

# 突片激励射流冲击冷却的实验研究

余业珍<sup>1,2</sup>, 张靖周<sup>2,3</sup>, 武彬彬<sup>1</sup>, 牛宝联<sup>1</sup>, 李应林<sup>1</sup>

(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]** 对突片激励射流冲击冷却特性进行实验研究, 分析突片形成的流向涡对冲击换热特性的影响, 总结了双排射流孔的传热规律. 实验结果表明, 在双排突片射流冲击冷却中, 突片具有改善冲击换热特性的作用, 射流孔的排列方式以及两排孔之间流向孔间距的变化对冲击靶面的温度分布具有较大的影响, 叉排孔的有效冷却范围更大, 冷却效果更好.

**[关键词]** 冲击冷却, 突片, 实验研究, 双排孔, 温度分布

**[中图分类号]** V233.5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2015)04-0019-08

## Experimental Investigation on Jet Impingement with Vortex-Generating Tabs

Yu Yezhen<sup>1,2</sup>, Zhang Jingzhou<sup>2,3</sup>, Wu Binbin<sup>1</sup>, Niu Baolian<sup>1</sup>, Li Yinglin<sup>1</sup>

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

(2. Key Laboratory of Aerospace Power System of Jiangsu Province, 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:** The impingement cooling characteristics of a circular jet with tabs are investigated experimentally. It is analyzed that stream wise vortices formed by tabs affect the impingement cooling characteristics. The heat transfer laws of double-rows jet orifices are summarized. The results show that tabs can improve the impinging heat transfer properties for the impingement cooling with double-rows tabbed jet flows. The arrangement of jet orifices and the change of the stream wise space between the orifices have an important influence on the target temperature distribution. The staggered orifices have the larger valid cooling cope and the better cooling effect.

**Key words:** impingement cooling, tabs, experimental investigation, double-rows jet orifices, temperature distribution

射流冲击作为一种高效的强化传热方式, 不仅在工业上得到了越来越广泛的应用, 而且在理论和实验研究方面也取得了很大进展<sup>[1-5]</sup>. 研究表明, 一般的强迫对流换热方式难以解决高热负荷的传热问题, 射流冲击则显示出独特的优势. 近年来, 一些研究人员对流体间断冲击靶面的脉冲射流冲击、自激励旋进作用下的射流流动结构和换热特性以及喷嘴内置扭转带的旋转射流冲击对流换热特性展开了一些探索研究, 获得了较常规射流冲击更高的强化传热性能<sup>[6-10]</sup>; 同时射流冲击与其他强化传热方式(如壁面扰流肋、管内扰流器)构成的复合强化传热方式更是引起研究人员的关注<sup>[11-17]</sup>. 文献[18]提出了一种气旋射流的概念, 由于涡轮叶片前缘冷却通道内的射流气旋运动, 大大增强了通道内的对流换热强度, 改善了周向的冷却效果均匀性. 尽管针对射流冲击强化传热已经展开了大量的研究, 但如何进一步提高射流冲击的强化传热效果仍然是一个值得关注和探索的研究方向. 突片是一种结构简单的涡激励器, 用于控制或改善射流的流动结构. 本文对突片激励射流强化冲击冷却进行了实验研究, 探索了双排突片射流对传热特性的影响, 总结了双排射流孔的传热规律, 揭示了突片射流强化传热的机理.

收稿日期: 2014-11-07.

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

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

## 1 实验系统和实验件

## 1.1 实验系统

实验系统如图 1 所示. 冲击射流和横流均由空气压缩机提供, 一股气流经过浮子流量计进入装有整流网的冲击气腔室, 以使气体得到整流而保证流动均匀; 再经过冲击孔板垂直冲击到换热靶板, 最后经半封闭通道出口排入大气. 整套实验系统包括实验段、冷却系统、加热系统以及测量系统.

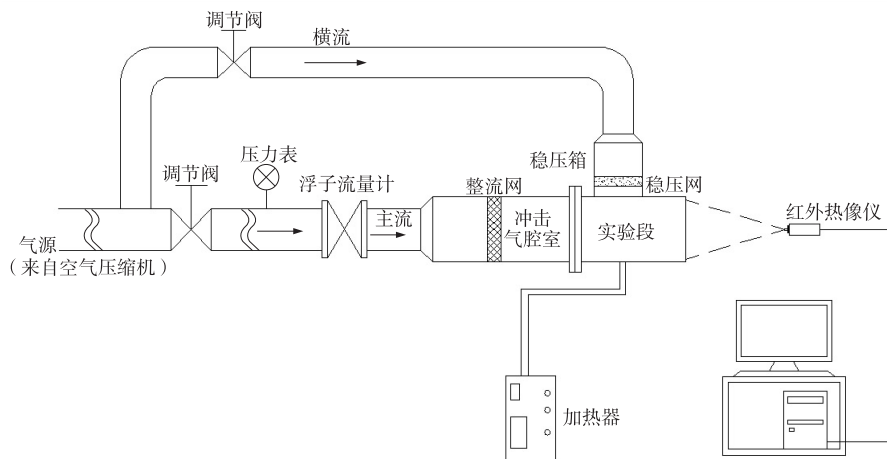


图1 实验系统图

**Fig.1 Experimental system**

根据实验特点采用电加热,由GDAJ-100/0-15型可控硅整流器提供的大电流、低电压的加热方式,加热电流0~100 A,加热电压0~15 V. 试验中采用的加热膜为康铜膜,厚度为0.01 mm,温度系数为 $50 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,电阻率为 $0.48 (\Omega \cdot \text{mm}^2)/\text{m}$ (20 $^{\circ}\text{C}$ ). 由于加热膜厚度非常小,与电源引线连接不方便,在加热膜两端焊接了厚度为0.5 mm的铜片,通过铜片与电源引线连接.

