

富氢 / 富氧燃气温度对同轴 直流气 - 气喷嘴性能的影响

李 茂, 高玉闪, 金 平, 蔡国飙

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 通过求解使用 $k-\varepsilon$ 湍流模型的 Navier-Stokes 方程组对采用同轴直流气-气单喷嘴燃烧室的燃烧流场进行数值模拟, 对比分析了富氢/富氧燃气推进剂与常温氢气/氧气推进剂条件下的燃烧流场、燃烧室室壁和喷注面板处的燃气温度, 研究了富氢/富氧燃气温度变化对燃烧流场和燃烧室热载的影响。数值结果表明: 富氢/富氧燃气-气喷嘴的燃烧性能较好, 但热载较高; 富氢/富氧燃气温度一定范围内提高对燃烧性能影响不明显, 而热载增加。

关键词: 富氢/富氧燃气; 气-气喷嘴; 燃烧流场; 数值模拟; 温度

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2010) 01-0019-06

Effects of temperature of hydrogen-rich/oxygen-rich hot gas on performance of a shear coaxial injector

Li Mao, Gao Yushan, Jin Ping, Cai Guobiao

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

Abstract: The turbulent Navier-Stokes equations in combination with the two equation $k-\varepsilon$ turbulence model were used to simulate the flow field in the chamber of a shear coaxial gas-gas injector. Combustion performance and heat load were compared between the gas-gas injector of the hydrogen-rich/oxygen-rich hot gas and the gas-gas injector of the ambient hydrogen/oxygen. The influence of the temperature of the hydrogen-rich/oxygen-rich hot gas on the performance of gas-gas injector was studied. The results show that the combustion performance of the gas-gas injector of the hydrogen-rich/oxygen-rich hot gas was better than the gas-gas injector of the ambient hydrogen/oxygen, but the heat load of the faceplate and the chamber were increased. The combustion performance was indistinctive to the temperature of the hydrogen-rich/oxygen-rich hot gas products, but the heat

收稿日期: 2009-09-11; 修回日期: 2010-01-04。基金项目: 国家“863”计划资助项目(2008702504)。

作者简介: 李茂 (1983—), 男, 博士研究生, 研究领域为全流量补燃循环发动机气-气燃烧技术。

load of the faceplate and the chamber were increased.

Key words: hydrogen-rich/oxygen-rich hot gas; gas-gas injector; combustor; numerical simulation; temperature

0 引言

在全流量补燃循环发动机中,所有流量的氧化剂和燃料先通过富氧预燃室和富燃预燃室燃烧,然后以富氧燃气、富燃燃气状态驱动涡轮泵后再进入推力室燃烧,因此,全流量补燃循环发动机推力室的喷注器为富燃/富氧燃气气-气喷注器。与常规气-液、液-液喷注器相比,气-气燃烧没有雾化与蒸发过程,燃烧规律发生变化,对喷注面板、燃烧室的热载也不同。气-气燃烧技术是全流量补燃循环发动机的关键技术之一。

近年来,国内外研究者对以全流量补燃循环发动机为技术背景的气-气喷注器设计、试验及数值模拟方面进行了大量的研究工作,但大部分研究工作集中在以常温 CH_4/GO_2 为推进剂的基础之上^[1-3]。在富氢/富氧燃气气-气喷注器研究中,文献 [6] 对不同压力条件下富氢/富氧燃气-气-气喷注器和常温 CH_4/GO_2 气-气喷注器对壁面热流影响展开了试验研究,研究结果表明富氢/富氧燃气气-气喷注器热流值显著大于常温氢气/氧气燃烧。文献 [7] 采用不同的仿真模型对富氢/富氧燃气气-气喷注器对燃烧室壁面的热流进行了数值分析,并与试验结果进行了对比,获得了与试验结果较为一致的仿真模型与方法。本研究以同轴直流喷嘴为研究对象,以数值模拟的方法研究富氢/富氧燃气气-气喷嘴。

