

文章编号:1000-8055(2011)07-1509-06

采用锯齿冠状混合器的加力燃烧室 燃烧特性数值研究

王亚盟¹, 张靖周¹, 单 勇¹, 高家春², 徐兴平²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 基于计算流体力学(CFD)技术,采用涡耗散燃烧模型对环形混合器和锯齿冠状混合器的加力燃烧进行三维两相化学反应流的数值模拟. 计算结果表明:相对于环形混合器,锯齿冠状混合器能够显著提高外涵气流的温度和内涵的含氧量,在相同的供油方案下,使得燃烧效率提高 14.9%.

关 键 词: 涡扇发动机; 加力燃烧室; 锯齿冠状混合器; 燃烧; 数值模拟

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Numerical study on the combustion characteristics of afterburner with chevron mixer

WANG Ya-meng¹, ZHANG Jing-zhou¹, SHAN Yong¹,
GAO Jia-chun², XU Xing-ping²

(1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016 China;

2. Shenyang Aeroengine Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015 China)

Abstract: Based on computational fluid dynamics (CFD), the process of three-dimension and two-phase chemical reaction flow of afterburner with confluent mixer and chevron mixer was simulated with introduction of eddy dissipation (ED) model. The results reveal that the temperature of bypass flow and the oxygen content of core flow are enhanced dramatically by chevron mixer, meanwhile, the combustion efficiency increases by 14.9% compared to confluent mixer under the same fuel supply scheme.

Key words: turbofan engine; afterburner; chevron mixer; combustion;
numerical simulation

涡扇发动机加力燃烧室中的混合器结构对内涵气流的混合以及燃烧组织具有重要的影响,就环形混合器而言,它具有结构简单、质量轻和气动损失小等优点,但由于内外涵为平行进气,两股气流之间的混合主要依赖于射流间的剪切作用,混合效率偏低,造成外涵出口下游的气流含氧量

高、温度低,而内涵出口下游的气流含氧量低、温度高,不利于加力燃烧效率的提高.

国内外学者已对波瓣混合器开展了大量的研究^[1-7]. 该型混合器可以有效改善混合的均匀性,有利于提高燃烧稳定性和燃烧效率,但也随之带来气动损失大、结构刚性差等问题,特别是在小涵

收稿日期:2010-06-21; 修订日期:2010-11-04

基金项目:航空科学基金(2008ZB0607)

作者简介:王亚盟(1984—),男,陕西宝鸡人,硕士生,主要从事传热与燃烧的研究.

道比的涡扇加力燃烧室中,波瓣穿透率过大所引起的气动损失尤为显著.本文借鉴波瓣和突片诱导的流向涡作用机制^[1-11],提出一种新型的锯齿冠状混合器结构型式,该混合器在环形混合器的基础上对尾缘进行锯齿修型,沿尾缘周向均匀分布的锯齿对于内外涵气流的混合可以起到相当于多个突片涡激励的强化作用.尽管国内外针对突片涡激励的作用机制以及锯齿冠状喷口的气动和噪声特性开展了一系列的研究工作,但针对涡扇发动机加力燃烧室中的锯齿冠状混合器结构的研究却很少.本文在加力燃烧室中锯齿冠状混合器掺混性能研究的基础上^[12],采用涡耗散燃烧模型对环形混合器和锯齿冠状混合器的加力燃烧进行三维两相化学反应流的数值模拟,分析比较环形混合器和锯齿冠状混合下游的两相流流场特征,揭示锯齿冠状混合器对加力燃烧室燃烧效率的

影响.

1 计算模型

涡扇发动机加力燃烧室简化结构如图 1(a)所示,为便于下文分析表述,标记了 A~E 五个典型截面,其距进口分别为 350, 850, 1 100, 1 500, 1 800 mm. 火焰稳定器包括三个同轴的环形 V 槽,环形槽之间由径向传焰器连接. 锯齿冠状混合器如图 1(b)所示,锯齿冠状混合器由 24 个锯齿沿环尾缘周向均匀分布,锯齿向内向外交错分布,倾角均为 30°,齿边长 134.3 mm、顶高 106 mm,环直径 403 mm. 航空煤油($C_{12}H_{23}$)由布置在稳定器上游的 135 个喷油点喷入加力燃烧室,燃油温度 300 K,燃烧热值为 4.29×10^7 J/kg,计算区域取整个加力室的 1/4,经网格独立试验取计算网格为 210 万.

