

# 常规结构和“腔中腔”结构的 涡轮级间燃烧室数值模拟

骆广琦<sup>1</sup>, 胡磊<sup>1</sup>, 李晓勇<sup>2</sup>, 张海明<sup>1</sup>, 孟龙<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 空军工程大学科研部, 陕西 西安 710051)

**摘要** 利用流体计算软件模拟涡轮级间燃烧室(ITB)三维两相燃烧流场,研究了常规结构收集涡和腔中腔(CIAC)结构收集涡的ITB燃烧和流场变化规律。湍流模型采用可实现 $k-\varepsilon$ 模型模拟,燃烧模型采用非预混平衡化学反应模型,并对2种不同结构ITB模型的温度、流场、组分等进行了分析和比较。结果发现2种结构的ITB燃烧室可以很明显地提高低压涡轮进口速度及进口温度,周向腔内前半段温度要高于后半段,主流通道下游参与二次燃烧的燃料为未完全燃烧氧化的低碳化和物。“腔中腔”结构的ITB燃烧更充分,温升更大,顶部凹槽具有明显增强火焰稳定性的作用。

**关键词** 涡轮级间燃烧室;腔中腔结构;非预混燃烧

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.04.002

**中图分类号** V231.2 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)04-0005-05

高压涡轮前温度提高虽然有利于发动机性能提升,但也在材料、工艺、安全性、费用等方面带来诸多不利影响,因此如何在不提高高压涡轮前温度的前提下提升发动机性能非常重要。对常规双转子涡扇发动机来说,主燃烧室出口温度虽然很高,但经过高压涡轮做功后,温度下降(约300-500 K),使得低压涡轮进口温度较高压涡轮小得多。在低压涡轮功不变的条件下,必然使低压涡轮落压比增大,出口总压降低,发动机推力随之减小。若能采取措施,使得低压涡轮进口温度升高,则发动机推力必然增大。

涡轮级间燃烧室(Inter-Turbine Burner, ITB)是一种新概念的燃烧室<sup>[1]</sup>。涡轮进口导向叶片的外围有一个环绕着的圆周腔,燃油和空气被以一定的方式引进,油气混合并燃烧均在圆周腔内进行,由于周向腔内空气以一定角度射入,可使腔内产生环腔的旋流,从而增加火焰滞留时间,使得燃烧所要求的轴向长度大大减少。通过在低压涡轮导向器外侧设置周向燃烧室,将高压涡轮出口燃气再组织一次燃烧,可以提高低压涡轮进口总温,从而提高喷管出口总压和发动机性能,扩大发动机飞行马赫数范围。从热力循环的角度看,涡轮级间燃烧室给工质加入了更多的热能,使发动机循环功增大,更多的热能转换为气体动能,必然使发动机具有更高的推力性能<sup>[2-3]</sup>。其结构见图1(a),相应的热力过程见图1(b)-(c)。

目前,常用的ITB结构有常规结构收集涡(The Trapped Vortex Combustion,简称TVC)<sup>[4]</sup>和“腔中腔”(Cavity In A Cavity,简称CIAC)结构收集涡<sup>[5]</sup>。文献[5]通过仿真表明CIAC结构燃烧效率较高,温升大,总压损失大,但并没有开展两者流场和温度场的对比研究。本文主要针对2种不同收集涡结构的ITB进行了数值模拟,得到了相同进口条件下的燃烧温度场、流场和组分分布,并进行了对比分析,阐明了CIAC结构优势。

\* 收稿日期:2010-12-28

基金项目:空军工程大学学术创新基金资助项目(XS1011004)

