

污染组分对氢燃料发动机燃烧动力学的影响

刘伟雄^{*}, 贺伟, 李宏斌, 李象远^{*}, 乐嘉陵^{*}

西北工业大学动力与能源学院, 西安 710072;

中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000;

四川大学化工学院, 成都 610065

^{*} 联系人, E-mail: wxliu123@yeah.net; xyli@scu.edu.cn

2008-03-21 收稿, 2008-07-13 接受

摘要 选择氢气及氢气-乙烯混合气体两种燃料, 在风洞加热器中加热空气来开展氢气燃烧的试验研究. 试验结果表明, 两种气体获得的发动机燃烧室稳定压力基本一致, 推力收益基本相同. 但是, 不同加热方式下壁面压力达到平衡值所需的时间明显不同, 采用氢气-乙烯混合气加热时, 燃烧室达到平衡所需的时间较长, 表现为点火延迟时间比氢气加热时增长. 初步从燃烧反应链传递步骤的连续性和含 C 自由基活性两个方面讨论了两种加热方式对点火延迟特性的影响.

关键词
污染组分
燃烧
点火延迟
动力学

获得高焓试验气体是实现地面模拟高超声速飞行状态的关键, 由于具有经济、投资少和效率高等优点, 燃烧加热高焓气体在地面模拟尤其是超燃冲压发动机地面模拟中得到广泛应用. 与飞行环境中的空气不同, 燃烧加热后的试验气体中存在与空气不同的污染组分. 当使用氢燃料加热空气时, 在高温状态下污染组分主要是 H_2O 和自由基, 而使用烃燃料加热空气时, 污染组分主要是 H_2O , CO_2 和自由基. 如何将污染空气来流下获得的性能外推到真实飞行状态下的实际性能, 是发动机研究必须要解决的问题, 因此正确评价和讨论污染组分对后续的燃烧过程的动力学影响对发动机的设计有重要意义.

污染组分的影响依赖于具体条件, 有时甚至出现相反的结论. 因此, 目前还没有可靠的方法来评估和比较不同设备获得的数据, 导致从地面试验向发动机飞行试验的延伸存在不确定性. 由于研究污染组分对发动机性能影响的试验技术复杂, 所以相对于数值模拟, 试验研究报道要少得多¹⁾. Guy 等人²⁾报道了利用 CHSTF 设备(烧氢补氧)和 AHSTF 设备(电弧加

热)针对同一个氢燃料直连式超燃冲压发动机进行对比试验, 匹配两个设备的总温和总压. 结果发现电弧加热设备上获得的推力明显高于燃烧加热设备. 有人进行了 M6(M 表示马赫数)状态下自由射流的氢燃料发动机对比试验, RJTF 设备在 M6 状态可选择蓄热式加热(SAH)或燃烧加热(VAH, 烧氢补氧), 除比热比外, 两种加热方式所获得的喷管出口试验气体的热力学参数都很接近. 试验结果表明, 在燃烧加热方式下发动机模型具有更好的点火性能; 燃料垂直注射并实现稳定燃烧时, 蓄热式加热方式获得的推力较大³⁾. 刘陵等人⁴⁾用电弧加热设备进行过水对超声速燃烧影响的地面试验研究, 在 $M = 2.1$ 状态下共进行了多次喷水污染试验. 由于喷水量很小, 没有采取补氧和加热水等措施, 在台阶后侧壁平行喷射氢气时, 喷水量较大, 燃烧室不能着火, 说明 H_2O 污染的影响不能忽略.

综上所述, 目前对试验气体的污染采用不同加热方式在不同设备上完成, 对污染组分的影响的评价存在困难, 尤其是采用脉冲加热和连续加热两种

1) Tirres G, Bradley M, Morrison G, et al. Flow quality analysis for future hypersonic vehicle testing. 22nd AIAA Aerodynamic measurement technology and ground testing conference. AIAA 2002-2706, 24—26 June 2002, St. Louis, Missouri

2) Guy R W, Rogers R C, Puster R L, et al. The NASA langley scramjet test complex. AIAA 96-3243, 32 AIAA/ASME/SAE/ASEE joint propulsion conference, July 1996

3) Pellett G L, Bruno C, Chinitz W. Review of air vitiation effects on scramjet ignition and flameholding combustion processes. 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint propulsion conference and exhibit. AIAA 2002-3880, 7—10 July 2002, Indianapolis, IN

方式来进行对比评估难度就更大. 用不同设备开展对比研究很难保证两者条件的一致性, 尤其是脉冲与连续的对比, 由于两者壁温的差距, 很难评价污染组分对燃烧动力学和发动机性能的影响. 因此, 本文设计新的试验, 在同一设备上用不同加热方式来产生不同污染组分, 用相同条件和手段来研究燃烧过程, 从而评价污染组分对燃烧动力学的影响.

