

煤油-氢双燃料超声速燃烧点火特性研究

俞刚, 李建国, 陈立红, 黄庆生

(中国科学院力学研究所高温气体动力学研究开放实验室, 北京 100080)

摘要:煤油-氢双燃料的超声速燃烧室中的自点火和燃烧稳定特性在直联式试验装置上进行了实验研究。实验空气总温 1650 ~ 1980 K, 总压基本保持在 1.8MPa 左右, 燃烧室进口 M 数为 2.5。用激光粒度仪测量了在加压下煤油的雾化程度。为了寻找能点燃并维持煤油稳定燃烧的最低氢当量比, 设计加工了四种不同构型引导火焰与凹稳焰一体腔结构, 利用氢引导火焰局部地加速煤油的化学反应和凹腔的联合促进作用与优化结合, 发现在没有强迫点火能源条件下点燃并维持煤油稳定燃烧的最低氢当量比能降低至 0.03。燃烧室的性能用简化的一维计算机程序 SSC-3 作了初步估算。在长度 425mm 的燃烧室中获得了煤油的燃烧效率 50%。引导火焰凹腔一体化结构对点火特性和性能的影响作了讨论。

关键词:煤油; 双燃料; 超声速燃烧; 凹腔; 火焰稳定器

中图分类号: V312⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-3124(2000)01-0063-09

Investigation on selfignition characteristics of kerosene-hydrogen dual fuel in supersonic Combustor

YU Gang, LI Jian-guo, CHEN Li-hong, HUANG Qing-sheng

(LHD, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The investigations on characteristics of selfignition and flame sustaining for the kerosene-hydrogen dual fuel were conducted in direct-connect supersonic combustor. The experiments were conducted with stagnation temperature varied from 1650 to 1980 K and stagnation pressure kept 1.8MPa and a fixed entrance Mach number 2.5. The atomization of the pressurized kerosene was measured by a laser particle sizer. Four pilot flame and recessed cavity flameholder integrated modules with different configuration were tested to seek the minimally required hydrogen equivalence ratio for kerosene ignition. Under the combined promotion of pilot hydrogen flame for the locally accelerating the kerosene reaction and the recessed cavity the minimally required hydrogen equivalence ratio 0.03 was found in an optimized condition. The performances of the combustor were preliminary estimated by the home developed code SSC-3. A combustion efficiency of 50% was ob-

收稿日期: 1999-10-20

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (19789202)

作者简介: 俞刚 (1938-), 男, 上海市人, 中国科学院力学研究所研究员。

tained in a combustor with length of 425mm. The effects of configuration of integrated module on combustor performances were discussed.

Key words: kerosene; dual fuel; supersonic combustion; recessed cavity; flameholder

0 前 言

经过数十年的研究,飞行 M 数小于 8 的氢超燃冲压发动机技术已接近成熟。然而氢气的密度小,单位质量的体积大,妨碍了实际应用,特别是军事应用。液体燃料,特别是煤油,容易储存,便于携带,然而作为超燃冲压发动机的燃料还必须解决许多问题。首先遇到的问题是煤油的雾化汽化和在超声速气流中的混合与化学反应能否满足超燃冲压发动机的要求。基本限制来自发动机所允许的气体驻留时间只有不足 1ms。煤油化学反应比氢慢几个数量级,据 V. B. Routovsky 的研究,温度 1000K、0.1MPa 下的煤油点火滞后时间为 100ms^[1]。仅此一条就可以设想,煤油用于超燃冲压发动机的困难有多大。起初的解决的办法是加燃点低的硼烷,硅烷等作助燃催化剂,但是带来的不安全和有毒的问题^[2]。Mastre 直接将煤油注入超声速气流中,发现燃烧室进口气流必须大大超过煤油的燃点才能自燃^[3]。后来发现碳氢燃料在氢附加的情况下点火滞后时间可以大大缩短以后,主要的注意力放在吸热碳氢燃料的研究上,例如甲基环己烷。通过吸收机体的热量达到闪点,在催化剂作用下裂解变成气态的小分子碳氢化合物和氢。也许这是一条较好的途径,然而这条途径涉及技术面宽、复杂、投资大。其他的途径主要有煤油-氢双燃料,注意到 V. N. Avrashkof 的研究,他设计了微支架注射结构,煤油通过位于氢引导火焰的上游微支架结构注射^[4]。此外,M. Owens 利用了氢引导火焰,煤油在引导火焰下游的凹腔中注射,借助等离子体火炬的帮助实现点火燃烧,获得了最低氢当量比为 0.02^[5]。煤油在氢火焰的上游还是下游注射,各有优缺点。煤油在上游注射增加了煤油雾化汽化的距离,但是氢火焰有可能将冷煤油淋灭。煤油下游注射优缺点正好相反,便于点火,但是不利于雾化和汽化。我们在两年前的研究中发现了凹腔对自点火极限的重要促进作用^[6]。差不多同时 R. A. Baurle^[7],A. Ben Yakar^[8]等人也在进行凹腔的研究。其他还必须提出的是 APL/JHK 的高温富油双燃烧室方法,我国司徒明也正在研究之中。