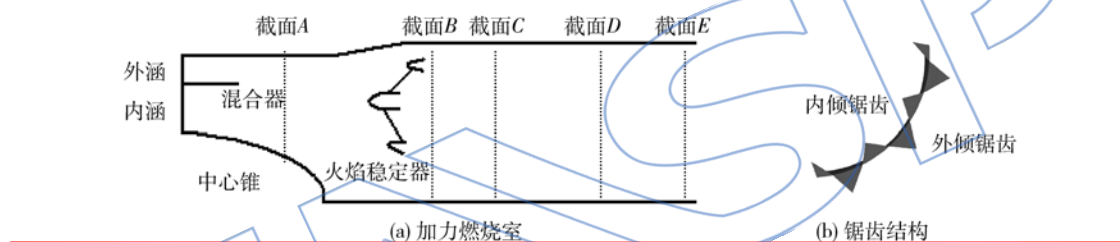


图 1 计算模型示意图

Fig. 1 Simplified computational model configuration

2 数学模型与计算方法

2.1 燃烧模型

燃烧模型选择涡耗散模型^[13],此模型基于快速化学反应假设,可同时用于预混和非预混的燃烧.在该模型中,组分 i 在化学反应中的净反应速率取下面两式中的最小值:

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min \left\{ \frac{Y_r}{v'_{i,r} M_{w,i}} \right\}$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j v''_{j,r} M_{w,j}}$$

式中 $M_{w,i}$ 是组分 i 的分子量; $v'_{i,r}$, $v''_{i,r}$ 为组分 i 在反应中反应物和生成物的 Stoichiometric 系数; Y_p 为生成物的质量分数, Y_r 为反应物的质量分数; N 为反应系统中化学组分的数目; A , B 为经验常数 ($A=4$, $B=0.5$); ρ 为混合物密度.

2.2 喷雾模型

借助离散项液滴模型来计算燃油液滴的轨道

以及由其引起的热量、质量传递,并在相间耦合中考察离散项的分布^[13]. 定义了 135 个三维的中空锥形射流源,其喷射半角为 30°,颗粒类型为液滴;油珠的湍流扩散采用颗粒群模型,其跟踪由统计平均决定的一个平均轨道,即颗粒流的轨道是围绕着某个平均轨道的“云团”,颗粒群中的颗粒质量分数分布服从高斯概率分布函数(PDF);燃油液滴假定是球形的,且直径服从 Rosin-Rammler 分布,液滴平均直径为 0.04 mm,其分布指数为 3.

2.3 湍流模型与边界条件

应用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型进行稳态湍流流场计算^[12],离散格式采用二阶迎风,压力-速度耦合通过 SIMPLE(semi-implicit method for pressure linked equation)算法求解;近壁区域采用标准壁面函数法进行处理,壁面 y^+ 范围在 30~45;选择离散项模型进行连续相和离散项的耦合求解. 内外涵进口为流量入口边界,内涵进口条件:流量为 17.2 kg/s,总温为 1 015.1 K,氧气质量分数为

0.1531; 外涵进口条件: 流量为 13.8 kg/s , 总温为 424 K , 氧气质量分数为 0.232.

3 计算结果分析

3.1 流场分析

图 2 是环形混合器和锯齿冠状混合器出口的速度矢量。从图中可以看出: 在锯齿冠状混合器的出口, 形成一对旋转方向相反的涡, 即流向涡。在流向涡的作用下, 内外涵气流之间能够进行较为迅速充分的掺混, 有利于改善加力燃烧室内部的流场结构: 向外侧弯曲的锯齿引导内涵高温气流向外涵风扇冷气流的穿透, 提高了外涵温度, 如图所示 3; 而向内弯曲的锯齿促使外涵气流向内涵方向的穿透, 在一定程度上提高内涵气流的氧气质量分数, 如图 4 所示。