实验中冷却介质为空气. 从压气机引入的冷却空气经管路系统, 由浮子流量计测量得到体积流量后再通过测温 and 测压仪器得到经过流量计的冷却空气的温度和压力, 然后通过冲击气腔室进入实验段, 形成冲击冷却. 冲击气腔室用厚度为 3 mm 的钢板焊制而成, 内有一整流网, 其侧面开有静压力测量孔和气腔室内气流温度的测量孔.

## 1.2 实验段和实验件模型

图2所示为实验段.当无横流作用时,关闭横流管路阀门,冲击孔布置为双排方式.冲击孔沿展向的孔间距与孔径之比 $Y_n/d$ 取值为5;冲击孔的中心平面距通道封闭一侧壁面的距离均保持为5倍的冲击孔直径.主要的研究参数包括:(1)射流气动参数;(2)突片的几何参数;(3)双排孔的流向孔间距 $X_n$ ;(4)射流到冲击靶板的距离.冲击靶板上的温度分布图像用红外热像仪拍摄,使用红外处理软件,对红外图像进行详细处理,得到分析需要的温度场.

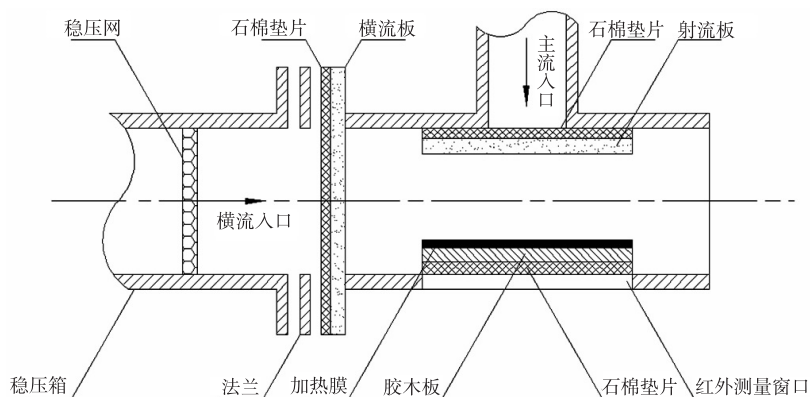


图2 实验段

**Fig.2 Experimental section**

## 2 实验数据的处理

射流雷诺数采用下式计算:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{Q_s \rho d}{\mu A N}, \quad (1)$$

式中,  $\mu$  为射流气体的粘性系数;  $\rho$  为射流气体的密度;  $Q_s$  为浮子流量计测量的体积流量;  $d$  为冲击孔的直径;  $N$  为冲击孔个数;  $A$  为冲击孔截面面积.

靶板外表面散热  $Q_l$  为:

$$Q_l = \frac{\Delta T_l}{\delta_s / \lambda_s} A_s, \quad (2)$$

式中,  $\Delta T_l$  为被测石棉垫片两面的温差;  $\delta_s$  为石棉垫片的厚度;  $\lambda_s$  为石棉垫片的厚度;  $A_s$  为石棉垫片的表面积.

外露加热膜与空气的自然对流换热量  $Q_c$  为:

$$Q_c = hA(T_w - T_f), \quad (3)$$

式中,  $T_w$  为外露加热膜的平均温度;  $T_f$  为环境的空气温度.

展向平均努塞尔数的定义如下:沿靶面相邻冲击孔圆心取线性温度积分,来作为靶板冲击孔的平均温度.

$$\bar{T}_s = \frac{\int_{T_{s2}}^{T_{s1}} T dl}{L}, \quad (4)$$

$$\overline{Nu} = \frac{(IV - Q_{\text{loss}})d}{A(\bar{T}_s - T_j)\lambda}, \quad (5)$$

式中,  $IV$  为电热膜的加热功率;  $Q_{\text{loss}}$  为散热损失;  $A$  为电热膜的面积;  $\bar{T}_s$  为冲击靶面的温度;  $T_j$  为射流的温度.

## 3 实验结果及分析

### 3.1 冲击靶面温度场显示与分析

#### 3.1.1 突片射流与无突片射流的温度场

图3所示为当  $Re=9\,000$ , 冲击间距  $Z_n/d=2$ , 流向孔间距  $X_n/d=3$ , 射流冲击孔分别呈顺排和叉排布置, 在冲击孔上加突片和不加突片时, 用红外热像仪拍摄到的冲击靶板上的温度分布. 从图中可以看出, (1) 当在射流孔上加突片以后, 突片射流冲击到靶板上, 在靶板上形成的驻点区低温区域扩大, 高温区域减小, 并且低温区的值也降低, 可见, 在多排孔冲击的情况下, 突片同样起到了改善冲击换热特性的效果; (2) 当射流孔呈叉排布置时, 前排射流和后排射流之间相互影响的程度较之射流孔为顺排布置时更强一些, 这种相互影响和相互作用表现在冲击冷却效果上, 是使射流与周围流体的换热增强, 导致叉排方式下驻点区的温度更低, 这种影响在有突片时更明显, 因为突片引起的涡对加强了这种相互作用, 如图3(b)和图3(d)所示.

