

突片射流传热和混合特性的研究进展

余业珍¹, 张靖周², 谭晓茗², 单 勇²

(1. 南京师范大学动力工程学院, 江苏 南京 210042)

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

[摘要] 介绍了突片对传热和混合特性的影响, 综合论述国内外突片射流传热和混合特性实验研究以及数值模拟的发展与现状. 分析了突片激励作用下流向涡的产生和发展现状、突片对下游流场核心区的影响和喷嘴出口速度变化的特点, 揭示了突片对传热和混合效果增强的机理.

[关键词] 突片, 射流, 强化传热, 强化混合, 数值模拟, 实验研究

[中图分类号] TK 121 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2009)04-0025-06

Investigative Progress on Heat Transfer and Mixing Characteristics of Jet Excited by Tabs

Yu Yezhen¹, Zhang Jingzhou², Tan Xiaoming², Shan Yong²

(1. School of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

2. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract The influence of tabs on the heat transfer and the mixing is recommended. The development and current status of the numerical simulations and experiment researches about the heat transfer and mixing characteristics of tabbed jet are reviewed. It is analyzed that the producing and developing rules of the stream wise vortices with the jet excited by tabs and the influence of tabs on the core area of downriver flow field and the characteristics of the velocity change at nozzle exit. The mechanism of enhancing the effect of the heat transfer and mixing are made known.

Key words tab, jet, intensified heat transfer, intensified mixing, numerical simulation, experiment research

射流是一种基本的流动现象, 它广泛存在于自然界和工程实际过程中. 射流冲击形成的强化传热技术以及两股射流之间的强化混合技术在工程技术领域具有广泛的应用背景, 也是工程热物理学学科的重要研究方向.

突片是一种结构简单的涡激励器, 这一概念最初是由 Bradbury 和 Khadem 于 1975 年提出的, 用于控制或改善射流的流动结构, 如图 1 所示. 突片是指安装在喷管出口处有一定几何形状的机械激励机构, 一般的堵塞面积在喷管出口面积的 1% ~ 2% 以内, 但它强化喷流混合的效果却较为明显. 研究表明, 在突片的下游产生一对旋转方向相反的涡对, 依靠卷吸作用, 加强边界层内的湍动, 在强化混合中得到了应用.

通过对突片在射流—横流混合中作用机制的研究结果表明, 在垂直射流和横流的相互作用中, 突片的存在使射流穿透减小了 40%, 如图 2 所示, 其作用效果与突片的结构和位置有关.

本文介绍了国内外突片射流传热和混合特性实验研究以及数值模拟的发展和现状, 分析突片对传热和混合效果增强的机理.

1 突片射流对传热的影响

由于突片射流在强化传热方面具有广泛的工程应用背景, 因此国内外对此开展了深入的研究.

对湍流圆形射流出口的三角形突片^[1]进行实验研究发现: 在射流出口附近的突片对传热有显著的影

收稿日期: 2009-10-12

通讯联系人: 余业珍, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 工程热物理. E-mail: yuyezhen@njnu.edu.cn