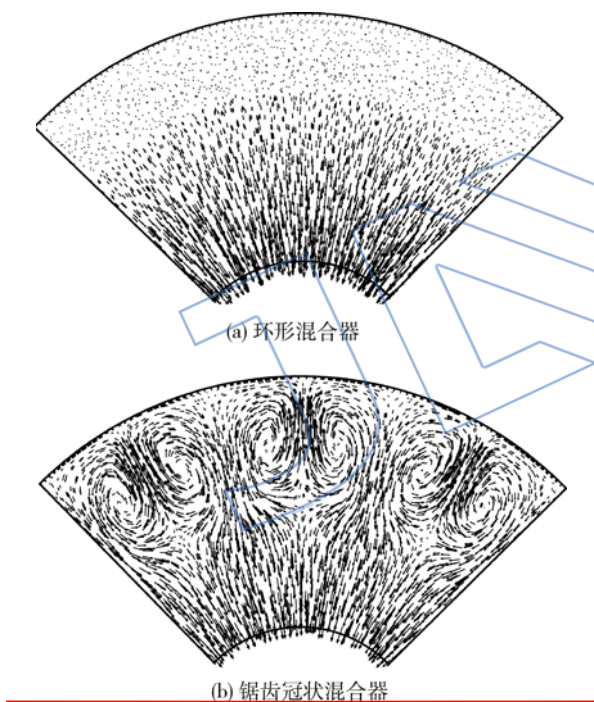


图 2 截面 A 速度矢量

Fig. 2 Velocity vectors at section A

图 5 给出了加力燃烧室内冷态流场子午面的压力分布特征, 可以看出来, 两种情形下, 火焰稳定器下游回流区压力分布很接近, 相对环形混合器, 锯齿冠状混合器对稳定器回流区的影响很小。

图 6 为加力燃烧室截面 C 上加力燃烧后的温度分布。通过对比可以看出: 采用环形混合器时, 外涵有比较大的低温区域, 原因是燃油在较低温度的外涵气流中不能够良好地雾化、蒸发, 进而导致燃烧不充分, 很显然这对整个加力燃烧室的

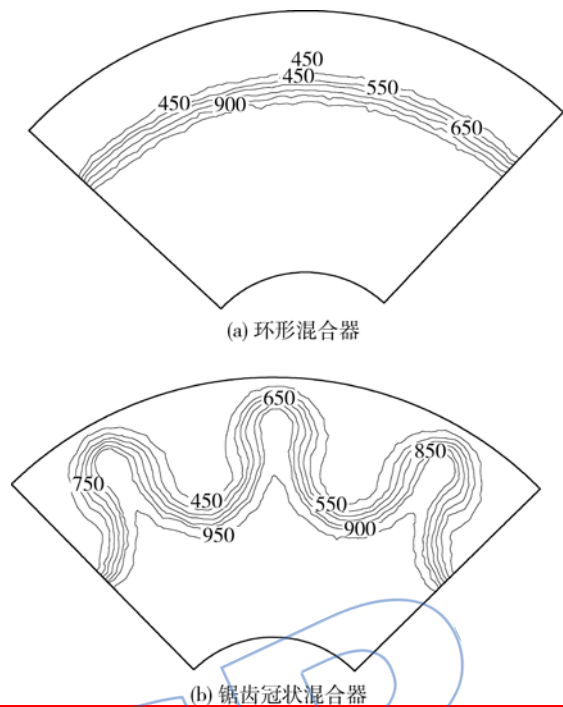


图 3 截面 A 温度分布 (单位: K)

Fig. 3 Temperature distributions at section A (unit: K)