#### 3.1.2 冲击射流 $Re$ 和冲击间距对温度场的影响

以顺排方式为例, 讨论冲击射流  $Re$  和冲击间距对冲击靶面温度场的影响.

图4所示为当冲击间距  $Z_n/d=2$ , 流向孔间距  $X_n/d=3$ , 射流冲击孔呈顺排布置时, 用红外热像仪拍摄到的不同  $Re$  时冲击靶板上的温度分布. 从图中可以看出, 当冲击射流  $Re$  增大时, 驻点区的低温区范围逐渐扩大, 高温区逐渐减小, 当  $Re$  较高时, 如图4(c)和图4(d)所示, 在驻点区范围内高温区域基本已移到了下游. 同时,  $Re$  的增加还导致低温区的温度值降低. 可见,  $Re$  的增加增强了射流的冲击换热效果, 这是由于冲击射流流量的增加引起的. 图5所示为冲击间距对冲击靶面温度场的影响. 从图5可以看出, 随着冲击间距  $Z_n/d$  的增大, 驻点区的低温区域逐渐减小, 高温区域逐渐增大; 与此同时, 低温区的温度值逐渐增大. 说明射流孔与冲击靶板的距离越近, 冲击换热效果越好.

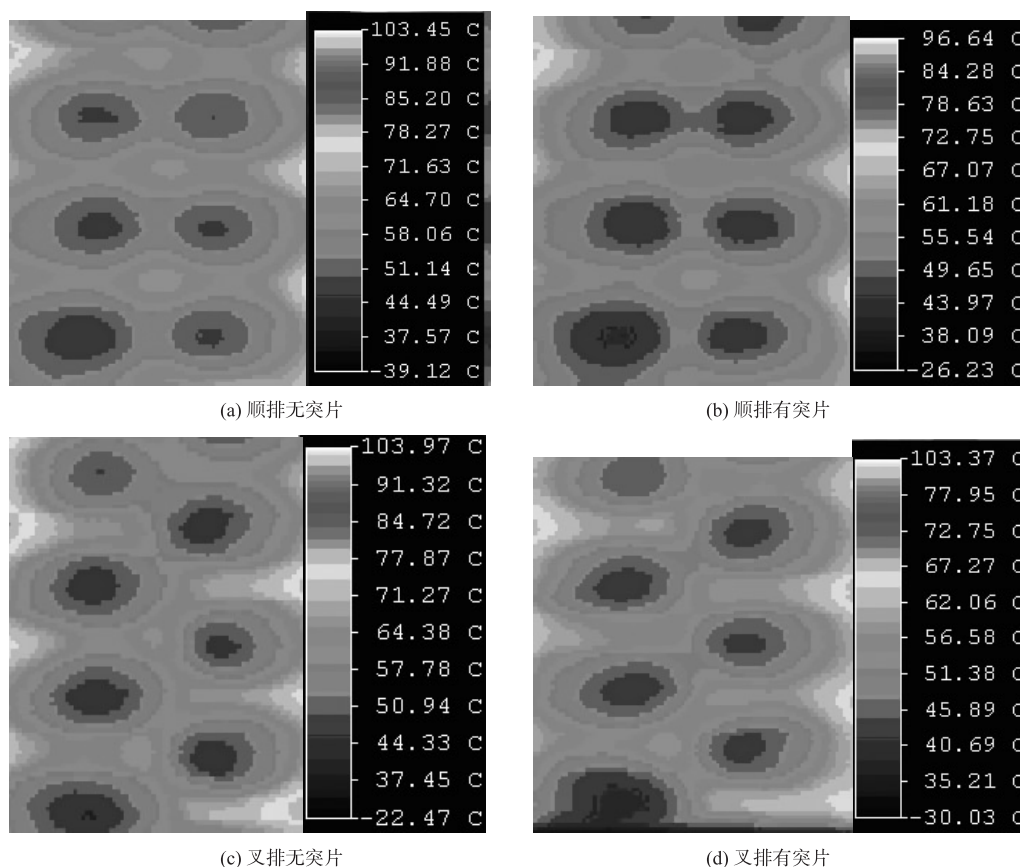


图3 冲击靶板上的温度分布 ( $Re=9\ 000, Z_n/d=2, X_n/d=3$ )

Fig.3 Temperature distribution on the impingement target ( $Re=9\ 000, Z_n/d=2, X_n/d=3$ )

