

文章编号:1000-8055(2011)01-0072-06

加力燃烧室用锯齿冠状混合器 混合特性数值研究

王亚盟¹, 张靖周¹, 高家春², 单勇¹, 刘涛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: 通过三维计算流体动力学(CFD)数值计算,研究了加力燃烧室中三种不同型式的锯齿冠状混合器及环形混合器的掺混性能.结果表明:①锯齿冠状混合器下游形成了流向涡阵列,锯齿布置和倾角对其尺度和强度有较大的影响;②相邻锯齿交错布置的锯齿冠混合器的强化掺混效果最为显著且流动损失相对较低,总压恢复系数相对环形混合器降低在0.2%以内,在其作用下,加力燃烧室火焰稳定器前的外涵气流温度提高100~150 K左右.

关 键 词: 齿冠状混合器; 加力燃烧室; 掺混; 数值计算; 混合特性

中图分类号: V231.9

文献标识码: A

Numerical study on the mixing characteristics of chevron mixers for the afterburner

WANG Ya-meng¹, ZHANG Jing-zhou¹, GAO Jia-chun²,
SHAN Yong¹, LIU Tao²

(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: Three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) computations were conducted to analyze the mixing characteristics of three types of chevron mixers and the confluent mixer used in the afterburner. The research results obtained in the present conditions show that: (1) an array of stream-wise vorticity could be induced by chevron mixers, and the stream-wise vorticity scale and intensity are affected seriously by the chevrons arrangement and inclined angle; (2) the chevron mixer with chevrons tilted alternately inward and outward demonstrates the best performance with higher thermal mixing efficiency and lower extra pressure loss, the total pressure recovery coefficient decreases 0.2% compared to confluent mixer, and the mixing flow temperature increases about 150 K in front of flameholder by enhancing the mixing process between core flow and bypass flow.

Key words: chevron mixer; afterburner; mixing; numerical computation;
mixing characteristics

收稿日期:2009-12-02; 修订日期:2010-01-19

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,主要从事强化传热研究.

涡扇发动机加力燃烧室中的混合器结构对内外涵气流的混合以及燃烧组织具有重要的影响,就目前加力燃烧室中采用的环形混合器而言,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依赖于射流间的剪切作用,混合均匀性差,由此带来局部富油、燃烧效率低等问题。

国内外对于波瓣混合器开展了大量的研究^[1-5],波瓣混合器具有优越的强化混合特性,但存在结构尺寸的限制和流动损失相对过大的问题。本文借鉴突片涡激励的作用机制^[6-12],提出一种改进的环形混合器结构型式,即齿冠状混合器。该混合器是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。本文通过数值计算,对不同锯齿倾角、不同锯齿分布形式的 3 种齿冠状混合器以及环形混合器进行了内外涵气流混合特性的分析研究。

1 物理模型与计算方法

1.1 物理模型

本文所计算的物理模型由内涵道、外涵道、中心锥、混合器、火焰稳定器以及外场组成。如图 1 (外场省略) 所示,其中外涵道入口直径 500 mm,内涵直径(环形混合器直径)403 mm,混合器出口到火焰稳定器的距离为 344 mm。

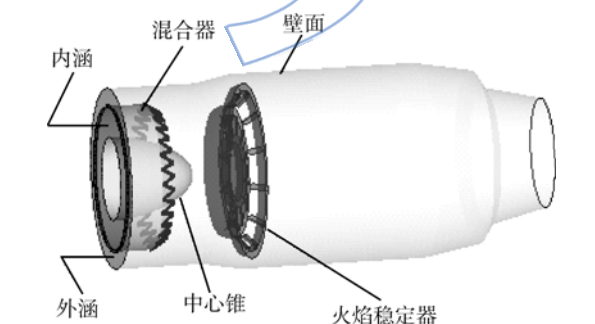


图 1 混合器结构物理模型

Fig. 1 Physical model of forced mixer

为叙述简化起见,记 M0 为环形混合器。齿冠状混合器三种结构如图 2 所示,分别为齿内倾、齿外倾和齿交错,依次标记为 M1, M2, M3。三种混合器周向齿数均为 30,单齿的两直边长均为 105.17 mm,锯齿顶角 47.3° ,表 1 给出了齿冠混