我们试图从双燃料(煤油/氢)的超声速燃烧入手,利用氢引导火焰与凹腔的联合促进作用并找到优化的条件,研究在没有外界强迫点火能源的情况下,通过反应速度快的氢气自燃引导火焰加速煤油的化学反应,找到实现煤油/氢双燃料自点火并维持稳定燃烧所需的氢气最低当量比,同时探索燃料喷注方式与燃烧室几何形状对燃烧的影响。

研究双燃料是因为理论上氢是煤油超声速燃烧不可缺少的辅助成分。如果技术上能实现双燃料中的氢成分降到实际应用可以接收的程度,那么双燃料不失为可以成为与吸热碳氢燃料平行的另一条途径,而得到合适的应用。

实验是在氢燃烧补氧直联式超声速试验台上进行的,实验空气总温可达 2000K、总压为 1.0~1.8MPa;燃烧室入口 $M = 2.5$ 。基本上可以模拟飞行 M 数为 7 的冲压发动机的燃烧工况。为了研究引导火焰凹腔一体化结构对点火燃烧特性和性能的影响,燃烧室的性能用简化的一维计算机程序 SSC-3 作了初步估算^[9]。

1 实 验

1.1 实验装置

煤油 - 氢双燃料超声速燃烧实验装置如图 1 所示。它是在原有的氢气超声速燃烧试验台上改装而成的。燃烧室进口截面为 $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ 。等截面段长 125mm ，呈半角 0.5° 扩张为边界层修正。扩张段长 300mm ，呈半角 1.5° 扩张。系统的详细描述可参阅文献 [9]。

由于燃烧室壁面的凹腔中突扩台阶形成的低速回流区以及突扩台阶形成的局部高温驻点区，对点火与维持火焰有很好的促进作用，因此，采用了引导火焰凹腔一体结构（后面简称凹腔），如图 2 所示，可以方便地通过改变凹腔结构来研究引导氢火焰和煤油射流位置，凹腔形状尺寸对点火和燃烧的影响。四种不同的凹腔如图 2 所示：图 2(a) 为带有矩形槽的燃烧室，煤油喷嘴与氢气喷嘴的距离为 $3h$ (h 为凹腔深度)，凹腔长度有 30mm 和 45mm 两种；图 2(b) 燃烧室为带有梯形凹槽的燃烧室；图 2(c) 为带有矩形槽的燃烧室，煤油喷嘴与氢气喷嘴的距离为 $5h$ ，凹腔长度 45mm ；图 2(d) 所示的矩形凹槽燃烧室，煤油喷嘴与氢气喷嘴的距离为 $7h$ ，凹腔长度 60mm 。引导氢气从台阶的小孔向回流区平行喷射，煤油在台阶的下游向来流垂直对撞式喷射。

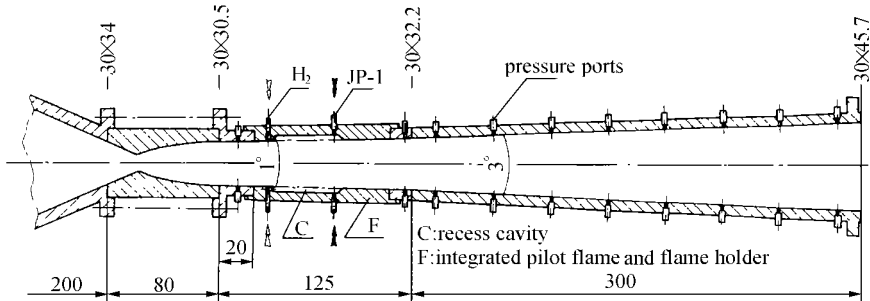


图 1 氢-煤油双燃料超声速燃烧实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of supersonic combustor for hydrogey-kerosene dual fuel

