

文章编号: 1001- 2486(2009) 02- 0005- 05

超燃冲压发动机燃烧室中双凹腔对引导氢分布的影响*

刘娟¹, 潘余, 刘卫东, 王振国

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了研究超燃冲压发动机燃烧室中多个凹腔对气体燃料分布的影响, 运用数值仿真的方法模拟了引导氢(氢气作为引导气体引燃煤油)的分布情况。从三个方面对仿真结果进行分析, 首先对比了串联凹腔燃烧室和单凹腔燃烧室中的燃料分布, 结果表明后凹腔的存在使得双凹腔燃烧室下游的氢气射流中心更偏向主流; 其次比较了前后凹腔同一位置的燃料分布情况, 结果表明前凹腔中氢气在展向方向分布更广, 后凹腔中氢气在横向方向分布更宽; 最后对比了并联凹腔燃烧室和单凹腔燃烧室内的燃料分布情况, 结果表明并联凹腔对气体燃料的分布影响不大。

关键词: 超燃冲压发动机; 双凹腔; 引导氢; 氢气分布

中图分类号: V235. 21 **文献标识码:** A

The Influence of Dual-cavity on Pilot Hydrogen Distribution in Scramjet Combustor

LIU Juan, PAN Yu, LIU Wei-dong, WANG Zhen-guo

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

Abstract: In order to investigate the influence of multi-cavity on gas fuel distribution in scramjet combustor, the numerical simulation was used to analyze the pilot hydrogen jet, which was used to pilot kerosene into cold flow in scramjet. The analysis was conducted in three aspects: firstly, dual-cavity combustor with cavities in tandem was compared with single-cavity combustor, with the result showing that the center of hydrogen jet leans to the main stream because of the downstream cavity. Secondly, in dual-cavity combustor with cavities in tandem, upstream cavity was compared with downstream cavity in fuel distribution. The result reveals that hydrogen spreads more extensively in the Z axis direction in upstream cavity, while it spreads wider in Y axis direction in downstream cavity. Finally, the dual-cavity combustor with cavities in parallel was compared with single-cavity combustor. The result indicates that cavity which is in the bottom wall has no influence on gas fuel distribution.

Key words: scramjet; dual-cavity; pilot hydrogen; hydrogen distribution

超燃冲压发动机中的点火方式有很多种, 常见的有^[1]: 机械节流式点火; 火炬点火; 引导氢辅助点火。引导氢辅助点火利用氢气自燃(或火花塞引燃的方式)产生的火焰来点燃煤油。氢气作为引导煤油燃烧的燃料, 其流量和当量比较小。引导氢的分布情况对于氢气初始火焰有一定的影响, 进而影响到煤油的火焰分布。因此, 分析引导氢的分布情况对于研究煤油的燃烧有着重要作用。

凹腔是超燃冲压发动机中增强混合的重要装置, 在凹腔研究方面, Burnes 等^[2]发现, 发生在凹腔内部的非稳态压力振荡会诱发大尺度拟序结构, 这些大尺度结构以一定的频率从凹腔后缘脱落, 有助于增强可压缩流中燃料与空气的混合。孙明波^[3]运用混合 RANS/LES 方法对超燃冲压发动机中凹腔的质量交换特性进行了非正常数值模拟, 得出凹腔的长深比和后沿倾角对凹腔质量交换过程有较大的影响, 凹腔的驻留时间随着长深比的增加而增加的结论。在多凹腔混合方面, Adam^[4]等运用 PLIF 的试验方法比较了凹腔上游、内部和下游喷射气体时的混合效果, 得知凹腔上游喷射气体具有较大的优势。Jeyakumar^[5]等通过测量滞止压力、滞止温度, 比较了对称分布凹腔和无凹腔时的燃料混合情况, 得知在

* 收稿日期: 2008- 11- 04

基金项目: 国家部委基金资助项目; 国防科技大学研究生创新资助项目

作者简介: 刘娟(1983-), 女, 博士生。

相同条件下,带凹腔的燃烧室比不带凹腔燃烧室的混合效果好很多。但是并联凹腔的研究情况很少见,本文运用定常 $k-\epsilon$ 模型,对于凹腔上游喷射燃料的方式,比较了串联凹腔/并联凹腔燃烧室相对于单凹腔燃烧室在增强燃料混合方面的优势,同时比较了串联凹腔燃烧室前后两个凹腔的燃料分布情况,旨在为两凹腔的位置布置提供参考。

