

文章编号: 1000-8055(2009)02-0353-07

应用气泡雾化喷嘴的煤油超声速燃烧试验

王 辽, 章成亮, 韦宝禧, 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应用气泡雾化喷嘴, 煤油当量比 0.97 和 0.33 分别使用氢气、空气和氮气为起泡气体进行了煤油超声速燃烧试验. 在多种工况下实现了煤油的稳定燃烧. 研究发现: 凹槽火焰稳定器通过制造高温低速漩涡区增加煤油在燃烧室内的停留时间, 并使煤油得到充分加热从而实现煤油的点火和稳定燃烧. 通过气泡雾化喷嘴加入少量氢气, 由于氢气进入燃烧室后迅速自燃释放热量, 能够提高煤油的燃烧性能, 使得煤油能够在无凹槽火焰稳定器的条件下稳定燃烧.

关 键 词: 超声速燃烧; 气泡雾化喷嘴; 凹槽火焰稳定器; 超燃冲压发动机

中图分类号: V434⁺.13

文献标识码: A

Experimental investigation of kerosene supersonic combustion test using aerated-liquid injectors

WANG Liao, ZHANG Cheng-liang, WEI Bao-xi, 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 aerated-liquid injectors. In the test, kerosene equivalence ratio was 0.97 and 0.33, and hydrogen, air and nitrogen were used as effervescent gas respectively. The experimental results show that, cavity flameholders can achieve kerosene self-ignition and flame-holding effect by producing an eddy with low speed and high temperature, kerosene can prolong the resident time in combustor and achieve sufficient heating by the effect of this eddy. The hydrogen can self-ignite and release energy while injecting into the supersonic combustor, therefore adding hydrogen by aerated-liquid injector can improve the combustion performance of kerosene, and even achieve stable combustion without cavity flameholder.

Key words: supersonic combustion; aerated-liquid injector; cavity flameholder; scramjet

超燃冲压发动机燃烧室最主要的特点就是燃料的燃烧完全是在超声速气流中进行的. 这个特点决定了燃料在超燃冲压发动机燃烧室内的驻留时间会非常短(ms 级), 要在这样短的时间里完成燃料与气流的混合和燃烧, 这大大增加了燃料喷射、点火和火焰稳定装置设计的难度.

煤油由于其能量密度高, 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. 但是对于煤油这类液体燃料, 其燃烧前必须经过雾化、蒸发过程^[1], 而且煤油的点火延迟时间较长, 这加大了其在超燃冲压发动机上应用的难度.

目前国内外解决超燃冲压发动机燃烧室组织

收稿日期: 2008-01-18; 修订日期: 2008-04-07

作者简介: 王辽(1982-), 男, 贵州惠水人, 硕士生, 主要从事超燃冲压发动机试验研究.

燃烧困难的普遍做法是加装火焰稳定器,其中凹槽火焰稳定器受到了广泛的关注^[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得其对气流影响较小,更适用于超燃冲压发动机燃烧室内的超声速气流.

气泡雾化喷嘴是上世纪80年代后期由Lefebver^[4-6]首先提出的一种新型液体喷射方式.它通过在喷嘴上游将少量气体直接注入液体中,从而在喷嘴出口处形成均匀的气液两相流,两相流液体喷出喷嘴后其中的气体迅速爆破,可以大大提高雾化效果.将气泡雾化喷嘴应用于超燃冲压发动机燃烧室国内外进行了一系列研究.Lin K C^[7-8]系统的研究了气泡雾化喷嘴在超声速气流种的喷雾结构、穿透深度等,Yu G^[9-10]分别使用氢气和空气为起泡气体进行了煤油的超声速燃烧试验,试验结果显示在使用了气泡雾化喷嘴以后煤油的燃烧效率能够大幅提高.Mathur T^[11]使用氧气为起泡气体进行了煤油的超声速燃烧试验,取得了较好的结果.

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2.0 MPa,核心区马赫数约为2.0.