合器结构参数。

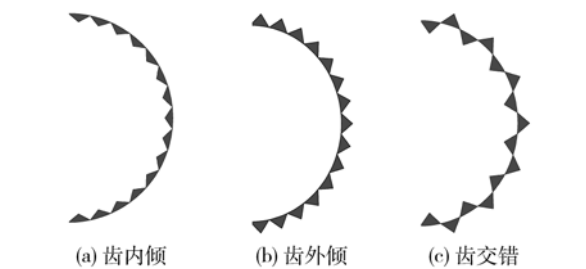


图 2 齿冠状混合器结构

Fig. 2 Types of chevron mixer

表 1 齿冠状混合器结构参数

Table 1 Parameters of chevron mixer

混合器	标记	齿倾角/ $^\circ$		
齿内倾	M1	10	20	30
齿外倾	M2	-10	-20	-30
齿交错	M3	± 10	± 20	± 30

1.2 边界条件及计算方法

本文网格试验表明,当整个计算区域的网格在 460 万左右时,即可获得网格独立解,近壁网格 y^+ 在 45~55 之间。采用 renormalization group (RNG) $k-\epsilon$ 湍流模型,近壁区采用标准壁面函数法进行修正。采用分离隐式求解器进行稳态计算,压力-速度耦合采用 SIMPLEC (semi-implicit method for pressure linked equation consistent) 算法,离散格式为二阶迎风格式,收敛的标准是判断各物理量的相对残差小于 10^{-4} 。

内外涵道入口设定为流量进口,内涵入口流量 68.8 kg/s,总温 1015.1 K;外涵入口流量 55.3 kg/s,总温 424.1 K。喷管出口与外场相连,外场出口设置为压力出口边界,静压设为环境大气压力,其他变量按沿流向偏导数为零处理。

2 计算结果分析

2.1 混合器出口速度分布

图 3 显示了不同混合器出口截面的速度分布。可以看到,环形混合器 M0 出口平面以混合器边界为分界线,内外涵高低速气流分布均匀,外涵几乎不存在径向向内的速度分量。对于 M1,其内倾的锯齿诱导外涵气流具有一个沿径向向内的速度,而内涵气流向外的速度则很不明显,即 M1 强化了外涵冷流向内涵热流的穿透;对于 M2,其外

