *A* 相似, 所以试验结果也相近. 通过试验和以上分析得可知, 影响煤油点火性能的最主要因素是煤油喷点与凹槽后缘的距离, 适当增加此距离有利于煤油的点火.

2.3　煤油当量比对燃烧性能的影响

图 3为使用凹槽 *C*, 不同 ϕ_k 下, 煤油稳定燃烧时壁面静压 P_w 沿燃烧室纵向 x 的分布. 从图中各工况均可观察到由于燃烧放热导致的压力上升. 在高当量比 ϕ_K = 1.32下燃烧室内的压力在凹槽处出现一个峰值, 大量的燃烧放热导致压力影响向凹槽上游传播, 进入隔离段.

在 ϕ_K = 0.32下壁面压力上升明显滞后, 说明煤油的燃烧有一个明显延迟, 燃烧并不是在凹槽内开始的. 分析原因可能是由于此时煤油当量比太小, 也可能是由于喷注压力太低造成的. 为了进一步研究确定产生这种现象的原因, 分别使用直径为 0.5mm 和 0.85mm 的喷嘴, 喷注压力为 7.85MPa和 2.8MPa, 使之 ϕ_k 均为 0.24, 进行了试验, 壁面压力分布如图 4所示. 从图中看出, 在 2种工况下, 煤油的燃烧都不是在凹槽内开始的, 而且燃烧的位置较 ϕ_K = 0.32时更加滞后. 说明过小的当量比会造成煤油燃烧的滞后, 当量比越小滞后越严重. 这是因为在小当量比下, 燃烧温度较低, 煤油的火焰传播速度大幅下降, 造成了煤油燃烧起始点后移.

对于 ϕ_K = 0.46～0.97的情况, 燃烧室壁面压力上升迅速, 煤油几乎是喷入后立即燃烧, 而且压力不存在明显的峰值, 对燃烧室上游压力没有影响, 壁面压力能在一段和二段燃烧室内保持平稳. 凹槽起到了很好的火焰稳定效果.

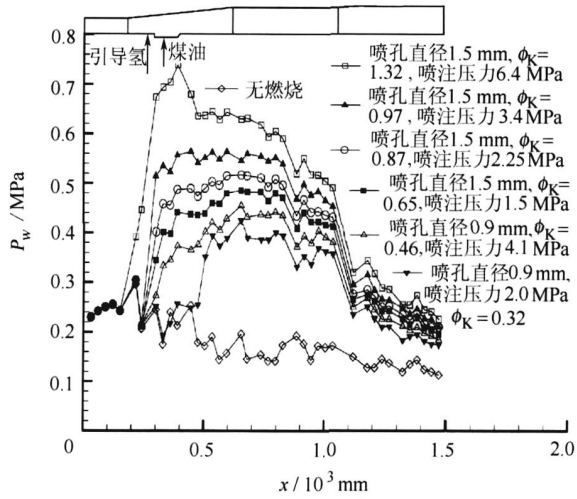


图 3　不同 ϕ_K 下煤油燃烧 P_w 分布

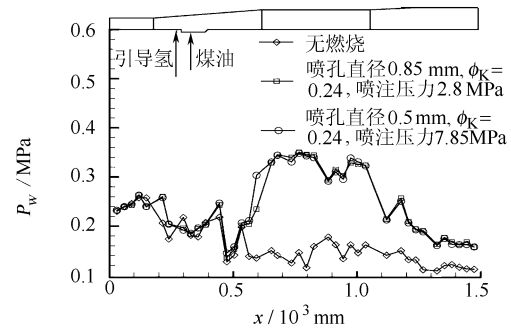


图 4　不同喷注压力下 ϕ_K = 0.24煤油燃烧 P_w 分布

2.4　凹槽结构对煤油燃烧性能的影响

图 5为 ϕ_k = 1.32和 0.32, 分别使用凹槽 *A*、*B*、*C* 时燃烧室壁面压力分布. 比较图 5发现, 煤油达到稳定燃烧后, 在相同当量比下, 使用不同长深比的凹槽火焰稳定器煤油燃烧压力平稳区壁面压力没有明显区别. 不仅是图中所示的两种当量比, 试验中所有当量比的结果都相似. 分析原因, 由于

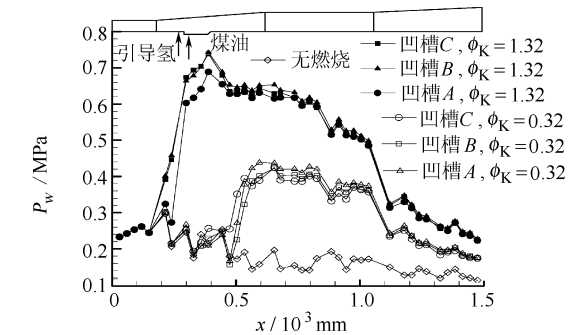


图 5　不同凹槽煤油燃烧 P_w 分布

试验中使用的凹槽均属开式凹槽, 流动特性相近, 煤油点火成功后均能维持稳定燃烧, 所以燃烧室壁面压力没有明显区别.

2.5 喷注压力对煤油燃烧性能的影响

采用对不同孔径喷嘴调整喷注压力使其流量相等的方案研究喷注压力对煤油燃烧性能的影响. 实验时通过调整喷注压力使孔径 1.0mm 和 1.2mm 的喷嘴 $\phi_K = 0.5$, 孔径 0.9mm 和 1.5mm 的喷嘴 $\phi_K = 0.65$. 图 6为在喷注器 B 上使用以上两组喷嘴, 煤油稳定燃烧时壁面压力分布. 从图中看出, 在这两种当量比下, 低喷注压力时壁面压力的上升要滞后于高喷注压力时, 同时平稳区压力也略低于前者.