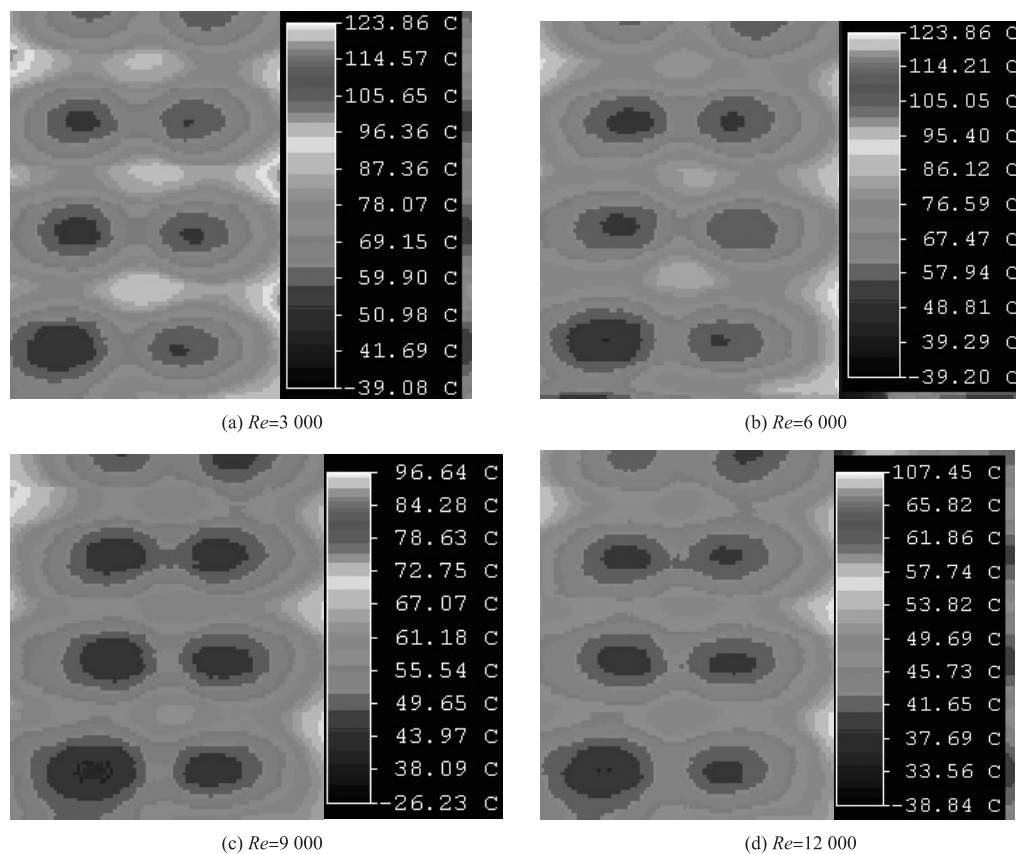
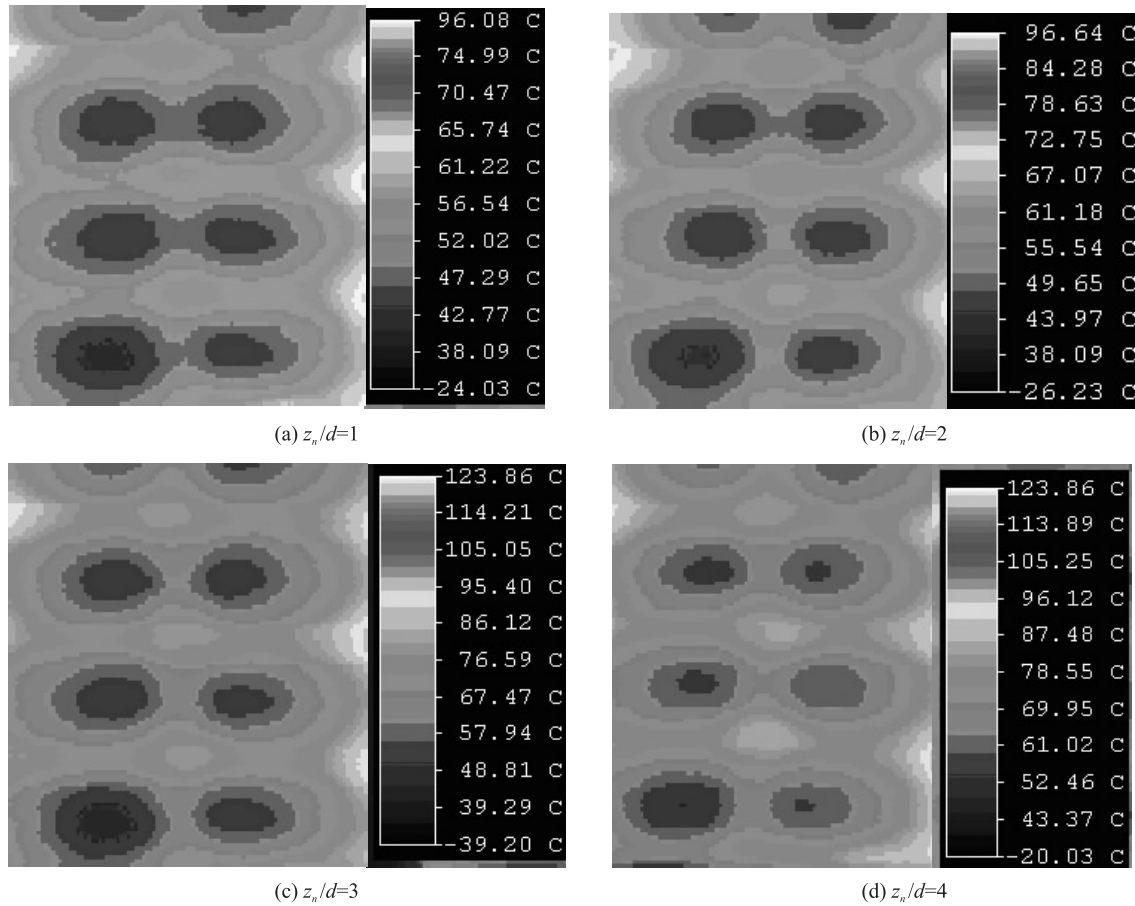