1.2 超声速燃烧室

超声速燃烧室由四部分组成:隔离段、一段燃烧室、二段燃烧室和三段燃烧室.燃烧室采用单边扩张结构,全长1500 mm,入口截面尺寸为54 mm(高)×32 mm(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,而且每段燃烧室上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.

1.3 气泡雾化喷嘴

图2为试验中使用的气泡雾化喷嘴结构图.起泡气体通过喷嘴中部细管末端12个直径 $\phi=0.5$ mm的小孔直接注入液体中,并在喷孔前留有一段直径为8 mm长为25 mm的空腔作为两相流的充分发展区,以保证液体以均匀的气液两相流形式进入喷孔.喷孔的长深比取20.

图3为试验中气泡雾化喷嘴的供应系统,煤油储罐在每次试验前使用高压氮气增压,通过高压进气和放气手阀调整煤油增压压力.气体则通过减压器减压以达到试验所需的压力.煤油和气体系统各有一个流量控制器分别控制煤油和气体的流量以满足试验所需的煤油流量以及气液质量流量比(G).两系统中分别设置了流量及压力传感器,在试验中对流量和压力进行实时测量.在气体系统末端设置了一个单向阀以防止试验中煤油的回流.

为了考察气泡雾化喷嘴的雾化性能,在进行煤油超声速燃烧试验前使用氮气为起泡气体在常压下对气泡雾化喷嘴的喷雾进行了观察,图4分

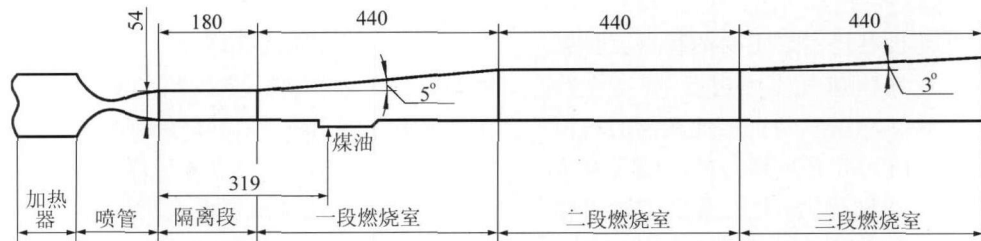


图1 超声速燃烧室结构示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic of the supersonic combustor (Unit:mm)