作者简介:骆广琦(1971-),男,陕西泾阳人,教授,主要从事推进系统总体设计与性能研究。

E-mail:78758909@qq.com

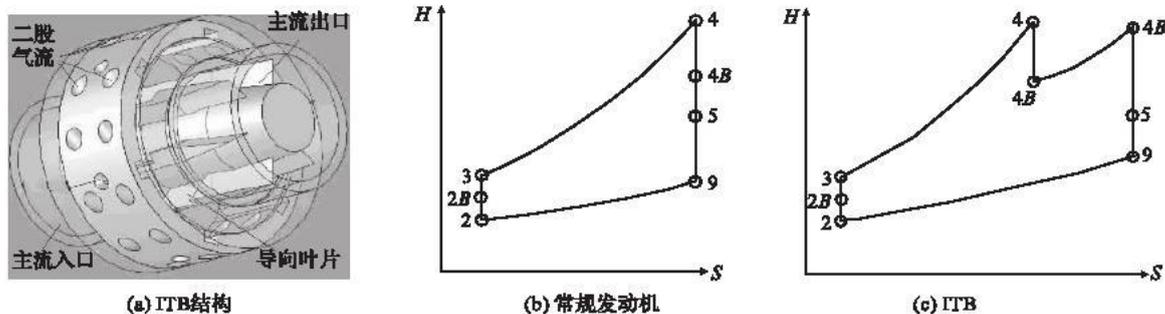


图1 ITB结构和发动机理想循环比较

Fig. 1 ITB configure and Ideal circulation of ITB engine and general engine

## 1 涡轮级间燃烧室模型的建立

### 1.1 结构模型及网格划分

级间燃烧室为环绕在低压涡轮导向叶片外侧的周向空腔,考虑到每个导向叶片外侧都有4个空气入口及一个燃油入口,且实验重力可以忽略不计,因此可以认为每一部分的流场分布都是完全一样的,故构造1/6周期性模型,即60°模型,以减少计算量<sup>[6]</sup>。具体计算模型结构见图2。

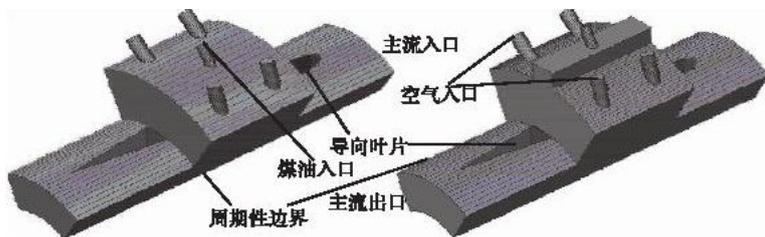


图2 常规TVC(左)和CIAC结构图(右)

Fig. 2 Configuration of general TVC (left) and CIAC(right)

为了提高网格质量,将CIAC结构的模型分割成20个部分,局部加密,除顶部的“腔中腔”结构外,其余部分均可采用库勃方法进行结构网格划分。在常规结构中,除燃油入口以下长方体部分,其他部分也均可采用库勃划分,网格约为 $13 \times 10^5$ 个。

### 1.2 边界条件

本结构主流通道入口、燃油进口及收集涡4个空气入口均采用与文献[5]相同的进口条件,流量分别为 $0.036\ 667\ \text{kg/s}$ 、 $89 \times 10^{-5}\ \text{kg/s}$ 及 $0.008\ 067\ \text{kg/s}$ ,出口处采用压力出口,主流通道入口温度为491 K。文献模型采用 $\text{C}_{12}\text{H}_{23}$ (实验用JB-8+100燃油)作为反应物,通过圆锥雾化喷嘴喷入圆周腔中,形成锥形喷雾。两侧壁面采用周期性无压降旋转壁面。本文利用离散相模型来模拟单个液滴的流动,通过交互式计算离散相轨迹和气相连续方程,可以得到液体和空气流动之间的热量、动量传递和质量守恒。液滴来流的离散数量设置为20个,液滴的直径都是 $100\ \mu\text{m}$ ;液滴锥形的半角锥为 $35^\circ$ ;喷射流量为 $0.12\ \text{kg/min}$ ;燃油温度设置为常温 $300\ \text{K}$ <sup>[7]</sup>。燃油喷射的流量根据与主流的当量比求得,文献提供的混气当量比为0.294。

### 1.3 计算模型及求解器

本文采用Realizable  $k-\varepsilon$ 湍流模型<sup>[8]</sup>。对于本算例模拟的快速化学反应的紊态扩散火焰,较适宜采用非预混燃烧模型来模拟燃烧过程<sup>[9]</sup>。求解器为分离隐式稳态求解器,速度和压力的耦合采用SIMPLE算法处理,各计算参数的离散均采用二阶精度的迎风格式,控制方程采用亚松弛因子控制收敛。除能量和 $\text{NO}_x \times 10^{-6}$ 外,其他各残差收敛参数的标准均为 $10^{-3}$ 。由于3D模型结构复杂,能量的残差收敛较困难,故本文主要通过出、入口的流量和能量守恒判断,同时监测出口处的平均温度,当迭代到以上参数基本无变化时(误差控制在1%),即可认为计算已收敛。