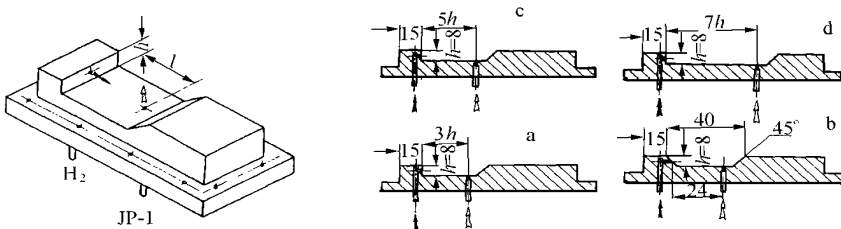


图 2 引导火焰和火焰稳定器一体化结构示意图

Fig. 2 Four pilot flame and recessed cavity flameholder integrated modules

1.2 煤油供应与雾化装置

如图 3 所示煤油的喷射压力由气动煤油泵提供，此煤油泵为活塞式煤油泵，由计算机控制的高压气体推动活塞；活塞再向泵内煤油加压，通过煤油喷射器注入气流。实际供油

量大小根据供油时间的长短及喷油前的油泵柱塞高度和喷油后的高度差得出(换算成容积计算得出)。

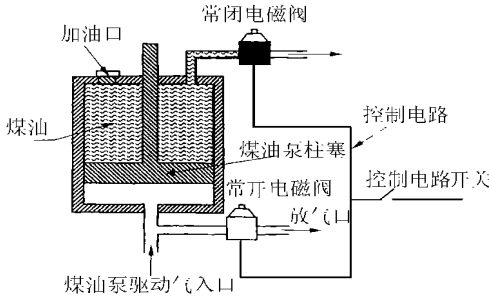


图3 煤油供应系统示意图

Fig. 3 Sketch of kerosene supply system

超过 2s.引导氢气在 2s 时向气流中注入,如果气流的静温、静压达到自燃极限,则燃烧立即开始,这时静压上升并看到氢超声速燃烧火焰。实验证明引导氢气的燃烧在 4.5s 时静压分布达到稳定。因此煤油可以从 4.5s 开始喷入。如果煤油注射后超声速燃烧火焰猛烈的加强,同时燃烧室内的静压分布立即显著的上升,表明煤油燃烧了;若压力不升反降,则说明煤油未燃烧而且氢引导火焰被粹灭,这是煤油燃烧与否的最直观的判据。图 4 为煤油燃烧成功的典型压力分布。

1.3 实验程序

每次实验运行 6.5s,主要实验气体 Air、O₂、H₂ 在加热器点火火焰出现 1s 之后进入加热器,一般达到稳定温度和压力的时间不

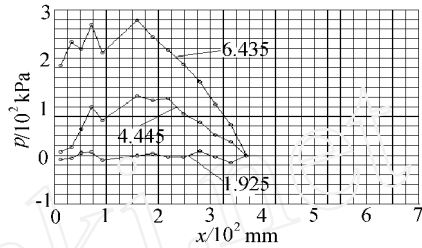


图4 燃烧室静压在不同时间的典型分布

Fig. 4 Profiles of static pressure at different time

2 数据处理

为了处理超声速燃烧的实验数据,我们编制了 SCC-3 程序来计算燃烧室的各种流场参数和燃烧室的燃烧效率。它是由参考文献[9]中的一维近似计算程序 SCC-1 和自编的计算绝热燃烧温度程序 ATM 合并而成。

与氢燃料不同,煤油的化学成分复杂得多。化学反应机理更为复杂。在利用程序 SCC-1 和 ATM 以及处理煤油燃烧实验数据时,必须对煤油的化学成分、化学反应方程式进行简化,确定某些重要的热物理参数(比热、焓)随温度的变化,定义煤油、氢气和空气三体混合物的化学当量比。