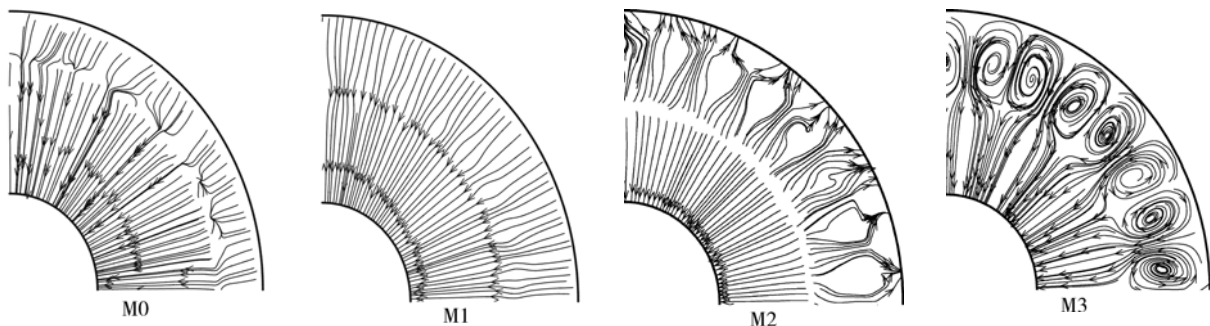


图 3 不同混合器出口截面速度特征

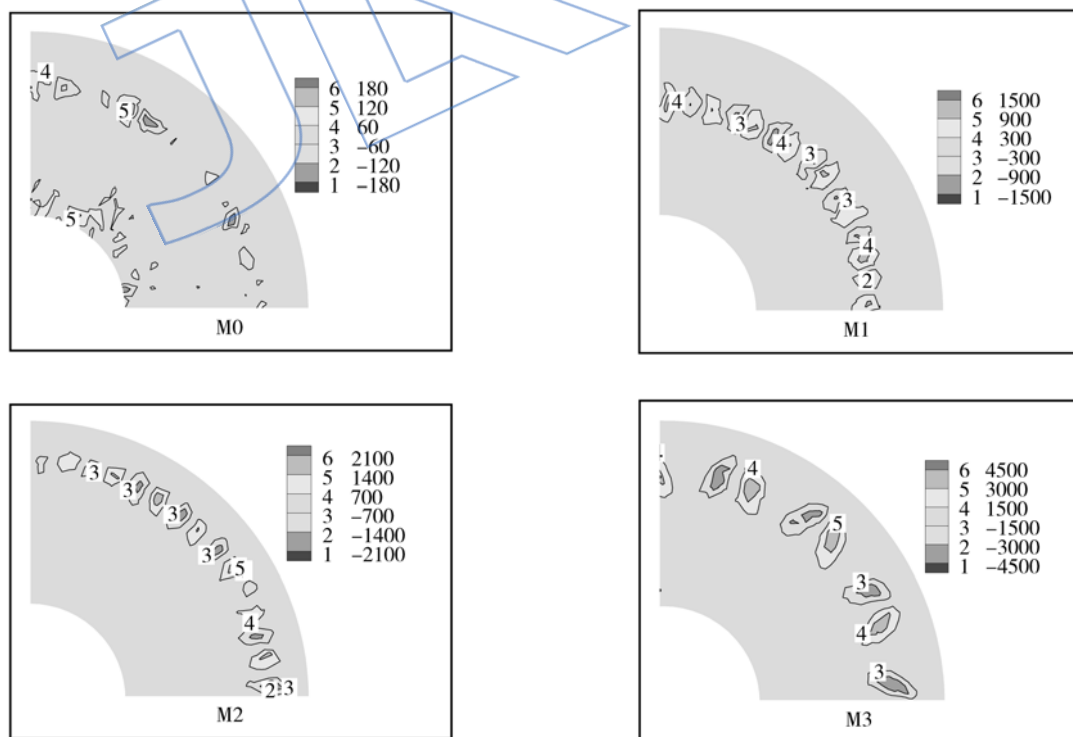
Fig. 3 Velocity characteristics at different mixers exit cross-sections

倾的锯齿使内涵气流具有了明显向外的速度,强化了内涵热流向外涵冷流的穿透. 对于交错状混合器 M3,在其出口截面,可以清楚地看到外涵气流具有向内、内涵气流向外的径向速度,形成了一对方向互为反向的环流. 因此,通过对各个混合器出口速度矢量的分析可以看出,环形混合器下,剪切作用在内外涵气流间的掺混占主导;齿冠状混合器下,其结构本身使流体具有了向上和向下的速度,流体层间的剪切作用弱化,流体径向端动作用在混合过程中的作用明显. 对于 M3,其环流的存在,能够对内外涵流体造成比较大的卷吸作用,

显然,这种结构的掺混效果比普通单向倾斜结构更为显著,这也是齿冠状混合器与环形混合器掺混机理的不同所在.

2.2 不同混合器出口流向涡分布特征

图 4 显示了锯齿倾角均为 30° 的齿冠状混合器 M1, M2, M3 及环形混合器 M0 出口截面流向涡的分布,可以看出, M0 出口截面几乎没有流向涡的产生,相比之下, M1, M2 和 M3 混合器出口都有流向涡的形成. 观察 M1 和 M2 出口截面发现,对应于每一个锯齿,都存在一对流向涡,且 M2 的流向涡强度大于 M1,说明了流向涡的强度

图 4 混合器出口流向涡分布特征(单位: s^{-1})Fig. 4 Stream-wise vorticity at mixer exit (unit: s^{-1})

与锯齿上游气流的速度有关. 鉴于内涵气流速度大于外涵, 因此, 可以推断, 锯齿上游气流速度越大, 径向速度分量相应增大, 流向涡随之而增强. 一个值得注意的现象是, 对于锯齿数相同的 M3, 其出口截面上流向涡对的数目仅为前者的 1/2, 这是因为 M3 相邻两个锯齿的倾斜方向交错, 每一个锯齿仍产生一对互为反向的流向涡, 但两锯齿间涡结构的方向是相同的, 两个方向相同的涡叠加在一起, 构成了一个尺度和强度更大的涡对.