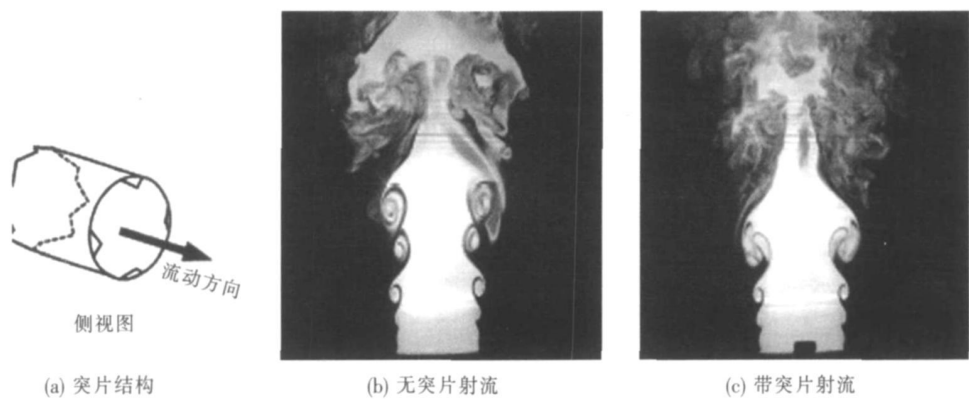


图 1 射流流动结构显示

Fig.1 Configuration of jet flow

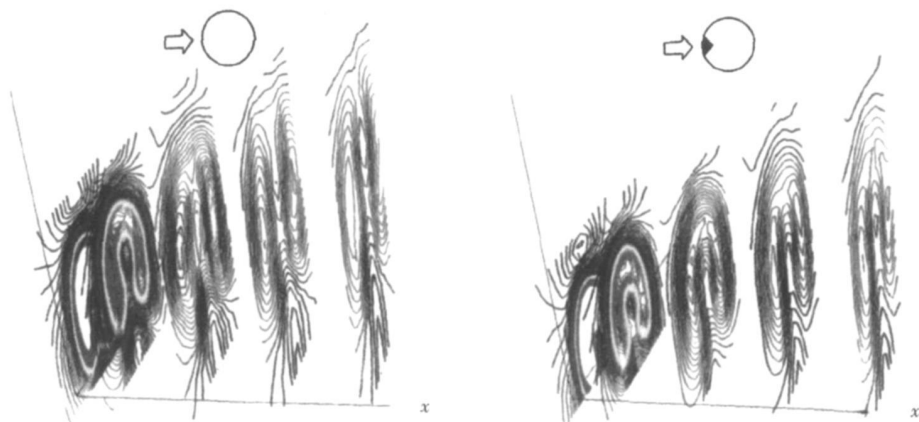


图 2 突片作用下的流场

Fig.2 Flow field by tab

响,特别是在冲击区,当喷嘴到靶板的距离较小时,冲击射流在冲击区周围产生了一系列传热明显增强的区域.在某些情况下,局部传热系数的增强超过了 25%.研究还发现:6个突片产生了 6个传热增强区,而 10个和 16个突片分别仅仅产生了 5个和 8个传热增强区,如图 3所示.这些区域随着流动发展到下游,和周围流体混合而消失.当喷嘴到靶板的距离较大时,传热的增强变得均匀.同时,湍流的混合也减小了射流的发展长度,通过对流场的研究和驻点区传热的变化都可以得出这一结论.

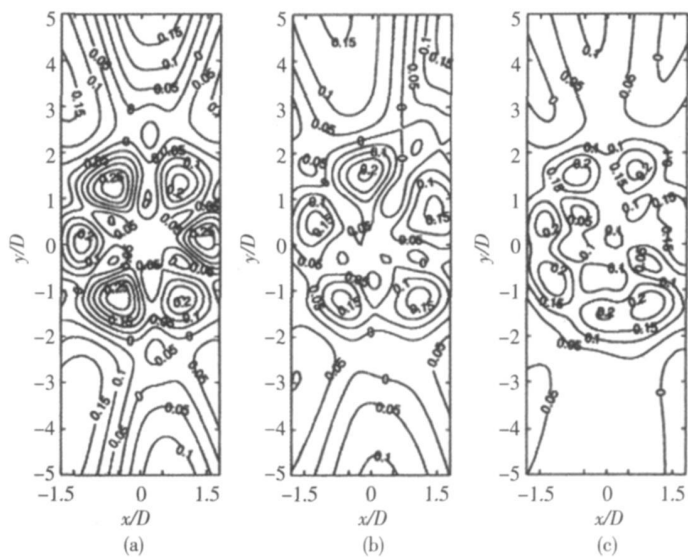


图 3 突片射流传热增强区显示 (a)6个突片(b)10个突片(c)16个突片

Fig.3 Heat transfer enhanced area of tabbed jet

对带 4 个三角形突片的方形射流^[2]的实验研究揭示出在每个突片后面的区域都有一个“缺口”, 缺口处中心区域的流体不能立即到达, 因此射流中心分叉形成 4 个“瓣状”, 如图 4 所示. 这种分叉是由于突片生成的流向涡引起的, 并且在每个“瓣状”的两个角, 一些核心区流体旋转形成流向涡. 这些涡是弱的马蹄形涡的分支. 这些“瓣状”将核心区流体与射流中心分离, 并增加了与周围流体的边界面积, 表明突片加强了射流和周围流体的混合, 从而改善了冲击射流的换热特性. 同时还观察到当突片平面内倾 45° 时, 出现了第三对流向涡, 但这对流向涡的尺寸和规模都很小, 并且这对弱的流向涡沿流向迅速消失. 该项研究证实了在小突片两侧能产生强烈的反向旋转的涡对, 强化了射流混合.

