

文章编号:1000-8055(2012)11-2408-06

H₂O 污染对煤油燃料超燃冲压发动机燃烧室性能影响的数值模拟

邢建文^{1,2}, 肖保国²

- (1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;
2. 中国空气动力研究与发展中心 超高速空气动力研究所
高超声速冲压发动机技术重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 在超声速燃烧设备上进行了带凹槽的直连式双模态煤油燃料超燃冲压发动机污染与纯空气来流的对比试验. 为了研究来流污染对超燃冲压发动机试验性能的影响, 在相同的试验气体参数(马赫数为 2, 总温约为 828 K 和总压约为 800 kPa)下, 对带凹槽煤油燃料燃烧室进行了一系列对比燃烧试验. 采用 AHL3D 软件对 3 个试验条件的燃烧室反应流场进行了数值模拟. 计算和试验得到的压强分布比较接近且趋势一致. 通过数值模拟获得反应流场的细节, 探究污染影响的机理.

关 键 词: 超燃冲压发动机; 燃烧室; 污染效应; 性能; 燃烧效率

中图分类号: V235. 213

文献标志码: A

Numerical simulation of H₂O vitiation effects on kerosene-fueled scramjet combustor performance

XING Jian-wen^{1,2}, XIAO Bao-guo²

- (1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Science and Technology on Scramjet Laboratory,
Hypervelocity Aerodynamics Institute of China Aerodynamics Research and Development Center,
Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: Experiments on the direct-connect dual-mode Kerosene-fueled scramjet engine with two cavities were conducted in the supersonic combustion facility to compare the combustor performance under clean air and air vitiated with H₂O conditions. The primary objective was to understand the complicated issues with regard to the effects of air-stream vitiation on scramjet test performance. A set of comparative combustion tests were conducted with the same test gas parameters of nominal Mach number 2, total temperature of about 828 K and total pressure of about 800 kPa. The simulations of reacting flowfield in the combustor under the same experimental conditions were conducted using flow solver AHL3D. The calculation results were close to experimental data. The final objective was to provide insight into the detail of combustion flow which was not resolved by the available instruments.

Key words: scramjet; combustor; vitiation effect; performance;
combustion efficiency

收稿日期:2011-10-31

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121115.1028.002.html>

作者简介:邢建文(1977—),男,河南武陟人,副研究员,博士,研究方向为吸气式高超声速推进技术.

超燃冲压发动机必须具备高性能和能宽范围运行($Ma=4\sim 8$)的能力才能满足高超声速飞行的需求. 超燃冲压发动机宽范围运行必然要经历一系列模态转换和供油时序变化, 这些都需要进行地面试验来确认运行能力. 考虑到燃烧加热设备广泛应用于低于 $Ma=8$ 的超燃冲压发动机研究, 必然会带来不可忽视的污染影响, 需要细致评估污染对超声速燃烧过程的影响. 预热空气燃烧产生的污染组分包括主要污染物即 H_2O 或 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ ^[1], 次要污染物如 OH 和 O . 本文针对主要污染组分 H_2O 对超燃冲压发动机燃烧室性能和燃烧的影响展开研究. 在高 Mach 数飞行时($Ma>6$), 由于在优化设计的燃烧室中燃烧比较剧烈, 污染对性能的影响可能并不显著. 而在低 Mach 数飞行时, 污染可能会影响超燃冲压发动机点火, 燃烧模态和稳焰, 从而引发超出预想的性能变化. 点火是个复杂而困难的问题, 因此本文只考虑稳焰和发动机性能.

已经有人尝试研究主要组分污染物对碳氢燃料超燃冲压发动机的影响^[2], 但试验研究很少, 而在单一风洞上开展纯净与污染试验气体的对比试验更少, 国外比较有代表性的有美国弗吉尼亚大学^[3-5]和日本^[6-7]开展的对比试验, 国内比较有代表性的对比试验工作见文献^[8-11]. 本研究的目标是通过二维反应流数值模拟及与试验结果的对比, 获得主要污染组分 H_2O 对碳氢燃料超燃冲压发动机燃烧室性能的影响.

