2012 年 12 月 北京航空航天大学学报 December 2012
第38卷 第12期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol. 38 No. 12

超燃燃烧室等离子体点火和火焰稳定性能

韦宝禧 欧 东 闫明磊 徐 旭

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 为了研究热等离子点火器在超燃冲压发动机中的应用,在来流马赫数 2.0 工况下,针对乙烯和氢气两种燃料,进行了超燃环境中等离子体点火的试验和仿真研究. 在来流总温 1 500 ~ 1 950 K,燃料当量比 0.1 ~ 0.55 范围内对等离子点火器的点火和改善燃烧性能的性质进行了详细分析. 结果显示:对于氢气和乙烯燃料,等离子体点火器使两种燃料的点火性能均得到明显改善,点火延迟时间大大缩短,燃料着火范围扩大、贫燃极限当量比降低. 但未观察到其在加速掺混以及改善燃烧性能方面的明显作用. 进行了与乙烯燃烧试验对应的数值仿真工作,选用了两种乙烯化学反应模型进行对比研究. 仿真结果显示:8 步 9 组分反应模型与试验结果符合较好,而 3 步 6 组分反应模型过高的估计了反应剧烈程度,燃烧室压力值偏高,压力起始上升位置偏向上游. 所用的 8 步模型比 3 步模型更适合于超燃燃烧室中乙烯反应的模拟.

关 键 词: 等离子点火器; 超声速燃烧; 多步反应模型

中图分类号: V 231.2^{+}4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)12-1572-05

Ignition and flame holding ability of plasma torch igniter in a supersonic flow

Wei Baoxi Ou Dong Yan Minglei Xu Xu

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

Abstract: In order to study the application of plasma torch igniter in the scramjet engine, a numerical and experimental study was conducted in a Mach 2 supersonic flow with the ethylene and hydrogen. A detailed analysis of ignition and flame holding characteristics was done at the fuel equivalence ratio from 0.1 to 0.55, and the total temperature between 1 500 K and 1 950 K. The results show that the plasma torch has a positive effect on the ignition process, but the promotion on combustion efficiency is unapparent. An 8 step 9 species and a 3 step 6 species reaction model were used to simulate the ethylene supersonic combustion. The numerical results of 8 step reaction model agrees well with the experimental results.

Key words: plasma torch; supersonic combustion; multi-step reaction model

火焰稳定技术是超燃冲压发动机的关键技术之一. 针对超燃燃烧室流场超声速的特点,如何在有限的时间和空间内获得尽可能高的燃料燃烧效率是超燃火焰稳定技术的核心问题.

上世纪 70 年代以来,美国、俄罗斯、日本等国相继研制了用于超燃燃烧室点火的等离子体发生器,对其在超声速燃烧中的点火及火焰稳定作用开展了广泛的研究[1-6]. 文献[5]针对等离子体发生器不同供给气体、不同喷注位置对点火和燃烧的影响开展了试验研究. 结果表明,等离子体发生器布置于燃料喷嘴下游对燃烧的影响要远远好于布置于喷嘴上游,以氮气为介质优于氩气和氢气;国内宋文艳[6]在凹槽侧壁处设置了自行研制的等离子体点火器,成功点燃煤油,并与相同条件下火花塞点火试验进行比较,认为等离子体点火使煤油燃烧更充分.

收稿日期: 2011-05-15; **网络出版时间**: 2012-12-20 17:22

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121220.1722.006.html

作者简介: 韦宝禧(1983-),男(壮族),广西柳州人,博士生,weibaohuasky@163.com.

本文以氢气和乙烯为燃料,研究热等离子体点火器在超燃燃烧室中的应用,以期探求等离子体在点火和改善燃料燃烧性能方面的作用.

1　试验设备与设置

1.1　直连式超燃试验台及等离子体发生器介绍

本文试验在北京航空航天大学超燃冲压发动机直连式试验台上进行,超声速燃烧试验装置的详细描述可参见文献[7]. 超燃燃烧室由 4 部分组成:隔离段、一段燃烧室、二段燃烧室和三段燃烧室. 燃烧室采用单边扩张结构,全长 1 500 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. 二段燃烧室上壁面装有长径比为 9 的凹槽火焰稳定器,煤油喷孔与等离子体发生器喷孔均在凹槽内,如图 2 所示.

