

文章编号: 1001-2486(2011)01-0017-04

## 一种空气加热器的三维流场数值仿真\*

沈赤兵, 刘友朋, 吴海燕

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**为进行超燃冲压发动机试验, 设计了空气加热器, 对其内部流场进行了仿真并与热试车结果进行了比较验证; 计算结果表明, 所设计的加热器在结构方案和总体性能方面基本满足设计要求, 喷注器喷入的空气降低了冷却面板的温度, 燃烧室轴向入口空气能保护燃烧室内壁, 仿真结果对于加热器的改进设计也起到一定的指导作用。

**关键词:**超燃冲压发动机; 空气加热器; 数值仿真; 地面试验

**中图分类号:** V211.72 **文献标识码:** A

## Numerical Simulation of Three-dimension Flow Field in an Air-heater

SHEN Chi-bing, LIU You-peng, WU Hai-yan

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha, 410073, China)

**Abstract:** An air-heater was designed for scramjet ground test. The internal flow field in the air-heater was investigated and the results were compared with the test data. The results show that the air-heater basically corresponds with the structure project and performance, the temperature of faceplate is reduced as a result of the air flow from injector-inlet, and the inner surface of the combustion chamber is protected by air flow from chamber-inlet. The results will be helpful for the optimization of the air-heater design.

**Key words:** scramjet; air-heater; numerical simulation; ground test

为了能在地面进行超燃冲压发动机的高空模拟试验, 必须建造其地面试验系统, 模拟其实际飞行时的总焓、总压、马赫数和空气中氧气组分等飞行参数。在现有的超燃冲压发动机直连式试验系统中, 空气加热器是其关键设备之一。国内外常用的空气加热方式有蓄热式加热、电弧加热、电阻加热、燃烧加热和激波加热等<sup>[1-2]</sup>。

超燃冲压发动机直连式试验系统中的燃烧型空气加热器通过燃烧一定量的燃料提供热量, 并进行补氧, 从而保证产生的气流中氧气的含量与空气中相同<sup>[3]</sup>。空气加热器结构紧凑, 建设周期短, 启动方便, 试验成本低, 能够在短时间内产生大流量的加热空气, 广泛应用于超燃冲压发动机试验系统<sup>[4]</sup>。空气加热器工作原理就是将高温燃气与常温空气掺混并通过喷管加速, 得到符合要求气流, 所以加热器总温越低, 空气流量相对越大, 空气与燃气的掺混过程越长, 掺混的效果对出口流场影响较大, 一般需要增大燃烧室特征长度或者单独设置一个混合段和隔栅<sup>[5]</sup>。

本文设计的空气加热器总温较低, 但结构简单, 未设置单独的混合段, 并通过对其内流场的仿真研究分析其工作状态, 评价结构的合理性。

### 1 空气加热器的结构

本文所研究的空气加热器基于液体火箭发动机结构, 由液体燃料喷注器, 燃烧室及超音速喷管组成, 采用酒精、氧气、空气作为推进剂, 三种组元的比例为 1:3:23.2, 燃气总温为 1170K, 喷管出口马赫数为 1.7。

加热器的燃烧室为圆筒型, 内径为 150mm, 喷管出口也为圆形。针对该加热器空气流量相对较大的特点, 设计了以下三种结构:

(1) 设计了单独的空气喷入段(如图 1 所示)。空气由喷注器和空气喷入段两个通道喷入燃烧室(两部分比例为 3:7), 通过两个通道的入口压力调节实现两部分流量的分配。空气喷入段上有沿圆周均布的喷入孔, 考虑到增强燃气沿燃烧室周向和径向的流动强度, 空气的喷入方向有轴向和

\* 收稿日期: 2010-12-06

作者简介: 沈赤兵(1968—), 男, 研究员, 博士。

切向之分。特征长度较大,以促进空气与燃气的混合。

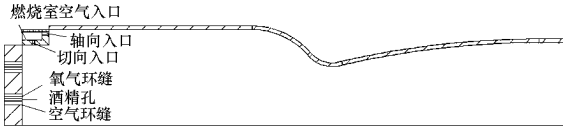


图1 加热器结构示意图

Fig.1 The schematic diagram of the air-heater

(2)在加热器的热防护方面,燃烧室身部及喷管外壁设计有水冷通道,从燃烧室空气喷入段喷出的大量空气也可以对燃烧室内壁形成气膜保护。

(3)酒精、氧气与部分空气从喷注器的同轴直流式喷嘴喷入,酒精从中间细孔喷入,氧气和空气分别从外围的两个环缝喷入。在喷嘴出口处氧气与空气形成高速气流,与酒精液膜产生强烈的剪切作用,使得液体酒精得到比较好的雾化效果。

