

同轴射流突片激励混合的数值研究

余业珍^{1,2}, 张靖周^{2,3}, 武彬彬¹, 牛宝联¹, 李应林¹

(1. 南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

(2. 南京航空航天大学江苏省航空动力系统重点实验室, 江苏 南京 210016)

(3. 南京航空航天大学能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

[摘要] 通过数值方法对同轴射流的突片激励混合特性进行研究, 分析了突片数目、突片顶角和安装角对同轴射流混合过程的流向涡和温度分布的影响. 研究表明, 突片的激励作用使得同轴射流之间的混合流在突片对应位置下游形成阵列涡对, 导致温度分布等值线发生“指型”局部变形, 增强了两股气流之间的混合. 随着突片数目的增加, 单个突片诱导的流向涡强度和影响范围存在较大的差异, 过多的突片数导致相邻涡对的“挤压”, 流向涡的强度有很大的减弱; 在相同的堵塞比下, 突片顶角为 90° 时或安装角为 30° 时, 单个突片诱导的流向涡强度和作用范围均体现最为显著, 从而有利于改善同轴射流的混合程度.

[关键词] 同轴射流, 强化混合, 流向涡, 突片激励

[中图分类号] V233.5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2015)02-0027-06

Numerical Investigation on Mixing Behavior of Co-Axial Jets Excited by Triangular Tabs

Yu Yezhen^{1,2}, Zhang Jingzhou^{2,3}, Wu Binbin¹, Niu Baolian¹, Li Yinglin¹

(1. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(2. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(3. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Numerical investigation is carried out to illustrate the mixing behaviors of co-axial jets by the fluidic excitation of tabs. The effects of the tab number, tab apex angle and tab tilted angle on the streamwise vorticity and temperature distribution of co-axial jets mixing flow are analyzed. The results show that the tabbed excitation induces array pairs of streamwise vortices at the trailing of corresponding tabs, making the local temperature contours to take on finger-shaped distortion and enhancing the co-axial jets mixing process. The intensity as well as the affecting zone of the individual streamwise vortex varies from the tab number. Larger tab number degrades the vortex intensity obviously due to the interaction between the adjacent tabs. Under the same total blockage of the tabs into the internal flow, the tab apex angle of 90 degree or the tab tilted angle of 30 degree seem to introduce stronger streamwise vorticity and co-axial jets mixing, in relative to the other geometric parameters in the present.

Key words: co-axial jets, mixing enhancement, streamwise vortices, triangular tab

同轴射流的强化混合广泛用于能源、动力、化工和航空航天等多个领域. 对射流掺混的研究, 在航空发动机加力燃烧室和排气系统中具有重要的应用背景, 譬如降低排气喷流的噪声、增强燃料和空气之间的混合、抑制排气尾焰的红外辐射特征等^[1-3].

影响同轴射流混合过程的因素主要包括两股流的速度比、温度比、密度比、湍流程度和旋流度等. 常规的平行混合过程依靠射流间的剪切混合, 往往具有较低的混合效率. 在发动机的实际应用中, 需要在较短的距离内实现充分的混合, 利用流向涡增强射流之间的强迫混合成为目前关注的研究热点问题, 其中波瓣混合器^[4-10]和突片涡激励^[11-15]得到了广泛的应用. 已有的研究表明, 突片涡激励的混合效率相对于波瓣混合器虽有所降低, 但付出的流动损失也有所下降. 其强化射流间的混合机制在于突片两侧能产生反

收稿日期: 2015-01-04.

基金项目: 江苏省高校自然科学基金项目(13KJB470008)、江苏省高校自然科学基金项目(12KJB560006).

通讯联系人: 余业珍, 博士, 讲师, 研究方向: 强化传热和混合. E-mail: yuyezhen@njnu.edu.cn

向旋转的涡对,对于矩形突片和三角形突片的对比研究则表明三角形突片产生的反向涡对强度更大.近年来,针对流体诱导的突片以及由突片衍生的锯齿冠状混合器的研究已引起高度的兴趣^[16-18],同时利用突片的涡激励在强化射流冲击以及气膜射流冷却方面也显示出其应用的效果^[19,20].

目前对于突片数目、堵塞比和突片形状等对同轴射流强化混合特性的影响研究尚不够深入.本文试图通过数值方法在此方面进行深入细致的研究,分析在圆形射流出口安装突片后,流向涡的产生和发展规律,揭示突片激励对同轴射流掺混流动结构的作用机制;通过同轴射流出口下游截面上温度场和流场的显示,研究不同突片结构和安装方式对同轴射流混合的影响.