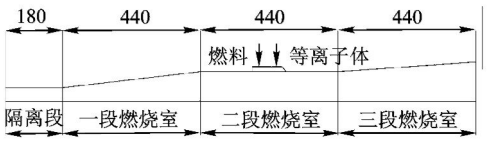


图 1　燃烧室结构示意图(单位:mm)

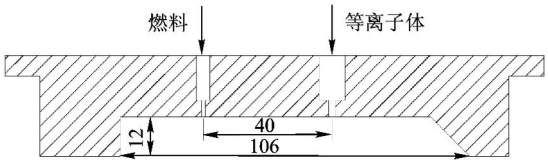


图 2　凹槽火焰稳定器结构示意图(单位:mm)

直流电弧热等离子体发生器是最常见的应用于超燃燃烧室的等离子点火器,它的特点是温度高,而且单位体积的热功率密度极高,在高温下等离子体存在着大量的电子、离子以及化学活性很高的原子和原子基团. 这种等离子体发生器的结构简单,能够合适的安装在燃烧室的壁面上.

本试验所用等离子体点火器是根据超燃试验台的燃烧室尺寸来自行设计的直流电弧等离子体发生器,由负极、正极、内腔体、进气口、进水口、回水口及出气口和电源控制系统组成,输入功率约为 1 kW. 点火器的正负极间隙很小,当接通电源时,点火器正负极间的介质被击穿,形成电弧. 作为点火器工质的气体(本试验选择氮气)通过电弧时被加热,然后形成的高温等离子体从喷嘴处喷入燃烧室点燃部分燃料、空气混气,并进一步强化燃料与空气的混合,达到在短距离内点燃大部分混气的目的.

1.2　试验工况

试验来流马赫数为 2.0,通过改变加热器工况实现不同来流总温的变化. 根据之前的试验[7],本文选用较易实现燃料稳定燃烧的长深比为 9 的凹槽作为基体. 燃料喷嘴和等离子体点火器均布置于凹槽内. 燃料喷嘴孔径为 1.2 mm,等离子点火器喷嘴孔径为 2.0 mm.

图 3 显示了试验设备运行的典型时序. 整个试验过程中等离子体点火器始终处于工作状态. 加热器压力(来流总压)建立约 0.2 s 后乙烯燃料喷入燃烧室,紧接着乙烯燃料被点着,燃烧室压力开始上升,燃烧室工作 1 s 后,试验结束,相继关闭各阀门,并通入吹除氮气.

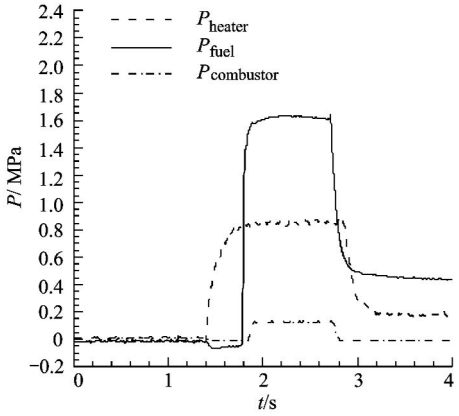


图 3　设备运行典型时序图

表 1 为试验工况及试验结果统计表,总温 T_t、总压 P_t、当量比 φ 和燃烧室最高压力与燃烧室入口压力比值 P_{max}/P_1 等主要试验参数均列于表中. 最高压力与入口压力比值未填的试验(算例 1,2,9,10)表示未能实现燃料的稳定燃烧.