1 网格及边界条件

采用专业网格生成软件 Gambit 生成三维计算网格,计算区域为等直段的燃烧室,燃烧室尺寸为 $54.5\text{mm} \times 75\text{mm} \times 1124\text{mm}$ 。为了提高网格的质量,在流道壁面及燃烧室进出口、凹腔和喷孔附近等流场变化剧烈的地方加密网格,同时将原来的圆形喷孔等效为等面积的方形喷孔,氢气喷孔的直径为 3mm 的圆孔,等效为 $2.65\text{mm} \times 2.65\text{mm}$ 的方孔,为了节省计算时间,取燃烧室一半作为计算区域,这样燃烧室入口尺寸为 $54.5\text{mm} \times 37.5\text{mm}$,图 1 给出了单个凹腔燃烧室的网格情况,其中 X 方向为流向, Y 方向为横向, Z 方向为展向。网格总数在 100 万左右,使用 Fluent 软件在 8 台计算机上并行计算。先计算通流流场情况,待流动稳定后,打开氢气喷孔。仿真中的压力与试验所测的压力平均值相差不大(如图 2 所示),验证了计算结果是可信的。以串联凹腔为例,图 3 给出了双凹腔燃烧室的结构示意图,其中, L 为本文所提到的两凹腔之间的距离。

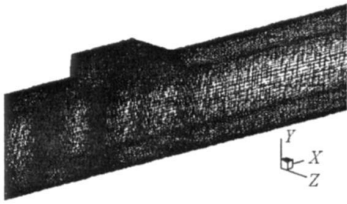


图 1 单凹腔计算网格
Fig. 1 Mesh of single cavity

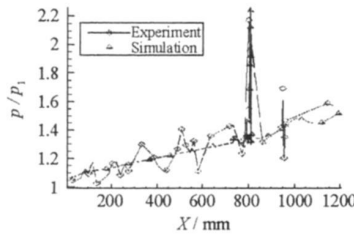


图 2 收敛时燃烧室壁面压力分布
Fig. 2 Distribution of combustor wall pressure when converging

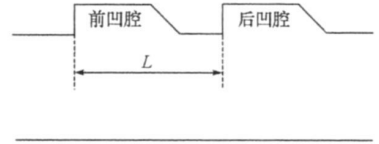


图 3 双凹腔燃烧室示意图
Fig. 3 Sketch map of combustor with dual cavities

边界条件:

(1) 燃烧室入口: 加热器稳定工作时室压 1.5MPa , 温度 1337K , 以此作为喷管入口条件, 经过分析采用标准 $k-\epsilon$ 模型结合非平衡壁面函数的湍流模型能较好地模拟喷管的流动特征, 表 1 给出了计算得到的喷管出口即隔离段入口的参数值;

出口由于是超声速, 则无需边界条件, 数值边界条件采用简单的一阶外推。

(2) 壁面条件: 采用无滑移、绝热条件: $u = v = w = 0, dT/dn = 0$ 。

(3) 喷流入口条件: 氢气喷孔采用压力入口边界条件, 并给出氢气组分浓度为 1。

表 1 燃烧室入口参数

Tab. 1 Parameters at combustor entrance

	Ma	P (kPa)	T (K)	P_0 (kPa)	T_0 (K)
设计参数	2.6	86.6	641	175.8	1301
仿真结果	2.59	72.53	650	147.3	1400

本文中模拟的燃烧室内部构型有三种, 如表 2 所示。

表2 燃烧室构型分类

Tab.2 Different sorts of combustor structure

单凹腔燃烧室	串联凹腔燃烧室		并联凹腔燃烧室
	构型 I	构型 II	
燃烧室内部只有一个凹腔	燃烧室内前后布置两个凹腔, 两凹腔前沿相距 135mm	燃烧室内前后布置两个凹腔, 两凹腔前沿相距 200mm	燃烧室上下壁面各布置一个凹腔

2 仿真结果分析

2.1 串联凹腔和单凹腔燃烧室氢气分布比较分析

为了比较串联凹腔对燃料分布的影响,选取三种构型燃烧室下游距离入口 1.1m 位置,对该截面处的燃料分布进行分析。该位置已经越过了后凹腔,接近燃烧室出口。由于不同构型方案下前凹腔及其附近的燃料分布相同,超声速来流情况下下游的流场不会影响上游,因此整个燃烧室内部燃料分布局部范围的变化是由后凹腔引起的。从图 4 中可以看出,在三种构型下,氢气射流中心的浓度基本相同,但是串联凹腔燃烧室的燃料中心比单凹腔燃烧室燃料中心偏向主流,构型 II 燃烧室的燃料中心明显地比构型 I 燃烧室燃料中心偏向主流。图 5 给出了构型 II 燃烧室氢气喷射时的流场压力分布情况,在后凹腔的后沿有道明显的激波存在,夹带燃料的混合气体经过后凹腔时,在后沿激波的作用下发生偏折,更靠近主流。