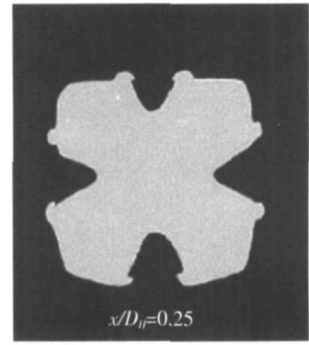


图 4 LIF 图像显示

Fig.4 LIF image

在数值模拟方面, Zan an 在文献 [3] 中研究了在圆形喷嘴出口安装三角形突片产生的影响, 得到了不同突片数目时流向速度等值线. 图 5 为圆形喷嘴示意图, 图 6 为 4 个突片时的流向速度等值线. 并且, Zan an^[4]还研究了矩形突片和三角形突片产生的影响, 证实了三角形突片产生的反向涡对的强度最大. 同时得到: 4 个三角形突片把混合边界成分成 4 个“瓣状”, 导致了射流下游混合的增强; 对 6 个三角形突片, 由于流向涡的相互作用, 混合边界层又变回 3 个“瓣状”; 并且分析了流向涡产生的机理.

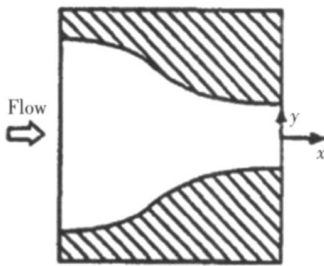


图 5 圆形喷嘴示意图

Fig.5 Sketch map of circular nozzle

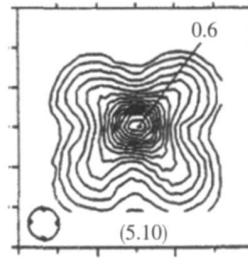


图 6 流向速度等值线 (4 个突片)

Fig.6 Streamwise velocity contours (4 tabs)

突片射流对传热的影响表现在: 由于射流孔边缘突片的插入, 一方面能够在突片两侧形成一对反向旋转的流向涡对. 流向涡随着射流的流动沿流向发展, 与周围流体进行着热量和动量的交换, 并随着与主流的不断掺混而削弱, 并且呈现向四周扩散的趋势. 由于流向涡的卷吸和强化掺混作用, 对应于突片布置方向上出现较为明显的局部高端流动能区域, 湍流动能的增强有利于提高射流冲击的冷却效果. 另一方面也使得射流出口的流动面积呈现收敛的几何特征. 在亚音速射流范围内, 射流孔截面收敛有利于提高射流核心区速度, 从而改善射流冲击驻点区附近的对流换热效果.

2 突片在射流混合中的作用

对于射流混合, 在发展区前端存在明显的大涡卷起过程, 大涡结构从射流的长边上突起, 分布比较均匀, 涡结构比较单一, 在射流中远场区域流向涡和展向涡在涡强度、前后涡间距等方面大致相当. 流向涡从核心区末端开始逐渐发展增强, 在射流远场区域流向涡和展向涡在同等水平上, 二者具有同等重要的地位. 从图 7^[5]可以看出, 在涡的分布形态上展向涡比较规则匀称, 而流向涡则杂乱无章. 通过流向涡的旋转运动能促使中心射流和环境流体更好地混合, 横截面上流体在不同流向涡之间反复游走, 极大地强化了射流的混合过程.

