一种单喷嘴推力室燃烧内流场的方法

汪小卫 金 平 蔡国飙

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 为了方便开展单喷嘴气气喷注器燃烧试验研究,设计了一种燃烧室壁面测温,并结合推力室燃烧流场的非稳态数值模拟的方法,以考察燃烧室内流场的发展和燃烧完成情况. 应用试验数据对不同的湍流模型和燃烧模型进行了对比研究,得到与试验结果较为吻合的计算模型. 并应用该方法开展了同轴剪切式喷注器氢/氧喷注动量比、燃烧室压力变化的试验研究. 试验结果表明喷注器掺混燃烧效果随氢/氧喷注动量比增加而增强,而不随燃烧室压力的变化而变化.

关 键 词: 测量方法; 燃烧流场; 气气喷注器; 燃烧室; 数值模拟

中图分类号: V 434

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)09-1095-05

Method for investigation of combustion flowfield characteristics in single element gas/gas injector chamber

Wang Xiaowei Jin Ping Cai Guobiao

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

Abstract: To facilitate hot-fire tests of single element gas/gas injector chamber, a method used to reveal the combustion development and completion length of the chamber flowfield was designed, which combines wall temperature measurement and numerical simulation of gas/gas combustion flowfield. The impacts of using various turbulence and combustion models was investigated to obtain the models which best represented the experimental data. And influences of H_2/O_2 momentum ratio and chamber pressure on shear-coaxial injector combustion flowfield were investigated. The result shows that the better mixing and the shorter combustion length can be obtained with the larger H_2/O_2 momentum-ratio and the chamber pressure can hardly influences the combustion flowfield.

Key words: measurement method; combustion flowfield; gas/gas injector; combustor; numerical simulation

自从全流量补燃循环发动机被提出以来,作为其关键技术之一的气气喷注器技术受到广泛关注[1-6]. 其燃烧现象和燃烧机理一直是研究者关注的热点,而对气气燃烧机理开展研究主要是应用各种光学测试手段,这些仪器具有测量精确、无侵入等优势,其主要是为了进行推进剂混合和燃烧机理等基础研究[2-6];另外,其昂贵的成本以及对实验室环境严格的要求,且须设计具有透明室壁的燃烧室等,使其应用受限. 且 Raman 光谱仪一次不能够对整体流场进行测量,因此要在一般的实验室条件下用于大量的喷注器试验研究,其应用很不方便.

在研制新型喷注器过程中,必须对各种不同类型和参数的喷注器进行大量的试验研究. 需要了解各喷注器在燃烧室内的燃烧内流场发展和完成情况,获得各喷注器燃烧完成的长度,以便筛选喷嘴和优化喷注器结构,这就有必要设计出一种能够反映喷注器燃烧内流场的方法. 本文就是基

收稿日期: 2008-08-10

基金项目: 国家 863 基金资助项目

作者简介: 汪小卫(1983—),男,安徽安庆人,博士生,wangxwbuaa@163.com.

于这种背景下设计了一种工程实用的燃烧室壁面测温的试验方法，并结合燃烧流场的仿真来考察内部燃烧流场的发展和完成情况，并进行了同轴剪切式喷注器工作参数影响的研究.

1 测量方法

本文采用的推力室构型如图1所示，在对喷注器的研究试验中，试验时间不用太长，一般为几秒钟，且为了能够在较短试验时间内获得燃烧室壁面温度的分布，圆筒段采用了高热导率的铜材料. 在身部同一周向上，不同的轴向距离上进行了钻孔，除头部喷注面板上的一个测温孔外，圆筒段上各测量孔距内壁距离相同，各孔之间相距15 mm. 并在一些相同轴向位置不同周向位置设计了多个测温孔，用于检查内流场的轴对称性. 采用了热电偶温度传感器对各孔孔底进行温度测量，对传感器的热响应时间进行了标定，都在75～100 ms之间，因此能够输出各测量点热试车时间内较为准确的实时温度.