图4  $Re$  对冲击靶板上温度分布的影响 ( $Z_n/d=2, X_n/d=3$ )

Fig.4 Temperature distribution on the target with different  $Re$  ( $Z_n/d=2, X_n/d=3$ )



图5 冲击间距对冲击靶板上温度分布的影响 ( $Re=9\ 000, X_n/d=3$ )Fig.5 Temperature distribution on the target with different impingement distance ( $Re=9\ 000, X_n/d=3$ )

### 3.1.3 流向孔间距的变化对温度场的影响

图6所示为当 $Re=9\ 000$ ,冲击间距 $Z_n/d=2$ ,射流冲击孔分别呈顺排和叉排布置时,用红外热像仪拍摄到的不同流向孔间距 $X_n/d$ 时冲击靶板上的温度分布.从图中可以看出,(1)流向孔间距的变化对冲击靶面整个区域内的温度分布影响比较大;(2)随着流向孔间距与直径之比 $X_n/d$ 的增加,冲击冷却有效范围变大,但两排冲击孔之间出现了局部温度较高的区域,这是由于流向孔间距的增大,使两排射流之间的相互影响减弱,其中当冲击孔呈顺排布置时,最低温度值没有明显的变化,而当冲击孔呈叉排布置时,最低温度值有所下降;(3)与顺排时相比,在流向孔间距与直径之比 $X_n/d$ 相同时,叉排孔的驻点区面积更大,最低温度值更低,冷却效果更好.

## 3.2 冲击靶板上孔间平均 $Nu$ 数的分布规律

### 3.2.1 冲击射流 $Re$ 和冲击间距对孔间平均 $Nu$ 数的影响

图7所示为当冲击间距 $Z_n/d=2$ ,流向孔间距 $X_n/d=3$ ,射流冲击孔分别呈顺排和叉排布置时,冲击靶面展向平均 $Nu$ 数随 $Re$ 的变化曲线.从图中可以看出,(1)展向平均 $Nu$ 数随 $Re$ 的增加而增加;(2)两种排列方式下,两排冲击孔之间区域的平均 $Nu$ 数均有所下降,使平均 $Nu$ 数曲线形成两个驼峰;(3)前排射流冲击至靶面后形成壁面射流,与后排射流相互作用,使得沿流向第二排孔对应的换热情况与前排孔相比,略有增强;(4)在流向孔间距与直径之比 $X_n/d$ 相同时,在相同的 $Re$ 下,对于叉排方式,平均 $Nu$ 数的值高于顺排方式下的平均 $Nu$ 数值,表明叉排孔的换热效果要好于顺排孔,原因是由于在叉排方式下,前排射流中部分射流能绕过后排射流形成的“射流柱”,与后排射流相互影响,使最终的作用效果是换热的增强.图8所示为当 $Re=9\ 000$ ,流向孔间距 $X_n/d=3$ ,射流冲击孔分别呈顺排和叉排布置时,冲击靶面展向平均 $Nu$ 数随冲击间距的变化曲线.从图中可以看出,随着冲击间距 $Z_n/d$ 的增大,平均 $Nu$ 数逐渐下降,当冲击间距较大时(从 $Z_n/d=3$ 变化到 $Z_n/d=4$ ),这种下降趋势逐渐减小,在顺排时尤其明显.平均 $Nu$ 数的下降说明了冲击换热效果的减弱,即射流孔与冲击靶板的距离越近,换热效果越好.

