

涡激励突片射流冲击冷却的数值研究和试验验证^{*}

余业珍^{1,2}, 张靖周¹, 谭晓茗¹

(1 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016 2 南京师范大学 动力工程学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 运用数值计算方法研究带涡激励突片的单排圆形射流冲击冷却特性, 同时对数值计算结果进行试验验证。研究表明, 与无突片的圆形射流以及不倾斜的突片相比, 三角形突片相对于主流倾斜 45°和 135°能较好地改善冲击区的换热。由于流向涡的存在, 有突片射流的流向速度等值线呈现瓣状分布, 且随着流向距离的加大逐渐扩散, 直至消失。计算与实验结果吻合。

关键词: 射流; 突片⁺; 冷却; 数值计算

中图分类号: V233.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2008) 02-0163-05

Numerical investigation and experimental examination on jet impingement with vortex-generating tabs

YU Ye-zhen^{1,2}, ZHANG Jing-zhou¹, TAN Xiaom ing¹

(1 Coll. of Energy and Power, Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2 Coll. of Power Engineering, Nanjing Normal Univ., Nanjing 210016, China)

Abstract The jet impingement characteristics of a circular jet with vortex-generating tabs were investigated by three-dimensional numerical computation. The tabs, which are triangular in shape, are tilted into the jet at either 45° or 135°. The tilted tabs can better improve the convective heat transfer of impingement region compared with the non-tilted tabs. As a result of the pair of streamwise vortices, the streamwise velocity contours of the jet with tabs take on lobed distribution, which gradually spreads with the increase of the streamwise distance and disappears at last. The calculation results are close to the experimental data.

Key words Jet flow; Tabs⁺; Cooling; Numerical calculation

1 引 言

射流冲击是一种极其有效的强化局部传热或传质的方法。由于射流冲击靶面所形成的在冲击靶面上流动的边界层薄, 对流换热系数比常规的对流换热要高出几倍甚至一个量级^[1], 因此冲击冷却在现代燃气涡轮发动机的热端部件的强化冷却中被广泛采用。尽管针对射流冲击冷却已经开展了大量的研究, 但如何进一步提高射流的冷却效率仍然是需不断探索的研究课题。Colucci^[2]和 Lee^[3]等曾对射流喷口的形状进行过研究, 得到了在不同的射流雷诺数和冲击间距下射流喷口形状对驻点和局部换热特性的影响; Zumbunnen^[4]和李发军等^[5]对流体间断冲击靶面

的脉冲射流冲击进行了实验研究, 获得了射流脉冲频率对射流冲击对流换热的影响效果; Liu^[6]等对激励圆形射流的流动结构和换热特性进行了研究, 陈玉阳等^[7]对喷口内置扭转带的旋转射流冲击靶面的对流换热特性进行了实验研究, 发现与普通射流冲击相比, 旋转射流换热在驻点区略低而在壁面射流区却略高。本文从突片诱导涡激励措施在射流-横流混合中的作用机制中得到启发, 试图利用突片诱导的流向涡改善射流的冲击冷却特性。突片涡激励概念最初是由 Bradbury 和 Khadem^[8]于 1975 年提出的, Zhang 等^[9]通过细致的实验研究, 揭示出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, 进而改变两股流体之间的混合流场。

* 收稿日期: 2006-12-28 修订日期: 2007-06-18.

作者简介: 余业珍 (1970—), 女, 博士生, 讲师, 研究领域为传热与燃烧。E-mail: yuyezhen@njjnu.edu.cn

Wang和Chua^[10]等人用激光多普勒风速计研究了单孔方形射流上加装倾斜的三角形突片对流场速度的影响,对突片产生的流动机理进行了更深入的考察。但目前尚未见对带突片单排圆形射流冲击冷却特性研究的报道。