1 试验方法

试验气体污染组分对超声速燃烧的影响有两个方面, 一方面, 污染组分影响燃烧动力学, 从而影响发动机燃烧室压力的建立过程; 另一方面, 由于污染组分的存在将改变燃烧反应的化学平衡, 进而影响燃烧反应的产物浓度, 这种影响表现为燃烧室平衡压力的变化. 为此作者采用相同研究模型和测试条件来开展研究工作, 具体状态参数为: 来流总温 1650 K, 总压 5.5 MPa, 马赫数 6. 在中国空气动力研究与发展中心 600 mm 口径脉冲燃烧加热风洞上, 通过测试和比较来研究不同来流组分对氢燃料超燃冲压发动机燃烧性能的影响. 该设备主要由富氧空气管、挤压供氢装置、大口径快速阀系统、燃烧加热器、出口 600 mm 型面喷管、试验段、扩压器、真空箱组成. 试验过程如下.

首先, 用大口径快速阀将富氧空气和氢气分别封在富氧高压管和挤压供氢装置内, 发动机模型放置于试验段喷管出口附近的流场均匀区内, 并对试验段和真空箱抽真空. 然后, 同步打开封闭富氧空气和等压供氢装置的快速阀, 这时富氧空气和氢气就通过各自的限流喉道, 按试验所要求的参数进入燃烧加热器; 在加热器内用多个高频电火花塞点火燃烧, 将试验气体加热到所需状态, 这时将燃烧室分为前室和后室的金属膜片瞬时打开, 大流量的高温高压试验气体经喷管膨胀加速到所需状态, 从喷管喷出后, 经过发动机模型进气道压缩, 进入模型内流道, 在发动机燃烧室内与燃料供应系统提供的燃料混合燃烧, 产生的高温高压气体通过发动机尾喷管膨胀, 产生推力. 本次试验主要通过天平测量和压力测量手段, 得到发动机在模拟状态工作时的推阻特性和压力分布.

为了考察不同污染组分对发动机燃烧性能的影响, 需要改变来流工作气体的组成. 我们通过不同燃料在富氧空气中燃烧来加热空气的办法. 本文选择

两种燃料在风洞加热器中加热空气, 一种为纯氢燃料, 另一种为氢-乙烯的混合燃料. 不同燃料加热获得的来流气体, 其气体平衡组成除了水和二氧化碳含量有细微差距外, 其余相同(见表 1). 考虑到本文的目的在于定性探讨污染组分对点火延迟和压力分布等的影响, 并考虑实验成本, 我们暂未采用其他混合比例(如 5:5 等)的实验.

表 1 工作气体平衡组成和热力学参数

气体	平衡组成和风洞驻室热力学参数 ^{a)}						总温	总压
	X _{H₂O}	O ₂	N ₂	CO ₂	比热比	分子量	/K	/atm
1 ^{b)}	0.252	0.209	0.539	0	1.27	26.32	1650	60.0
2 ^{c)}	0.165	0.214	0.565	0.055	1.27	28.09	1650	60.0

a) 混合气体平衡组成; b) 加热器燃料为纯氢气; c) 加热器燃料为氢-乙烯混合气体, 乙烯与氢气的摩尔比为 2:8. 1 atm = 1.013 × 10⁵ Pa

试验所用超燃发动机模型长 1.5 m, 在试验状态下捕获来流流量为 0.75 kg/s, 燃料加注为支板方式. 压力测量采用压阻传感器, 天平为自行研制的高响应天平; 数据记录采用瞬态记录仪. 在试验中, 由于风洞有效试验的时间很短, 为 0.2 s, 因此我们忽略来流与壁面的热交换.