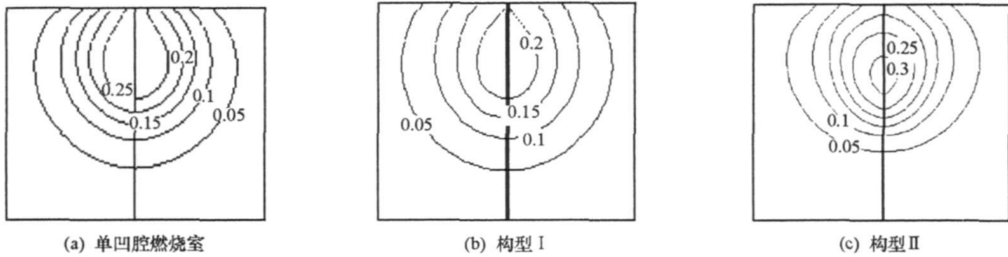
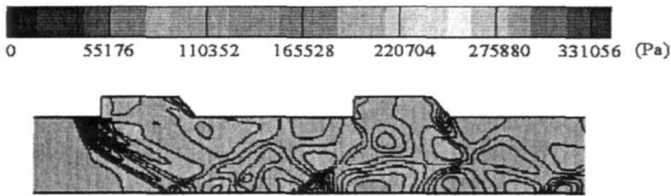
图4 不同燃烧室构型下距离燃烧室入口 1.1m 位置处的燃料分布情况(mol/m^3)Fig.4 Fuel distribution in the plane $X=1.1\text{m}$ of different combustor structure (mol/m^3)

图5 构型 II 燃烧室氢气喷射时流场压力分布

Fig.5 Pressure distribution during hydrogen injecting in II combustor

2.2 串联凹腔燃烧室前后凹腔氢气分布比较分析

为了比较前后凹腔及其附近的燃料分布情况,图 6 给出了构型 I 燃烧室前后凹腔相同位置的燃料分布情况。从图中可以看出,不论是前或后哪个凹腔,其内部的燃料比较少,更多的燃料主要分布在主流当中。在前凹腔附近,沿着流向氢气在凹腔内的浓度越来越小,分布的范围越来越广;在后凹腔附近,沿着流向燃料在凹腔中越来越多。前后两个凹腔相比较:前凹腔中的氢气比较多,在展向方向分布得较宽;后凹腔中的氢气浓度较低,在横向方向到达了壁面。耿辉^[6]根据 PLIF 试验结果同样也指出燃料流在向下游发展的过程中,混合越来越充分,进入凹腔的燃料逐渐增多,燃料在凹腔内部的展向扩展逐渐增大,本文仿真结果与该文献是一致的。原因解释如下:氢气在最初与主流混合的过程中,由于反向漩涡对的卷吸作用,混合过程比较明显,氢气在展向方向发展较快。之所以在后凹腔中横向方向发展较快,主要是由于后凹腔内部存在大的回流区结构(如图 7 所示),带动燃料在内部混合,即使在壁面也会

有氢气存在。为了与之相比较,图8同样给出了构型II燃烧室前后凹腔的燃料分布,可以看出,图8与图6具有相同的燃料分布,所不同的是,两凹腔之间的距离越长,后凹腔内部燃料中心的浓度越小,分布的范围更广,这与通常意义上燃料射流流经的距离越长混合越好是一致的。