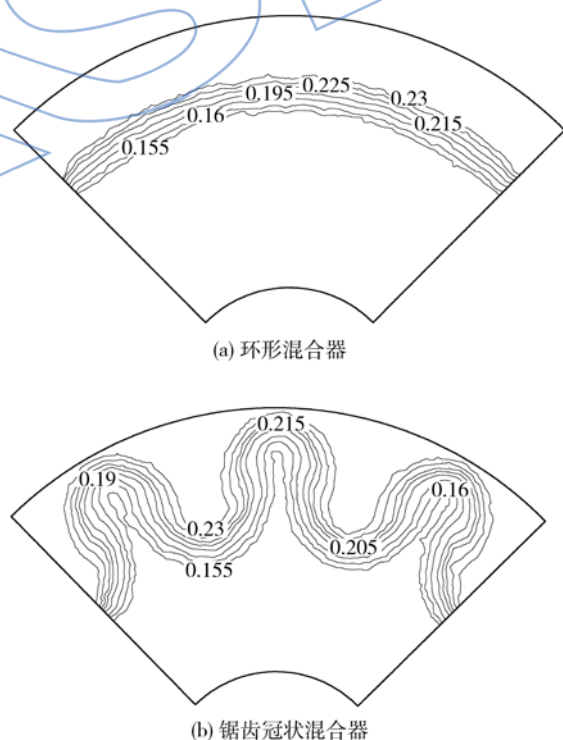


图 4 截面 A 氧气质量分数分布

Fig. 4 Oxygen mass fraction distributions at section A

性能是不利的; 而在锯齿冠状混合器作用下, 气体加力燃烧后的温度相对均匀, 燃烧更充分。

3.2 燃油液滴直径分布特征

加力燃烧室内的燃油油珠的蒸发状况对其端

流扩散及燃烧过程起着很重要的作用,燃油只有成为蒸气状态才能通过一定的气相反应机制发生化学反应.加力燃烧室内燃油如果能够在高温和强迫对流的作用下快速蒸发,则后期的燃烧过程进行得就会比较充分,即有助于燃烧效率的提高.

加力燃烧室各喷油点液雾轨迹跟踪如图 7 所示,可以看出,在环形混合器作用下,外涵区域油珠寿命很长,燃油场在很长的距离内由气液两相燃油组成,其随外涵气流而去,边运动边沿途蒸发;而在锯齿冠状混合器下,外涵的燃油油珠在很短的