1 物理模型和计算方法

1.1 物理模型

图 1 所示为同轴射流混合的简化物理模型.两股同轴空气射流分别从内侧的圆形管和外侧的环形管道中,独立地流出位于相同轴向位置的出口截面,然后在出口下游形成混合.内侧圆形管的直径 d 设为 80 mm,外侧环形管道的外径 D 为 240 mm,两者长度均为 760 mm.三角形突片设置在内侧圆形管出口尾缘,并伸入内侧射流中.突片的主要结构参数包括:突片数 n ,顶角 α ,安装角 δ ,基体宽度 w 和顶长 l .注意到上述结构参数中有些几何参数与其他参数是密切相关的,譬如,基体宽度与顶角和顶长之间、突片法向穿透距离 t 与顶长和安装角之间存在特定的关联.为了对比分析结构参数的特定影响,可根据突片的表面积和安装角确定其对内侧圆形管流通截面积的堵塞比,如图 1(b)所示.坐标原点设置在射流进口处.

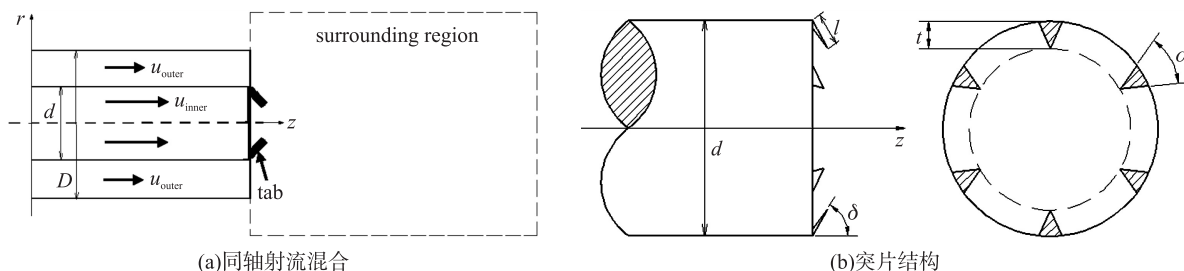


图 1 物理模型示意图

Fig. 1 Physical model diagram

1.2 计算方法

数值计算采用 Fluent-CFD 软件,选择其独立隐式求解器进行稳态计算.湍流模拟采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和标准壁面函数法进行近壁面处理.计算域包括 3 个子域,即内侧圆形通道、外侧环形通道和下游混合扩展区.其中,下游混合扩展区设定为:流向距离为下游 10 倍内侧圆形通道直径,直径为 500 mm.考虑到本文仅研究低速流动下的同轴射流掺混问题,根据所研究物理问题的特点,在数值研究中认为流体流动为不可压缩定常流动,且忽略黏性耗散的影响.为减小计算量,根据轴对称计算域特征,截取一半的计算区域.采用非结构化网格对计算域进行网格划分,邻近突片的局部区域和近壁区域的计算网格进行加密处理,经网格独立性数值验证,内侧圆形管道和外侧环形管道的网格数比例为 0.7,网格总数约为 105 万左右.

边界条件设置如下:

(1) 内侧通道气流进口速度为 25 m/s,进口温度为 600 K;外侧环形通道气流速度为 8 m/s,进口温度为 300 K.

(2) 固体壁面设为无滑移速度边界和绝热边界,突片和内侧通道壁设为流-固耦合边界.

(3) 外场边界设为压力出口边界,静压和静温分别设为环境压力和温度(101 325 Pa, 300 K).

数值离散采用二阶精度的迎风格式,收敛的标准是判断各物理量的相对残差小于 10^{-5} .

2 计算结果与分析

2.1 有突片和无突片时射流掺混的流场

图 2 显示了有突片(突片顶角为 90° ,顶长为 6 mm,安装角为 90°)和无突片时,沿程若干流向截面上的温度分布.由于突片的激励作用,同轴射流之间的混合流在出口下游流向截面上的温度分布发生较为

显著的变化. 在突片对应的位置,温度分布等值线发生局部变形,随着混合距离的增加,两股气流之间的混合加剧,使沿着流向的高温区变小,中间温度区域范围变大,温度场逐渐均匀. 对于无突片射流,高温区和低温区界限分明,且两个气流之间的混合远不如突片射流迅速和充分.