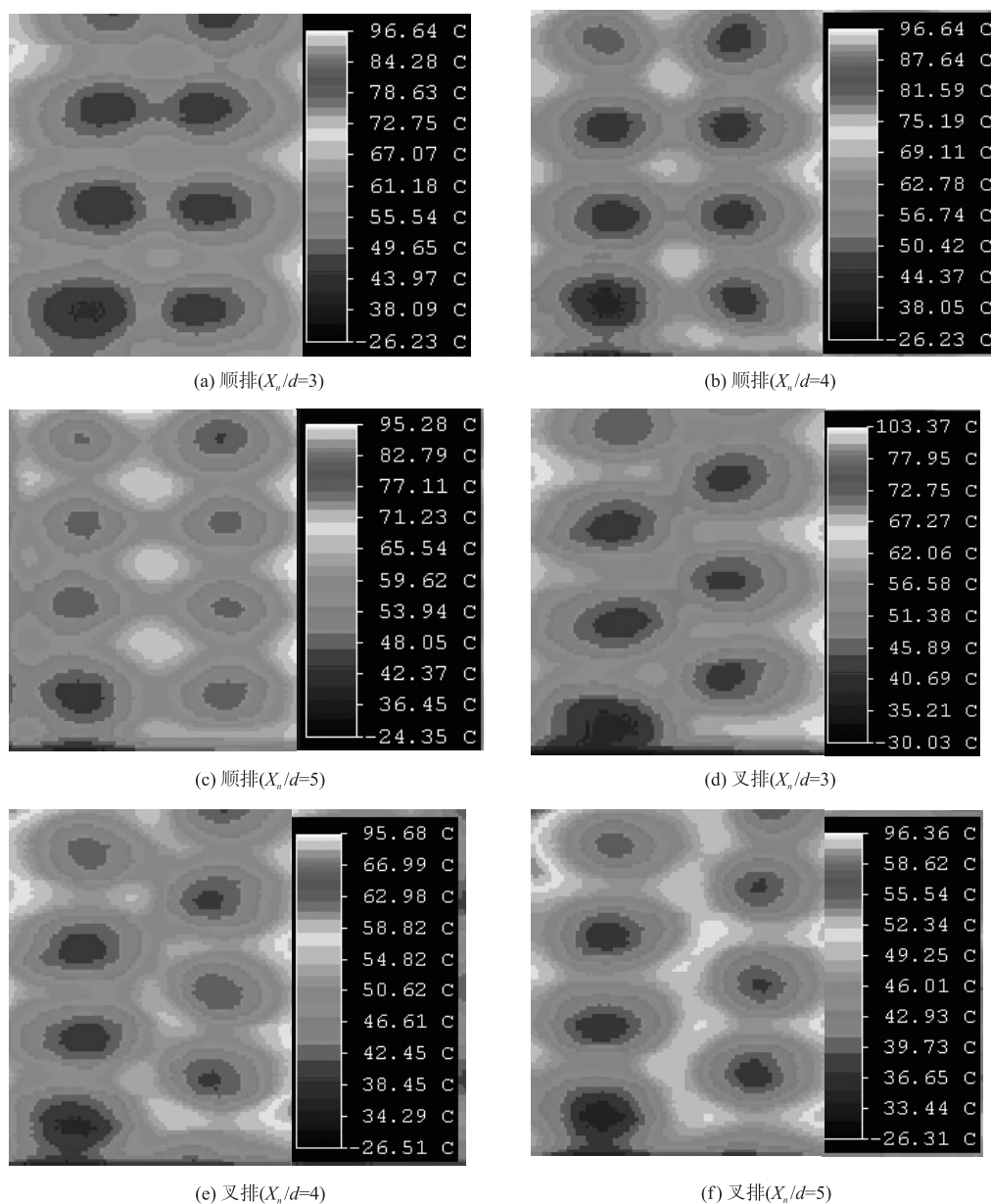


图6 流向孔间距对冲击靶板上温度分布的影响( $Re=9\ 000, Z_n/d=2$ )

Fig.6 Temperature distribution on the target with different stream wise space ( $Re=9\ 000, Z_n/d=2$ )

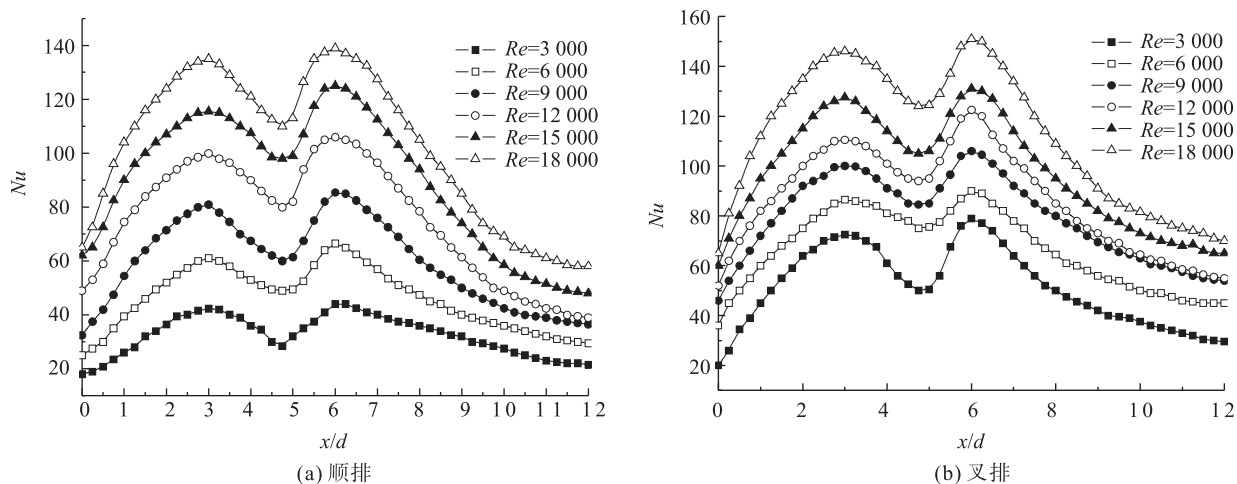
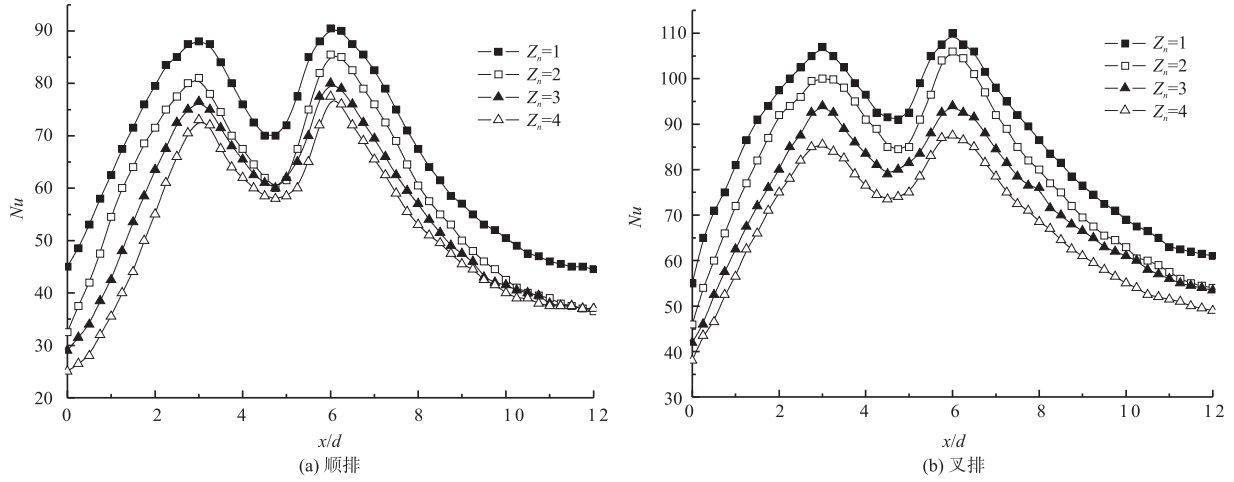