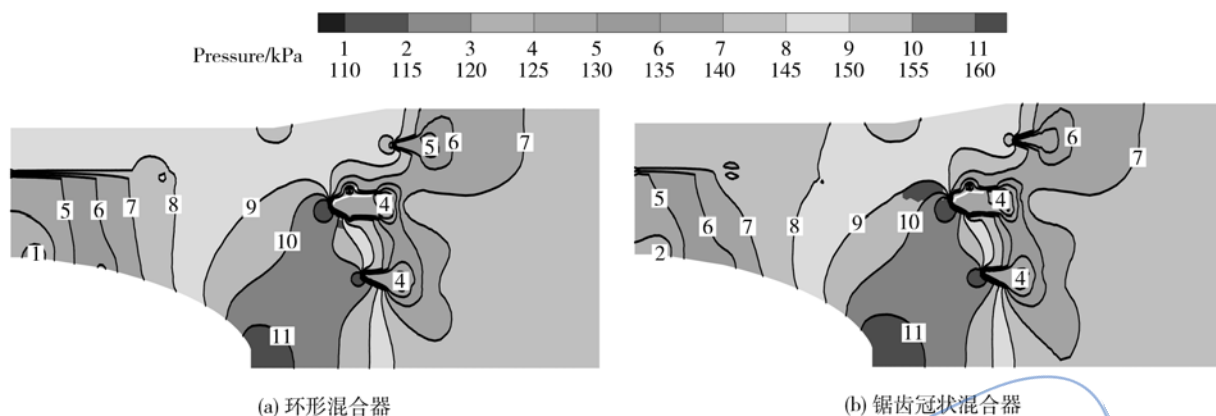


图 5 压力分布云图

Fig. 5 Contour of pressure distribution

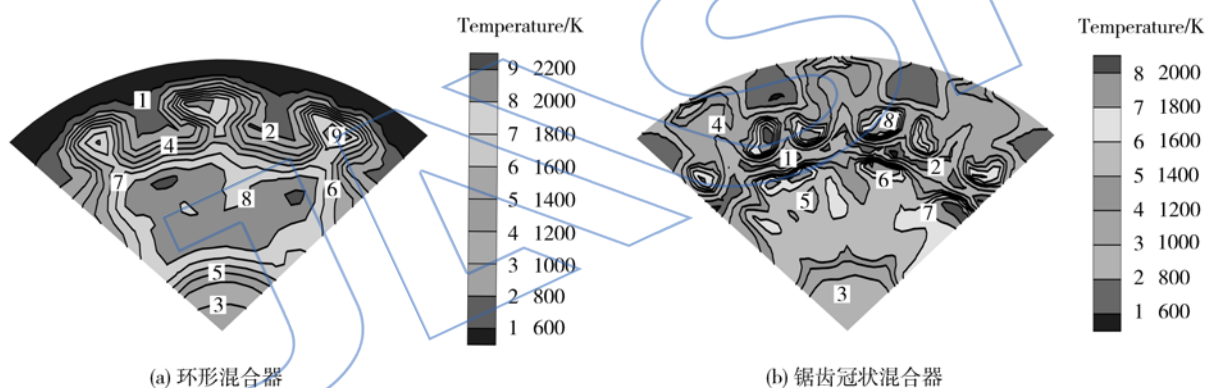


图 6 截面 C 温度分布

Fig. 6 Contour of temperature distribution at section C

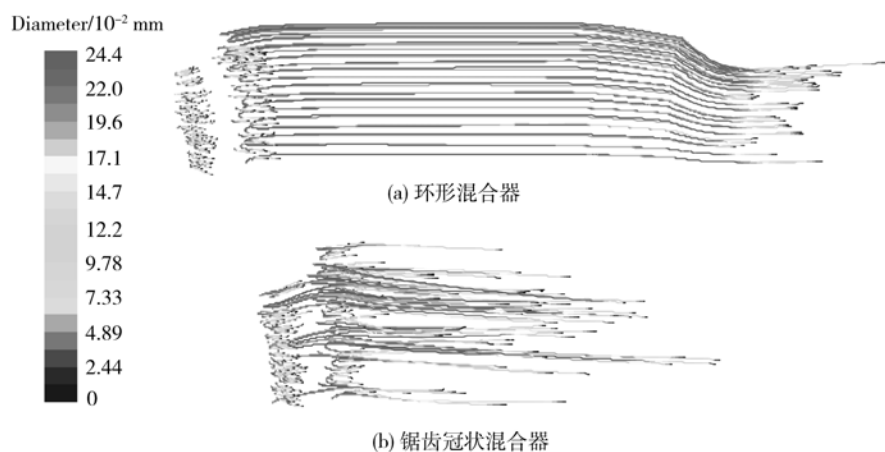


图 7 油滴直径分布对比

Fig. 7 Comparison of fuel droplet diameter distribution

距离内即蒸发为气态,产生这种差别的原因在于锯齿冠状混合器强化了内外涵混合,外涵气流温度有所提高,显著改善了燃油的蒸发,从而会提高整体的燃烧效率。

3.3 燃油和氧气分布

燃烧欠充分的原因主要有两个:第一是该区域氧气质量分数低,不足以将燃油全部燃烧殆尽;第二是该区域的温度不够高,燃油液滴的蒸发不完全。图8为环形混合器下游四个截面上燃油质量分数分布云图,可以看出其燃烧并不充分,尤其在中圈和外圈稳定器附近体现得比较明显。从图9所示的子午面上燃油质量分数分布来看,两种混合器的富油区域具有不同的特点。对于环形混合器,在加力燃烧室后部喷管处出现了富油很严重的区域,这是由于外涵区域的燃油受限于较低的温度而没有得到充分蒸发和燃烧,被外涵气流携带到了喷管处靠近壁面的区域;对于锯齿冠状混合器,在加力燃烧室内并不存在明显的富油区域,表明相当一部分燃油参与了化学反应。