1 计算模型和喷嘴参数

1.1 几何模型

模拟的气-气喷嘴燃烧室几何模型如图 1 所示。燃烧室设计参数以 SSME 主发动机为参考^[8],将 SSME 主发动机喷注单元流量进行低压换算,

保证设计的燃烧室的流量密度与 SSME 主发动机进行低压换算后的流量密度相同,质量流量为换算后 SSME 喷注单元流量的 2 倍 (226g/s)。设计的燃烧室直径为 26mm,长度为 295mm,其中圆柱段长度为 250mm,由于不测量推力,没有设计喷管扩张段。气-气喷嘴结构形式为同轴直流喷嘴,无缩进,喷嘴入口段长度 10mm。

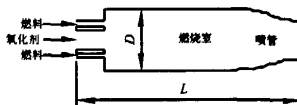
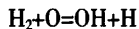
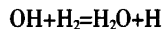
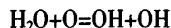
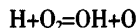
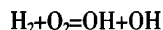


图 1 燃烧室几何模型

Fig.1 Geometrical model of the combustor

1.2 化学反应模型及边界条件

利用 FLUENT 商业软件,通过求解使用 $k-\varepsilon$ 湍流模型的 Navier-Stokes 方程组对燃气气-气喷注器进行数值模拟,化学反应模型为 6 种组分、9 个主要化学反应的有限速率模型,化学反应速率由阿累尼乌斯公式计算,化学反应模型如下



其中 M 为第三载体^[9,10]。入口边界采用质量入口,给定入口水力直径、湍流强度、燃气温度和组分(燃气温度和组分由预燃室热力计算获得,不计燃气从预燃室到燃烧室沿程能量损失);出口边界条件采用压力出口边界,给定出口水力直径;燃烧室壁面采用无滑移、绝热条件。

1.3 喷嘴参数

同轴直流气-气喷嘴主要设计参数如表 1 所示, 其中混合比指两个预燃室入口的氧化剂总质量流量和燃料总质量流量之比, 氧压降指富氧燃气压降与燃烧室压力的比值, 速度比指富氢燃气与富氧燃气的速度比。

表 1 气-气喷嘴设计参数

Tab.1 Design parameters of gas-gas injector

流量/ (g·s ⁻¹)	混合 比	氧压降 /%	速度 比	氧喷嘴出口壁厚 /mm
226	6	6.5	6.6	1.5

鉴于国内外研究主要集中在以常温氢气为推进剂的气-气喷嘴研究中, 本文同时对以常温氢气/氧气为推进剂的同轴直流气-气喷嘴进行了数值模拟, 与富氢/富氧燃气同轴直流气-气喷嘴的燃烧流场进行比较, 常温氢气/氧气的同轴直流气-气喷嘴总流量、混合比、氧压降、速度比与富氢/富氧燃气同轴直流气-气喷嘴相同。

考察温度对富氢/富氧燃气同轴直流气-气喷嘴燃烧室流场影响时, 温度通过调整预燃室混合比改变。研究富氧燃气温度影响时富氧燃气参数设置如表 2 所示, 富氢燃气参数值固定, 富氢燃气温度 758K, 其中氢气组分比例 65.08%, 水组分比例 34.92% (对应的富燃预燃室混合比为 0.45); 研究富氢燃气温度影响时富氢燃气参数设置如表 3, 而富氧燃气参数值固定, 富氧燃气温度 676K, 其中氧气组分比例 97.22%, 水组分比例 2.78% (对应的富氧预燃室混合比为 320)。从表 2 和表 3 可以看出, 在保证总流量和总混合比不变的条件下, 预燃室混合比改变, 燃气温度、富氧燃气和富氢燃气的流量分配、燃气组分所占的比例发生变化。

表 2 富氧燃气参数

Tab.2 Parameters of oxygen-rich hot gas

工况	混合 比	流量/ (g·s ⁻¹)	温度/ K	燃气组分/%		
				氧	氢	水
1	450	179.8	577	98.02	0	1.98
2	320	180.0	676	97.22	0	2.78
3	245	180.3	777	96.37	0	3.63

表 3 富氢燃气参数

Tab.3 Parameters of hydrogen-rich hot gas

工况	混合 比	流量/ (g·s ⁻¹)	温度/ K	燃气组分/%		
				氧	氢	水
1	0.4	44.4	708	0	67.83	32.17
2	0.5	47.6	810	0	62.47	37.53
3	0.6	50.8	909	0	57.77	42.23