从喷注器出来的推进剂在燃烧室轴向方向上不断混合燃烧，直到混合燃烧完全，燃烧流场沿轴向的发展，引起其在燃烧室室壁沿轴向上传热的不同. 特定的燃烧流场分布决定了特定的室壁上热流分布情况，因此可以利用燃烧室室壁上热流分布情况来反映燃烧室内部特定的燃烧流场的发展和完成情况.

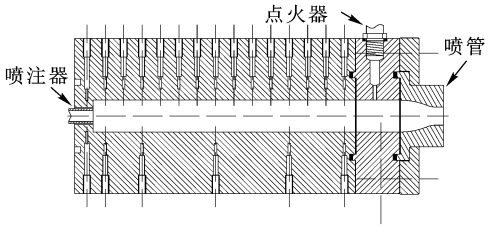


图1 带温度测量孔的燃烧室身部结构示意图

应用该方法对气气喷注器进行了试验研究. 图2为某次典型试验得到热试车过程中温度传感器典型输出曲线，稳态试车时间为3 s. 喷注器和推力室结构及工作参数如表1，该喷注器结构尺寸见图3. 为了表征各温度测量点在试车过程中的温升，本文选取各条温度曲线的最高点与试车前初始温度差值来表示；于是得到沿轴向上各测点的温升分布，图4所示为两次重复试验结果.

表1 喷注器和推力室结构和工作参数

参 数	燃烧室内径/mm	混合比	氢/氧流量/(kg·s^{-1})	氧压降/MPa	氢压降/MPa
数值	18.4	6.0	0.016/0.096	0.2	0.46

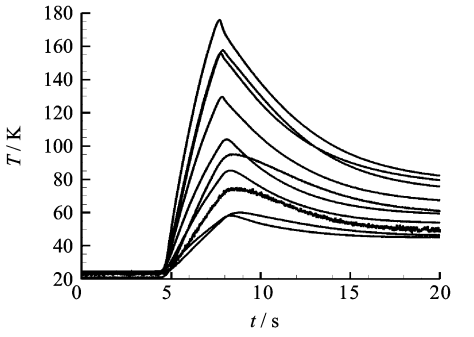


图2 各测量点温度 T 输出曲线

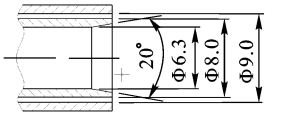
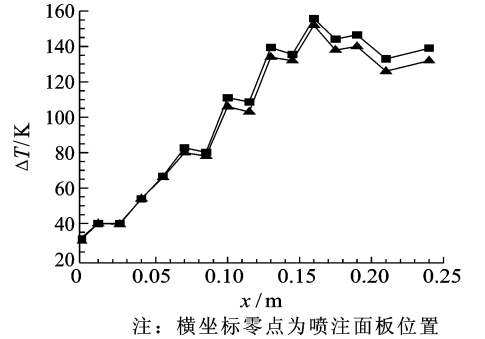


图3 喷注器结构图



注：横坐标零点为喷注面板位置

图4 测量点温升 ΔT 沿燃烧室轴向分布图

从图4可以看出，在靠近头部区域，温度出现一段小平缓区，随后温度沿轴向整体一直上升，这说明内流场对室壁的传热越来越强，内部燃烧越来越充分，在约160 mm位置的测温点处达到最高，随后变得平缓，并稍有下降. 温升最高点表示了内壁传热热流最大的区域，也反映了内流场热释放最充分的位置.

2 数值模拟

2.1 计算模型

传统的喷雾燃烧过程分为：雾化-蒸发-混合-燃烧4个阶段，其计算模型对应可分为：喷雾模型-蒸发模型-混合模型-化学反应模型[7]. 对气气燃烧过程，只有混合和化学反应过程，属于气相混合燃烧模式. 对模型的应用完全归结为气相流动、化学反应和这两者之间的交互影响上，由于火箭发动机中的流动一般为强湍流流动，因此以上三者的应用上就分别对应着湍流模型、化学动力学模型和湍流-化学反应交互作用模型. 如何有效地采用这些模型，即是气气喷注燃烧模型的研究关键所在.