喷注器面板上分两圈均布同轴直流式喷嘴,喷注器面板与燃烧室前部之间连接空气喷入段。该加热器的设计目的就是要通过合理设计大量空气的喷入位置及喷入流量分配来实现稳定工作和可靠热防护。在加热器工作时,部分空气从燃烧室空气轴向入口沿着燃烧室内壁喷入,保护燃烧室前部内壁,同时燃烧室空气切向入口的气流可以增大流场的旋流强度,使得出口混合更加均匀,另一部分空气由喷嘴最外圈环缝进入燃烧室,氧气由中间环缝进入燃烧室,酒精以同轴射流方式由内喷嘴进入,通过高速空气流、氧气流与低速酒精液膜射流互相作用,加速雾化过程。

## 2 空气加热器内流场数值仿真

### 2.1 计算模型

本文使用数值仿真方法分析加热器内部流场,验证所设计的结构是否能够达到设计的要求。采用有限体积法求解 Reynolds 平均 N-S 方程;采用 Density-based 求解器;湍流模型采用标准  $k-\epsilon$  模型;计算时采用基于组分输运的酒精氧气单步化学反应模型;采用 Eddy-dissipation 模型处理湍流化学反应;假设酒精离开喷嘴后立刻充分雾化为液滴,喷嘴的喷雾模型作为加热器流场喷雾燃烧模型的初始条件和边界条件给出<sup>[6-8]</sup>。

### 2.2 网格及边界条件

如图2所示,根据喷注面的对称性,计算时沿加热器周向取 1/12 为计算域,头部喷注器附近区域采用非结构化网格并且局部加密,壁面边界层采用等比法加密,身部区域为由密到疏再到密的

六面体非结构网格,喷管区域为较密的六面体非结构网格。燃烧室入口:给定氧气和空气的流量、总温,给定酒精的液滴速度、流量、粒径分布,液滴尺寸分布采用 Rosin-Rammler 分布,液滴的初始速度以及液滴最大、最小、平均直径,结合单喷嘴实验数据给出<sup>[9-10]</sup>。燃烧室出口:由于出口为超音速气流,出口数值边界条件通过一阶外推得到;对亚声速区域,如附面层内,参数条件根据外界大气给定。壁面:绝热、无渗透、无滑移壁面,即:  $u = v = w = 0$ ,并满足绝热条件和零压力梯度条件<sup>[11]</sup>。

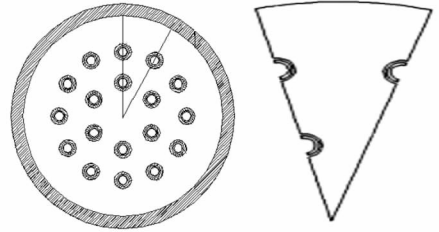


图2 喷注面及计算区域结构简图

Fig.2 The schematic diagram of the faceplate and computing domain

## 3 仿真结果及分析

加热器热试车得到的设计工况下燃烧室的压力值为 1.18MPa。沿加热器轴向共设置了三个测点,压力值如图3所示,实心圆点所示为仿真结果,仿真结果的室压值为 1.22MPa,由于采用的化学反应模型在计算温度场时会存在部分区域温度偏高的现象,考虑试验过程中的部分热损失,可以认为仿真结果与试验值吻合较好。

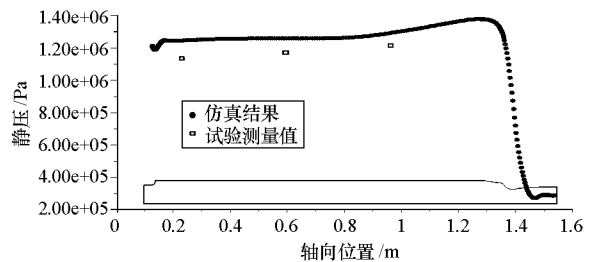


图3 燃烧室压力沿轴向分布图

Fig.3 Distribution of pressure on the axis of combustor

### 3.1 燃烧室前部回流区流场

图4为燃烧室入口速度场矢量图,从中可以看出喷嘴出口面附近流场非常复杂,并存在着很多回流区。这主要是由于氧气和空气均以很高的速度(接近音速)喷入燃烧室,其中高速氧气空气流与低速酒精液膜相互作用,加速了酒精的雾化和蒸发,部分气氧与蒸发出来的酒精发生反应放出大量的热,造成局部区域体积急剧膨胀,引起速度急速增加、变化。