2 计算结果和分析

水是氢氧燃烧的最终产物, 水组分在燃烧室内的分布能反映燃烧进行的程度, 通过分析水组分在燃烧室内分布评价同轴直流气-气喷嘴燃烧性能, 同时通过燃烧室壁面燃气温度 (不包括收缩段)、喷注面板燃气温度 (从单喷嘴外径至燃烧室内径之间的部分) 分析同轴直流气-气喷嘴燃烧室热载。

2.1 富氢/富氧燃气与常温氢气/氧气同轴直流气-气喷嘴性能对比

图 2 给出了富氢/富氧燃气推进剂 (简称燃气工况) 和常温氢气/氧气推进剂 (简称常温工况) 条件下的燃烧室温度分布, 图 3 给出了两种工况的水组分质量分数曲线沿燃烧室轴向的分布。从图 2 可以看出, 燃气工况燃烧室内的高温区域比常温工况明显靠前, 说明燃气工况燃烧反应较快。

从图 3 中可以看到, 燃气工况燃烧室内的水组分质量分数在较短的燃烧室长度之内达到平衡; 水组分质量分数曲线在燃烧室内达到平衡之前, 在相同的燃烧室轴向位置, 富氢/富氧燃气同轴直流气-气喷嘴燃烧室内的水组分质量分数一直显著高于常温氢气/氧气同轴直流气-气喷嘴燃烧室内的水组分质量分数。虽然燃气工况入口有一定的水组分, 但反应进行后, 燃气工况的水组分上升速率大于常温工况。

以上结果说明在本研究的参数设置下, 燃气工况的燃烧性能相对较好。

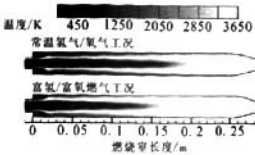


图 2 燃烧室温度分布

Fig.2 Temperature contour in the combustor

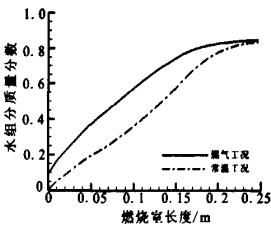


图 3 水组分质量分数分布

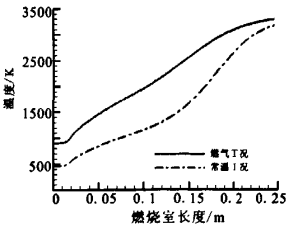
Fig.3 Mass fraction of water

图 4 给出燃气工况和常温工况下燃烧室圆柱段壁面燃气温度分布和喷注面板燃气温度分布。从图中可看到，燃气工况圆柱段壁面燃气温度和喷注面板燃气温度都显著高于常温工况，这说明富氢/富氧燃气推进剂使燃烧室承受的热载更高(喷注面板尺寸不同是由于燃气工况与常温工况下的推进剂流量、温度不同导致喷嘴外径不同)。燃烧室热载的增加是由于周围的富氢燃气温度高于常温氢气加强了换热和燃烧性能的提高。

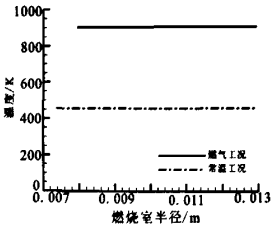
2.2 燃气温度对燃烧及传热的影响

图 5 给出了不同富氧燃气温度和富燃燃气温度条件下燃烧室内温度的分布。从温度分布可以

看出，不同温度工况条件下燃烧室内温度分布基本相同，没有显著区别。图 6 为燃烧室内水组分质量分数沿燃烧室轴向的分布曲线。图 6 中，随着燃气温度的变化，水组分质量分数曲线在燃烧室内分布略有不同，温度较高时相同燃烧室长度条件下水组分质量分数曲线较高，但差别很小；水组分质量分数达到平衡时的位置基本相同，这表明在不同燃气温度条件下燃烧室内燃烧反应速率差别很小，完成燃烧反应需要的燃烧室长度基本相同。仿真结果表明富氧燃气温度和富氢燃气温度在一定范围内提高不能显著改善同轴直流气-气喷嘴燃烧性能。