2 试验结果与分析

2.1 工作气体的平衡组成

试验过程中, 模型在燃烧室入口注入氢燃料, 氢燃料油气比为 0.3. 试验结果表明, 两种不同来流状态下模型设备表面沿长度方向(流动方向)产生的压力分布基本相同, 参见图 1. 根据气体动力学原理, 两种状态下发动机内流动结构基本相同.

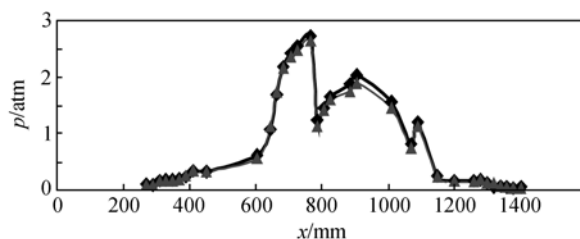


图 1 氢气加热器(○)和氢气-乙烯加热器(▲)中的压力分布

2.2 点火延迟

使用上述两种加热后的工作气体来开展燃料燃烧的研究试验. 在燃烧室喷入氢气燃料, 我们发现, 两种工作气体获得的发动机稳定工作燃烧室的压力

水平基本一致, 推力收益基本相同, 说明在现试验条件下来流组分不同不影响发动机的稳定燃烧值. 但是, 不同工作气体由于污染组分不同导致壁面压力达到平衡值所需的时间不同, 用氢气加热的气体, 燃烧达到平衡所需的时间较短, 发动机燃烧室前后压力达到平衡的时间基本相同. 然而, 采用氢-乙烯混合气加热的气体做试验, 燃烧室达到平衡所需的时间较长, 表现为发动机内火焰从燃烧室后向前传播, 点火首先发生在发动机燃烧室后部, 燃烧室前后压力达到平衡的时间有明显不同(图 2).

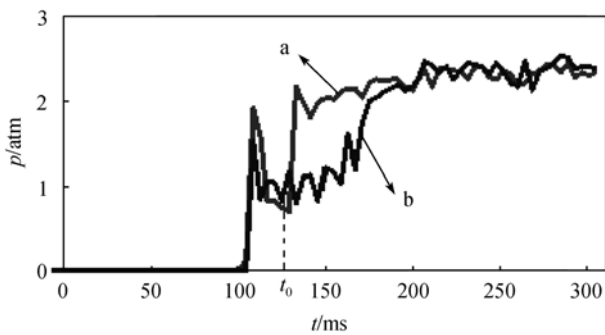


图 2 凹槽典型点压力随时间的变化关系

a, 氢气加热器; b, 氢气-乙烯加热器. t_0 为燃烧室氢气燃料注入时间

我们测定模型内壁面 3 个典型压力测点达到平衡值的 2/3 所需的时间与氢燃料注入的时间差. 从建压时间可见, 用氢气-乙烯加热的气体来点燃氢气燃料时, 风洞驻室壁面的压力建压时间比用氢气加热的情形推迟约 35 ms, 说明加热器燃料为乙烯和氢气时点火延迟明显增长(表 2).

2.3 燃烧反应动力学分析

氢-氧燃烧是研究得较多的复杂反应, 其点火热

表 2 风洞驻室壁面压力建压时间对比

状态	建压时间/ms		
	前部	中部	后部
A 燃烧室未加氢燃料 燃烧室加氢燃料	~3	~3	~3
	18	13	16
B 燃烧室未加氢燃料 燃烧室加氢燃料	~3	~3	~3
	61	47	37

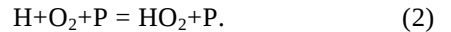
A, 加热器燃料为纯氢气; B, 加热器燃料为乙烯和氢气的摩尔比为 2:8 的混合气体

烧过程包含链反应的诱发和链的传递. 存在污染组分(如 H_2O , CO_2) 等稳定分子时, 可能的链诱发步骤列于表 3^[2~4].

表 3 的速率常数由相应的改进的 Arrhenius 型速率常数

(1)

描述. 这些基元步骤一般具有较高的活化能垒(约 $200 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$), 因而速率常数较小. 污染组分(P)在点火延迟方面有两种反应机理, 一是如同容器壁, 在连串反应中充当致钝剂, 将活性高的自由基变为低活性的自由基或使自由基猝灭而终止链传递, 如



另一个作用是直接参与反应(如水蒸汽), 使高活性自由基变为低活性自由基. 因此, 污染物的存在能阻止燃烧反应, 在试验上体现为点火延迟. 在本文试验中, 两种加热方式均会产生污染组分, 由于两种加热方式产生的污染组分的总含量相当(表 1), 我们估计它们在点火特性方面产生的影响区别不大.