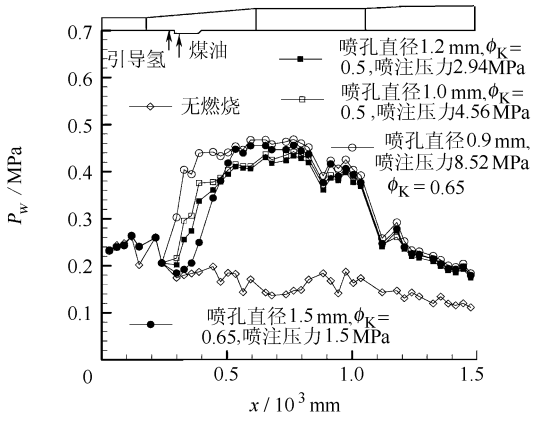


图 6 不同喷孔直径下 P_w 分布

喷注压力直接影响了煤油的雾化和穿透深度[7-8]. 从而在很大程度上决定了煤油的燃烧性能. 根据文献[7]所述, 射流液体与横向气流的动压比是决定液体喷射进入横向气流后雾化效果的一个重要参数. 动压比越大, 雾化效果越好, 越有利于煤油的燃烧. 根据文献[8]所述, 纯液体垂直喷射进入超声速气流中其穿透深度满足:

$$h/d = 3.94q^{0.47}(x/d)^{0.21} \quad (1)$$

式中 h 为穿透深度; d 为喷孔直径; q 为射流液体和主流气体的动压比; x 为主流中离喷孔的距离. 根据式(1)计算试验中使用 0.9mm 喷孔时煤油的穿透深度是 1.5mm 喷孔的 1.74倍. 使用 1.0mm喷孔时煤油的穿透深度是 1.2mm喷孔的 1.78倍. 较深的穿透深度使煤油能够更加充分的与主流空气接触从而使燃烧更加充分.

试验中对于相同的主流条件, 煤油喷射压力越大, 相应煤油与主流的动压比也越大, 煤油的雾化就越好, 其燃烧滞后就越小. 因此在相同当量比下低喷注压力时煤油燃烧要滞后于高喷注压力时. 同时, 分析图 6还可发现使用直径 1.5mm 喷嘴, 喷注压力 1.5MPa, $\phi_K = 0.65$时煤油的燃烧会滞后于 $\phi_K = 0.5$, 但喷注压力较高时. 这更加说明了喷注压力对煤油燃烧性能的影响. 即使在高当量比下, 若喷注压力过低, 煤油无法很好的完成雾化, 其燃烧仍有可能滞后于当量比略低, 但喷注压力较高、雾化较好的情况. 从图 6中可看出, 在相同当量比下, 高喷注压力时, 煤油燃烧平稳区的压力会略高于低喷注压力时. 但两者的区别并不是很大. 由此可见这种由喷注压力不同所引起的对煤油燃烧平稳区压力的影响十分有限.

3 结 论

通过上述试验研究得到以下结论: ①使用 $\phi_K = 0.53$的引导氢自燃点火稳定可靠, 所有工况均能实现煤油的成功点火. ②在无引导氢时, 煤油喷点距凹槽后缘的距离对煤油点火性能影响很大, 在此距离足够大时, 煤油能实现自燃. ③当量比对煤油的燃烧性能影响很大. 过高的当量比会导致煤油燃烧放热过大, 在凹槽处形成明显的压力峰, 并向上游传播. 过低的当量比会使煤油的燃烧严重滞后. ④试验中所使用的 3种凹槽火焰稳定器均能实现煤油的稳定燃烧. ⑤喷注压力对煤油燃烧的滞后性影响明显. 相同当量比下, 低喷注压力煤油的燃烧要滞后于高喷注压力时. 而喷注压力对煤油燃烧平稳区压力的影响则十分有限. 相同当量比下, 低喷注压力煤油燃烧平稳区的燃烧室壁面静压只是略低于高喷注压力时.

参考文献 (References)

[1] Tishkoff J M, Drummond J P, Edwards T, et al. Future directions of supersonic combustion research: air force /NASA workshop on supersonic combustion [R]. AIAA-97-1017, 1997

[2] Baurle R A, Gruber M R, A study of recessed cavity flowfields for supersonic combustion applications [R]. AIAA-98-0938, 1998

[3] Ben-Yakar A, Hanson R. Cavity flameholders for ignition and flame stabilization in scramjets: review and experimental study [R]. AIAA-98-3122, 1998

[4] Stallings R L Jr, Wilcox F J Jr. Experimental cavity pressure distributions at supersonic speeds [R]. NASA TP22683, 1987

[5] Gruber M R, Baurle R A. Fundamental studies of cavity-based flameholder concepts for supersonic combustors [R]. AIAA-99-2248, 1999

[6] Veretennicov V G, Autoignition study on kerosene in supersonic flow: technical report on scientific and research work [R]. NO. F61780-96-W0286, 1996

[7] Wu P K, Kirkendall K A, Fuller R P. Spray structures of liquid jets atomized in subsonic crossflows [J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 13(2): 173-182

[8] Lin K C, Kennedy P J. Penetration heights of liquid jets in high-speed crossflows [R]. AIAA-2002-0873, 2002

(责任编辑: 张 嵘)