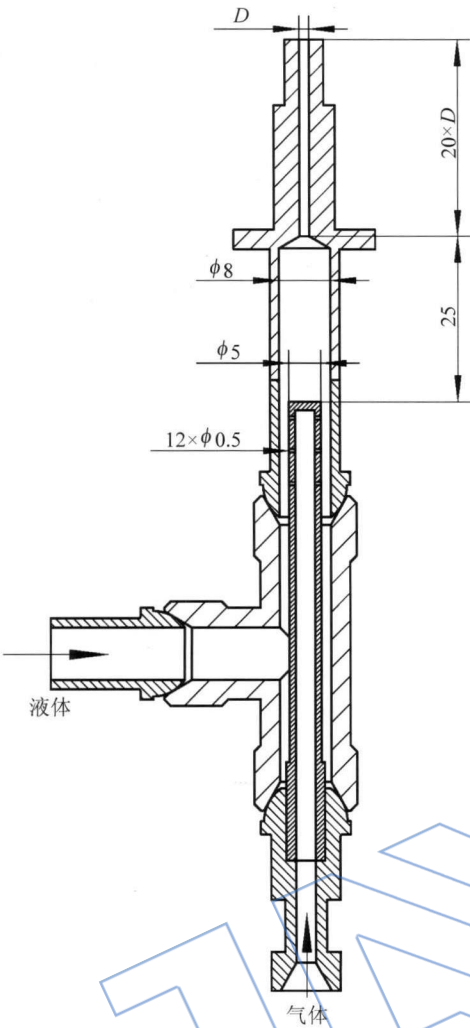


图 2 气泡雾化喷嘴结构图

Fig. 2 Structure of the aerated-liquid injector

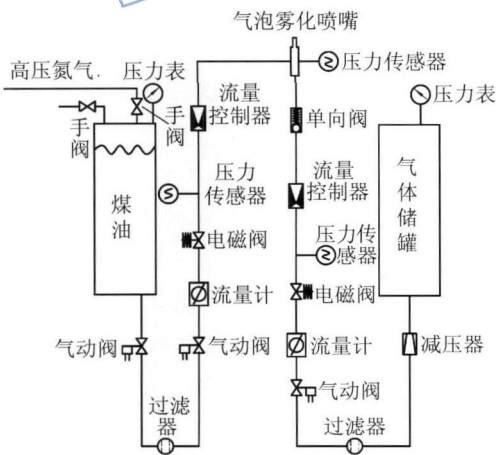
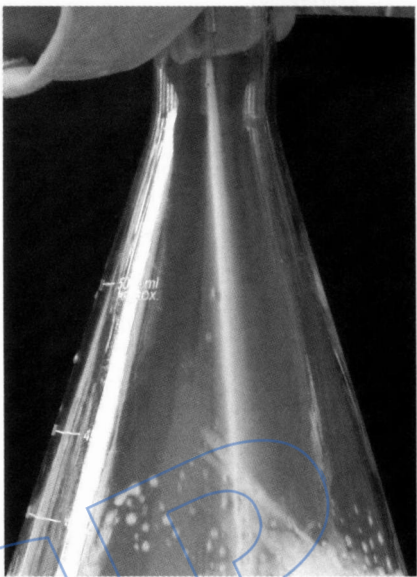


图 3 气泡雾化供应系统

Fig. 3 Schematic of aerated-liquid supply system

别为煤油流量 97 g/ s 时普通直喷喷嘴与气泡雾化

喷嘴在静止空气中的喷雾结构. 从图中可以明显看出通过使用气泡雾化喷嘴煤油的雾化效果有明显的改善.



(a) $G=0\%$



(b) $G=4\%$

图 4 气泡雾化喷雾结构 (煤油流量 97 g/ s)

Fig. 4 Structure of the aerated-liquid spray (Kerosene mass flux 97 g/ s)

1. 4 凹槽火焰稳定器

本文试验采用了长深比为 9 的凹槽火焰稳定器,并在凹槽内设置了 3 个煤油喷点. 图 5 为凹槽结构图,试验中分别在 3 个喷点上进行了试验. 试验中还使用了无凹槽喷注器,在其上设置了一个煤油喷点,喷点位置与凹槽内 1 号喷点位置相同,距离隔离段入口均为 319 mm.

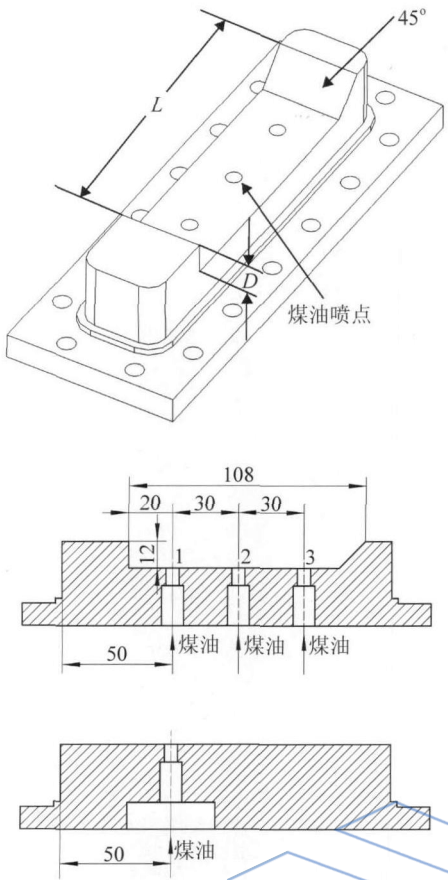


图 5 凹槽火焰稳定器结构图
Fig.5 Structure of cavity flameholder

2 试验及结果分析

2.1 不同起泡气体对煤油燃烧性能的影响

图 6 为煤油当量比 $\phi_k = 0.97$, $G = 4.3\%$ 时, 在凹槽火焰稳定器 1 号喷点分别使用氢气、空气和氮气为起泡气体进行试验时燃烧时壁面压力分布。