图10为环形混合器和锯齿冠状混合器下子午面上氧气质量分数的分布。可以看出,采用锯齿

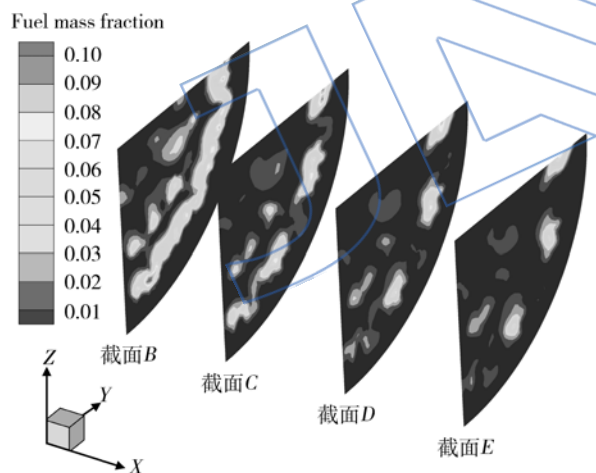


图8 环形混合器下游截面燃油质量分数分布

Fig. 8 Fuel mass fraction distributions on the cross section of confluent mixer downstream

冠状混合器的加力燃烧室中具有较高氧气质量分数的范围比环形混合器的要大,而且主要体现在内涵区域,这说明了锯齿冠状混合器有效强化了外涵气流向内涵的穿透,这对内涵区域燃油的燃烧是非常有利的。

3.4 燃烧效率

燃烧效率 η 是衡量加力燃烧室宏观性能的重要参数,定义为

$$\eta = \frac{m_{\text{out}} h_{\text{out}}^* - m_{\text{in}} h_{\text{in}}^* - m_f h_f}{m_f q_f}$$

其中 $m_{\text{in}}, m_{\text{out}}$ 分别为进、出口截面质量(kg); $h_{\text{in}}^*, h_{\text{out}}^*$ 分别为进、出口截面平均总焓(J/kg); m_f 为燃油质量(kg); h_f, q_f 分别为燃油的焓值和燃烧低热值(J/kg)。

计算得到环形混合器与锯齿冠状混合器的燃烧效率分别为 0.748 和 0.897。相对于环形混合器,锯齿冠状混合器能够显著提高外涵气流的温度和内涵的氧气质量分数,在相同的供油方案下,使得燃烧效率提高 14.9%。