本文采用数值计算的方法对半封闭通道单排圆形孔上加装突片后的流动换热特性进行了研究,并进行试验验证。

2 计算模型和计算方法

计算模型如图1所示,坐标轴 x 、 y 、 z 分别代表水平方向、展向和流动方向。8个突片安装在射流孔出口边缘,沿周向均匀分布; θ 是突片沿流动方向的倾角,分别取为 45° 、 90° 和 135° ,其中 $\theta=90^\circ$ 的突片和流动方向垂直,即为不倾斜的突片;突片长度 m 的取值,对 45° 突片和 135° 突片为 1.4 mm ,不倾斜突片为 1 mm ,保证了倾斜突片和不倾斜突片具有相同的堵塞比。射流孔的数目为7,直径 d 为 6 mm 。沿展向的孔间距与孔径之比 Y_n/d 为2,孔的中心线距通道封闭一侧壁面的距离保持为5倍的射流孔直径。

数值计算采用Fluent计算软件,对有突片区域的网格,采用非结构化网格,在流场参数变化较明显的

区域如射流出口、冲击靶板附近进行了局部网格加密,冲击孔被设置为高 5 mm 的小圆柱单独形成网格。湍流模型采用标准的 $k-\epsilon$ 湍流模型,在近壁区采用非平衡的壁面函数法。方程采用二阶迎风格式进行离散,收敛的标准是判断相对残差小于 10^{-6} 。

进口边界,给定射流孔入口的速度和温度($T_{in}=300\text{ K}$),进口的湍流动能和湍流动能耗散率取为

$$k_{in} = 0.03 u_{in}^2 \quad \epsilon_{in} = k_{in} / 0.005d$$

式中 u_{in} 为射流入口速度, d 为射流孔的直径。

固体边界,速度为无滑移条件,射流冲击板为绝热条件,冲击靶面为恒热流边界条件,热流密度为 6 kW/m^2 。

出口条件,所有参数沿流向的一阶导数为零。

计算网格示意图见图2。

3 试验方法

实验系统如图3所示。空气经过压缩机压缩,利用除湿器分离出空气中的水分,以保证压缩空气的干度,分离后的空气经过流量计进入稳压箱,再进入冲击气腔,在冲击气腔内装有整流网,以使气体流动均匀;再经过冲击孔板而垂直冲击到换热靶板,最后经半封闭通道出口排入大气。