2.1 煤油的简化分子式

普通煤油是由许多化学成分和性质都不同的碳氢化合物混合而成的。由于煤油技术资料的缺乏,借用了发表的 RP-1 煤油资料^[10]。

(1) RP-1 煤油可用简化分子式 C₁₂H₂₄代替。

(2) RP-1 煤油的三个主要热力学参数: C_p、H(焓)、S(熵)的经验公式分别为:

$$\frac{C_p}{R} = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4$$

$$\frac{H_T}{R} = a_1 + \frac{a_2}{2} T + \frac{a_3}{3} T^2 + \frac{a_4}{4} T^3 + \frac{a_5}{5} T^4 + \frac{a_6}{T}$$

$$\frac{S_T}{R} = a_1 \ln T + a_2 T + \frac{a_3}{2} T^2 + \frac{a_4}{3} T^3 + \frac{a_5}{4} T^4 + a_7$$

上述经验公式的热力系数值见表 1。

表 1 RP-1 的热力系数值

	1000 ~ 5000K	300 ~ 1000K
a_1	0.36440206E+02	0.39508691E+01
a_2	0.54614801E-01	0.10207987E+00
a_3	-0.16091151E-04	0.13124466E-04
a_4	0.21478497E-08	-0.76649284E-07
a_5	-0.10131180E-12	0.34503763E-10
a_6	-0.63890109E+05	-0.52093574E+05
a_7	-0.15798973E+03	0.21980951E+02

上面提到的 RP-1 的平均分子式 $C_{12}H_{24}$ 及 H_T 的经验公式和热力系数值将会在计算燃烧效率的程序 ATM 中用到。

2.2 双燃料中氢气和煤油有效当量比的计算方法

本实验研究中用到了两种燃料,涉及到计算混合当量比。对于氢气、煤油和空气的燃烧,假设煤油、氢气和空气的摩尔分数分别为 F 、 H 和 A ,且 $F + H + A = 1$ 。首先注意到,由于氢气的量是很小的,有足够的空气可使其完全燃烧(需要 $H / (H/A)_{st}$ 的空气量)。其中 $(H/A)_{st} = 0.418$, $(F/A)_{st} = 0.0116$ 。引导氢气的当量比定义为:

$$\phi_H = \frac{H/A}{(H/A)_{st}} = \frac{H/A}{0.418}$$

如果剩下的空气用来燃烧煤油,则可以定义煤油的有效当量比^[11]:

$$\phi_F = \frac{F/A - H/(H/A)_{st}}{(H/A)_{st}} = \frac{F/A - H/(H/A)_{st}}{0.0116}$$

3 实验结果与讨论

3.1 煤油雾化测量

煤油雾化程度和穿透深度直接影响煤油的点火和燃烧。因此我们用激光粒度测试仪对油雾滴的直径作了测量,结果见表 2。

对三种孔径(0.3mm, 0.4mm, 0.5mm)的单孔喷嘴在不同油压不同距离测量了油雾的平均直径。为了研究油喷嘴几何形状对雾化的影响,设计了不同喷嘴孔深(1.5mm, 3mm)的单孔喷嘴和 40 对喷的双孔喷嘴来进行比较。从表 2 中可以看出,液滴尺寸主要与油压和距离有关,油压越大液滴越小,距离喷嘴越近液滴越小。另外,喷嘴孔深对油雾化影响不大;0.4mm 孔和 0.5mm 孔的雾化程度基本相同,0.4mm 双孔对喷比单孔直喷的雾滴尺寸要大,但油雾的张角也大。

表2 激光粒度测试仪测量煤油雾滴尺寸数据

喷嘴直径 d/mm	喷嘴孔深 l/mm	单孔直喷或双孔 40°对喷	煤油驱动压力 P/MPa	测点距喷嘴距离 x/cm	油滴平均直径 $d/\mu\text{m}$
0.3	1.5	单孔	2.1	20	27.2
0.3	1.5	单孔	4.1	20	21.8
0.3	1.5	单孔	5.6	20	20.8
0.3	1.5	单孔	2.1	60	33.4
0.3	1.5	单孔	4.1	60	32.1
0.3	1.5	单孔	5.6	60	29.3
0.4	1.5	单孔	2.1	20	25.2
0.4	1.5	单孔	4.0	20	20.8
0.4	1.5	单孔	5.5	20	20.2
0.4	1.5	双孔	2.0	20	30.7
0.4	3.0	单孔	2.1	20	27.9
0.4	3.0	单孔	4.1	20	20.8
0.5	1.5	单孔	2.1	20	24.2
0.5	1.5	单孔	4.1	20	20.7