从图中可以看出,与使用直喷喷嘴时的压力比较,使用气泡雾化喷嘴时煤油在燃烧平稳区的压力并没有明显区别,只是在使用氢气为起泡气体时凹槽处的压力要高于其余情况,这是因为氢气在凹槽处的燃烧造成的。而使用空气和氮气为起泡气体时,凹槽处的压力则与使用直喷喷嘴时没有明显区别。

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。燃烧室内超声速气流由于凹槽的作用在凹槽内部形成了一个高温低速漩涡区,煤油在此处喷出由于低速漩涡的作用,增加了煤油在燃烧室内的停留时间,这是影响煤油燃烧的

主要因素。同时凹槽内较高的温度使煤油能够在此处得到充分的加热,实现成功点火。

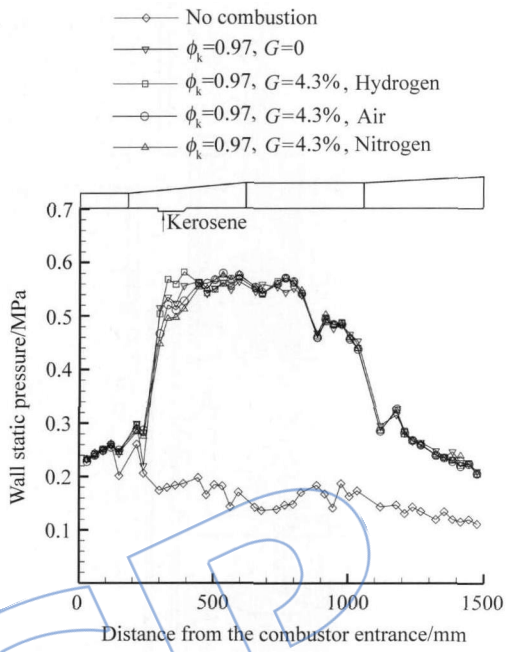


图 6 加入不同气体时燃烧室压力分布
Fig.6 Wall pressure distribution with different kinds of gas

煤油在燃烧前需要进行雾化、蒸发。试验中气泡雾化喷嘴的使用虽然提高了煤油的雾化效果,有利于煤油的蒸发,但是从试验结果上看,这种由于雾化效果的改善带来的对煤油燃烧性能的改善是不明显的。因为在凹槽内部,气流强烈的剪切力十分有利于煤油液滴的雾化,即使不使用气泡雾化喷嘴煤油也能有较好的燃烧效果。同时也更能说明增加煤油在凹槽内的停留时间,使煤油得到充分加热才是影响煤油燃烧效果的主要因素。

从图 6 中可看出煤油当量比 $\phi_k = 0.97$, $G = 4.3\%$ 时加入空气和氮气燃烧室压力与使用普通纯液体直喷喷嘴时没有明显区别。但当煤油流量保持不变,把空气和氮气的 G 提高到 8.25% 后,在凹槽火焰稳定器 1 号喷点处煤油无法实现成功点火,此时煤油的点火性能大幅降低,分析原因,使用氢气为起泡气体时相当于给燃烧室中加入了燃料,使用空气则加入了部分氧化剂,而使用氮气时对于煤油仅有雾化效果上的影响。分析加入这 3 种气体时不同的燃烧效果发现只有加入氢气时对煤油的燃烧才有比较有利的影响,这是由于氢气的加入能够迅速自燃,实际上是给燃烧室中加入了热量,这才造成使用氢气时煤油有较好的燃

烧效果.而对比使用空气和氮气为起泡气体的情况,由于加入的气体均是常温,加入燃烧室后会吸收一部分燃烧室中的热量,当加大气体的流量后,吸收的热量也随之增加,这在一定程度上降低了燃烧室中煤油喷点附近的温度,所以造成了煤油无法点燃.由此可见,热量的加入是提高煤油点火性能的最佳途径.