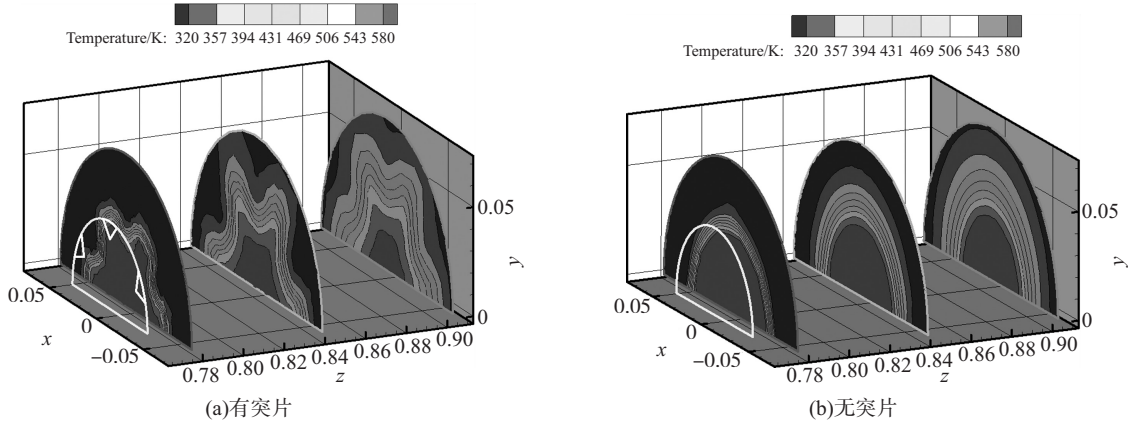


图2 有突片和无突片的混合流温度分布

Fig. 2 Temperature distributions of mixed flow with and without tabs

图3显示了有突片时,在邻近突片下游截面的流线以及沿程若干流向截面上的流向涡分布. 对于突片射流,由于突片深入内侧气流内部,诱导内侧通道主流在突片中心处分成两股局部反向旋转的“指形”流动变形,外侧气流则沿径向向流向涡核心卷吸,从而在突片两侧形成两个反向旋转的流向涡,如图3(a)所示. 流向涡的形成有助于促进两股气流之间的混合,随着混合距离的增加,两股气流之间的混合区域逐渐扩大,流向涡的强度不断减弱,直至逐渐消失.

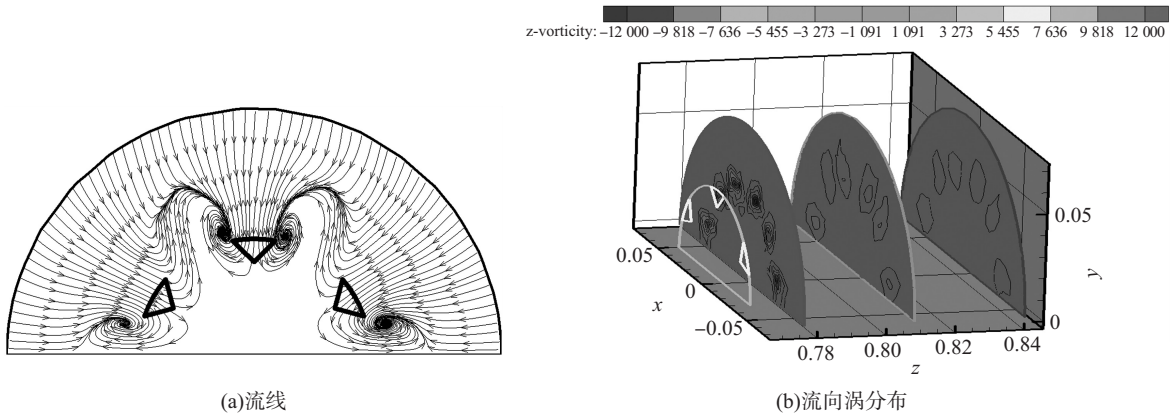


图3 突片射流流向涡形成和发展

Fig. 3 Streamwise vortices formation and developing about jet flow with tabs

2.2 突片数的影响

图4为不同突片数的突片激励混合流在射流出口下游截面($z/d=1$)上的流向涡分布. 上述突片结构中,单个突片的参数保持一致,即顶角 90° ,顶长8 mm,安装角 90° . 突片数从4变化至12,对应的突片堵塞比则从4.88%变化至14.64%. 随着突片数目的增加,尽管每个突片依然能够诱导相应的流向涡对,但单个突片诱导的流向涡强度和影响范围则存在较大的差异. 相对而言,突片数为6和8时诱导的流向涡强度和覆盖区域较为明显;对于12个突片结构,由于突片之间的距离很小导致相邻涡对的“挤压”,流向涡的强度有很大的减弱.