### 1.4 算例验证

目前国内还没有开展相关实验研究,无法通过实验结果验证仿真模型的正确性,为了验证仿真计算的可靠性和适用性,本文参照Roger T. Greenwood的仿真结果进行仿真算例的验证<sup>[5]</sup>。进口条件采用文献中的条件1,Main为 $2.2\ \text{kg/min}$ ,cavity为 $0.484\ \text{kg/min}$ , $P$ 为 $284.1\ \text{kPa}$ , $dP/P$ 为 $4.7\%$ , $T$ 为 $491\ \text{K}$ , $\Phi$ 为0.294。具体模型尺寸大小文献[5]中没有全部给出,故采用近似的办法。通过对比表1出口污染物排放量及燃烧

效率,发现计算结果总压损失略低于文献结果,都大于实验值,CO 污染物高于实验值和文献计算值,但仍在可接受范围内。NO<sub>x</sub> 模型也是跟文献中一样只考虑热力型,故数值低于实验值。温度略低于文献计算值,同时燃烧效率略低于实验值及文献计算值,可以说明所采用的计算模型得出的计算结果能够比较好地模拟实验结果。

表1 结果比较

Tab.1 Comparison of result

计算结果	dP/P (%)	CO/ppm	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	NO <sub>x</sub> /ppm	T <sub>exit</sub> /K	η <sub>b</sub> (%)
实验	5.0	1 089	3.2	16.4	37.3	1 254	98.5
文献[5]计算	10.5	1 279	5.4	12.3	3.8	1 413	98.3
本文模型	9.5	1 674	4.7	13.2	1.7	1 359	98.0

## 2 仿真结果对比分析

### 2.1 收集涡内流场对比分析

由于燃烧使得气体膨胀,出口速度提高,并且空气从5个入口射入(1个主流,4个收集涡入口),1个主流出口流出,整个结构相当于一个收敛管,在亚音速范围内也起到一个加速作用。收集涡前后截面的速度分布见图3-4。可知收集涡的前半段流场旋流的整体速度相对于后半段较低,这将有利于火焰的稳定燃烧。收集涡顶部喷入的高速气流使得收集涡产生一个顺时针(图示方向)的旋流,此时导向叶片起到火焰稳定器的作用。



图3 常规 TVC 的截面流场分布

Fig.3 Velocity vectors on the cross section of TVC



图4 CIAC 结构截面流场分布

Fig.4 Velocity vectors on the cross section of CIAC

对比2种结构,可以知道 CIAC 结构的收集涡中煤油先喷入顶槽内掺混反应,而常规结构的收集涡则将煤油直接喷入收集涡内掺混反应。CIAC 的顶槽内速度相对于收集涡内的速度是非常低的,这种低速区非常有利于燃烧反应。而常规结构的收集涡燃烧过程则在收集涡的高速区,作用相反。在 CIAC 结构的 ITB 内,收集涡中流场与顶槽流场相互作用,在顶槽内产生了一个十分明显的旋流现象,且顶槽前端速度相对于后端速度更低,这将有利于燃油的掺混和燃烧,而常规 ITB 则没有这种现象。

### 2.2 温度场对比分析

图5为ITB各主要截面的温度分布,从图中可以看到空气及燃油喷出后在收集涡内沿圆周腔周向流动,

该流动区域的局部温度相对其他部分温度要低一些。收集涡内靠近前面的部位燃油燃烧较充分,相应温度较高。在图中主流通道下游的截面上,右侧贴近导向叶片的温度较高,而左侧高温区域不贴近导向叶片。结合此处流场分析可知,火焰从收集涡内射流进入主流通道下游,由于导向叶片的火焰稳定作用,在导向叶片的右侧(背风区)使得火焰能够扩展至贴近导向叶片。而左侧火焰则直接被高速气流吹向下游,无法贴近导向叶片。