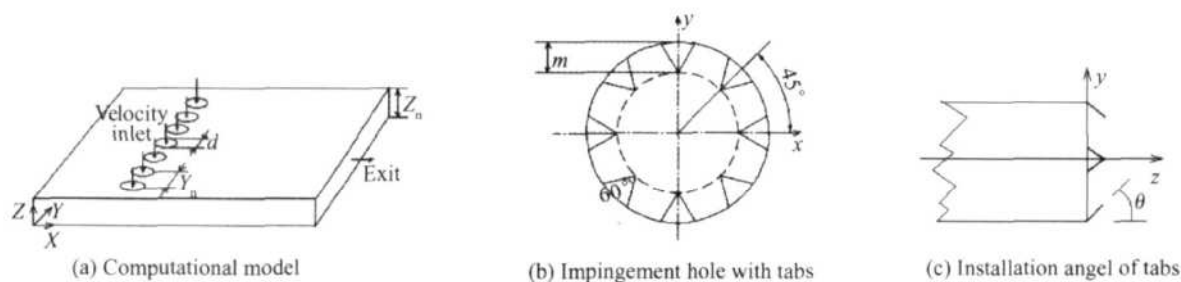


Fig. 1 Schematic computational model

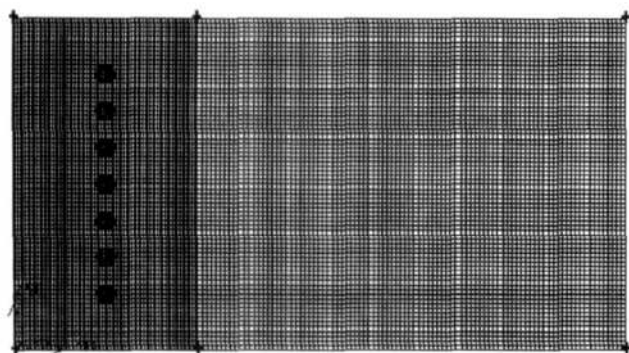


Fig. 2 Schematic computation grid

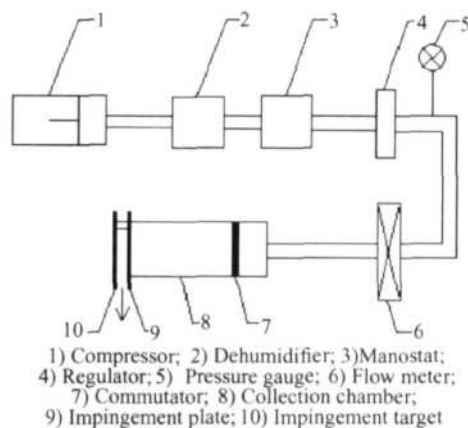


Fig. 3 Experimental system

在单向出流的冲击通道中,冲击孔板上设置单排射流冲击孔,射流孔的数目为 7,直径 d 为 6mm,沿展向的孔间距与孔径之比 Y_n/d 为 2,孔的中心线距通道封闭一侧壁面的距离保持为 5 倍的射流孔直径;在射流孔内侧沿周向均匀安置 8 个形状为等腰三角形的突片,分别沿流动方向倾斜 45° 和 135° 。突片厚度为 0.2 mm,长度为 1 mm;冲击靶面板用有机玻璃制成,内侧敷设康铜膜用于提供恒热流加热的边界条件,冲击靶板和冲击孔板之间的距离可以通过调整垫片厚度改变,冲击间距与孔径之比 Z_n/d 分别取为 1~3。

冲击靶板上的温度分布图像用红外热像仪拍摄,红外热像仪的温度范围: $-20^\circ\text{C} \sim 2\,000^\circ\text{C}$;测温分辨率: 0.15°C 。在对康铜膜加热时,考虑到冲击靶板的散热主要是靶板外表面的散热和外露加热膜的热辐射及自然对流,实验中在冲击靶板后面的绝热层内的一层石棉垫片的两面敷设了两对热电偶,通过测量石棉垫片两面的温差,求得靶板的散热损失;外露加热膜的热辐射和自然对流散热损失通过测外露加热面的平均温度来计算。使用红外处理软件,对红外图像进行详细处理,得到需要的温度场。根据靶板的温度分布,计算出靶板上的平均对流换热系数。在本文的试验研究中,冲击射流雷诺数 Re 取为 $5 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$, Re 冲击靶面的平均对流换热系数和平均努塞尔数定义为

$$Re = \frac{\rho v_j d}{\mu} \quad h = \frac{IV}{A(T_s - T_j)}$$

$$Nu = \frac{hd}{\lambda_j}$$

式中 v_j 为射流的速度, IV 为电热膜的加热功率, A 为电热膜的面积。 T_s 为冲击靶面的温度, T_j 为射流的温度。

4 计算结果与分析

4.1 冲击靶板上平均 Nu 数

图 4 为 $Z_n/d = 1 \sim 3$, $Re = 2 \times 10^4$ 时,不同倾角突片对驻点区冲击孔间平均 Nu 数的影响。其中不带突片的射流,其实验结果的趋势与文献 [11] 吻合。从图中可以看出: (1) 倾角为 135° 和 45° 的突片换热效果优于倾角为 90° 的突片,可见突片倾角能够改善射流冲击冷却的换热效果。(2) 倾角为 135° 和 45° 的突片换热效果并无明显区别。(3) 射流孔上加装不同倾角突片后的换热效果均优于未加突片的射流。

4.2 突片作用效果与机理

图 5 所示为 $Z_n/d = 2$, $Re = 2 \times 10^4$ 时,安装不同形状突片射流孔的射流在相同流向位置处 ($z/d = 0.15$) 的流向速度等值线。从图中可见,对于带突片的射流,由于突片生成的流向涡作用,引起两个相邻突片之间的速度等值线变形,在相邻突片之间流向速度等值线呈现瓣状分布;对于倾角为 45° 和 135° 的突片,瓣状的高度和宽度都明显强于不倾斜 ($\theta = 90^\circ$) 的突片,同时等值线也更加紧凑,说明突片的倾角加强了流向涡的强度,增强了射流与周围流体的交换,且突片沿流动方向向内倾斜和向外倾斜在冲击效果上没有明显的区别。