在圆湍射流喷嘴小突片对强化射流混合作用影响方面, 图 8^[6]给出了轴向截面平均流动显示图片. 从图中能够明显看出射流核心区的存在 (核心区尖端由箭头指出), 在无突片的图中核心区的长度大约为 $4.5d$ 而有小突片以后核心区明显减小到 $2d$ 附近. 在另一方向截面图 (c) 中还能清楚看到核心区分叉外移的现象, 形成了两个亮度高峰. 从图 9 所示轴向截面瞬时流动图片, 可以看出没有小突片存在时涡卷起的位置在 $4.5d$ 附近, 而有小突片的图 (b) 在喷嘴小突片的尖端处就产生了展向涡, 涡的合并和脱落的位置

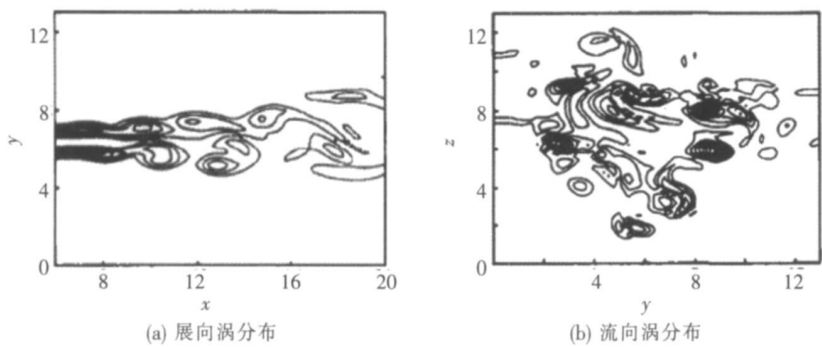


图 7 流向涡和展向涡对比

Fig.7 Contrast of streamwise and spread vortices

置也都随之有了很大的提前. 在 XZ 截面图 (c) 中看到射流外边缘的涡卷起过程和图 (a) 差别不大, 但是受到与之垂直方向的流动状态变化影响, 在 $1.5d$ 附近中心出现了“空洞”, 这是图 (b) 中显示的展向涡在这个位置脱落而形成的.