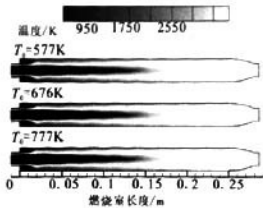
(a) 燃烧室壁面燃气温度分布



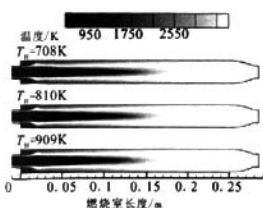
(b) 喷注面板燃气温度分布

图 4 壁面燃气温度分布

Fig.4 Hot gas temperature on the wall



(a) 不同富氧燃气温度工况



(b) 不同富氢燃气温度工况

图 5 入口燃气温度条件对燃烧室温度分布的影响

Fig.5 Effects of the inlet hot gas temperature on the distribution of the combustor temperature

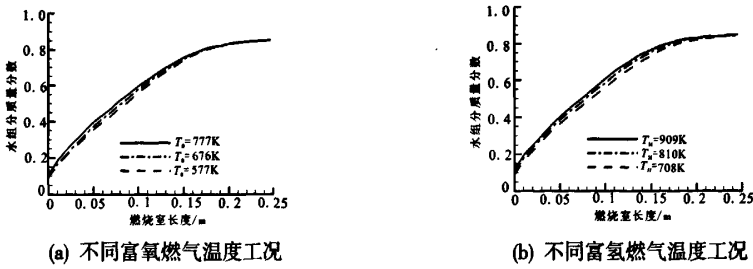


图 6 入口燃气温度对水组分质量分数分布的影响

Fig.6 Effects of the inlet hot gas temperature on the distribution of mass fraction of water

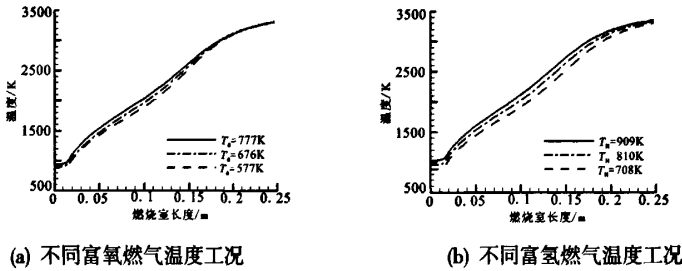


图 7 入口燃气温度对燃烧室壁面温度分布的影响

Fig.7 Effects of the inlet hot gas temperature on the distribution of the wall temperature

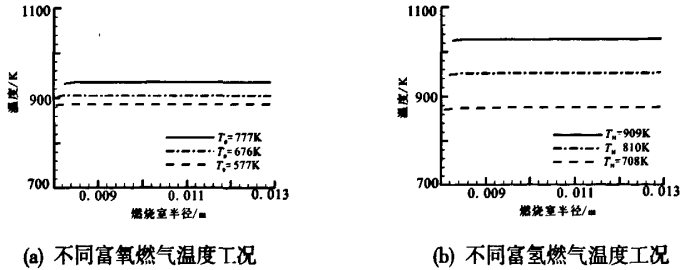


图 8 不同燃气温度条件下喷注面板温度分布

Fig.8 Effects of the inlet hot gas temperature on the distribution of the faceplate temperature

图 7 和图 8 分别给出了不同富氧燃气温度和富燃燃气温度条件下燃烧室圆柱段壁面燃气温度和喷注面板的燃气温度分布。从图 7 和图 8 中可以看出, 富氧燃气温度和富燃燃气温度的提高都会使燃烧室壁面和喷注面板的燃气温度增加, 说明燃气温度提高会使燃烧室热载增加。比较不同富氧燃气工况和不同富氢燃气工况条件的圆柱段壁面燃气温度和喷注面板燃气温度分布可以看出, 富氢燃气温度的提高对壁面燃气温度影响更