1 试验介绍

1.1 试验方法和设备

西北工业大学基于直连式电阻加热设备(见图 1), 发展了一套支持纯净空气和污染空气的广泛研究空气污染效应的试验系统^[12]. 污染气体通过在电阻加热器流出的纯净空气中加入一定的



图 1 西北工业大学直连式电阻加热设备

Fig. 1 Direct-connected resistance heated facility of Northwestern Polytechnic University

H_2O 和/或 CO_2 来得到.

因为污染空气的成份与纯净空气不同, 由此带来必须面对的问题——不能匹配所有的试验参数. 对纯净空气和污染空气, 需要选择合适的试验参数来匹配, 相应适当放宽其他参数的匹配. 本文的匹配参数为: 马赫数、总压、总温和摩尔分数(O_2 的摩尔分数为 0.21).

1.2 发动机模型

超燃冲压发动机燃烧室试验模型如图 2 所示^[13]. 燃烧室长为 770 mm, 宽为 40 mm, 由隔离段、台阶侧上壁面和双凹槽侧下壁面组成. 在相同运行参数——名义马赫数为 2, 总温约为 828 K 和总压约为 800 kPa 下, 进行了纯净和污染空气的对比燃烧试验. 氢作为先锋火焰在凹槽底部靠近前台阶的位置通过直径为 0.5 mm 的 5 个喷孔垂直空气流动注入, 喷注马赫数为 1, 总温为 300 K. 煤油在凹槽上游 4 个直径为 0.3 mm 的孔垂直注入. 点火由凹槽里的火花塞实现.

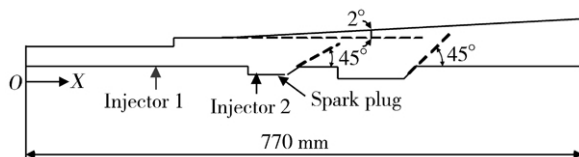


图 2 煤油燃料超燃冲压发动机燃烧室示意图

Fig. 2 Kerosene-fueled scramjet combustor tested in the present study

2 数值计算

2.1 数值计算方法和边界条件

本文采用计算流体力学(CFD)软件 AHL3D 评估 H_2O 的污染效应. 采用有限体积法进行离散 Favre 平均 Navier-Stokes 方程组, 用 $k-\omega$ 湍流模型来模拟湍流影响. 守恒形式的方程组采用对角隐式有限体积方法, 即采用两步扫描的 Gauss-Seidel 方法求解. 无黏通量采用 3 阶 monotone upstream-centered scheme for conservation laws (MUSCL) 插值的 Steger-Warming 格式来计算. 燃烧采用 10 组分 12 方程煤油-空气反应机理^[14]来模拟.

表 1 为试验和计算采用的来流条件和喷油条件. 计算采用的边界条件如下: 来流给定入口马赫数 Ma 、压强 p 、温度 T 和摩尔分数 x ; 超声速出口采用外插边界条件.

表 1 来流条件
Table 1 Inflow conditions

	试验气体			油料		
	纯净空气	7.75% H ₂ O	11.35% H ₂ O	纯净空气	7.75% H ₂ O	11.35% H ₂ O
<i>Ma</i>	2.022	2.016	2.014			
<i>T</i> _{i,0} /K	828	828	820	300	300	300
<i>p</i> _{i,0} /kPa	810	800	800	6 806	6 791	7 111
<i>x</i> _{kerosene}	0	0	0	1.0	1.0	1.0
<i>x</i> _{H₂O}	0	0.077 5	0.113 5	0	0	0
<i>x</i> _{N₂}	0.79	0.713	0.668 5	0	0	0
<i>x</i> _{O₂}	0.21	0.209 5	0.218	0	0	0
当量比				0.73	0.73	0.73

2.2 计算结果与讨论

通过纯净空气来流的试验结果来校准二维计算流体动力学(CFD)计算中的模型参数,然后保持模型参数不变,对 2 个污染水平(7.75% H₂O 污染和 11.35% H₂O 污染)的状态进行了数值模拟.给出了数值模拟结果,将数值模拟结果与试验结果进行了对比,并对燃烧室性能进行评估.