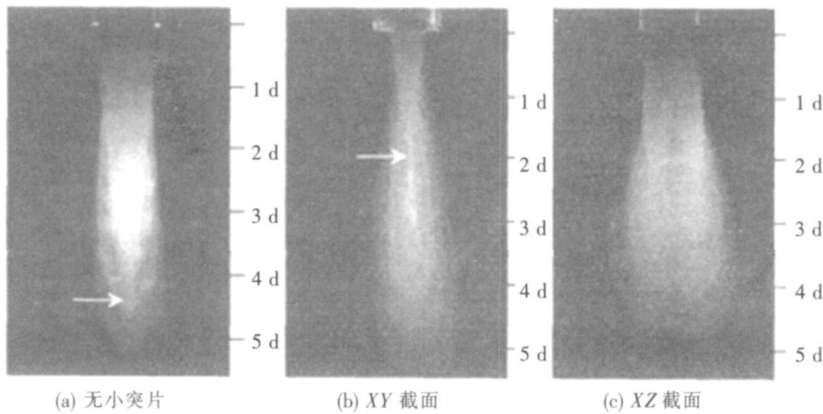


图 8 轴向截面平均流动图

Fig.8 Average flow on axis section

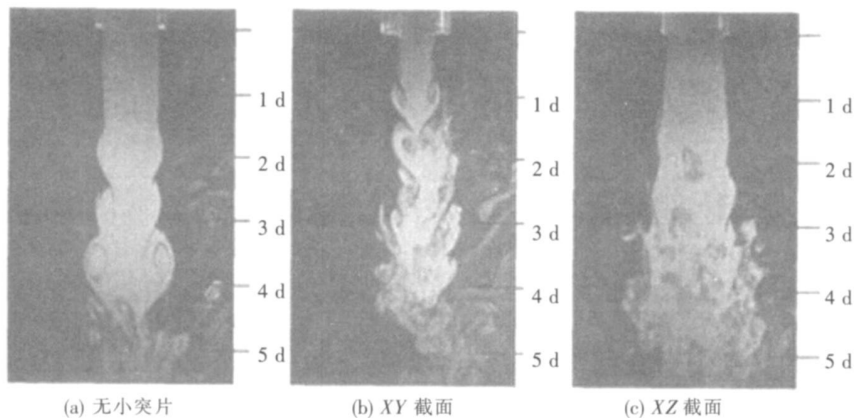


图 9 轴向截面瞬时流动图

Fig.9 Instantaneous flow on axis section

研究发现^[7]: 当在喷管出口处安装小突片后, 在低速条件下, 能加强尾喷流与环境气流的混合, 使尾喷流的速度衰竭加快, 尾喷流的核心区缩短, 在高温高速条件下也具有较好的强化混合性能. Hu Hui^[8]从涡结构的演化过程讨论了小突片强化混合作用机理, 图 9 显示的是突片掺混中沿流向横截面的 PLIF 流动显示图像. 从图 10 (a) 中可以清楚地看到, 有一向内的锯齿形图像上出现了小规模湍流结构, 这是由于开尔文——赫儿姆霍尔茨旋涡系从突片尾端较早地脱落. 在 $X/D = 1.0$ 的横截面上, 由于突片侵扰而引起

的主流向内的锯齿变得更大了, 在 PLIF 流动显示图像上, 能看到在锯齿上有更小的湍流结构. 而在 $X/D = 2.0$ 的横截面上, 可以看到, 小规模湍流和旋涡结构几乎布满了整个流场.

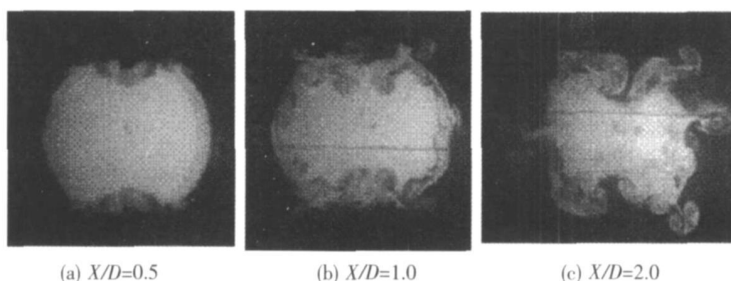


图 10 PLIF 流动显示

Fig.10 PLIF flow

在射流的强化掺混中, 由于流向涡的诱导作用使尾喷流截面在突片安装位置的附近出现凹凸现象, 由此加快了大涡环的分割和重组过程. 此外, 流向涡对的诱导作用, 使其与方向互相垂直的正交涡环受到局部拉伸作用, 从而发生涡的能量“串级效应”, 使正交涡的尺寸迅速减小, 加强了喷流从大尺度涡向小尺度涡的转化过程, 因而使尾喷流与环境流体的混合得到加强. 同时由于突片混合结构有效地增长了流体冷却接触边界, 使发动机的热燃气流和环境冷空气流在较短的距离上得到最充分的混合, 从而降低了排气温度, 并改善了温度分布情况, 因而可大幅度地降低红外辐射.

3 结论

对突片射流传热和混合特性的研究表明, 小突片能在尾喷流的下游流场中形成一对旋转方向相反的流向涡, 其产生主要有两个来源: (1) 由于突片的插入, 使尾喷流在突片的上游出现压力突起, 从而在突片的两侧产生一对反向旋转的涡对; (2) Kelvin-Helmholtz 不稳定性引起的从突片侧边周期脱落的尾涡在下游被速度梯度导向, 使涡矢量沿流向形成流向涡. 由于流向涡的卷吸作用, 把核心区的高能量流体向附面层中传输, 把附面层的低能量流体向核心区输送, 使核心区与附面层之间的能量交换加强.

[参考文献] (References)