图5为不同突片数下的突片激励混合流在射流出口下游截面($z/d=1$)上的温度分布. 在突片数为4和6时,局部温度在相邻突片之间呈现“指形”的分布,体现了突片诱导的局部流向涡对两股同轴射流混合流动的作用;随着突片数目增加至8个,周向的温度分布趋于均匀,当突片数目为12时,过大的堵塞比反而不利于流向涡的形成和发展. 从以上计算结果来看,6个和8个突片的结构,对应的堵塞比分别为7.32%和9.76%,混合效果相对较好.

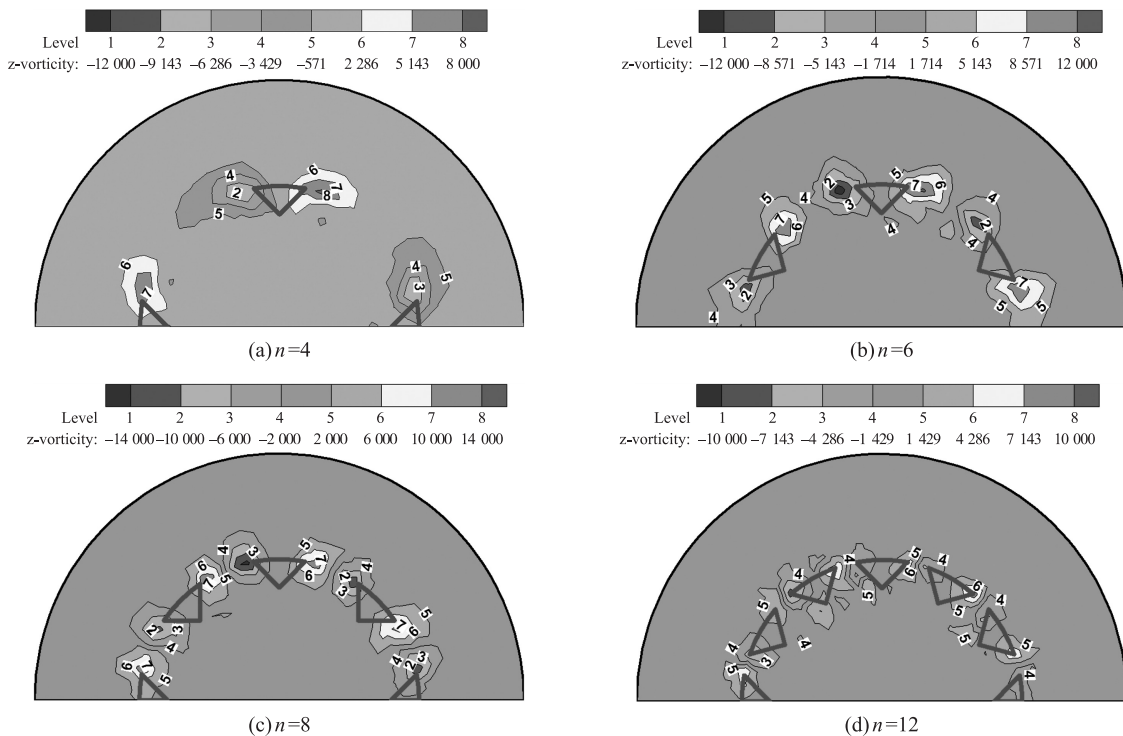


图 4 突片数对突片射流流向涡的影响

Fig. 4 Effect of tabs number on streamwise vortices about jet flow with tabs

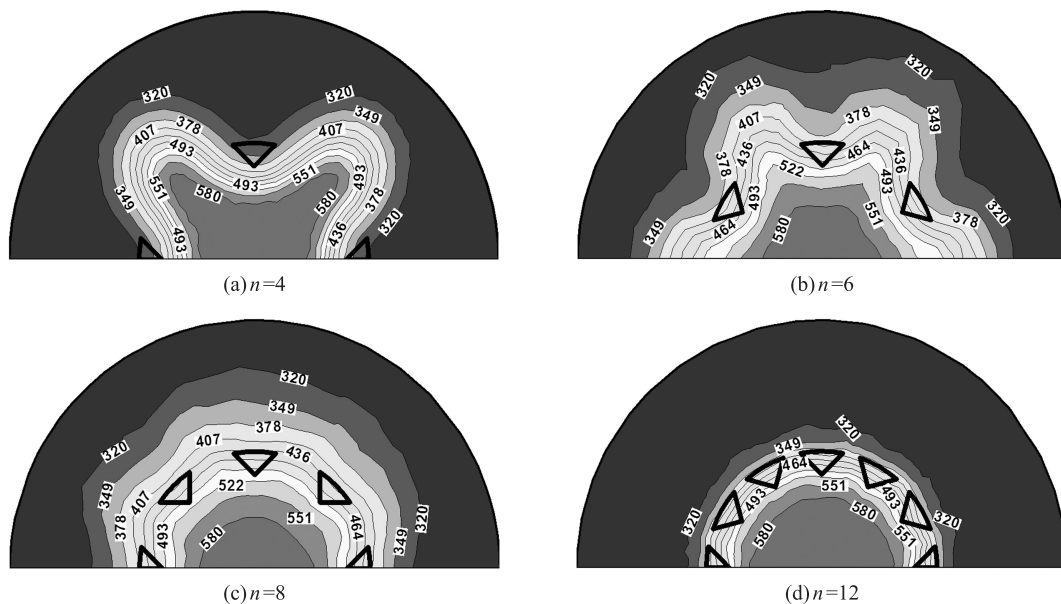


图 5 突片数对同轴射流温度分布的影响

Fig. 5 Effect of tabs numbers on temperature distributions of co-axial jets

2.3 突片几何参数的影响