综上所述,将气泡雾化喷嘴应用于超燃冲压发动机燃烧室对燃烧性能最主要的影响是加入气体的种类.加入氢气时能提高煤油的点火和燃烧性能,主要是因为氢气自燃放热从而加热煤油实现的.而相比之下由于使用气泡雾化喷嘴提高雾化效果对燃烧的影响则十分有限.

2.2 使用氢气为起泡气体的试验

2.2.1 加入氢气量的影响

图 7(a) 和 (b) 分别为煤油当量比 ϕ_k 等于 0.97 和 0.33,通过气泡雾化喷嘴加入不同质量的氢气进行试验时,燃烧室壁面压力的分布.

从图 7 中可以看出,对于图中所示的工况,燃烧室壁面压力只是在凹槽处压力有比较明显的区别,而在之后的燃烧压力平稳区则基本一致.这说明对于加入的氢气,在凹槽处就已经完全反应,所以在煤油流量相同的条件下,加入不同流量的氢气只是对凹槽处的压力有比较大的影响,对煤油燃烧压力平稳区的影响则十分有限,煤油燃烧压力平稳区的压力主要是受煤油流量的影响.

另外,如图 7(a) 所示,在煤油当量比 $\phi_k = 0.97$, $G = 8.8\%$ 的工况下,由于煤油和氢气流量

均比较大,在凹槽处形成了明显的压力峰,大量的燃烧放热导致压力影响向凹槽上游传播.这种燃烧室压力影响向上游传播的情况有可能会影响到超燃冲压发动机进气道的性能,是应当尽量避免的.图 7(b) 所示,当煤油当量比 $\phi_k = 0.33$ 使用直喷喷嘴时煤油的燃烧有明显滞后,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.但是对比使用气泡雾化喷嘴加入氢气后,煤油的燃烧起始点提前至凹槽处.这是由于氢气加入后即自然放热,提高了当地温度,更有利于缩短煤油的点火延迟,同时较高的温度还能提高煤油燃烧火焰的传播速度,这对小当量比下煤油的燃烧是十分有利的.

2.2.2 凹槽内不同喷点位置的影响

图 8(a) 和 (b) 为煤油当量比 $\phi_k = 0.97$ 时, G 为 4.3% 和 2.2%,分别在凹槽火焰稳定器的 3 个喷点进行煤油燃烧试验的壁面压力分布图.

对于凹槽中的 3 个喷点,在使用直喷喷嘴时只有在 1 号喷点处煤油能够点燃并维持稳定燃烧.这是因为喷点与凹槽后缘的距离是凹槽所能提供给煤油加热和雾化的有效距离,2 号和 3 号喷点由于缩短了与凹槽后缘的距离,即缩短了煤油在凹槽中的停留时间,使得煤油无法在凹槽内得到充分的加热和雾化从而不能实现点火和稳定燃烧.