表 1　试验工况和结果

算例	燃料	T_t/K	P_t/MPa	φ	P_{max}/P_1	等离子体
1	H_2	1 500	1.75	0.2		
2	H_2	1 600	1.75	0.1		
3	H_2	1 700	1.75	0.1	1.44	
4	H_2	1 600	1.75	0.15	1.75	
5	H_2	1 600	1.75	0.2	2.11	
6	H_2	1 600	1.75	0.1	1.44	有
7	H_2	1 600	1.75	0.15	1.81	有
8	H_2	1 600	1.75	0.2	2.17	有
9	C_2H_4	1 750	0.9	0.22		
10	C_2H_4	1 750	0.9	0.55		
11	C_2H_4	1 750	0.9	0.22	2.00	有
12	C_2H_4	1 850	0.9	0.12	1.33	
13	C_2H_4	1 850	0.9	0.22	2.17	
14	C_2H_4	1 850	0.9	0.55	2.63	
15	C_2H_4	1 850	0.9	0.12	1.33	有
16	C_2H_4	1 850	0.9	0.22	2.08	有
17	C_2H_4	1 850	0.9	0.55	2.63	有
18	C_2H_4	1 950	0.9	0.55	2.42	
19	C_2H_4	1 950	0.9	0.55	2.42	有

2 数值仿真

鉴于多步化学反应模型对计算机要求较高，本文的仿真工作将试验对应的工况简化为二维问题，主要研究两种乙烯化学反应模型对超声速燃烧的模拟能力.

2.1 网格及收敛条件

计算时燃烧室全部采用结构化网格并且在凹槽火焰稳定器区域局部加密，壁面边界层采用等比法加密. 当满足下列条件时认为解已经收敛：①各控制方程的残差小于 10^{-3}；②进出口的流量误差小于 0.01；③监视点压力稳定.

2.2 流场计算模型

本文使用计算流体力学软件 Fluent 完成乙烯超声速燃烧等离子体点火的数值模拟，该软件采用有限体积法求解雷诺时均 N-S 方程，选择基于密度的耦合求解器，湍流模型采用标准 k-ε 模型，求解精度均为二阶精度. 针对乙烯点火燃烧试验进行了数值模拟分析，分别使用了 3 步 6 组分和 8 步 9 组分两种乙烯化学反应模型进行对比计算[8-9].

等离子体作为一种电离状态下的气体包含了分子、原子、电子及离子成分，所以对于等离子体模型的准确模拟不仅应包括气体内能，还应该包括振动能量及电子能量. 文献[10]的研究已经表明：在为冲压发动机设计的等离子体发生器所产生的气体中，电子及离子的成分很小，并且对于燃料的点火和燃烧几乎不起任何作用，因此本文中将这两种成分排除，并将等离子体射流模型简化为高温氮分子.

本文对等离子体射流模型作如下基本假定：①等离子体射流为稳态结构；②文献[10]中研究所得的等离子体发生器射流温度分布满足：$T=(T_0-T_w)[1-(r/R)^{2.3}]+T_w$. 其中 T_0，T_w 分别为射流中心温度 10 127 K 与壁面温度 700 K，其平均温度在 4 000 K 左右，为了方便选取等离子体输运性质的数据，在本文的算例中取其射流温度为 4 000 K进行计算；③等离子体射流的密度、粘性系数、热导率、比热容在不同的温度区间内都取为温度的函数.

3 结果与分析

3.1 试验结果及分析

将等离子点火器应用于超燃冲压发动机燃烧室，最需要关心的是其点火和改善燃烧性能两方面的作用. 接下来根据所得试验结果，具体分析热等离子体对于氢气和乙烯燃料的点火和促进燃料燃烧的性能.

3.1.1 等离子点火器点火性能研究

点火延迟时间是评判点火性能的一个重要参数. 在氢气、乙烯低当量比工况下进行了点火延迟时间的试验研究. 从算例 1 ~ 3 试验结果可知，以氢气为燃料，当来流总温为 1 600 K 时，贫燃极限在 $\varphi=0.1$ 附近. 图 4 为燃烧室凹槽内压力测点采集到的压力信号，4 次试验来流条件相同，来流总温均为 1 600 K. 对于无等离子点火器的工况，该点所测到的压力并不是从喷入氢气后立即上升的，在试验控制时序中，氢气燃料在 1.8 s 时刻喷入凹槽，而这两个当量比下，压力上升都有所滞后，其中 $\varphi=0.2$ 的算例 5 试验其燃烧室压力从 2.2 s开始明显上升，而 $\varphi=0.15$ 的算例 4 试验，压力更是延迟到 2.4 s 才上升，该现象表明：当来流总温较低时，小当量比的氢气在燃烧室凹槽内的燃烧从点火时间上来看存在着一定的点火延迟，当量比越小，点火延迟时间越长.