为了合理地比较各种模型，本文选择了以下

有效模型组合进行比较研究：①标准 k-ε 湍流模型[8]、氢/氧 6 组分 9 步化学反应模型，不考虑湍流与燃烧之间交互作用；②Realizable k-ε 湍流模型[8]、氢/氧 6 组分 9 步化学反应模型，不考虑湍流与燃烧之间交互作用；③标准 k-ε 湍流模型、氢氧单步总包反应模型，湍流与化学反应之间的交互作用采用 EDM 模型[9]来考虑；④标准 k-ε 湍流模型、氢/氧 6 组分 9 步化学反应模型，湍流与化学反应之间的交互作用采用 EDC 模型[9]来考虑. 这 4 种情况被称为计算方案 1，2，3，4. 本文以 CFD 软件 Fluent 6.2 作为求解器，并引入外部燃烧机制和用户自定义函数，对单喷嘴推力室进行仿真分析.

气气掺混燃烧的控制方程采用气相湍流反应流 N-S 方程组[8]. 6 组分 9 步反应模型各反应如下：

$$\mathrm{H+O_2=OH+O}$$
$$\mathrm{H+OH+M=H_2O+M}$$
$$\mathrm{H_2+O=OH+H}$$
$$\mathrm{H+O+M=OH+M}$$
$$\mathrm{H_2O+O=OH+OH}$$
$$\mathrm{O+O+M=O_2+M}$$
$$\mathrm{H_2+OH=H_2O+H}$$
$$\mathrm{H_2+O_2=OH+OH}$$
$$\mathrm{H+H+M=H_2+M}$$

2.2　数值方法和边界条件

本文采用时间相关法求解气气燃烧流场，采用控制体积法离散方程. 在空间上采用二阶迎风格式对连续方程、动量方程、能量方程和组分方程进行耦合求解，然后再解湍流模型相关方程.

推力室采用轴对称模型，计算区域分为喷注器构型、燃烧室内流场区域和固体紫铜身部区域，网格在边界上、燃烧室头部和氢氧剪切层区域进行了加密处理. 首先进行稳态求解，设紫铜固壁为试车前环境温度，达到收敛后进行非稳态计算，将圆筒段紫铜壁面边界改为耦合边界，采用整体求解法求解，这时该界面成了求解区域内部的控制容积界面，采用控制容积积分法就能保证耦合边界的温度连续、热流连续条件的满足，非稳定计算 3 s.

入口给出流量边界条件；喷管出口参数由临近的上游参数插值求得；中轴线采用轴对称边界；固体区域与流体区域的耦合边界，在稳态求解中采用定温、无滑移边界条件，在非稳态求解中，热边界条件采用耦合求解. 其余固体壁面定为绝热无滑移边界.

2.3　结果分析

图 5 为方案 1 非稳态计算中某些时间点上燃烧室内壁上的热流沿轴向分布图，且计算结果显示了在非稳态计算过程中，各时刻的燃烧内流场基本不变，壁面的非稳态传热对整体流场影响很小，这一点也可以从图 5 各热流的分布趋势的一致性看出. 各方案计算得到的壁面热流分布以及单喷嘴推力室燃烧内流场分别如图 6 和图 7 所示. 由图 5 可见仿真得到方案 1 沿轴向的壁面热流分布趋势与试验得到的温升分布趋势一致，都在靠近头部区域存在热流一小峰值，而后不断上升在距喷注面板 140～160 mm 处热流达到最大.