- [1] Gao N, Sun H, Ewing D. Heat transfer to impinging round jets with triangular tabs[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46: 2557-2569.
- [2] Wang X K, Chua L P, Yu S C M. On the near-field of a square jet with vortex-generating tabs[J]. Fluid Dynamics Research, 2003, 32: 99-117.
- [3] Zaman K B M Q. Reduction of jet penetration in a cross-flow by using tabs[J]. AIAA Paper 98-3276, 1998.
- [4] Zaman K B M Q, Reeder M F, Samimy M. Control of an axisymmetric jet using vortex generators[J]. Phys Fluids, 1994, 6(2): 778-793.
- [5] 蒋平, 郭印诚, 张会强, 等. 矩形射流中的流向涡分布特性及作用[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(8): 1110-1113.
Jiang Ping, Guo Yingcheng, Zhang Huiqiang, et al. Distribution and function of stream wise vortices in rectangular jet flows[J]. J. Tsinghua Univ. Sci and Tech, 2005, 45(8): 1110-1113. (in Chinese)
- [6] 崔金雷, 张会强, 容易, 等. 两相圆湍射流喷嘴小突片对强化射流混合作用影响的流动显示[J]. 实验流体力学, 2005, 19(3): 14-20.
Cui Jinlei, Zhang Huiqiang, Rongyi, et al. Visualization of the turbulent two-phase jet with mixing tabs[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2005, 19(3): 14-20. (in Chinese)
- [7] Ahuja K K. Mixing enhancement and jet noise reduction through tabs plus ejector[J]. AIAA Paper 93-4347, 1993: 1-10.
- [8] Hu Hui, Tetsuo S, G. A. Toshiro Kobayashi, et al. Passive control on jet mixing flows by using vortex generators[C] // Proceedings of the Sixth Triennial International Symposium on Fluid Control, Sherbrooke, Canada. Measurement and Visualization, 2000: 1-6.
- [9] 顾维藻, 神家锐, 马重芳. 强化传热[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 318-322.

- Gu W eizao Shen Jianji Ma Chongfang Strengthen Heat Transfer[M]. Beijing Science Press 1990 318-322 (in Chinese)
- [10] 陈利强, 杨卫华, 杨成凤, 等. 梯形突片气膜冷却特性的实验 [J]. 航空动力学报, 2008, 23(9): 1 660-1 665.
Chen L iqi ang Yang W eihua Yang Chengfeng et al Experimental study on cooling characteristics of film cooling with trapezoid tabs[J]. Journal of Aerospace Power 2008, 23(9): 1 660-1 665. (in Chinese)
- [11] 燕小芬, 王兵, 王希麟. 颗粒对小突片喷口湍射流调制研究 [J]. 推进技术, 2007, 28(3): 253-257
Yan Xiaofen Wang Bing Wang Xilin Turbulence modulation of particles in a tabbed-jet[J]. Journal of Propulsion Technology 2007, 28(3): 253-257 (in Chinese)
- [12] Reddy D R, Zaman K B M Q. Computational study of effect of tabs on a jet in a cross flow[J]. Computers and Fluids 2006 35 712-723
- [13] Nakod P M, Prabhu S V, Vedula R P. Heat transfer augmentation between impinging circular air jet and flat plate using finned surfaces and vortex generators[J]. Experimental Thermal and Fluid Science 2008, 32 1 168-1 187.
- [14] Nasir H, Acharya S, Ekkad S V. Improve film cooling from cylindrical angled holes with triangular tabs effect of tab orientations[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003(24): 657-668
- [15] 黄勇, 郭志辉, 魏福清, 等. 小突片对热射流红外辐射的影响研究 [J]. 推进技术, 2001, 22(2): 122-125.
Huang Yong Guo Zhuhui Wei Fuqing et al Effect of tabs fixed on a convergent nozzle to the infra-red radiation of the exhaust hot jet[J]. Journal of Propulsion Technology 2001, 22(2): 122-125. (in Chinese)
- [16] Feischer A S, Nejad S R. Jet impingement cooling of a discretely heated portion of a protruding pedestal with a single round air jet[J]. Experimental Thermal and Fluid Science 2004, 28 893-901.
- [17] Yang W, Meng H, Sheng J. Dynamics of hairpin vortices generated by a mixing tab in a channel flow[J]. Experiments in Fluid 2001, 30 705-722
- [18] Yu S C M, Koh P K, Chua L P. An experimental investigation of two-stream mixing flow with a single delta tab[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2001, 22 62-71.
- [19] Chua L P, Yu S C M, Wang X K. Flow visualization and measurement of a square jet with mixing tabs[J]. Experimental Thermal and Fluid Science 2003, 27: 731-744
- [20] Reddy D R, Zaman K B M Q. Computational study of effect of tabs on a jet in a cross flow[J]. Computers and Fluids 2006 35 712-723

[责任编辑: 刘 健]