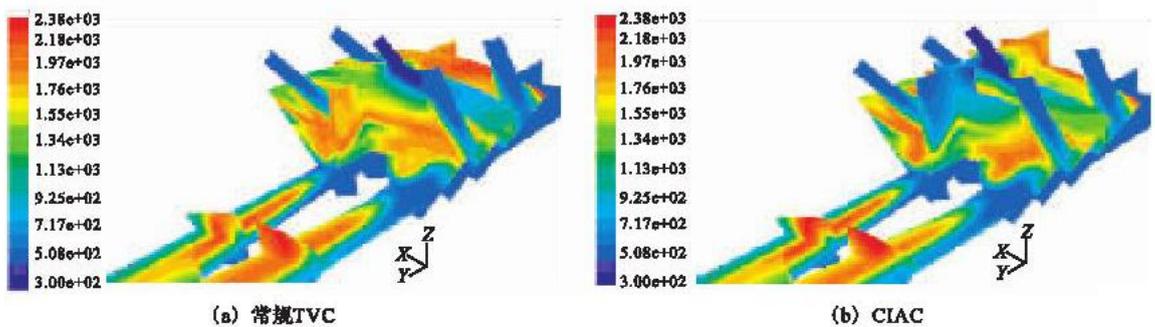


图5 截面温度云图分布

Fig. 5 Contours of temperature on the cross section

从图中可以看到,CIAC 结构的煤油先进入顶槽内,在顶槽内开始反应燃烧,而常规结构的煤油直接喷入收集涡内,没有较好地进行掺混,从而在壁面形成了较大面积的低温区。由于收集涡内前半段速度要比后半段低,因此前半段的燃烧效果要高于后半段,而在 CIAC 结构的收集涡内,这种现象更为明显,在 CIAC 结构的顶槽后端有较大面积的低温区。经计算得到常规 ITB 结构的出口面积积分平均温度约为 1 390 K,而 CIAC 结构的 ITB 出口面积积分平均温度约为 1 420 K,说明 CIAC 结构的 ITB 燃烧更充分。

### 2.3 煤油组分对比分析

见图 6,2 种结构的 ITB 煤油都在收集涡内参与反应,主流通道出口处均不存在未反应的煤油,主流通道下游参与二次燃烧的燃料为煤油裂解分离后的未完全燃烧氧化的低碳化合物。

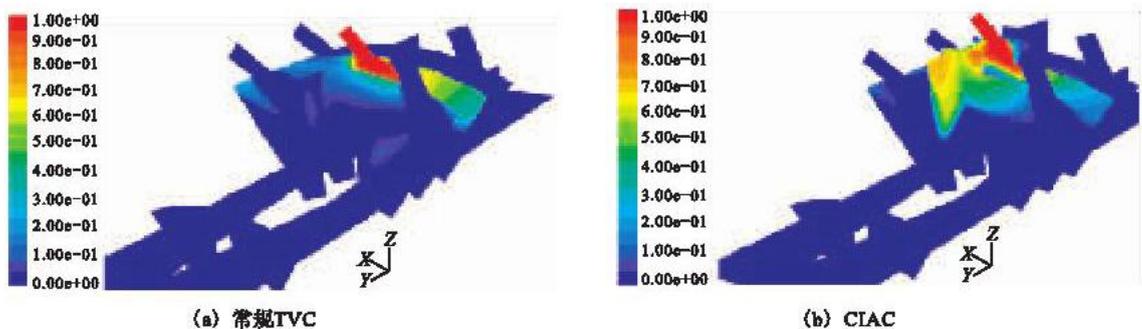


图6 截面煤油云图分布

Fig. 6 Contours of fuel spray on the cross section

由图可见,在 CIAC 结构中,煤油在顶槽内浓度最高,而后随着与收集涡内的  $O_2$  参与反应,浓度逐渐降低。由于 CIAC 结构的 ITB 一部分煤油在顶槽内燃烧,因此 CIAC 结构的收集涡内煤油含量要比常规结构的收集涡含量低。由于收集涡内前半段的流场速度比后半段的流场速度低,煤油在顶槽的前半段燃烧更充分,因此前端的煤油含量要比顶槽后端含量低,这种现象在 CIAC 结构的收集涡中更加明显。