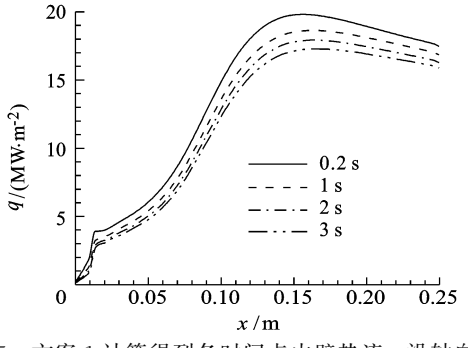


图 5　方案 1 计算得到各时间点内壁热流 q 沿轴向的分布

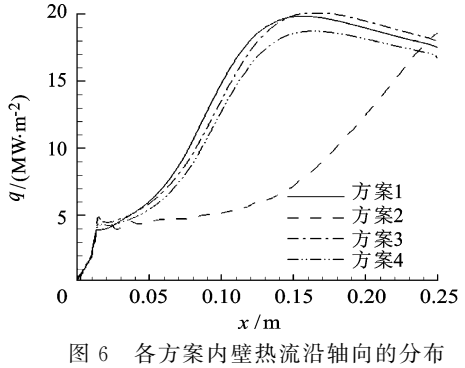


图 6　各方案内壁热流沿轴向的分布

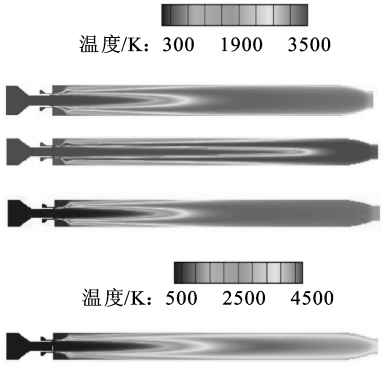
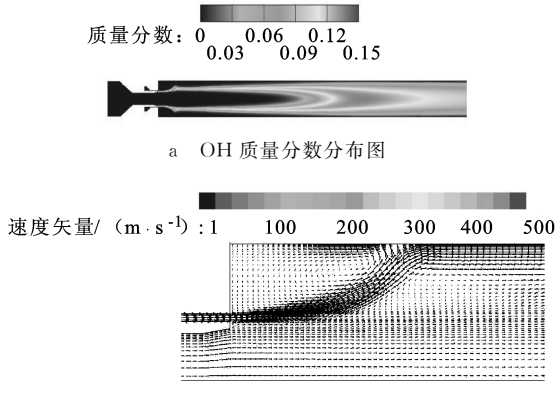


图 7　各方案燃烧室内温度分布，分别为方案 1，2，4，3.

由图 7 可见各方案计算得到的内流场具有相似的分布，都在靠近头部区域存在回流区，然后氢/氧不断混合燃烧直到燃烧完全；可以看出采用

的方案2计算得到的燃烧长度过长，图6显示方案2计算得到的壁面热流的上升速度最慢，最大值的出现位置等与试验数据不符；而方案3由于采用了单步总包反应模型，其流场温度明显过高；方案1与方案4得到的流场分布和壁面传热分布较为相近，且都与试验数据相符，下面以方案1的计算结果进行详细分析.

图8a给出了方案1得到的OH组分质量分数.结果显示流动在燃烧室头部形成回流，这增强了混合燃烧，且在燃烧室壁面上形成了速度为0的滞止点，导致在该处热流出现了小的峰值，详细流场速度矢量见图8b；随燃烧的发展，高温区逐渐扩大，流速不断增强，内壁热流不断增大，在轴向位置150～160 mm处达到温度最高点，从OH质量分数分布可以看出，在该区域OH质量分数达到最大，由于OH浓度起着燃烧火焰最直接的标示作用，可以得出该喷注器的燃烧长度为140～160 mm之间，这之后反应放热认为基本结束，壁面热流也在该处达到最大.而后，高温流场在壁面继续传热，而反应放热基本结束，由于壁面热损失，导致内流场温度有所下降，内壁热流也沿轴向有所降低.



a OH质量分数分布图

b 回流区速度矢量图

图8 方案1燃烧内流场各参数分布图

由于沿轴向测量点温升的分布完全由内壁热流的分布所决定，而热流分布又完全反映了内流场的发展和完成情况.以上分析可以得出，试验得到的壁面温升的分布完全可以反映内流场发展和完成情况.这种方法可以用来比较不同喷注器燃烧内流场发展和完成情况，比较它们的燃烧完成长度.