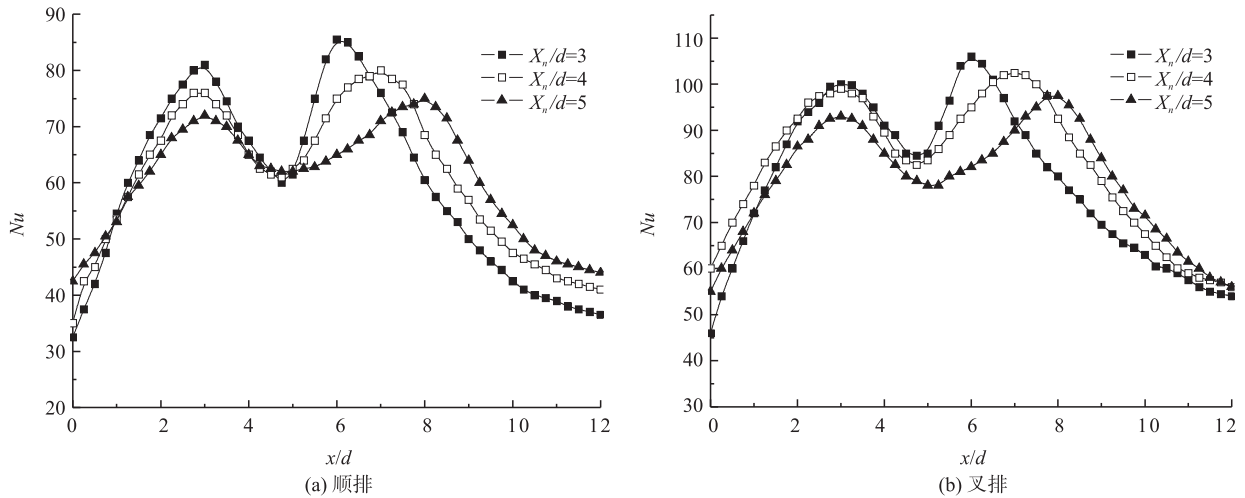
图7  $Re$  对孔间平均  $Nu$  数的影响( $Z_n/d=2, X_n/d=3$ )

Fig.7 Average  $Nu$  between orifices on the target with different  $Re$  ( $Z_n/d=2, X_n/d=3$ )

图8 冲击间距对孔间平均 $Nu$ 数的影响( $Re=9\ 000, X_n/d=3$ )Fig.8 Average  $Nu$  between orifices on the target with different impingement distance ( $Re=9\ 000, X_n/d=3$ )

### 3.2.2 流向孔间距的变化对孔间平均 $Nu$ 数的影响

图9所示为当 $Re=9\ 000$ ,冲击间距 $Z_n/d=2$ ,射流冲击孔分别呈顺排和叉排布置时,冲击靶面展向平均 $Nu$ 数随冲击间距的变化曲线.从图中可以看出,(1)随着流向孔间距与直径之比 $X_n/d$ 的增加,冲击冷却有效范围变大,但平均 $Nu$ 数的峰值有所下降,在叉排方式下,两排孔之间的平均 $Nu$ 数值也出现了一定程度的下降,这是由于流向孔间距的增大,使两排射流之间的相互影响减弱,使两排冲击孔之间出现了局部温度较高的区域.导致冲击冷却有效范围变大而冷却效果降低.(2)在 $X_n/d$ 相同时,对于叉排方式,平均 $Nu$ 数的值高于顺排方式下的平均 $Nu$ 值,表明叉排孔的换热效果要好于顺排孔.