但是,在使用以氢气为起泡气体的气泡雾化喷嘴后,凹槽火焰稳定器的 3 个喷点煤油均能点燃并维持稳定燃烧,这说明氢气的加入能够增强

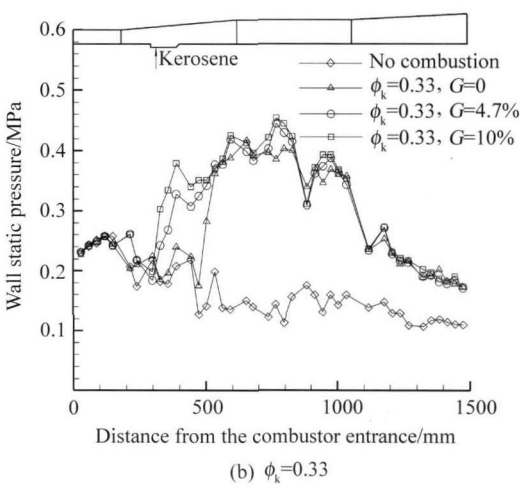
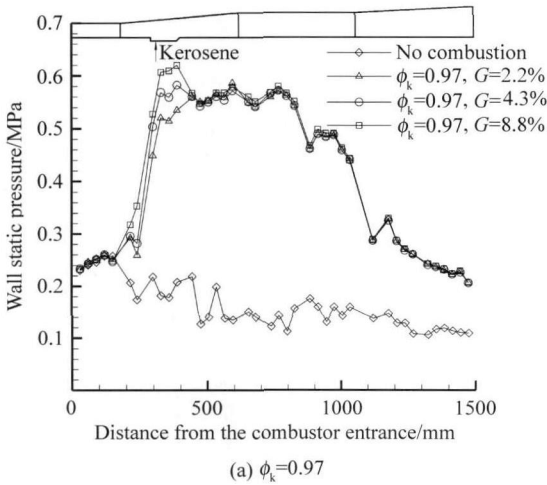


图 7 不同氢气量燃烧室壁面压力分布

Fig. 7 Wall pressure distribution with different hydrogen flux

煤油的点火性能. 这是因为氢气进入燃烧室后能够迅速自燃并释放热量提高当地的静温, 使煤油得到更好的加热, 从而实现煤油的成功点火. 但是从图 8(a) 和图 8(b) 中可以看出, 虽然氢气的加入使得 3 个喷点处煤油均实现了成功点火, 但是从煤油燃烧压力平稳区的壁面压力上看 1 号喷点还是要高于 2 号和 3 号喷点, 这说明在此工况下凹槽还是影响煤油燃烧效果主要因素.

2.2.3 无凹槽火焰稳定器的试验

研究中还就不使用凹槽火焰稳定器直接在燃烧室壁面使用气泡雾化喷嘴进行了煤油的超声速燃烧试验. 结果在使用氢气为起泡气体时实现了

煤油的点火和稳定燃烧. 图 9(a) 和 (b) 是煤油当量比分别为 0.97 和 0.33 时不使用火焰稳定器和使用凹槽火焰稳定器 1 号喷点时燃烧室壁面压力分布.

从图中可以看出, 即使不使用凹槽火焰稳定器, 煤油在以上两个当量比下依然能够成功点火并维持稳定燃烧, 而且此时煤油燃烧的燃烧室壁面压力要高于相同工况下使用凹槽火焰稳定器时. 分析原因, 对于氢气的加入, 其在进入燃烧室后即可自燃, 所释放热量能够充分加热煤油以实现煤油在燃烧室气流条件下的点火, 这与凹槽火焰稳定器所制造的高温低速涡流区加热煤油的结