3 方法的应用

3.1 氢/氧动量比对燃烧的影响

利用该方法对单喷嘴气气同轴剪切式喷注器关键参数——氢/氧喷注动量比进行了参数试验研究，考察其对燃烧流场的影响.保持其他工作参数不变，仅改变氢氧动量比，喷注器和推力室工作参数如表2所示，得到如图9所示试验数据.

表2 喷注器和推力室工作和结构参数

参数	氢/氧流量/（kg·s⁻¹）	氧压降/MPa	氢/氧动量比	室压/MPa	燃烧室内径/mm
数值	0.032/0.193	0.2	0.67/1.1/1.5	3.0	26

由图9可以看出随着动量比的增加，前端温度明显上升，说明燃烧室内掺混燃烧变得更加剧烈，燃烧完成区域也明显向前移动，燃烧距离缩短；但动量比1.1与1.5之间变化不大.结果表明随着动量比增加，氢/氧掺混燃烧速率增加，燃烧距离缩短，但到一定程度后增强效果不明显.

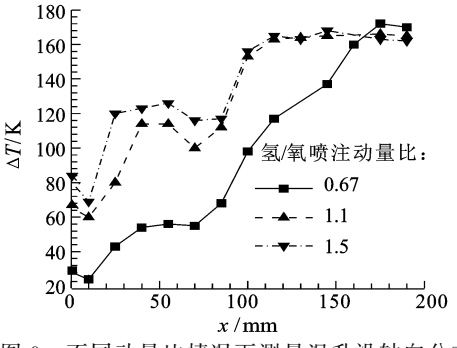


图9 不同动量比情况下测量温升沿轴向分布图

3.2 燃烧室压力的影响

在保持喷注器和推力室构型以及喷注器动量比1.5、氧喷注压降与燃烧室压力之比为3.5%等参数不变的情况下，通过按比例改变推进剂流量，从而改变室压，考察室压变化对流场的影响，燃烧室名义压力分别为2.0 MPa，4.0 MPa，6.0 MPa，由于各压力下内壁热流差别较大，同一测量点在各压力下的温升差别较大，为方便观察，将各压力下测量点的温度以最高点为特征量，进行归一化处理，得到数据如图10所示.

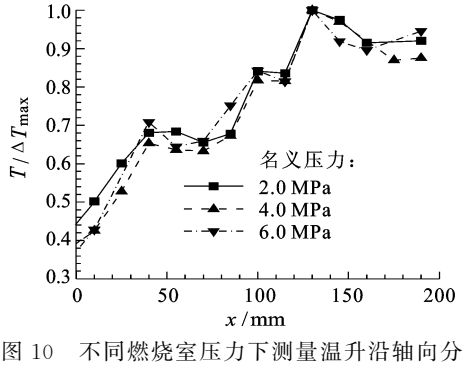


图10 不同燃烧室压力下测量温升沿轴向分布图

由图10可见随着燃烧室压力的变化，壁面温升分布基本保持不变，温升最高点位置不变，说明

在保持喷注器工作参数不变的情况下,燃烧室压力的变化对燃烧室内燃烧流场分布没有影响.

4 结　论

本文设计了一种壁面测温的方法,并结合了数值模拟分析,将该方法应用到气气同轴剪切式喷注器的实验研究中,得到如下结论.

1) 该方法能够反映单喷嘴喷注器燃烧内流场的发展和燃烧完成情况;

2) 该方法能够方便应用于气气喷注器的研制工作中,用以考察喷注器结构形式和参数对其燃烧流场的影响.并能够推广到其它类型喷注器以及多喷嘴的研究中去.

3) 气气同轴剪切式喷注器的掺混燃烧速率随氢/氧喷注动量比增加而增加;而燃烧室压力对喷注器燃烧流场影响不明显.