为明显, 这是因为富氧燃气从同轴直流喷嘴中心喷入而富氢燃气从周围喷入的缘故。

在全流量补燃循环发动机中, 推力室入口燃气温度过高对整个发动机系统非常不利, 富氧燃气温度的增加会显著增加富氧预燃室、氧涡轮及富氧燃气路抗氧化性的设计难度, 而富氢燃气温度的增加对氢涡轮的寿命、密封等都不利。从仿真结果可以看出, 燃气温度对燃烧性能影响不明显, 因此可以选择较低的燃气温度设计发动机,

以有效降低设计难度,提高发动机寿命。

3 结论

采用数值模拟方法比较了富氢/富氧燃气气-气喷嘴和常温氢氧气-气喷嘴的区别,研究了富氢/富氧燃气温度对气-气喷嘴燃烧性能和传热性能的影响,结论如下:与常温氢气/氧气相比,富氢/富氧燃气推进剂可以使燃烧在更短的燃烧室长度内完成,也会使燃烧室热载显著增加;富氢/富氧燃气温度的增加对燃烧性能的提高不明显,但会增加燃烧室壁面和喷注面板的热载,富燃燃气温度增加对热载影响更为明显。

参考文献:

- [1] Cai Guobiao, Wang Xiaowei, Jin Ping, et al. Experimental and Numerical Investigation of Large Mass Flow Rate Gas-Gas Injectors[R]. AIAA-2008-4562.
- [2] Vaidyanathan A, Gustavsson J, Segal C. Heat Fluxes/OH PLIF Measurements in a GO_2/GH_2 Single-element, Shear Injector[R]. AIAA-2007-5591.
- [3] Conley A, Vaidyanathan A, Segal C. Heat Flux Measurements for a GO_2/GH_2 Single-Element, Shear Injector[J]. Journal of Spacecraft and Rockets. Vol.44, No.3, May-June 2007.
- [4] Vaidyanathan R, Tucker P. K, Papila N, et al. Computational-fluid-dynamics-based Design Optimization for Single-Element Rocket Injector. Journal of Propulsion and Power[J]. Vol.20, No.4, July-August 2004.
- [5] Shyy W, Kevin T P, Vaidyanathan R. Response Surface and Neural Network Techniques for Rocket Engine Injector Optimization [J]. Journal of Propulsion and Power. 2001, 7 (2): 391-401.
- [6] Lin J, West J S, Williams W R, et al. CFD Code Validation of Wall Heat Flux Heat Fluxes for a GO_2/GH_2 Single Element Combustor [R]. AIAA-2005-4524.
- [7] Marshall W M., Pal S. Benchmark Wall Heat Flux Data for a GO_2/GH_2 Single Element Combustor[R]. AIAA 2005-3572.
- [8] 中国航天工业总公司. 世界导弹与航天发动机大全[M]. 北京: 军事科学出版社, 1999.
- [9] Sozer E, Vaidyanathan A, Segal C, et al. Computational Assessment of Gaseous Reacting Flows in Single Element Injector[R]. AIAA 2009-449.
- [10] Shang M, Chen Y, Paul L. Investigation of Chemical Kinetics Integration Algorithms for Reacting Flows [R]. AIAA 95-0806.

(编辑: 陈红霞)

(上接第7页)

参考文献:

- [1] 叶玉江. “十一五”我国基础研究发展方向[J]. 中国科技论坛. 2007(1): 9-12.
- [2] 段增斌. 中国大型液体火箭发动机研制 [J]. 火箭推进, 2000, 26(1): 15-30.
- [3] 王静, 张延东. 关于加大基础研究稳定支持力度之思考和建议[J]. 中国科技论坛, 2008(5): 20-23.
- [4] 林豆豆, 田大山. MPG 科研管理模式对创新我国基础研究机构的启示[J]. 自然辩证法通讯, 2006, 28(4): 53-59.
- [5] 陈佳洱. 基础研究: 自主创新的源头 [J]. 科学咨询. 2005, 23(11): 11-14.
- [6] 陈敬全. 从科学发展观的角度审视我国基础研究的发展 [J]. 中国科学基金, 2007(3): 153-156.

(编辑: 马杰)