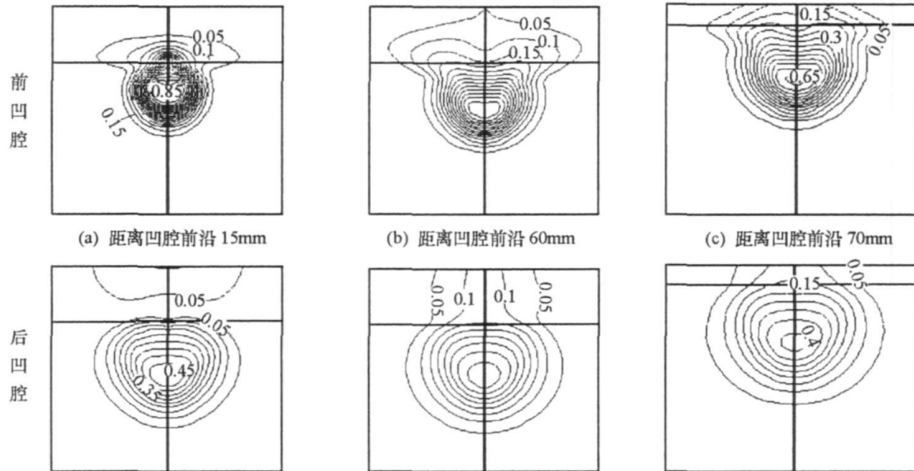


图6 构型I 燃烧室燃料在前后两凹腔中的分布(mol/m^3)

Fig. 6 Fuel distribution in upstream/downstream cavities of II combustor (mol/m^3)

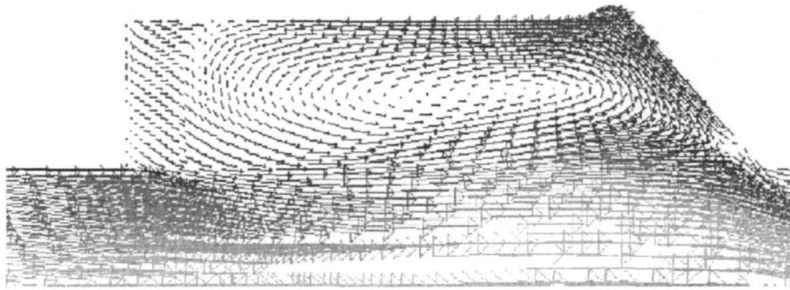


图7 构型I 燃烧室后凹腔回流区

Fig. 7 Recirculation area in downstream cavity of II combustor

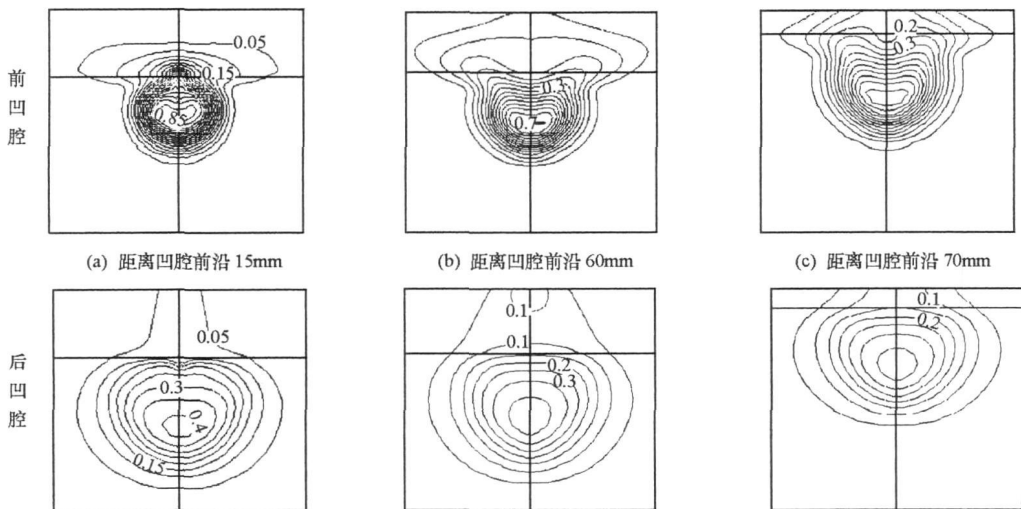


图8 构型II 燃烧室燃料在前后凹腔中的分布(mol/m^3)

Fig. 8 Fuel distribution in upstream/downstream cavities of III combustor (mol/m^3)

2.3 并联凹腔和单凹腔燃烧室氢气分布比较分析

图9给出了并联凹腔燃烧室内的燃料摩尔浓度分布。从图中可看出,并联凹腔与单凹腔的燃料分

布不管在穿透度还是燃料摩尔浓度具体数值上基本上是一样的,两幅图中燃料穿透度在通过上凹腔后延时达到了最大值。图10选取了燃烧室内距离入口0.9m的一个截面,比较该截面处并联凹腔和单凹腔时的燃料分布情况。从图中可以看出,两种构型燃烧室燃料穿透度基本一致,燃料中心位置也基本一样,只是单凹腔时燃料中心处的浓度更大些,达到了0.5,而并联凹腔时浓度是0.45,这可能是由于下凹腔后沿激波作用在燃料射流上促进了燃料与主流的混合。但是总体上来讲,并联凹腔对气体燃料的分布影响不大。