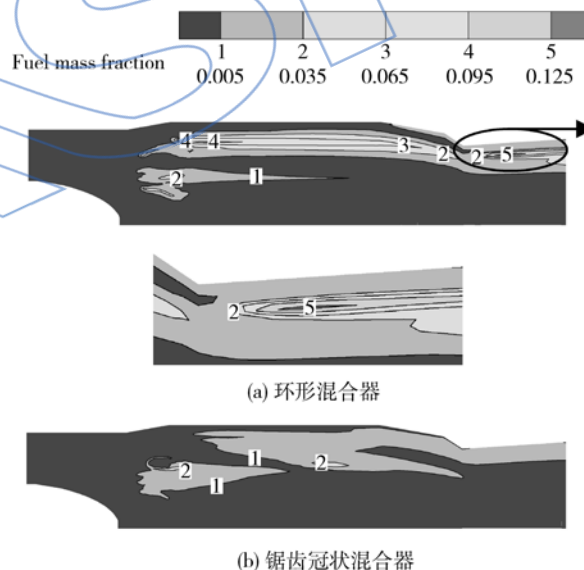


图9 子午面燃油质量分数分布

Fig. 9 Fuel mass fraction distributions on the longitude section of two mixers

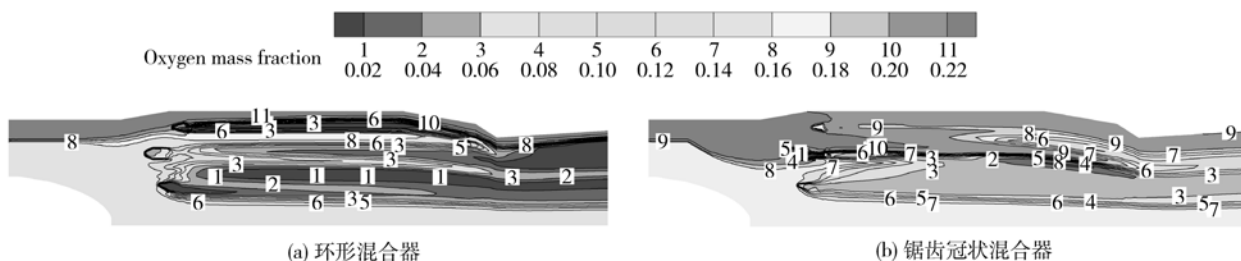


图10 氧气质量分数分布云图

Fig. 10 Distribution of oxygen mass fraction

4 结 论

锯齿冠状混合器的锯齿结构诱导了流向涡的形成,强化了高温的内涵气流和氧气质量分数丰富的外涵气流的卷吸与混合,相对于环形混合器有效提高了外涵的温度和内涵的氧气质量分数。外涵温度的提高改善了外涵区域燃油的蒸发,内涵氧气质量分数的增加直接维持了内涵区域燃油的燃烧。在相同的供油方案下,锯齿冠状混合器使加力燃烧室获得了较高的燃烧效率,相比环形混合器燃烧效率提高 14.9%。

参考文献:

- [1] Salman H, McGnirk J J, Page G J. A numerical study of vortex interactions in lobed mixer flow fields[R]. AIAA Paper 99-3409, 1999.
- [2] Zhang J Z, Shang Y, Li L G. Computation and validation of parameter effects on lobed mixer-ejector performances[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2005, 18(3): 193-198.
- [3] 张靖周, 谢志荣, 李立国. 三维强迫混合波瓣结构流场的数值研究[J]. 推进技术, 2001, 22(3): 225-228.
ZHANG Jingzhou, XIE Zhirong, LI Ligu. Numerical investigation of three-dimensional flow fields for forced mixer lobe configuration[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(3): 225-228. (in Chinese)
- [4] 单勇, 张靖周. 波瓣喷管结构参数对引射混合器性能影响的数值研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(6): 973-977.
SHAN Yong, ZHANG Jingzhou. Numerical investigation on the effects of lobe nozzle geometric parameters on mixer-ejector performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(6): 973-977. (in Chinese)
- [5] Callender B, Gutmark E A. PIV flow investigation of chevron nozzle mechanisms[R]. AIAA Paper 2004-019, 2004.
- [6] Booher M E, Okey K, Barta A B. Development of an advanced exhaust mixer for a high bypass ratio turbofan engine[R]. AIAA Paper 93-2435, 1993.
- [7] 张靖周, 单勇, 李立国. 直升机排气系统用波瓣喷管引射-混合式红外抑制器研究[J]. 航空学报, 2007, 28(1): 32-36.
ZHANG Jingzhou, SHAN Yong, LI Ligu. Investigation on lobed nozzle mixer-ejector infrared suppressor for helicopter exhaust system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(1): 32-36. (in Chinese)
- [8] Clifford A B, James B. Acoustic efficiency of azimuthal modes in jet noise using chevron nozzles[R]. AIAA Paper 2006-2645, 2006.
- [9] 左秀娟, 黄勇, 李永, 等. 喷管加装小突片强化射流混合的 PIV 测量[J]. 推进技术, 2004, 25(1): 15-18.
ZUO Xiujian, HUANG Yong, LI Yong, et al. PIV measurements of the jet flows enhanced by tabs fixed on convergent-divergent (C-D) nozzles[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(1): 15-18. (in Chinese)
- [10] 陈方, 吴寿生, 魏福清, 等. 常压、双涵进气条件下小突片强化混合研究[J]. 航空动力学报, 2002, 17(1): 35-39.
CHEN Fang, WU Shousheng, WEI Fuqing, et al. Investigation on two-flow mixing enhancement by small tabs at atmospheric pressure[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(1): 35-39. (in Chinese)
- [11] 王强, 额日其太, 杨勇. 小突片强化混合结构三维流场数值模拟[J]. 推进技术, 2001, 22(2): 215-218.
WANG Qiang, Eriqitai, YANG Yong. Numerical simulation on three dimensional nozzle flow field with tabs[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(2): 215-218. (in Chinese)
- [12] 王亚盟, 张靖周, 单勇, 等. 加力燃烧室用锯齿冠状混合器混合特性数值研究[J]. 航空动力学报, 2011, 26(1): 72-77.
WANG Yameng, ZHANG Jingzhou, SHAN Yong, et al. Numerical study on the mixing characteristics of chevron mixers for the afterburner[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(1): 72-77. (in Chinese)
- [13] 周力行. 湍流气粒两相流动和燃烧理论与数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1994.