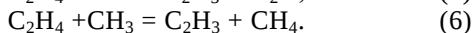
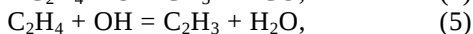
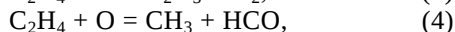
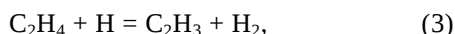
本文试验表明, 氢气燃烧加热气体时, 壁面压力建立时间比较短, 即通入氢气后燃烧迅速达到稳定平衡. 两种状态对比可见, 氢气加热所产生的高温高焓气体, 其平衡组分除了 H_2O , O_2 , N_2 , 还有少量 NO_x (高温燃烧)和自由基 H , O , OH , HO_2 等; 氢-乙烯

表 3 不同加热方式下氢-氧燃烧可能的部分链传递步骤

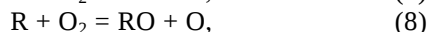
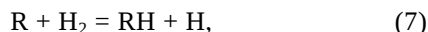
序号	反应	A	n	E/kJ · mol ⁻¹	$k_{1650}/\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	文献
氢气燃烧加热						
A1	$O + H_2 = H + OH$	5.08×10^4	2.67	26.3	2.91×10^{12}	[3]
A2	$OH + H_2 = H_2O + H$	2.16×10^8	1.51	14.3	5.48×10^{12}	[4]
A3	$H + O_2 = O + OH$	8.0×10^{13}	0	60.25	7.97×10^{13}	[2]
乙烯燃烧加热						
B1	$CH_3 + O_2 = CH_3O + O$	1.45×10^{13}	0	122.2	1.98×10^9	[5]
B2	$CH_3 + O_2 = CH_2O + OH$	2.51×10^{11}	0	61.2	2.90×10^9	[5]
B3	$CH_3O + O_2 = CH_2O + HO_2$	6.30×10^{10}	0	10.9	2.85×10^{10}	[5]
B4	$CH_2 + O_2 = CH_2O + O$	3.29×10^{21}	-3.3	12.0	3.30×10^{10}	[5]
B5	$CH_2 + O_2 = HCO + OH$	1.29×10^{20}	-3.3	1.2	2.85×10^9	[5]
B6	$HCO + O_2 = HO_2 + CO$	7.58×10^{12}	0	1.7	6.69×10^{12}	[5]
B7	$C + O_2 = CO + O$	2.00×10^{13}	0	0	2.00×10^{13}	[5]
B8	$CO + O_2 = CO_2 + O$	2.53×10^{13}	0	199.4	1.23×10^6	[5]

混合加热器所产生的高温高焓气体,其主要组分除了氢气加热的所有成分外,还含有含碳自由基 CH_x , CH_xO , CO 和 CO_2 . 如上所述,两种加热方式产生的气体对点火延迟的影响,关键在于两种高温工作气体所含成分不同. 由于反应机理^[6]非常复杂,我们对本文发现的实验现象只能做定性讨论. 我们认为,两种机制可能引起点火延迟时间的差别.

一方面,如果燃烧是支链爆炸,则用氢加热气体来点燃氢气时,支链传递的机理得到延续,且自由基的组成不变,因而不需要诱发新的链反应. 然而,氢-乙烯加热产生的气体点燃氢气时,由于不再供给乙烯燃料,如(3)~(6)式所示的生成含 C 自由基的链反应^[4]将被终止,并重新诱发氢氧燃烧的链反应. 和用纯氢气加热情形相比,这种自由基反应的部分终止可能会导致点火延迟时间变长. 这是氢-乙烯混合加热时点火延迟时间增加的一个可能原因.