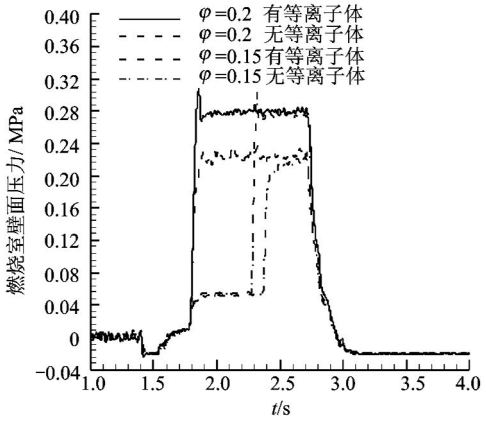


图 4 H_2 凹槽压力测点信号曲线(算例 4,5,7,8)

从算例 7 和算例 8 试验结果可见，当加入等离子体发生器后，凹槽内的压力上升几乎与氢气喷入的时间相同，说明等离子体发生器所产生的高温等离子体射流可以显著减小氢气的点火延迟时间，能够迅速的点燃喷入燃烧室内的氢气.

图 5 为乙烯试验的压力时间曲线. 与氢气试验结果相似，等离子点火器对乙烯燃烧的点火延迟也有明显的改善作用.

3.1.2 等离子点火器对改善燃烧性能的研究

在来流总温 1 600 K 工况下，进行了相同当量比下的等离子体发生器对燃料燃烧性能改善效果的试验研究. 图 6 为各个当量比下等离子体发生器工作与不工作 2 种工况的燃烧室壁面压力分布对比图. 对于当量比 $\varphi=0.1$ 的情况，单喷氢气燃

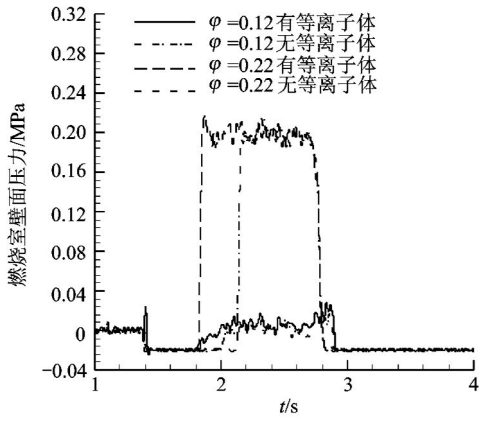


图 5　C_2H_4 凹槽压力测点信号曲线(算例 12,14,15,17)

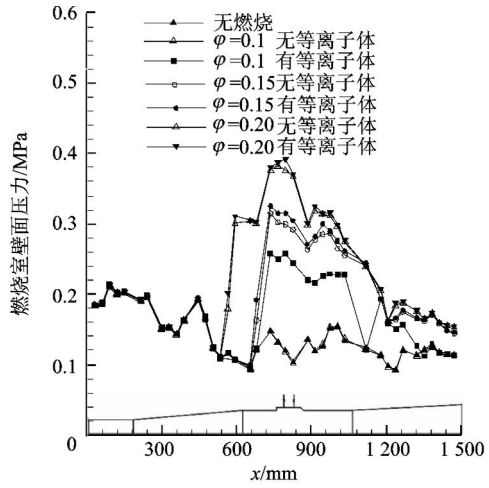


图 6　燃烧室壁面静压分布图(H_2 T_0=1 600 K)

烧室不着,而在等离子体发生器的高温射流作用下,燃烧室壁面压力上升迅速,氢气喷进燃烧室后立即开始燃烧;对于其余两个当量比下的情况,加等离子体发生器时氢气燃烧得到的壁面压力峰值略高于不加等离子体发生器时,等离子体发生器所产生的高温射流对于氢气在燃烧室内的燃烧并没有明显的促进作用,这与氢气本身容易完全燃烧的性质有关.