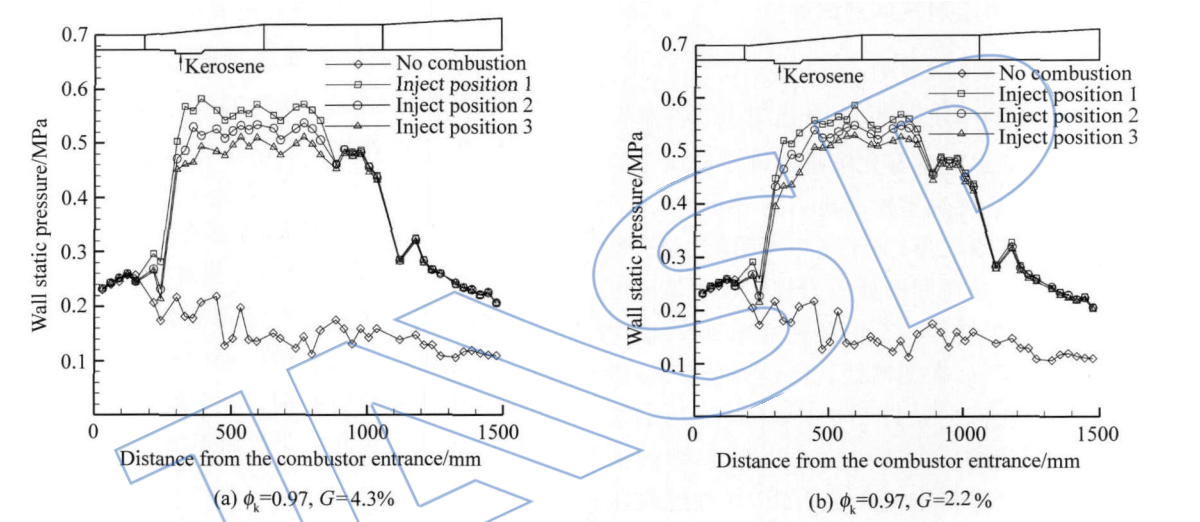


图 8 不同喷射位置燃烧室壁面压力分布
Fig. 8 Wall pressure distribution with different inject position

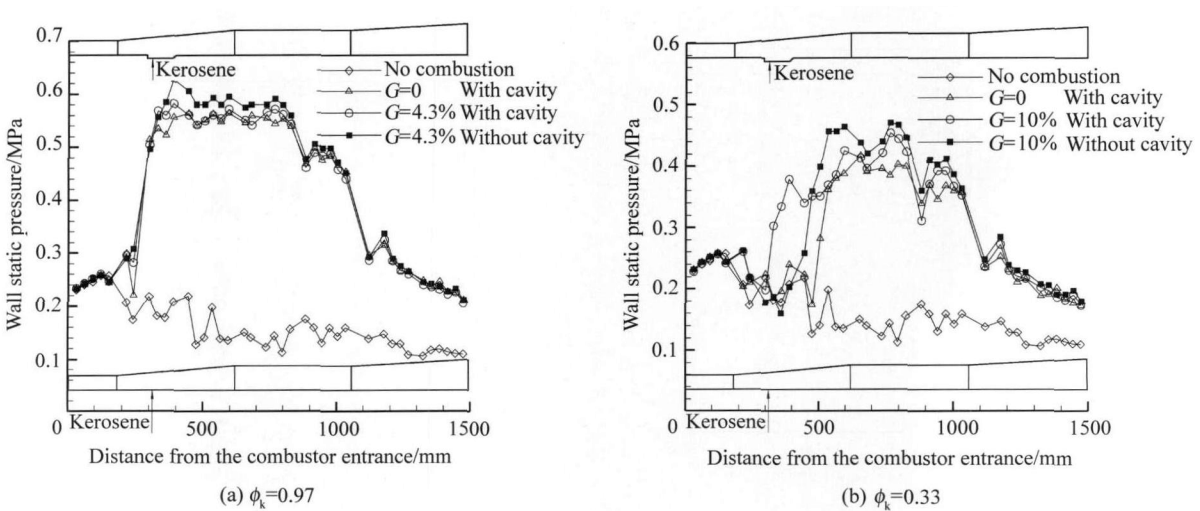


图 9 有无凹槽壁面压力分布
Fig. 9 Wall pressure distribution with/ without cavity

果是相近的,均能实现煤油的成功点火.另外,气泡雾化喷嘴的使用提高了煤油的雾化效果,使得煤油在没有凹槽内气体强烈的剪切力作用下依然能实现很好的雾化和蒸发.同时,由于没有使用凹槽火焰稳定器,燃烧室中的气流由于少了凹槽的影响,使得压力损失得以减小,所以在不使用凹槽时燃烧室的压力要高于相同工况下使用凹槽的情况.

为了研究加入氢气的量与煤油能否成功点火之间的关系,本文在不使用凹槽的工况下进行了多次试验,结果发现在试验中的来流条件下,要实现各流量下煤油的成功点火氢气的最小流量为 3.3 g/s ,低于此流量煤油均不能成功点燃.