2.2.1 与试验测结果的比较

图 3 对比了试验与计算得到的燃烧室壁面压

强.结果显示计算得到的壁面压强与试验结果趋势基本一致,不同污染水平的计算结果比较接近,燃烧室燃烧产生的高压都扰动到隔离段入口附近($X=0$),纯空气来流条件下扰动位置最靠前,其次是 7.75% H₂O 污染和 11.35% H₂O 污染下的扰动,隔离段后($X>180$ mm)计算和试验得到的压强差别稍大,这可能是采用二维数值模拟导致的.试验和模拟结果均显示:H₂O 污染会降低燃烧室壁面压强峰值,并且压强峰值向后漂移,而且

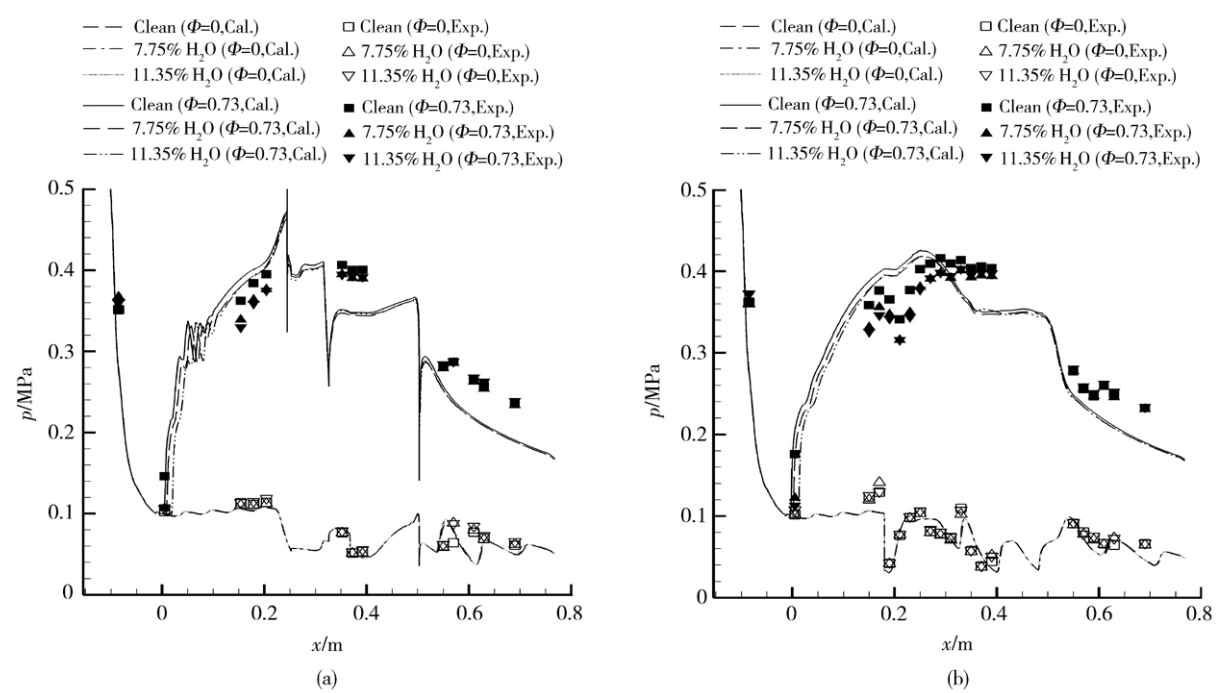


图 3 计算和试验得到的壁面压强结果对比

Fig. 3 Comparison of wall pressure distributions between calculation results and experimental results

污染导致的压强差别主要集中在隔离段和燃烧室凹槽部分.