图 6 和图 7 分别为不同突片顶角的突片激励混合流在射流出口下游截面($z/d=1$)上的流向涡分布和温度分布. 上述突片结构中, 突片数均为 6 且安装角均为 90° , 为保证堵塞比相同(7.32%), 单个突片的面积相同, 因此随着突片顶角的变化, 突片顶长和基体宽度均随之改变. 可以看出, 在相同的突片面积和堵塞比下, 随着突片顶角的增加, 单个突片诱导的流向涡强度也有所增强, 从而有利于改善同轴射流的混合程度.

图 8 和图 9 分别为不同突片安装角的突片激励混合流在射流出口下游截面($z/d=1$)上的流向涡分布和温度分布. 上述突片结构中, 突片数均为 6, 且突片顶角为 90° 和顶长为 8 mm, 为保证堵塞比相同(7.32%), 单个突片的面积随着突片安装角的减小而有所增加, 即突片基体宽度随之增加. 可以看出, 在相同的堵塞比下, 突片安装角为 30° 时, 基体宽度相对较大, 单个突片诱导的流向涡强度和作用范围均体现

最为显著,从而有利于改善同轴射流的混合程度;突片安装角为 60° 时,尽管基体宽度小于 45° 的突片安装角,但同轴射流的混合程度却有所改善.