图 6 所示为倾角为 45° 的突片在不同流向位置处的流向速度等值线。从图中可见,速度等值线的瓣状结构,随着流向距离的加大逐渐扩散,到流向距离为 $z/d = 1$ 的时候,瓣状已经基本上消失。这是由于流向涡向下游不断发展形成的,流向涡沿下游不断与周围流体混合,最终和主流掺混到一起,这时瓣状就消失了。流向涡在与周围流体的掺混过程中,由突片

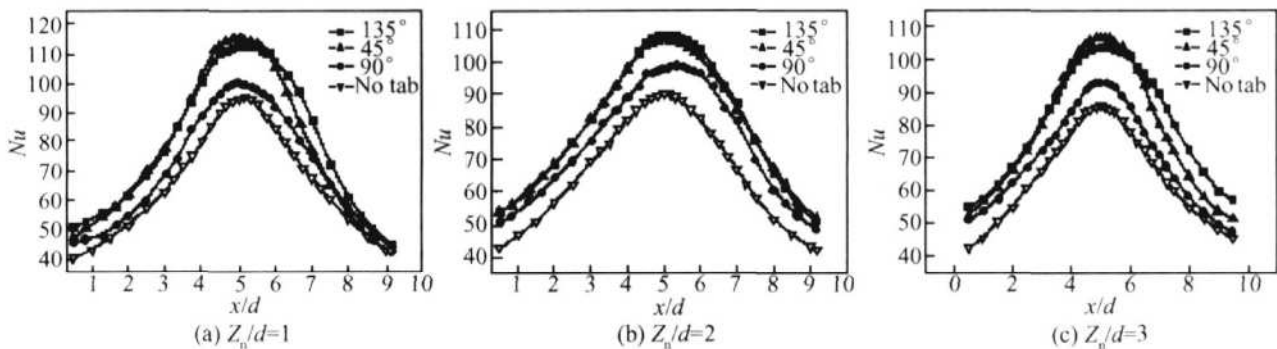


Fig 4 Effects of the tilted angle of tabs on the average Nu number between the impinging holes ($Re = 2 \times 10^4$)