2. 2. 2 生成物质量分数

图 4 给出了生成物 CO_2 和 H_2O (已经扣除污染物)的质量分数分布. 由图 4 可以看到 11.35% H_2O 污染生成的 CO_2 最多, 其次是 7.75% H_2O 污染, 最后是纯净空气. 生成 H_2O 的质量分数分布则是纯净空气来流下的最多. 说明在该条件下污染组分 H_2O 的存在促进 CO_2 的生成, 抑制 H_2O 的生成.

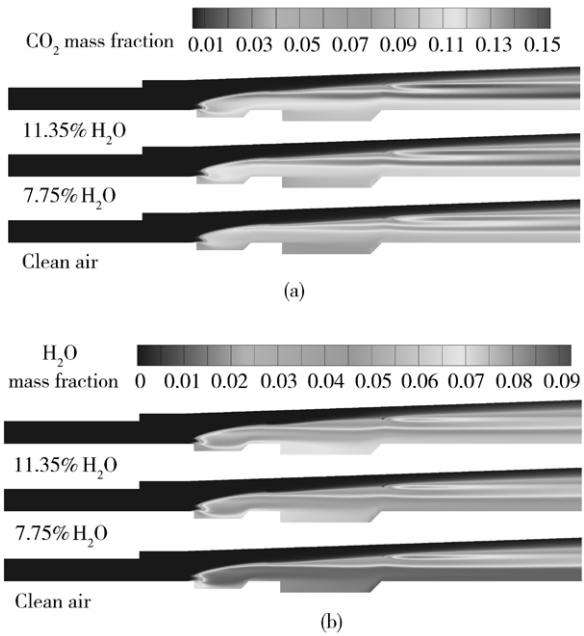


图 4 三种情况下生成物 H_2O 和 CO_2 的分布
Fig. 4 Contours of production H_2O and CO_2 mass fraction in three cases

2. 2. 3 静温和马赫数

图 5 和图 6 分别给出了一维质量加权的马赫数和静温沿流向分布的对比. 由图可见, 纯净空气、7.75% H_2O 污染空气和 11.35% H_2O 污染空气来流下的静温和马赫数分布比较接近. 静温和马赫数的一维质量加权量显示, 在该试验条件下燃烧室内纯净空气与污染空气的马赫数分布一致, 燃烧室内燃烧大部分区域平均 Mach 数均小于 1, 扩张段部分的静温却是 11.35% H_2O 污染空气稍高, 可能是由于 11.35% H_2O 污染空气中氧气质量分数稍高(21.8%)导致的.