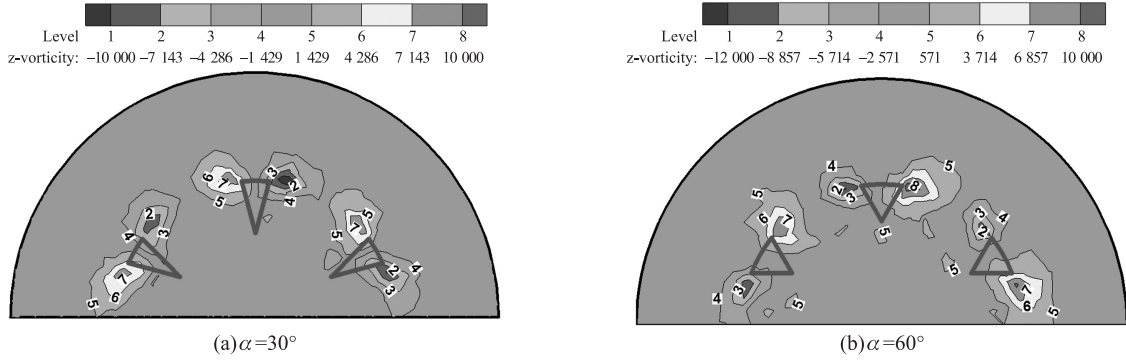


图 6 突片顶角对突片射流流向涡的影响

Fig. 6 Effect of tab apex angle on streamwise vortices about jet flow with tabs

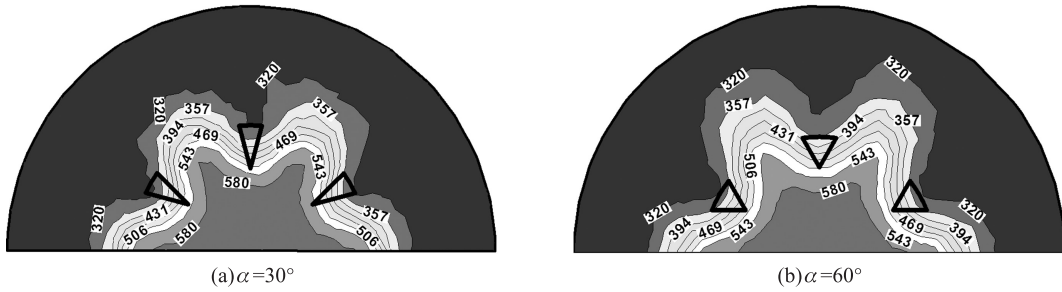


图 7 突片顶角对同轴射流温度分布的影响

Fig. 7 Effect of tab apex angle on temperature distributions of co-axial jets

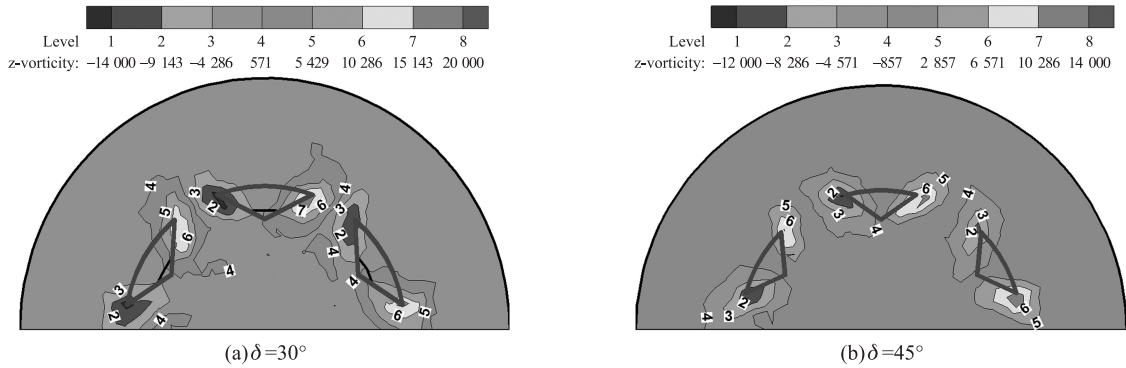


图 8 突片安装角对突片射流流向涡的影响

Fig. 8 Effect of tab tilted angle on streamwise vortices about jet flow with tabs

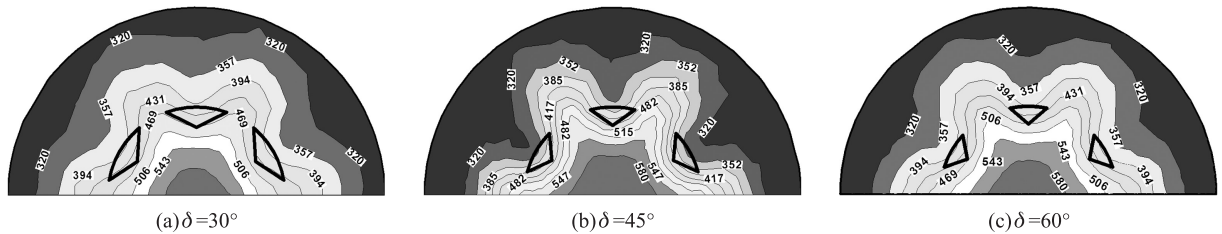


图 9 突片安装角对同轴射流温度分布的影响

Fig. 9 Effect of tab tilted angle on temperature distributions of co-axial jets

3 结论

(1) 由于突片的激励作用,同轴射流之间的混合流在突片对应位置的温度分布等值线发生局部变形,随着混合距离的增加,两股气流之间的混合加剧,使沿着流向的高温区变小,中间温度区域范围变大,温度场逐渐均匀.