通过以上分析,我们可以看出串联凹腔对于燃料混合有一定的促进作用,而并联凹腔的影响不大,这也是很少见关于并联凹腔在增强燃料混合方面文献的原因。

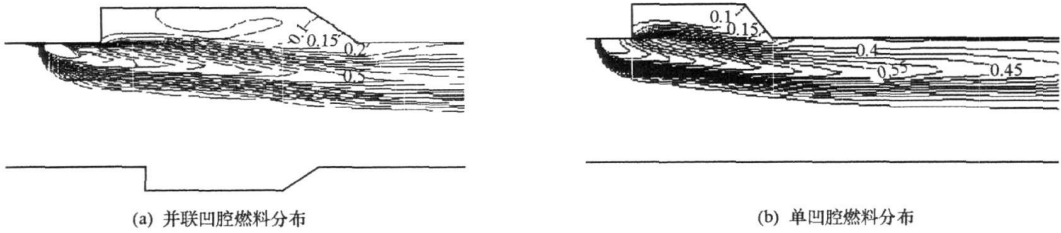


图9 并联凹腔与单凹腔燃料分布比较(mol/m^3)

Fig. 9 Fuel distribution in the flow direction in dual-cavity/single-cavity combustor (mol/m^3)

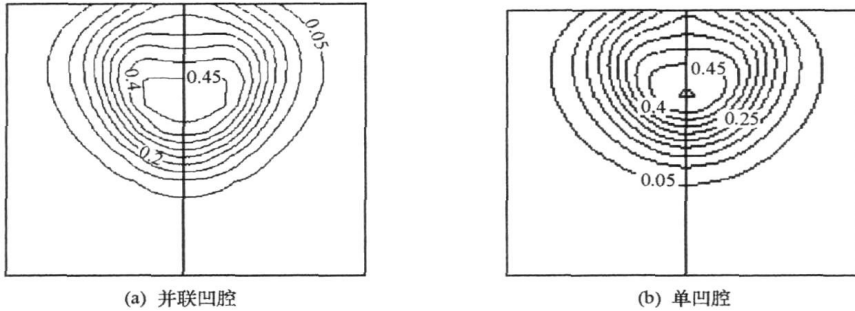


图10 距离燃烧室入口0.9m并联凹腔与单凹腔氢气分布比较(mol/m^3)

Fig. 10 Fuel distribution in the plane $X=0.9\text{m}$ in dual-cavity/single-cavity combustor (mol/m^3)

3 结论

(1) 氢气燃料主要分布在主流中,凹腔内部的燃料较少。

(2) 与单凹腔燃烧室相比较,双凹腔燃烧室下游的氢气燃料射流柱穿透度变化不大,燃料射流柱的中心更偏向于主流,这主要是由后凹腔后沿激波的作用引起的。

(3) 双凹腔燃烧室的前后两个凹腔相比较,前凹腔中的氢气浓度较大,在展向方向分布得较宽;后凹腔中的氢气浓度较低,在横向方向到达了壁面,这主要是由后凹腔内部大的回流区将燃料带到了上壁面引起的。

(4) 超燃冲压发动机燃烧室内并联凹腔对气体燃料的分布影响不大。

在分析过氢气燃料的分布情况后,下一步的工作就是分析氢气的着火过程,目的在于分析燃料初始浓度分布对着火的影响。

参考文献:

- [1] 李大鹏. 煤油双模态冲压发动机燃烧室工作过程研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
- [2] Bumens R, Parr T P, Wilson K J. Investigation of Supersonic Mixing Control Using Cavities: Effect of Fuel Injection Location[R]. AIAA Paper, 2000.
- [3] 孙明波, 梁剑寒, 王振国. 超声速燃烧火焰稳定凹腔质量交换特性的数值研究[J]. 力学学报, 2007, 39(2).
- [4] Quick A, Paul I. Upstream Mixing Cavity Coupled with a Downstream Flameholding Cavity Behavior in Supersonic Flow[C]//AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, July, 2005.
- [5] Jayakumar S, Balachandran P. Experimental Investigations on Supersonic Stream Past Axisymmetric Cavities[C]//41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, July 2005.
- [6] 耿辉. 超声速燃烧室中凹腔上游横向喷注燃料的流动、混合与燃烧特性研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.