2. 2. 4 燃烧室性能

本文采用推力、总压恢复系数和燃烧效率来评估污染对超燃冲压发动机燃烧室综合性能影

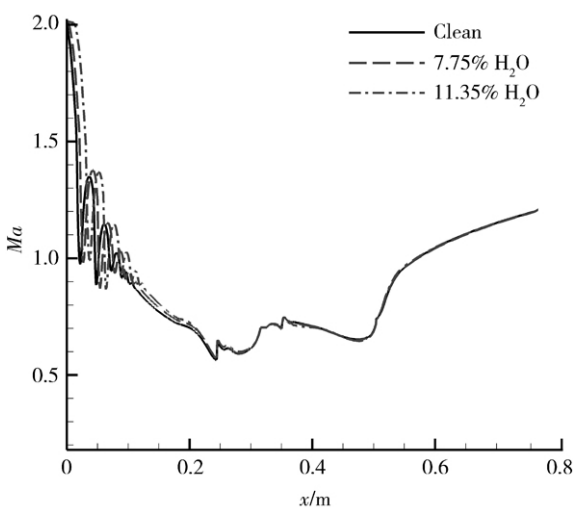


图 5 一维质量加权平均马赫数
Fig. 5 One-dimensional mass-weighted Mach number

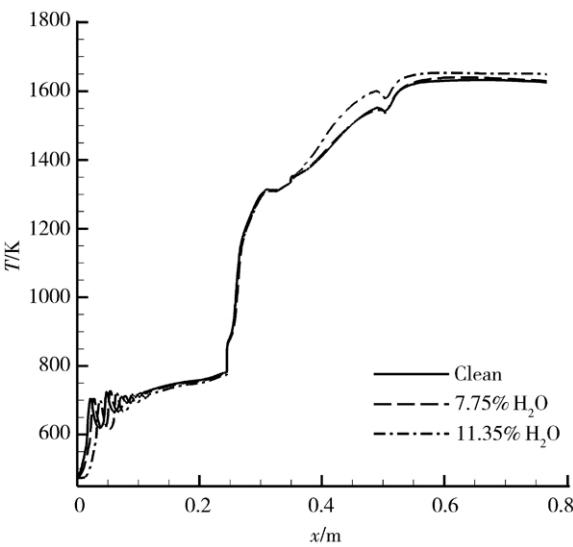


图 6 一维质量加权平均静温
Fig. 6 One-dimensional mass-weighted static temperature

响. 燃烧效率定义见参考文献[15]. 表 2 给出了燃烧室整体性能的对比. 由表 2 可见, 相对于纯净空气情况, 7.75% H_2O 和 11.35% H_2O 污染导致燃烧室推力分别下降 1.4% 和 1.1%, 导致燃烧室的燃烧效率分别下降 9.2% 和 5.8%, 总压恢复系数的差别可以忽略, 纯净空气来流下的压差阻力(压力沿燃烧室壁面的面积积分)和摩擦阻力变化都不大. 说明在本次试验的 3 种情况下, 污染对燃烧室推力和总压恢复影响不显著, 而燃烧效率差别显著. 11.35% H_2O 污染的燃烧效率和推力高于 7.75% H_2O 的原因是污染空气试验中氧气质量分数稍高(21.8%).

表 2 三种情况下燃烧室总体性能
Table 2 Overall performance of combustor in three cases

试验气体	压差阻力/N	摩擦阻力/N	推力/N	总压恢复系数	燃烧效率
纯空气	366.6	23.3	343.3	0.498	0.760
7.75% H ₂ O 污染空气	361.4	23.0	338.4	0.497	0.690
11.35% H ₂ O 污染空气	363.2	23.6	339.6	0.494	0.716

3 结 论

为了解来流污染对超燃冲压发动机试验性能的影响,需要大量的试验和 CFD 模拟.本文用 AHL3D 软件完成了纯净空气、7.75% H₂O 污染和 11.35% H₂O 污染空气来流下的煤油燃料燃烧室二维燃烧流场的数值模拟,并与试验结果进行了比较,得到以下结论:

- 1) 当量比 $\phi=0.73$ 时,纯净试验气体下的煤油燃料超燃冲压发动机燃烧室压力已扰至喷管, H₂O 污染试验气体下的燃烧室压力尚未扰至喷管,说明 H₂O 污染趋向于将进气道从纯净试验气体下的不起动状态变为起动机状态,并且水污染会导致流量变小.
- 2) H₂O 污染会稍稍降低燃烧室壁面压强峰值,并且压强峰值向后漂移,而且污染导致的压强差别主要集中在隔离段和燃烧室凹槽部分,扩张段压强分布几乎一样.
- 3) 从生成物质量分数来看,在本文给定的试验条件下污染组分 H₂O 的存在促进 CO₂ 的生成,抑制 H₂O 的生成.
- 4) 纯净和污染空气来流下的静温和马赫数分布都比较接近,污染对燃烧室推力和总压恢复影响不显著,而燃烧效率差别显著.摩阻的差别较小,说明该试验条件下表面摩阻对 H₂O 污染“不敏感”.