## 3 结论

本文主要进行了涡轮级间燃烧室的数值模拟计算,并针对 ITB 中关于“腔中腔”结构概念的流场、温度和组分分布等进行了分析比较,从而得出以下结论:

1) ITB 能够明显地提高低压涡轮前的燃气温度和速度。CIAC 结构的收集涡顶槽内速度较低,存在一个低速旋流场,有利于组织掺混和燃烧,顶部凹槽具有明显增强火焰稳定性的作用。

2) 在收集涡中的旋流场内,由于导向叶片的稳定作用,导致叶片两侧温度分布不均。CIAC 结构的收集

涡温升大于常规结构的收集涡。

3) 主流通道下游参与二次燃烧的燃料为未完全燃烧氧化的低碳化和物。CIAC 结构的收集涡内煤油浓度较高,煤油在此处进行部分掺混和燃烧。

2 种结构的 ITB 为使腔内形成高速旋流,都需要从外部引气,这必然会降低发动机效率。因此,下一步将继续研究如何在不采用外部引气的情况下使得腔内产生高速旋流。

#### 参考文献:

- [1] Greenwood Roger T. Numerical analysis and optimization of the ultra compact combustor[D]. Ohio: Department of the air force university, 2005.
- [2] 骆广琦,郑九洲,张发启. 多级涡轮级间燃烧室发动机与常规涡轮喷气发动机性能对比研究[J]. 弹箭与制导学报,2009, 29(1):162-165.  
LUO Guangqi,ZHENG Jiuzhou,ZHANG Faqi. Multiple turbine inter-stage burners turbofan engine performance research[J]. Journal of projectiles,rockets,missiles and guidance, 2009,29(1):162-165. (in Chinese)
- [3] Joseph Zelina, Shouse Dale T, Craig Neuroth. High-pressure tests of a high-g, ultra-compact combustor[R]. AIAA 2005-3779.
- [4] Zelina J, Ehret J, Hancock R D, et al. Ultra-compact combustion technology using high swirl for enhanced burning rate[R]. AIAA 2002-3725.
- [5] Greenwood Roger T, Anthenien Ralph A, Joseph Zelina. Computational analysis of the ultra compact combustor[R]. AIAA 2005-220.
- [6] Anisko Jonathan F, Anthenien Ralph A, Joseph Zelina Jr. Numerical investigation of cavity-vane interactions within the ultra compact combustor[R]. AIAA 2006-805.
- [7] Thornburg H, Sekar B, Zelina J, et al. Geometrical parametric studies of inter-turbine burner (ITB) for improved performance [R]. AIAA 2007-5099.
- [8] Moenter David S. Design and numerical simulation of two-dimensional ultra compact combustor model sections for experimental observation of cavity-vane flow interactions[D]. Ohio: Department of the air force university, 2006.
- [9] Jonathan Anisko. Numerical investigation of cavity-vane interactions within the ultra compact combustor[D]. Ohio: Department of the air force university, 2006.

(编辑:徐敏)

## Numerical Simulation Investigation of "Cavity in A Cavity" Structure of Inter-Turbine Burner

LUO Guang-qi<sup>1</sup>, HU Lei<sup>1</sup>, LI Xiao-yong<sup>2</sup>, ZHANG Hai-ming<sup>1</sup>, MENG Long<sup>1</sup>

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** The difference between general trapped vortex combustion and CIAC (cavity in a cavity) trapped vortex combustion of ITB (Inter-Turbine Burner) 3-D combustor on two phase combustion flow field and combustion performances are studied by using CFD software. Realizable model is applied to simulating the turbulence. Non-premixed combustion model is used to model the turbulence-chemistry interaction. Then, the analysis and comparison of the temperatures, flow field and species are done in the two different ITB structures. It is found that the ITB of the two structures can yield a substantial increase in the entrance temperature and speed of low-pressure turbine by the results. The temperature of the front half section is higher than that of the rear half section in the circumferential cavity. The fuel participating in the secondary burning in the downstream of the main path way is an incomplete burnt, incomplete oxidized low carbon compound. A fuller combustion and a greater temperature rise are obtained in CIAC (cavity in a cavity) structure. The groove on the top has a well effect on stability of combustion.

**Key words:** inter-turbine burner; cavity in a cavity structure; non-premixed combustion