参考文献 (References)

[1] Davis J A, Campbell R L. Advantages of a full-flow staged combustion cycle engine system[R]. AIAA 1997-3318,1997

[2] Moser M D, Pal S, Santoro R J, et al. laser light scattering measurements in a GO_2/GH_2 uni-element rocket chamber [R]. AIAA 1995-0137,1995

[3] Foust M J, Deshpande M, Pal S, et al. Experimental and analytical characterization of a shear coaxial combustion GO_2/GH_2 flowfield[R]. AIAA 1996-0646,1996

[4] Foust M J, Pal S, Santoro R J. Gaseous propellant rocket studies using raman spectroscopy [R]. AIAA 1996-2766, 1996

[5] Archambault M R, Talley D. Computational analysis of a single-element, shear-coaxial, GH_2/GO_2 engine[R]. AIAA 2002-1088,2002

[6] Smith T D, Klem M D, Breisacher K J. Experimental evaluation of a subscale gaseous hydrogengaseous oxygen coaxial rocket injector[R]. NASA/TM-2002-211982, 2002

[7] 庄逢辰.液体火箭发动机喷雾燃烧的理论、模型及应用[M].长沙:国防科技大学出版社, 1995
Zhuang Fengchen. Liquid rocket engine spray combustion: theory, modeling, and application[M]. Changsha: Press of National University of National Defense, 1995 (in Chinese)

[8] 王福军.计算流体动力学分析[M].北京:清华大学出版社, 2004
Wang Fujun. Analysis of CFD [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004 (in Chinese)

[9] 赵坚行.燃烧的数值模拟[M].北京:科学出版社, 2002
Zhao Jianxing. The numerical simulation of combustion [M]. Beijing: Science Press, 2002(in Chinese)

(责任编辑:张　嵘)

(上接第 1090 页)

参考文献 (References)

[1] Yu M, Wang L, Chu T, et al. An LMI approach to networked control systems with packet dropout and transmission delays[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2004, 4: 3545－3550

[2] Rabello A, Bhaya A. Stability of asynchronous dynamical systems with rate constraints and applications[J]. IEE Proc-Control Theory Appl, 2003, 150(5): 546－550

[3] 黄剑,关治洪,王仲东.基于脉冲微分系统模型的有损网络控制系统研究[J].控制理论及应用, 2006, 23(1): 69－73
Huang Jian, Guan Zhihong, Wang Zhongdong. Research of networked control systems with data packet dropouts based on model of impulsive systems[J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(1): 69－73(in Chinese)

[4] 宗群,王鹤.基于观测器的丢包网络控制系统控制器设计[J].系统工程与电子技术, 2007, 29(2): 259－261
Zong Qun, Wang He. Controller design based on observer to data packet dropout in networked control systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(2): 259－261(in Chinese)

[5] Zhang W, Yu L. Output feedback stabilization of networked control systems with packet dropouts[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(9): 1705－1710

[6] Ma D, Zhao J. Stabilization of networked control systems via switching controllers an average dwell time approach [C]//Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2006, 1: 4619－4622

[7] Liang T, Sun H, Lin T, et al. Stability analysis and state predictor design of the NCS with data packet dropout[C]//Proceedings of the 26th Chinese Control Conference. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2007: 584－586

[8] 郑大钟.线性系统理论[M].2 版.北京:清华大学出版社, 2002
Zheng Dazhong. Linear systems theory[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2002(in Chinese)

[9] 向伟铭.一类非线性切换系统的分析与控制[D].南京:南京理工大学自动化学院, 2007
Xiang Weiming. Analysis and control for a class of switched nonlinear systems[D]. Nanjing: School of Automation, Nanjing University of Science & Technology, 2007(in Chinese)

[10] Hao F, Wang L. An LMI approach to persistent bounded disturbance rejection for a class of nonlinear impulsive systems [J]. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 2007, 1(3): 297－305

(责任编辑:文丽芳)