图10为不使用凹槽火焰稳定器的条件下,煤油当量比 $\phi_k = 0.97$ 分别加入 3.3 g/s 和 4.2 g/s 的氢气时燃烧室壁面压力分布.从图中可以看出两者壁面压力几乎没有区别,这说明气泡雾化喷嘴中加入的氢气主要起到的主要是点火和稳定火焰的作用.由于氢气加入量较小,其对燃烧室壁面压力的影响很小.

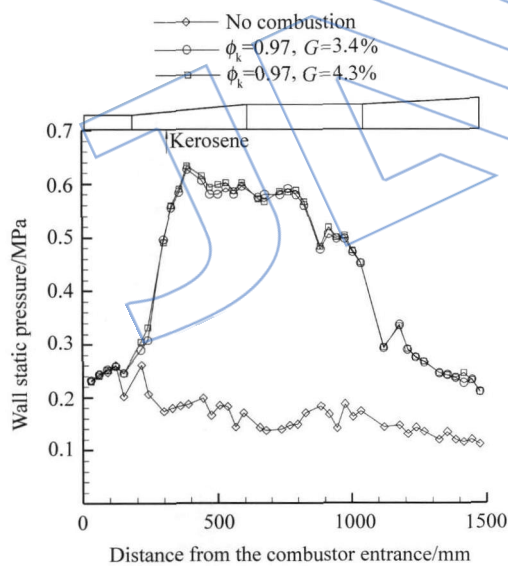


图10 无凹槽加入不同量氢气壁面压力分布

Fig. 10 Wall pressure distribution plus different hydrogen flux without cavity

3 结 论

通过上述试验研究得到以下结论:

1) 凹槽火焰稳定器通过制造高温低速漩涡区,增加了煤油的停留时间,使煤油在其中得到充分的加热,从而对煤油的点火和燃烧性能起着主

要作用.

2) 凹槽火焰稳定器和使用氢气的气泡雾化喷嘴均提高了煤油喷点附近的温度,取得了较好的燃烧效果.而通过气泡雾化喷嘴加入大量空气和氮气降低了煤油喷点的温度,煤油的点火性能大幅下降.这都说明煤油喷点处的当地温度是影响煤油点火性能的主要因素.

3) 在试验的来流条件下,当通过气泡雾化喷嘴加入的氢气大于 3.3 g/s 时,煤油能够在无凹槽火焰稳定器的条件下实现成功点火和稳定燃烧.而且由于少了凹槽的影响,此时燃烧室压力要高于相同工况下使用凹槽火焰稳定器时的燃烧室壁面压力.

4) 通过气泡雾化喷嘴改善煤油的雾化效果,对超声速气流中煤油燃烧性能的改善十分有限.

参考文献

- [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] Lefebvre A H, Wang X F, Martin C A. Spray characteristics of aerated-liquid pressure atomizers [J]. AIAA J Prop Power, 1988, 4(4): 293-301.
- [5] Lefebvre A H. A novel method of atomization with potential gas turbine application [J]. Indian Defence Sci, 1988, 38: 353-362.
- [6] Lefebvre A H. Atomization and sprays [M]. New York: Hemisphere, 1989.
- [7] Lin K C, Kennedy P J, Jackson T A. Structures of water jets in a Mach 1.94 supersonic crossflow [R]. AIAA Paper 2004-0971, 2004.
- [8] Lin K C, Kennedy P J, Jackson T A. Structures of aerated-liquid jets in high-speed crossflows [R]. AIAA Paper 2002-3178, 2002.
- [9] Yu G, Li J G, Zhang X Y, et al. Investigation of fuel injection and flame stabilization in liquid hydrocarbon-fueled supersonic combustor [R]. AIAA Paper 2001-3608, 2001.
- [10] Yu G, Li J G, Zhao J R, et al. An experimental study of kerosene combustion in a supersonic model combustor using effervescent atomization [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30: 2859-2866.
- [11] Mathur T, Lin K C, Kennedy P. Liquid JP-7 combustion in a scramjet combustor [R]. AIAA-2000-3581, 2000.