2.3 沿程热混合效率

引进热混合效率来评价外涵冷气流和内涵热气流的混合均匀程度, 定义为

$$\eta = \frac{\int \sqrt{T_i^*} dm - \sqrt{T_1^*} m_1 - \sqrt{T_2^*} m_2}{\sqrt{T_{\text{mix}}^*} (m_1 + m_2) - \sqrt{T_1^*} m_1 - \sqrt{T_2^*} m_2}$$

式中 $T_{\text{mix}}^* = \frac{T_1^* m_1 + T_2^* m_2}{m_1 + m_2}$, m 为质量流量 (kg/s); 下标 1 和 2 分别表示内涵和外涵; T^* 为总温 (K); T_i^* 为沿程某个面的总温 (K).

图 5 为混合器下游沿程各个截面的热混合效率曲线.

图 5(a) 为从混合器下游 $x=500 \text{ mm}$ 到 $x=2600 \text{ mm}$ 沿程各个截面的热混合效率曲线. 结果显示, 不同混合器的热混合效率沿程变化趋势基本是一致的, 但齿冠状混合器在各个截面上的热混合效率都高于环形混合器, 并且 M3 混合效率最高, M1 次之. 在加力室出口处环形混合器 $\eta=50.4\%$, M1, M2, M3 比 M0 依次高出约 10%,

5% 和 13%, 并且 M1, M2, M3 在 $x=1800 \text{ mm}$ 处就基本达到了 M0 出口处的效率, 也就是说齿冠状混合器在下游比较短的掺混距离内就达到了环形混合器出口处的热混合效率, 这说明了流向涡的存在确实强化了加力室内冷热气流的混合. 图 5(b) 为 M1 在锯齿倾角分别为 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 时的沿程热混合效率. 可以看出, η 随倾角的增加而提高. 在加力室出口处, η 最大值为 63.9%, 最小值为 60.3%, 仅差 3.6%, 即对 M1 来说, 锯齿倾角的变化对 η 带来的影响不是太显著.

2.4 总压恢复系数

图 6 为四种不同混合器下游流场的特征对比, 图 7 为四种混合器的总压恢复系数分布. 相对于环形混合器 M0 而言, 齿冠状混合器的总压恢复系数均有不同程度的降低, 表明其流动掺混过程的压力损失有所增加. 值得关注的现象是, 尽管 M3 混合器的强化掺混效果最为显著, 但其总压恢复系数却高于 M1 和 M2 两种型式的混合器, 说明影响流动损失的因素不仅仅是掺混过程的摩擦损失. 对于锯齿单向倾斜的 M1 和 M2 混合器, 由于其分别对内涵气流和外涵气流形成了较为严重的挤压, 使两股流体分别发生比较大的径向流动变形, 增强了气流对火焰稳定器的冲击或对加力燃烧室壁面的冲刷, 导致附加的流动损失, 如图 6 所示. 比较而言, 齿内倾齿冠混合器 M1 的锯齿倾斜角度对于总压恢复系数的影响非常显著, 这是由于锯齿较大的内倾加剧了内涵气流的流动变形, 而采用交错锯齿的冠状混合器所带来的压力