图9 流向孔间距对孔间平均 $Nu$ 数的影响( $Re=9\ 000, Z_n/d=2$ )Fig.9 Average  $Nu$  between orifices on the target with different stream wise space ( $Re=9\ 000, Z_n/d=2$ )

## 4 结论

根据以上分析,可得出如下结论:

(1)随着冲击雷诺数 $Re$ 的增大,在射流孔上加突片和不加突片,冷却效果都是增大的;随着冲击间距的增大,在射流孔上加突片和不加突片,冷却效果都有所降低;在保持总的冷却流量不变的条件下,在射流孔上加突片后,具有改善冲击换热特性的作用.

(2)突片激励射流可形成有利于强化射流冲击对流换热强度的流动.其一,流向涡的存在,起到了加强射流与周围流体的掺混以及冲击射流局部扰动的作用,能够提高射流的湍流度和射流作用范围;其二,突片对射流出口的局部堵塞,提高射流核心区的流向速度,有利于射流驻点区的局部强化换热.

(3)当射流冲击孔为双排时,相邻两排射流之间相互影响.当冲击射流的 $Re$ 为 $9\ 000$ 时,在顺排方式下,随着射流孔流向间距的增大,后排射流对前排的影响减弱,使得射流冲击驻点区得到了较为充分的发

展;随着流向孔间距与直径之比 $X_n/d$ 的增加,冲击冷却有效范围明显变大,但两排冲击孔之间出现了局部温度较高的区域.在叉排方式下,后排射流对前排的影响较弱,与顺排时相比,在流向孔间距与直径之比 $X_n/d$ 相同时,叉排孔的有效冷却范围更大,冷却效果更好.

### [参考文献](References)

- [1] GARDON R, AKFIRAT J C. The role of turbulence in determining the heat-transfer characteristics of impinging jets[J]. International journal of heat and mass transfer, 1965, 10(8): 1 261–1 272.
- [2] METZGER D E, FLORSCHUETZ L W. Heat transfer characteristics for inline and staggered array of circular jets with cross flow of spent air[J]. Journal of heat transfer, 1979, 101: 526–531.
- [3] GOLDSTEIN R J, BEHBAHANI A I. Impingement of a circular jet with and without crossflow[J]. Int J Heat Transfer, 1982, 25(9): 1 377–1 382.
- [4] BEBAHANI A I, GLODSTEIN R J. Local heat transfer to staggered arrays of impinging circular air jets[J]. Journal of engineering for power, 1983, 105: 354–360.
- [5] FLORSCHUETZ L W, ISODA Y. Flow distributions and discharge coefficient effects for jet array impingement with initial crossflow[J]. Journal of engineering for power, 1983, 105(3): 296–303.
- [6] AZEVEDO F A, WEBB B W, QUEIRO Z M. Pulsed air jet impingement heat transfer[J]. Experiment thermal and fluid science, 1994, 8: 206–213.
- [7] 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): 3 695–3 706.
- [8] WEN M Y, JANG K J. An impingement cooling on a flat surface by using circular jet with longitudinal swirling strips[J]. International journal of heat and mass transfer, 2003, 46: 4 657–4 667.
- [9] 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.
- [10] WHELAN B P, ROBINSON A J. Nozzle geometry effects in liquid jet array impingement[J]. Applied thermal engineering, 2009, 29: 2 211–2 221.
- [11] CHAKROUN W M, ABDEL-RAHMAN A A, AL-FAHED S F. Heat transfer augmentation for air jet impinged on a rough surface[J]. Applied thermal engineering, 1998, 18: 1 225–1 241.
- [12] YANG G Y, CHOI M S, LEE J S. An experimental study of slot jet impingement cooling on concave surface: effects of nozzle configuration and curvature[J]. International journal of heat and mass transfer, 1999, 42: 2 199–2 209.
- [13] CORNARO C, FLEISCHER A S, ROUNDS M, et al. Jet impingement cooling of a convex semi-cylindrical surface[J]. International journal of thermal sciences, 2001, 40: 890–898.
- [14] SHEVCHUK I V, SANIEI N. Impinging jet heat transfer over a rotating disk: exact solution and experiments[R]. USA: AIAA, 2002.
- [15] RHEE D H, CHOI J H, CHO H H. Flow and heat (mass) transfer characteristics in an impingement/effusion cooling system with cross flow[J]. ASME journal of turbomachinery, 2003, 125: 74–82.
- [16] 姚玉, 张靖周, 李永康. 带三角形突片气膜冷却结构换热特性的数值研究[J]. 航空动力学报, 2006, 21(4): 658–662.  
YAO Y, ZHANG J Z, LI Y K. Numerical investigation on heat transfer of film cooling with delta-shaped tabs[J]. Journal of aerospace power, 2006, 21(4): 658–662. (in Chinese)
- [17] 杨成凤, 张靖周, 陈利强, 等. 前缘突脊倾斜气膜冷却效果的实验[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(7): 1 174–1 176.  
YANG C F, ZHANG J Z, CHEN L Q, et al. Experimental investigation on film cooling effectiveness of the declining holes with tabs-ridged[J]. Journal of engineering thermophysics, 2008, 29(7): 1 174–1 176. (in Chinese)
- [18] KHALATOV A A, SYRED N, BOWEN P J, et al. Two-dimensional cyclone-jet cooling configuration: evaluation of heat transfer and pressure losses[R]. USA: ASME, 2001.

[责任编辑: 严海琳]