另一方面,用 1650 K 的高温气体燃烧 H_2 , 达到 H_2 和 O_2 混合的第三爆炸极限. 点火燃烧属于热爆炸. 这时,温度对反应步骤的加速变成了主要因素. 在这样的温度条件下,来流气体中的自由基可更快诱发 H 和 O 自由基的生成. 我们考虑最主要的链传递过程



式中 R 表示自由基. 考虑氢气和乙烯混合燃烧可能产生的自由基物种,我们将(3)和(4)式所代表的双分子基元步骤及 A, n, E 及在 1650 K 下的速率常数收集于表 3^[5]. 第二种情况下,我们只列出了主要的反应通道(参见文献[6]),其余的反应通道中要么是自由基太不稳定要么是其浓度可能很低,导致其对总反应的贡献比较小. 从 1650 K 下的速率常数可见,乙烯

燃烧产生的含 C 自由基参与链传递时,除 B6 和 B7 反应外,其他步骤的速率常数比氢气加热产生的 H, HO, O, HO_2 自由基参与的链传递(表 3 中的反应 A1~A3)的速率常数要低. 并且第二种情况下,很少有将 H_2 活化为 H 自由基的,含 C 自由基似乎不利于高还原活性的 H 自由基的生成. 这些因素的累计,造成了含 C 自由基对 H_2 燃烧的迟滞作用. 这是氢-乙烯混合加热时点火延迟时间增加的另一可能原因. 当然,这里的考虑仅是定性的,更准确合理的分析讨论应当做反应的敏感度分析和动力学模拟,以判断其各个反应的贡献和影响,这也是我们将要进行的工作.

3 结论

试验表明,组分污染对推力收益和平衡压力的影响不大,但在试验模型设备的不同点测定两种试验气体压力稳定的时间相差在 21~47 ms. 结果表明,与氢气加热方式相比,氢-乙烯混合加热会带来明显的点火延迟.

从动力学的角度,本文分析了可能引起点火延迟区别的原因,从链传递过程的动力学进行了对比分析. 我们认为,影响点火延迟的可能因素如下:一方面,用氢气加热气体来点燃氢气时,燃烧的链传递得到延续,有利于缩短点火延迟时间,而用氢-乙烯混合加热气体来点燃氢气时,含 C_2H_4 和 C 自由基的链传递将被终止,使燃烧室的建压时间增长. 据此可以推论,如果最后的燃料气改为乙烯,氢-乙烯混合加热的气体获得的建压时间将比纯氢气加热的建压时间短. 这一推论有待于我们的进一步验证. 另一方面,乙烯燃烧产生的含 C 自由基在与 O_2 反应时,其活性比氢-氧燃烧时产生的自由基低,并且含 C 自由基不利于与 H_2 反应生成高还原活性的 H 自由基. 这些因素造成了含 C 自由基对 H_2 燃烧的迟滞作用. 进一步的机制有待于试验和理论的进一步验证.

参考文献

- 1 刘陵,唐明,张榛,等. 污染空气对超音速燃烧地面试验结果的影响. 推进技术, 1992, 5: 11—33
- 2 Pirraglia A N, Michael J V, Sutherland J W, et al. A flash photolysis-shock tube kinetic study of the hydrogen atom reaction with oxygen: $\text{H} + \text{O}_2 = \text{OH} + \text{O}$ ($962 \text{ K} \leq T \leq 1705 \text{ K}$) and $\text{H} + \text{O}_2 + \text{Ar} = \text{HO}_2 + \text{Ar}$ ($746 \text{ K} \leq T \leq 987 \text{ K}$). J Phys Chem, 1989, 93: 282—291 [\[DOI\]](#)
- 3 Sutherland J W, Michael J V, Pirraglia A N, et al. Twenty-first symposium (international) on combustion. Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1986. 929—941
- 4 Micheal J V, Sutherland J W. Rate constants for the reactions of hydrogen atom with water and hydroxyl with hydrogen by the flash photolysis-shock tube technique over the temperature range 1246—2297 K. J Phys Chem, 1988, 92: 3853—3857 [\[DOI\]](#)
- 5 Marinov N M, Pitz W J, Westbrook C K, et al. Aromatic and polycyclic aromatic hydrocarbon formation in a laminar premixed n-butane flame. Combust Flame, 1998, 114: 192—213 [\[DOI\]](#)
- 6 Wang H, Frenklach M. A detailed kinetic modeling study of aromatics formation in laminar premixed acetylene and ethylene flames. Combust Flame, 1997, 110: 173—221 [\[DOI\]](#)