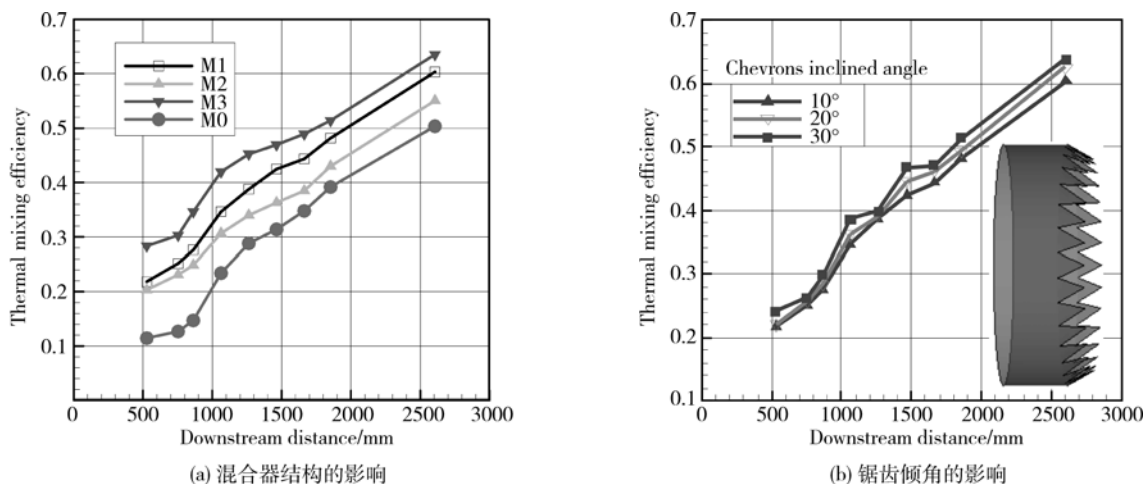


图 5 沿程热混合效率分布

Fig. 5 Thermal mixing efficiency distribution along streamwise direction

损失相对于环形混合器略有增加,总压恢复系数相对降低在 0.2% 以内。

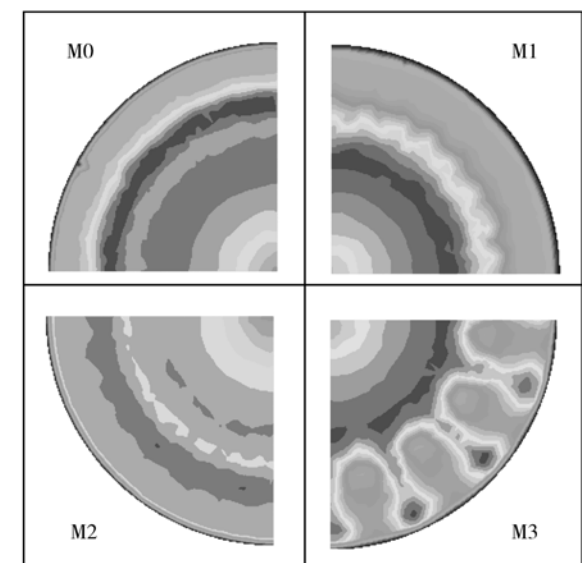


图6 不同混合器下游流场特征对比
Fig. 6 Comparison about flow field with different mixers

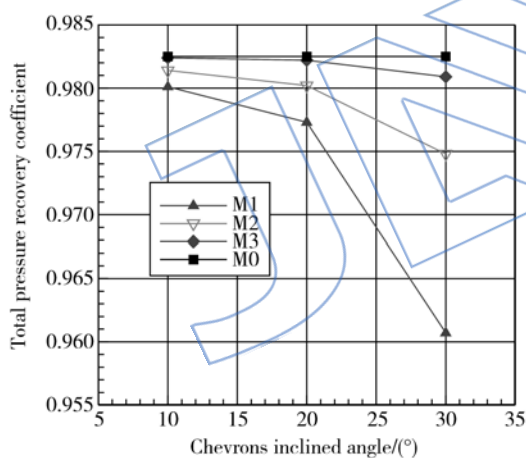


图7 总压恢复系数
Fig. 7 Total pressure recovery coefficient

2.5 温度分布

图8为对称面气流温度分布图。可以看出, M0尾缘温度等值线比较平直,内外涵气流之间温度梯度比较大,外圈火焰稳定器附近混合气流温度大约在 450~500 K 范围内。M1的内倾锯齿对内涵热流造成了比较大的挤压,使得温度等值线有向下凹的趋势,外涵低温区域较 M0 略微增加,掺混区域温度梯度较 M0 有所降低。M2的外倾锯齿对内涵流体营造了一个扩张区域,诱导了内涵热流向外涵冷流区域的运动,使得温度等值