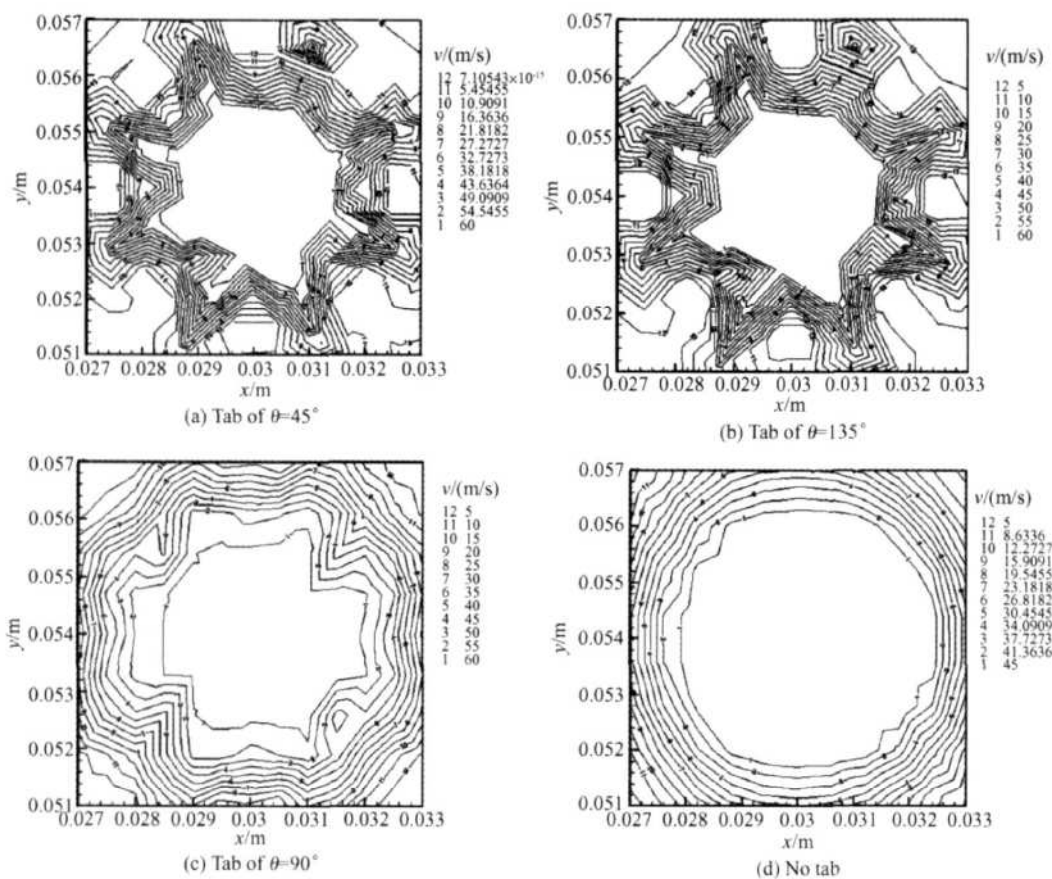


Fig. 5 Contours of streamwise velocity about three kinds of impingement hole ($Re = 2 \times 10^4$, $z/d = 0.15$)

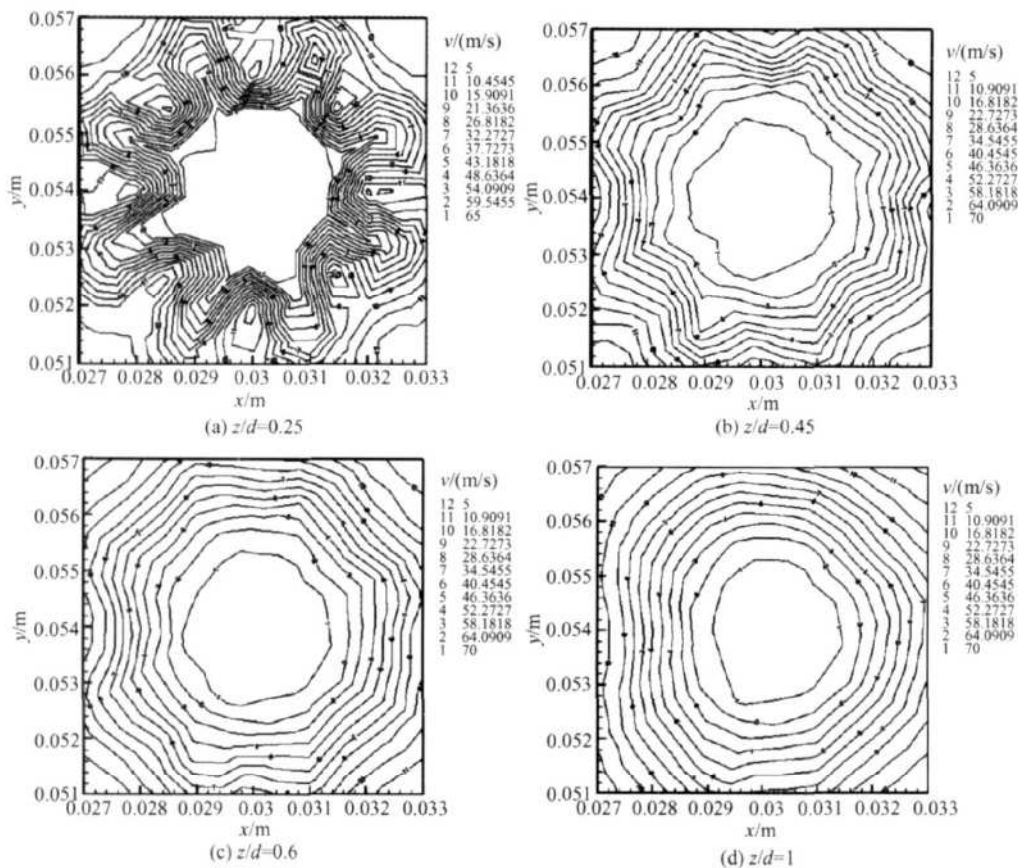


Fig. 6 Contours of streamwise velocity at different locations ($\theta = 45^\circ$; $Re = 2 \times 10^4$)