图 7 显示了不同当量比下,乙烯燃烧的壁面压力分布图.

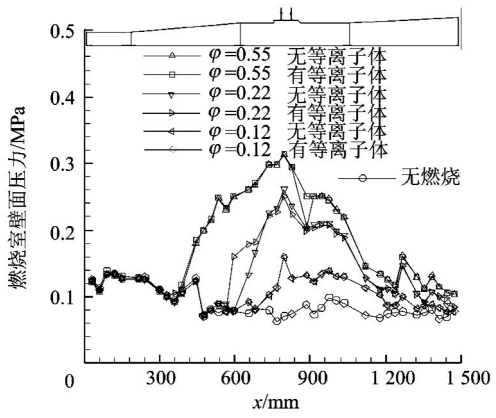


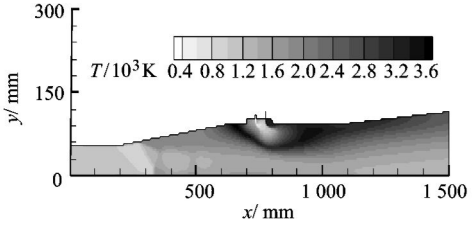
图 7　燃烧室壁面压力分布(C_2H_4 T_0=1 850 K)

从图 7 中可以看到,当来流总温为 1 850 K 时,不同当量比的乙烯均在燃烧室内燃烧,使得壁面压力在凹槽处出现了峰值. 值得注意的是,加与不加等离子体发生器并没有使壁面压力出现明显的差别,这与氢气的点火试验结果相似,等离子体发生器并没有对乙烯的燃烧性能产生明显的改善效果.

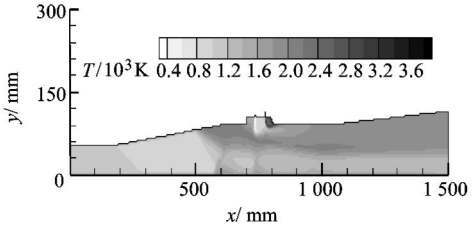
3.2　数值仿真结果及分析

在进行乙烯点火燃烧试验的同时,对其相应工况下的燃烧流场也作了数值模拟分析. 分别使用了两种乙烯化学反应模型进行对比计算,包括 3 步 6 组分反应模型、8 步 9 组分反应模型.

图 8 为来流总温 1 850 K 时,在当量比 0.22 下(算例 16)使用两种化学反应模型计算得到的仿真结果的燃烧室静温分布图. 从图中可以看到,3 步模型凹槽附近燃烧剧烈区域温度在 2 800 K 左右,而 8 步模型相同区域仅为 2 000 K 左右. 这一现象说明 8 步模型由于中间产物较多,反应剧烈程度远低于 3 步模型.



a　3 步模型



b　8 步模型

图 8　燃烧室静温分布图

图 9 为算例 16 燃烧室壁面静压分布仿真与试验结果对比图. 从图中可以发现:

1) 8 步化学反应模型计算结果壁面压力分布与试验结果符合较好,准确地捕捉到了燃烧室压力上升段、下降段的位置,计算得到的压力峰值也与试验测得的压力峰值接近;与 8 步模型的结果相比,3 步化学反应模型计算的压力峰值均高出试验测得值约 0.1 MPa,3 步反应模型也较好地捕捉到了压力下降段的位置,但没有准确地捕捉到压力上升的位置,计算得到的压力上升点明显比试验测得的压力上升位置更加提前. 这些现象说明 3 步模型化学反应速度快、放热多,对上游压

力的影响大于实际情况. 相比之下,8 步模型由于反应步数与燃烧组分较多,更加符合实际乙烯燃烧放热的强度. 乙烯计算与试验的结果能够较好地符合,证明了本文所进行的流场燃烧计算能够在一定程度上反映出真实的燃烧过程.

2) 在使用 3 步与 8 步乙烯化学反应模型的流场壁面压力结果中,等离子体发生器所产生的高温射流并没有对燃烧室中乙烯的燃烧性能有明显的促进作用,使用与不使用等离子体发生器的壁面压力峰值基本相同,这与试验中的结果相一致,说明对于乙烯在超声速燃烧室中的燃烧,等离子体发生器能够减小其点火延迟时间,但对燃烧性能的改善效果不明显.