3.2 氢气当量比对点火极限的影响

为了考察氢气当量比对点火极限的影响,实验中煤油流量、空气总温和总压大致固定,仅改变氢气流量。表3给出了在2(a)燃烧室中所得的数。

表3 氢当量比对点火极限影响的实验数据

实验序号	空气总温 T_0/K	空气总压 P_0/MPa	煤油当量比	氢气当量比	着火状态	煤油燃烧效率
1	1989.2	1.83	0.62	0.10	氢着火,煤油未着	
2	1970.4	1.81	0.60	0.17	氢着火,煤油未着	
3	1988.2	1.80	0.58	0.19	煤油着火	0.41
4	1978.6	1.82	0.61	0.22	煤油着火	0.45

由表3看出,在空气总温 1980K、总压 1.8MPa 左右,氢气的当量比要达到 0.19 左右,方能使当量比为 0.62 左右的煤油点燃。图5为实验静压分布。

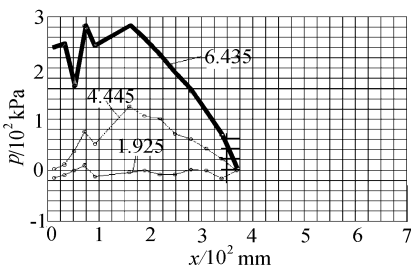


图5 燃烧室静压在不同时间的典型分布

Fig.5 Profiles of static pressure at different time. Cavity a

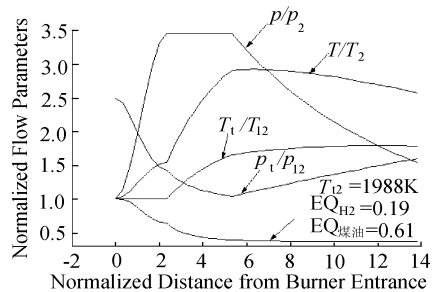


图6 一维计算程序获得的流场参数分布

Fig.6 Profiles of flow field parameters computed by SSC-3, Cavity a

当氢当量比低于 0.19 时,氢气燃烧产生的热量使液体煤油汽化,从而使燃烧室温度下降到一个较低的水平,该温度低于煤油的着火极限,因此,煤油未点燃,还可能将氢火焰淋熄,充当“灭火剂”。

图 6 为通过数据处理获得的有关流动参数分布。可以看出,静温曲线在扩张段有所下降。静温下降说明煤油燃烧释热不是很强,这从侧面说明了液体煤油燃烧效率不是很高。

3.3 煤油雾化对点火的影响

从表 4 可以看出,在实验空气总温 1980K、总压 1.8MPa,引导氢气当量比 0.19 左右,采用矩形火焰稳定器的情况下,煤油驱动气压要达到 2.1MPa,即要达到 2.1MPa 的雾化程度,煤油当量比为 0.54,煤油才可能着火燃烧。

表 4 煤油雾化(驱动气压)对燃烧影响的实验数据

实验序号	空气总温 T_0/K	空气总压 p_0/MPa	煤油驱动气压 p/MPa	煤油当量比	着火状态	煤油燃烧效率
1	1982.2	1.83	1.30	0.44	氢着火,煤油未着	
2	1990.6	1.80	1.70	0.49	氢着火,煤油未着	
3	1975.4	1.81	2.10	0.54	煤油着火	0.43
4	1986.4	1.80	2.50	0.58	煤油着火	0.41

3.4 凹腔形状对燃烧的影响

表 5 梯形凹槽火焰稳定器对燃烧影响的实验数据

实验序号	氢气当量比	煤油驱动气压力 p/MPa	煤油当量比	着火状态	煤油燃烧效率
1(基本工况)	0.193	2.1	0.54	氢着火,煤油未着	
2(加大氢量)	0.210	2.1	0.54	氢着火,煤油未着	
3(继续加氢)	0.231	2.1	0.54	煤油着火	0.40
4(油压提高)	0.194	3.0	0.60	氢着火,煤油未着	
5(继续升压)	0.193	3.5	0.64	煤油着火	0.36