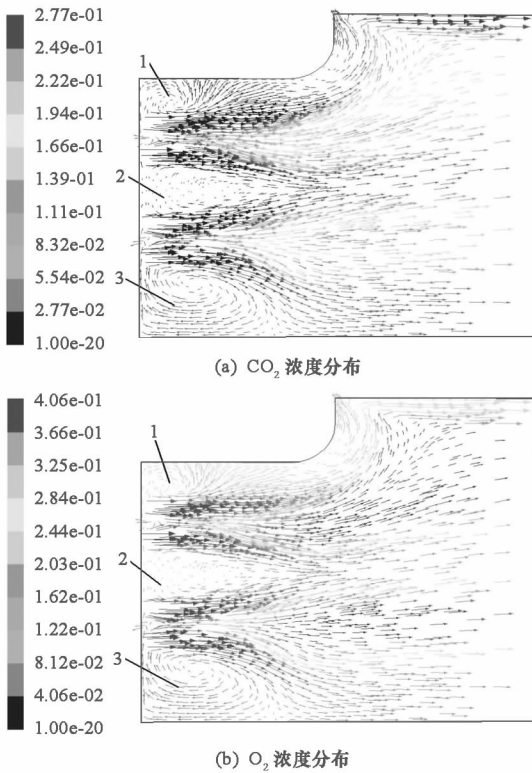


图 4 燃烧室入口速度场矢量图  
Fig.4 Vector of velocity on head of combustor

在两圈喷嘴之间的区域,有一个很大的回流区(1、2、3 处为回流形成的涡流),此回流区的主要组分为氧气和氮气。回流区气体来自于喷嘴出口下游很近的区域,这时酒精蒸发量很小,在酒精与外围氧气气流接触的区域化学反应已经开始,但是由于外围有高速氧气空气形成的气膜,限制了内部反应产生的高温气体的扩散,使得回流区气体主要来自于酒精外围的氧气和空气,温度较低,有效地起到了保护喷注面板的作用。

### 3.2 燃烧室轴向入口及切向入口空气对流场的影响

图 5 所示为绝热条件下的燃烧室内壁面温度,可以看出,燃烧室轴向入口空气所形成的气膜对燃烧室内壁面形成了很明显的保护作用,隔离了内部的高温燃气,使得燃烧室内壁面的前三分之一的区域温度较低,图中所示为壁面绝热温度,实际试车时再加上燃烧室冷却通道中冷却水的作用,使得加热器的冷却效果较好。但是从图 6 也可以看出,燃烧室轴向入口的空气流量大、速度高,对外圈喷嘴下游的化学反应区域也产生了很强的卷吸作用,这会造成区域 1 的温度相对较高。



图 5 燃烧室内壁面温度分布  
Fig.5 Contour of temperature on the inner surface of combustor

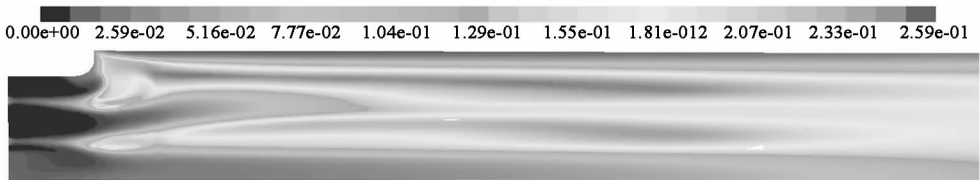


图 6 燃烧室前部总温分布  
Fig.6 Contour of temperature on head of combustor

### 3.3 加热器内部燃烧过程

图 7 所示为加热器内流场总温分布,可以看出高温火焰区域比较长,分析原因可能有两点,首先是液滴受周围高速气流的作用速度会有所增大,同时高速气流阻碍了反应产生的二氧化碳的向外扩散,使得化学反应速度有所降低;其次,相对于普通液体火箭发动机,该加热器空气流量相

对较大,所以燃烧室内的酒精燃烧比在纯氧环境中会慢很多,与在空气中燃烧相近。以上两点使得酒精需要一个比较长的区域才能够燃烧完全,但由于加热器特征长度很长,所以高温燃气仍可以和低温空气充分掺混,得到一个比较均匀的出口流场,图 8 给出了出口截面沿半径方向上的马赫数和静温分布图。