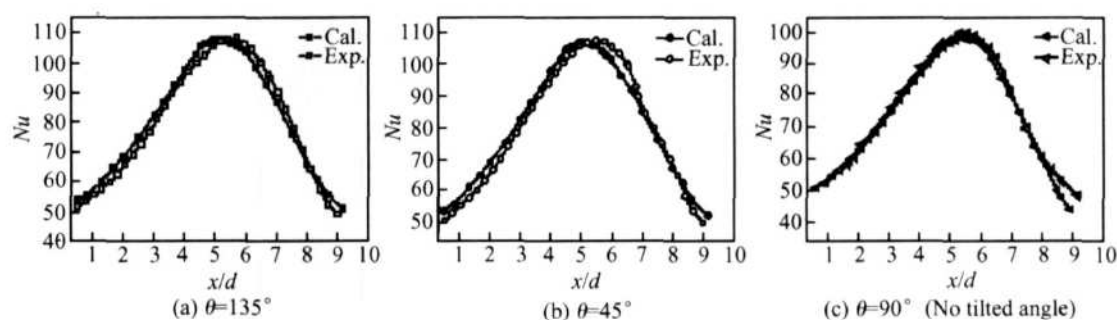


Fig 7 Comparison of calculation and experimental results of the average Nu number between the impingent holes about different tilted angle ($Z_n/d = 2$, $Re = 2 \times 10^4$)

生成的流向涡增强了湍流的混合,使主流的温度更低,这时,虽然流向涡和主流掺混到一起,速度等值线图与无突片时类似,但由于温度更低的主流继续冲击到靶板,使靶板驻点区附近的冷却效果明显好于未加突片的射流。

4.3 计算值和实验值的比较

图 7 所示为 $Z_n/d = 2$, $Re = 2 \times 10^4$ 时,不同倾角突片冲击孔间平均 Nu 数计算值和实验值的比较。从图中可以看出计算值和实验值是吻合的。说明本文的计算方法是可行的,得出的结论是可靠的。

5 结 论

(1) 常规冲击射流孔上加装突片结构后,由于流向涡的存在,有突片射流的流向速度等值线呈现瓣状结构,且随着流向距离的加大逐渐扩散,冲击冷却效果优于未加突片的射流;

(2) 倾角为 135° 和 45° 的突片换热效果优于倾角为 90° 的突片,突片倾角能够改善射流冲击冷却的换热效果;两者的换热效果并无明显区别。

(3) 计算与实验结果吻合,验证本文的数值计算是可靠的。

致 谢: 在本文的研究过程中,得到了张靖周教授的悉心指导,张老师严谨的科学态度深刻地影响了我。另外,实验过程中得到了杨卫华老师、谭晓茗老师和单勇老师的无私帮助,向他们表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] Bergles A E. Heat transfer enhancement—the encouragement and accommodation of high heat fluxes[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1995, 119: 8~19
- [2] Colucci D, Viskanta R. Effect of nozzle geometry on local

convective heat transfer to a confined impinging air jet [J]. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 1996, 13: 71~80

- [3] Lee J, Lee S J. The effect of nozzle configuration on stagnation region heat transfer enhancement of axisymmetric jet impingement[J]. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 2000, 43: 3497~3509
- [4] Zumbun D A, Aziz M. Convective heat transfer enhancement due to intermittency in an impinging jet[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1993, 115: 91~98
- [5] 李发军, 苑中显, 马重芳, 等. 脉冲射流冲击冷却换热的液晶显示实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2002, 23(2): 193~196
- [6] Liu T, Sullivan J P. Heat transfer and flow structure in a excited circular impinging jet[J]. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 1996, 39(17): 3695~3706
- [7] 陈玉阳, 苑中显, 马重芳, 等. 旋转射流冲击换热液晶显示实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2003, 24(4): 646~648
- [8] Bradbury L J, Khadem A H. The distortion of a jet by tabs[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1975, 70(4): 801~813
- [9] Zhang S C, Scheider S P. Molecular mixing measurements and turbulent structure visualization in a round jet with tabs[R]. *AAAS* 94-3082
- [10] 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
- [11] 张泽远, 张靖周, 杨卫华. 半封闭通道射流冲击冷却换热特性的实验[J]. *航空动力学报*, 2006, 21(4): 626~630

(编辑: 梅 瑛)