从表 5 可以看出,与凹腔 a 的结果不同,在同样的实验空气总温 1980K、总压 1.8MPa,氢气当量比 0.19 左右,煤油驱动气压力 2.1MPa 的工况下,采用凹腔 b 梯形火焰稳定器是不能使煤油着火燃烧的。主要原因是梯形凹腔没有突扩台阶形成低速回流区。

为了研究凹槽长度对点火的影响,我们固定煤油喷嘴位置在 3h 而改变凹槽长度从 30cm 到 45cm。试验结果表明,在相同的空气总温、总压和相同的煤油驱动压力下,45cm 凹槽所需的最小引导氢气当量比也是 0.19,与 30cm 长凹槽的结果相同。这说明煤油喷嘴下游的前向台阶对煤油的点火影响不大。

3.5 总温的影响

表 6 给出了固定总压和燃料当量比,改变总温获得的实验结果。

从表 6 可以看出,在空气总压 1.8MPa,氢当量比 0.19,煤油驱动气压力 2.1MPa,采用凹腔 a 时,空气总温最低可以达到 1712K 左右仍能点燃煤油。

表6 实验空气总温对燃烧影响的实验数据(凹腔 a)

实验序号	空气总温 T_0 /K	空气总压 p_0 /MPa	氢气当量比	煤油驱动气压 p /MPa	着火状态	煤油燃烧效率
1(基本工况)	1979.1	1.82	0.191	2.1	煤油着火	0.43
2(降总温)	1800.2	1.82	0.192	2.1	煤油着火	0.35
3(降总温)	1712.6	1.82	0.191	2.1	煤油着火	0.31
4(降总温)	1680.4	1.83	0.194	2.1	氢着火,煤油未着	

3.6 氢气喷嘴与煤油喷嘴的距离对燃烧的影响

前面的结果都是在燃烧室中氢气喷嘴与煤油喷嘴的距离为 3h 下获得的。为了考察氢气喷嘴与煤油喷嘴的距离对燃烧的影响,我们将煤油喷嘴与氢气喷嘴的距离加长到 5h 和 7h。即凹腔 b 和 d。

表 7 和表 8 给出了实验结果。可以看出,5h 燃烧室的最低氢气当量比可以小到 0.09 左右,而 3h 燃烧室的最低氢气当量比是 0.19,差别非常明显。更重要的发现是,7h 燃烧室比 5h 燃烧室更容易点火,当量比 0.03 就可以将煤油引燃,而且燃烧效率比 3h 和 5h 燃烧室高。7h 燃烧室的另一个特点是很容易发生热壅塞,特别在煤油当量比 0.6 以上时几乎总发生热壅塞。这说明,随着氢气喷嘴与煤油喷嘴距离的加大,对氢气的需求量大大减小了。

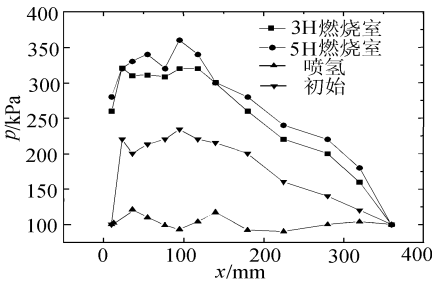


图7 3H和5H凹腔静压分布比较

Fig.7 Compares of static pressure profiles between cavity c and d

初步分析认为,如果氢气喷嘴距煤油喷嘴太近,氢火焰尚未来得及充分燃烧便被液体煤油淋熄了,为此,只有加大氢气流量,增加氢的释热量,才能使氢火焰不至被全部淋熄。然而,在燃烧室长度一定的情况下,并非氢喷嘴与煤油喷嘴距离越大越好,这会使煤油的有效燃烧行程缩短,煤油燃烧不充分。

图 7 为 3h 和 5h 燃烧室的静压曲线分布的比较。二者的工作参数均为:空气总温 1712K、总压 1.8MPa,氢气当量比 0.19,煤油驱动气压 21MPa。从图 7 可以看出,5h 的压力峰值要比 3h 的高。