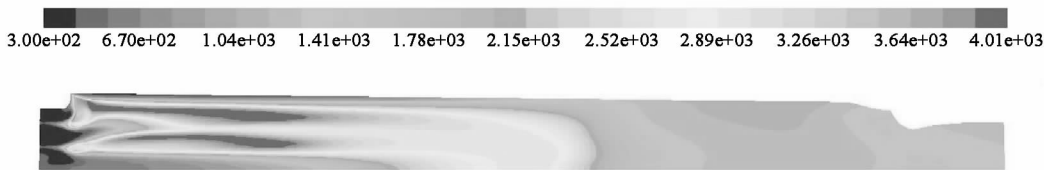


图7 加热器内流场总温分布图

Fig.7 Contour of total temperature in the air-heater

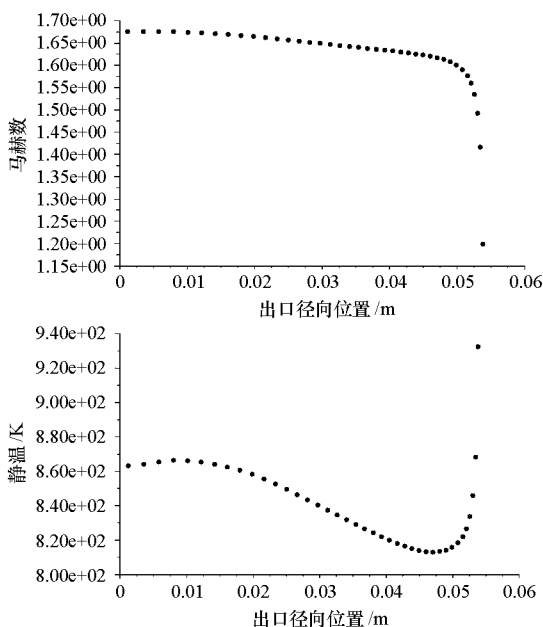


图8 加热器出口截面沿半径方向上的马赫数和静温分布图

Fig.8 Radial distribution of Mach number and static temperature on the outlet of the air-heater

### 4 结论

本文设计了一种空气加热器并通过 Fluent 软件对其内流场进行了数值仿真,结果表明:

(1)加热器能够满足设计要求,空气与燃气能够掺混均匀,得到品质较高的出口流场。

(2)喷注器喷入的空气对于喷注器冷却面板的热防护有明显作用。

(3)燃烧室轴向入口空气在燃烧室内壁形成冷气膜,保护了燃烧室内壁,作用非常明显,但同时对上游来流有一定的卷吸作用。

仿真结果对于评价该加热器的设计方案有一定的参考价值,同时可为空气喷入段及流量分配方案的改进设计提供依据。

### 参考文献:

- [1] 张新宇,陈立红,等. 超燃冲压模型发动机试验设备与实验技术[J]. 力学进展,2003,33(4):491-498.
- [2] Edward C T. Scramjet Engines: The First Forty Years [J]. Journal of Propulsion and Power, 2001,17(6): 1138-1148.
- [3] 方丁酉,胖永新,等. 直接加热对固冲发动机地面模拟性能影响的理论分析 [J]. 固体火箭技术,2006,29(4):251-273.
- [4] Wayne G R, Clayton R R, Richard L. The NASA Langley Scramjet Test Complex [R]. AIAA Paper 96-3243,1996.
- [5] Blevins J A, Coleman H W. An Assessment of Connected-pipe Ramjet Testing [R]. AIAA Paper 95-3074,1995.
- [6] 王辽,徐旭. 超燃冲压发动机地面试验氢燃烧加热器流场数值模拟 [J]. 航空动力学报,2008,23(8):1397-1402.
- [7] Lange H C, Goey L P. Two Dimensional Methane/air Flame [J]. Combustion Sci and Tech,1993,92:423-427.
- [8] 钟梓鹏,宋文艳,等. 超燃冲压发动机煤油燃烧加热器设计中的流场计算 [J]. 弹箭与制导学报,2007,27(1):184-185.
- [9] 林志勇,周进. 三组元发动机氢的质量分数对燃烧流场影响的数值研究 [J]. 热科学与技术,2004,3(1):81-85.
- [10] Ghafourian A, Mahalingam S, Dindi H. A Review of Atomization in Liquid Rocket Engines [R]. AIAA Paper 91-0283,1991.
- [11] 王福军. 计算流体动力学分析 - CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2004.