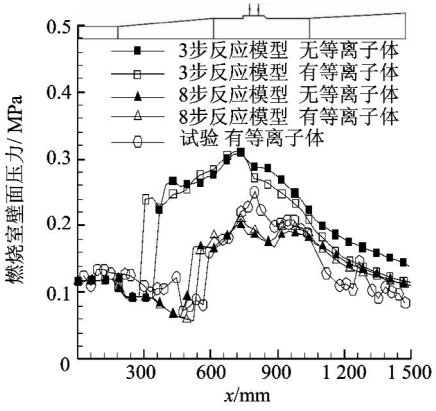


图 9 燃烧室壁面压力曲线(算例 16)

4 结 论

1) 在燃烧室来流总温较低时,氢气与乙烯均不能自燃,文中设计的等离子体发生器能够增大燃料稳定燃烧当量比范围,有效的提高燃料点火能力.

2) 在燃烧室来流总温较高时,以氮气为介质的等离子体发生器所产生的高温等离子体流能够大大缩短燃料点火延迟时间,但是未观察到其对改善燃料燃烧性能有明显的作用.

3) 分别采用乙烯 3 步化学反应模型与 8 步化学反应模型,模拟了乙烯当量比 0.22 时的等离子体点火燃烧流场. 通过与试验结果的对比发现,8 步化学反应模型的计算结果较好地捕捉到了试验测得的压力上升段、下降段的位置以及压力峰值. 而 3 步模型中的燃烧放热要大于实际情况,其压力峰值与压力起始上升位置均偏离较远. 因此认为 8 步化学反应模型更适合于超声速燃烧室的乙烯燃烧流场计算.

参考文献 (References)

[1] Do H, Seong-kyun I, Cappelli M A, et al. Plasma assisted flame ignition of supersonic flows over a flat wall[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(12): 2298-2305

[2] Hyungrok D, Cappelli M A, Godfrey M M. Plasma assisted cavity flame ignition in supersonic flows[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(9): 1783-1794

[3] Leonov S B, Kochetov I V, Napartovich A P, et al. Plasma-induced ethylene ignition and flameholding in confined supersonic air flow at low temperatures[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(2): 781-787

[4] Jacobsen L S. Toward plasma-assisted ignition in scramjets[R]. AIAA-2003-0871, 2003

[5] Kimura I, Aoki H, Kato M. The use of a plasma jet for flame stabilization and promotion of combustion in supersonic air flows [J]. Combustion and Flame, 1981, 42: 297-305

[6] 宋文艳,刘伟雄,贺伟,等. 超声速燃烧室等离子体点火实验研究[J]. 实验流体力学,2006,20(4):20-24
Song Wenyan, Liu Weixiong, He Wei, et al. Experimental investigation of plasma ignition in supersonic combustor [J]. Experiments and Measur in Fluid Mechanics, 2006, 20(4): 20-24 (in Chinese)

[7] 王辽. 超燃冲压发动机燃烧室燃料喷射与火焰稳定的试验研究[D]. 北京:北京航空航天大学宇航学院,2008
Wang Liao. Experimental investigation of fuel injection and flame stabilization in scramjet combustor[D]. Beijing: School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008 (in Chinese)

[8] Baurle R A, Eklund D R. Analysis of dual-mode hydrocarbon scramjet operation at Mach 4-6.5[J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 18(5): 990-1002

[9] Mawid M A, Sekar B. Kinetic modeling of ethylene oxidation in high speed reacting flows[R]. AIAA-1997-326, 1997

[10] Wang Haixing, Chen Xi, Pan Wenxia. Modeling study on the entrainment of ambient air into subsonic laminar and turbulent Argon plasma jets[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2007, 27(2): 141-162

[11] Minato R, Niioka T, Sugiyama H, et al. Numerical analysis of supersonic combustion by a plasma torch[R]. AIAA-2005-3424, 2005

(编 辑:张 嵘)