表7 凹腔 c 实验数据

实验序号	空气总温 T_0 /K	煤油压力 p /MPa	氢气当量比	着火状态	煤油燃烧效率
1(基本工况)	1712.2	2.1	0.19	煤油着火	0.48
2(降 H ₂ 当量比)	1715.6	2.1	0.09	煤油着火	0.38
3(降 H ₂ 当量比)	1723.4	2.1	0.08	煤油未着火	
4(降煤油压力)	1703.5	1.8	0.09	煤油未着火	
5(降空气总温)	168.9	2.1	0.09	煤油未着火	

表8 凹腔 d 实验数据

实验序号	空气总温 T_0 /K	煤油压力 p /MPa	氢气当量比	着火状态	煤油燃烧效率
1	1665	2.1	0.075	煤油着火	0.467
2	1670	2.1	0.025	煤油着火	0.581
3	1665	4.0	0.022	煤油着火	热壅塞

4 总 结

(1) 对煤油-氢双燃料超声速燃烧的点火与燃烧性能作了初步的研究, 实验空气总温 1650 ~ 1980K 左右、总压 1.8MPa 左右, 燃烧室进口 M 数为 2.5, 基本上模拟飞行 M 数为 7 的超燃冲压发动机中的燃烧工况。

(2) 在没有强迫点火能源的条件下, 利用氢引导火焰与凹腔稳焰结构的联合促进作用能使煤油点火维持稳定燃烧, 发现引导氢的注射点与煤油注射点的距离对点火特性有重要的影响。在实验其他条件相同的情况下, 3h 燃烧室所需氢气的最小当量比在 0.19 左右, 而 5h 燃烧室所需的氢气的最小当量比在 0.09 左右, 7h 燃烧室需要的引导氢当量比可降低到 0.03。

(3) 凹腔形状对点火也有影响。在实验其他条件相同的情况下, 梯形凹腔比矩形凹腔的点火性能差。

(4) 试验空气总温在 1650k ~ 1980k 范围内对自点火的影响效果不明显。在本研究中, 总温最低达到 1650K 时, 煤油-氢双燃料还能点燃并保持火焰稳定。

(5) 通过一维简化模型数据处理发现, 煤油的燃烧效率只有 50% 左右。由于本实验研究采用的燃烧室试验段较短, 燃料未来得及与空气充分混合进行燃烧, 因此燃烧效率不太高。

致谢: 参加研究工作的还有李英、钱大兴、杨仕润, 作者对他们所作的贡献表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] Veretennicov V G. Study of kerosene autoignition. Moscow State Aviation Institute, Technical Report No F61708 - 96 - WO286 Oct. 1997.
- [2] Mestre A and Viaud L. Combustion supersonique dans un canal cylindrique. In: supersonic flow, chemical Processes and Radiative Transfer, 1964, 1: 93 ~ 111.
- [3] Waltrup P L. Liquid fueled supersonic combustion ramjets: A Research Perspective of the Past, Present and Future, AIAA Paper 86 - 0158, 1986.
- [4] Avrashkov V, Baranovsky S and Levin V. Gasdynamic features of supersonic kerosene combustion. In: a Model Combustion Chamber, AIAA Paper 90-5268, 1990.
- [5] Owens M and Segal C. Combustion of kerosene in a supersonic airstream-thermal efficiency of selected injection configurations AIAA Paper 96-3140, 1996.
- [6] Li J G, Yu G, Zhang Y, Qian D X. Experimental studies on selfignition of hydrogen-air supersonic combustion J of Propulsion and Power, 1997, 13(4).
- [7] Gruber M, Jackson K, Mathur T, Billig F. Experiments with a cavity based fuel injector for scramjet applications. ISABE-99715, 1999.
- [8] Berr-Yakar A, Kamel M R, Morris C I and Hanson. Hypersonic combustion and mixing studies using simultaneous OH-PLIF and Schlieren Imaging, AIAA Paper 98-0940, 1998.
- [9] Yu. G, Li J G, Zhao J R, Qian, D X. Hydrogen-air supersonic combustion study by strut injector. AIAA Paper 98-3275, 1998.
- [10] Wang T S. Thermo-kinetics characterization of kerosene/ RP-1 combustion. AIAA Paper 96-2887, 1996.
- [11] Yu G, Law C K and Wu C K. Laminar flame speeds of hydrocarbon + air mixtures with hydrogen addition. Combustion and Flame, 1986, 63: 339 ~ 347.