(2)随着突片数目的增加,尽管每个突片依然能够诱导相应的流向涡对,但单个突片诱导的流向涡强度和影响范围则存在较大的差异,过多的突片数导致相邻涡对的“挤压”,流向涡的强度有很大的减弱。

(3)在相同的堵塞比下,突片顶角为 90° 时,单个突片诱导的流向涡强度有所增强;突片安装角为 30° 时,单个突片诱导的流向涡强度和作用范围均体现最为显著,从而有利于改善同轴射流的混合程度。

[参考文献](References)

- [1] Aida N, Nishijima T, Hayashi S, et al. Combustion of lean prevaporized fuel-air mixtures mixed with hot burned gas for low- NO_x emissions over an extended range of fuel-air ratios[J]. *Proceedings of Combustion Institute*, 2005, 30:2 885–2 892.
- [2] Tide P S, Babu V. Numerical predictions of noise due to subsonic jets from nozzles with and without chevrons[J]. *Applied Acoustics*, 2009, 70:321–332.
- [3] Shan Y, Zhang J Z. Numerical investigation of flow mixture enhancement and infrared radiation shield by lobed forced mixer[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29:3 687–3 695.
- [4] Paterson R W. Turbofan mixer nozzle flow field—a benchmark experimental study[J]. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1984, 106:692–698.
- [5] Eckerle J K, Sheibani H, Awad J. Experimental measurement of the vortex development downstream of a lobed forced mixer[J]. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1992, 114:63–71.
- [6] Yu S C M, Yip T H. Experimental investigation of two-stream mixing flows with streamwise and normal vorticity[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1997, 18:253–261.
- [7] Zhang Jingzhou, Shan Yong, Li Ligu. Computation and validation of parameter effects on lobed mixer-ejector performances[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2005, 18(3):193–198.
- [8] Mao R, Yu S C M, Zhou T, et al. On the vorticity characteristics of lobe-forced mixer at different configurations[J]. *Experiments in Fluids*, 2009, 46:1 049–1 066.
- [9] Nastase I, Meslem A. Vortex dynamics and mass entrainment in turbulent lobed jets with and without lobe deflection angles[J]. *Experiments in Fluids*, 2010, 48:693–714.
- [10] Pan C X, Shan Y, Zhang J Z. Parametric effects on internal aerodynamics of lobed mixer-ejector with curved mixing duct[J]. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 2014, 136:061504–1–9.
- [11] Samimy M M, Zaman K B M Q, Reeder M F. Effect of tabs on the flow and noise field of an axisymmetric jet[J]. *AIAA Journal*, 1993, 31:609–619.
- [12] Reeder M F, Samimy M. The evolution of a jet with vortex-generating tabs: real-time visualization and quantitative measurements[J]. *J Fluid Mech*, 1996, 311:73–118.
- [13] Foss J K, Zaman K B M Q. Large-and small-scale vortical motion in a shear layer perturbed by tabs[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1999, 382:307–329.
- [14] Chua L P, Yu S C M, Wang X K. Flow visualization and measurements of a square jet with mixing tabs[J]. *Experimental Thermal Fluid Science*, 2003, 27:731–744.
- [15] Behrouzi P, McGuirk J J. Effect of tab parameters on near-field jet plume development[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22:576–585.
- [16] Yu S C M, Lim K S, Chao W, et al. Mixing enhancement in subsonic jet flow using the air-tab technique[J]. *AIAA Journal*, 2008, 46:2 966–2 969.
- [17] Wan C, Yu S C M. Numerical investigation of the air tabs technique in jet flow[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2013, 29:42–49.
- [18] Zaman K B M Q, Bridges J E, Huff D L. Evolution from ‘tabs’ to ‘chevron technology’—a review[J]. *International Journal of Aeroacoustics*, 2011, 10:685–710.
- [19] Yang C F, Zhang J Z. Experimental investigation on film cooling characteristics from a row of holes with ridge-shaped tabs[J]. *Experimental Thermal Fluid Science*, 2012, 37:113–120.
- [20] Yu Y Z, Zhang J Z. Convective heat transfer by a row of confined air jets from round holes equipped with triangular tabs[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 72:222–233.

[责任编辑:严海琳]