线上抬,减小了外涵的低温区域,其温度梯度比 M0 要小,基本与 M1 持平。M3 对称面温度分布与前三者截然不同,其对温度场造成的影响更为显著,掺混区域扩大,温度等值线同时具有上抬和下凹的特征,温度梯度比 M0, M1, M2 都要低,外涵低温区域减小,贴壁气流温度达到了 450 K 左右,外圈火焰稳定器周围混合气流温度大约 600 K 左右。这是 M3 的外倾锯齿诱导内涵热流向外涵冷流穿透与内倾锯齿诱导外涵冷流向内涵热流穿透共同作用的结果,可见双向穿透作用强化了冷热气流的掺混,从而可以有效地提高外圈火焰稳定器附近的温度。

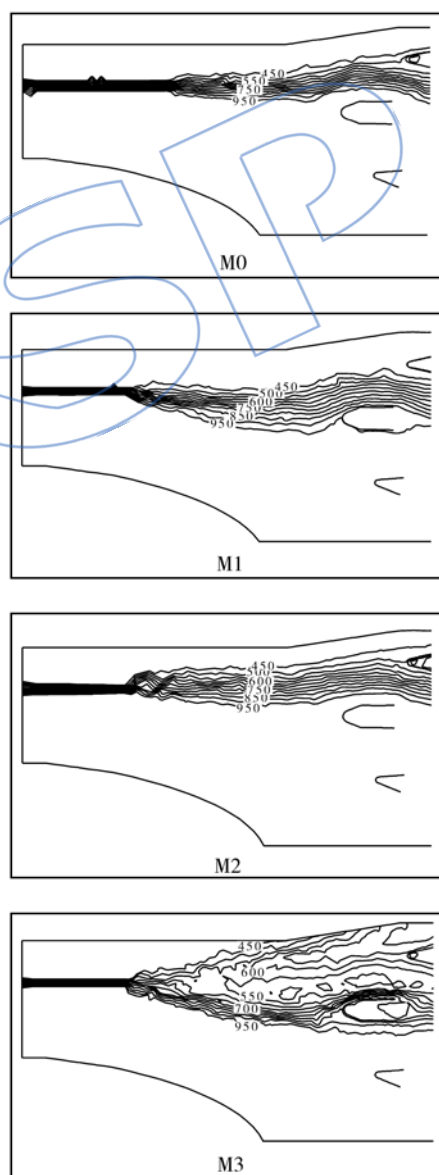


图8 对称面静温分布(单位:K)
Fig. 8 Static temperature distribution of symmetry plane (unit:K)

3 结 论

1) 齿冠状混合器周向分布的锯齿诱导了流向涡阵列,流向涡的卷吸作用强化了加力燃烧室内内外涵气流的混合. 锯齿的布置以及倾角对于流向涡的分布和强度具有重要的影响,在相同锯齿数下,相邻锯齿交错布置的齿冠混合器形成的流向涡对只有锯齿单向倾斜的一半,但流向涡对的尺度和强度显著增大,具有更优的混合效率.

2) 相对于环形混合器而言,齿冠状混合器的总压恢复系数均有不同程度的降低. 尽管相邻锯齿交错布置的齿冠混合器的强化掺混效果最为显著,但其总压恢复系数却高于锯齿单向倾斜的齿冠混合器,总压恢复系数相对环形混合器降低在0.2%以内.

3) 对于环形混合器,火焰稳定器附近的混合气流温度大约在450~500 K范围内;对于相邻锯齿交错布置的齿冠混合器,内外涵气流的强化掺混使得外圈火焰稳定器周围混合气流温度升高至600 K左右.

参考文献:

- [1] Tsui Y Y, Wu P W. Investigation of mixing flow structure in multilobe mixers[R]. AIAA Journal, 1996, 34(7): 1386-1391.
- [2] 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.
- [3] Liu Y H. Experimental and numerical investigation of circularly lobed nozzle with/without central plug[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(12): 2577-2585.
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] Callender B, Gutmark E A. PIV flow investigation of chevron nozzle mechanisms[R]. AIAA Paper 2004-019, 2004.
- [7] 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.
- [8] Tew D E, Waitz I A, Hermanson J C. Impact of compressibility on mixing with large-scale streamwise vorticity [R]. AIAA Paper 97-2637, 1997.
- [9] Clifford A B, James B. Acoustic efficiency of azimuthal modes in jet noise using chevron nozzles[R]. AIAA Paper 2006-2645, 2006.
- [10] 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 Xiujuan, 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)
- [11] 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)
- [12] 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)