可以推断,污染组分 H₂O 趋向于将进气道从纯净试验气体下的不起动状态变为起动机状态.对于本次试验的燃烧室构型,当燃烧比较剧烈时,污染对发动机燃烧室燃烧效率影响明显,但对推力性能的影响可以忽略.

参考文献:

[1] Pellet G L, Bruno C, Chinitz W. Review of air vitiation effects on scramjet ignition and flameholding combustion processes[R]. AIAA-2002-3880,2000.

[2] Fetterhoff T, Bancroft S, Burfitt W, et al. Development of

technologies in the U. S. for test and evaluation of high speed/hypersonic systems[R]. ISABE Paper 2009-1213, 2009.

[3] Krauss R H, Gauba G, Whitehurst R B, et al. Experimental and numerical investigation of steam-vitiated supersonic hydrogen combustion[R]. AIAA-1996-0856,1996.

[4] McDaniel J C, Krauss R H, Brad W W, et al. Test gas vitiation effects in a dual-mode combustor[R]. AIAA-2003-6960,2003.

[5] Goyne C P, McDaniel J C, Krauss R H, et al. Test gas vitiation effects in a dual-mode scramjet combustor[J]. Journal of Propulsion and Power,2007,23(3):559-565.

[6] Mitani T, Hiraiwa T, Sato S, et al. Scramjet engine testing in Mach 6 vitiated air[R]. AIAA-1996-4555,1996.

[7] Mitani T, Hiraiwa T, Sato S, et al. Comparison of scramjet engine performance in Mach 6 vitiated and storage heated air[J]. Journal of Propulsion and Power,1997,13(5):635-642.

[8] 杨样. 污染组分对超燃冲压发动机性能的影响研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.

YANG Yang. Investigations on contamination effects of test gas on scramjet engine performance[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2009. (in Chinese)

[9] LE Jialing, LIU Weixiong, SONG Wenyan, et al. Experimental and numerical investigation of air vitiation effects on scramjet test performance[R]. AIAA-2009-7344,2009.

[10] 邢建文, 杨样. H₂O 污染对超燃冲压发动机燃烧室性能影响的三维数值模拟[J]. 推进技术,2011,32(1):5-10.

XING Jianwen, YANG Yang. Three-dimensional simulation of H₂O vitiation effects on combustor performance for Scramjet[J]. Journal of Propulsion Technology,2011,32(1):5-10. (in Chinese)

[11] 罗飞腾, 宋文艳, 刘昊. 污染空气对氢燃料超声速燃烧室性能的影响[J]. 推进技术,2010,31(4):401-405.

LUO Feiteng, SONG Wenyan, LIU Hao. Experimental investigation for vitiated air effects on hydrogen-fueled supersonic combustor performance[J]. Journal of Propulsion Technology,2010,31(4):401-405. (in Chinese)

[12] 宋文艳, 肖隐利, 乐嘉陵. 电阻加热器在超声速燃烧研究中的应用[J]. 航空动力学报,2008,23(12):2268-2273.

SONG Wenyan, XIAO Yinli, LE Jialing. Application of resistance heater in supersonic combustion facility[J]. Journal of Aerospace Power,2008,23(12):2268-2273. (in Chinese)

nese)

[13] 刘昊,宋文艳,罗飞腾. 污染空气对乙烯燃料超声速燃烧影响的试验[J]. 推进技术,2011,32(1):70-75.
LIU Hao, SONG Wenyan, LUO Feiteng. Experiments on vitiated air effects of ethylene-fueled supersonic combustion[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(1): 70-75. (in Chinese)

[14] 杨顺华. 碳氢燃料超燃冲压发动机数值研究[D]. 四川 绵阳:中国空气动力研究与发展中心,2006.
YANG Shunhua. Numerical study of hydrocarbon fueled scramjet[D]. Mianyang Sichuan:China Aerodynamics Research and Development Center,2006. (in Chinese)

[15] Srinivasan S,Erickson W D. Influence of test-gas vitiation on mixing and combustion at Mach 7 flight conditions[R]. AIAA-1994-2816,1994.