

带凹坑楔形通道内射流冲击换热特性实验

蒋新伟, 许卫疆, 朱惠人

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 为了获得发动机进气道支板的热气防冰特性,采用热色液晶全表面瞬态测温技术对带凹坑楔形通道内表面开展冲击换热实验。研究了射流雷诺数,凹坑间距,射流入口到凹坑的距离和凹坑排数对壁面努塞尔数分布和大小的影响。结果表明:带凹坑壁面的平均换热效果要强于光滑壁面,两者的努塞尔数均随雷诺数的增加而增大。壁面的局部努塞尔数在凹坑尾缘出现一个峰值,凹坑间距越小,侧壁的平均换热效果越强。在小雷诺数时,凹坑的位置靠近出口缝,能够较大的增强侧壁的换热;在较大雷诺数时,凹坑位置越靠近前缘,则越能增强前缘的换热效果。当凹坑的排数增加,壁面的平均努塞尔数增大。

关键词: 射流冲击; 凹坑; 强化换热; 防冰; 进口支板

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Experiment of impingement heat transfer characteristics in dimpled wedge channel

JIANG Xinwei, XU Weijiang, ZHU Huiren

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to obtain the hot air anti-icing properties of engine inlet strut, an impingement heat transfer experiment was carried out in a dimpled wedge channel with use of transient thermochromic liquid crystal measurement technique. The effects of jet Reynolds number (Re), distance between jet entrance and dimple, dimple space and the number of dimple rows on Nusselt number (Nu) were studied. The results shows that Nu increases with the increasing Reynolds number, and the heat transfer of dimpled wall is stronger than that of smooth wall. Local Nusselt number reaches a maximum at the trailing edge of the dimple. The average heat transfer effect of side walls increases when the dimple space decreases. When the dimples are close to the outlet, there is an obvious enhancement to the side wall Nu at small Re , while the heat transfer at the leading edge is enhanced at relative large Re . When the number of dimple rows increases, the average Nu increases.

Key words: impingement; dimple; heat transfer enhancement; anti-icing; inlet strut

发动机结冰会导致性能的损失和功率的降低,因此必须对发动机部件进行防冰处理。对于进气道支板,则主要在其内通道采取冲击换热的

方式。

Goldstein 等^[1-3]研究了射流到靶面的距离和有无横流的对壁面传热的影响,在较大的间距时,

收稿日期: 2016-05-14

作者简介: 蒋新伟(1992—),男,硕士生,主要从事航空发动机高温部件传热和冷却研究。

通讯作者: 许卫疆(1974—),男,副教授,博士,主要从事航空发动机高温部件传热和冷却研究。E-mail: xuweijiang@nwpu.edu.cn

引用格式: 蒋新伟,许卫疆,朱惠人.带凹坑楔形通道内射流冲击换热特性实验[J].航空动力学报,2017,32(12):2981-2987. JIANG Xinwei, XU Weijiang, ZHU Huiren. Experiment of impingement heat transfer characteristics in dimpled wedge channel [J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(12): 2981-2987.

横流减小了传热系数的峰值;在较小的间距时,横流增加了传热系数的峰值,壁面的传热系数在射流中心线最大。Mokhtar^[4]通过带有一定角度的冲击射流实验,分析了不同角度下射流的驻点,壁面射流的位置及射流的最大速度衰减。谭蕾等^[5]运用红外热像测试技术对半封闭肋化通道射流冲击进行了实验,分析了流动参数、几何参数对换热特性的影响规律,在冲击驻点区和壁面射流区,换热能力均随射流雷诺数的增加而明显提高。周雷声等^[6-7]对带射流厚支板的流场结构和换热分布进行了实验研究,结果表明,随着支板内通道高度减小,侧壁和前缘整体换热强度均有所降低,且前缘下降最快。王克菲等^[8]采用热色液晶瞬态测量技术对阵列孔冲击靶面进行了换热实验,结果表明靶面的传热系数均随雷诺数的升高而升高,随侧向出流比的增加而减小。吴宏等^[9]通过实验方法对不同雷诺数下静止状态涡轮工作叶片带前缘冲击复杂蛇形通道的换热特性进行了研究,实验发现带肋通道的表面传热系数高于光滑情况,且随雷诺数的增加而增大;带肋表面沿流向努塞尔数呈现周期性涨落,相邻两肋间努塞尔数呈单峰分布。单文娟等^[10]利用红外热像仪测试技术对斜射流冲击开展了换热实验研究,结果发现,在斜向角度不变时,雷诺数是影响换热的主要因素;冲击间距减小,冲击换热的强化效果增强。

除了冲击强化换热,近来对表面凹坑强化换热方式的研究也越来越多。凹坑强化传热就是通过壁面布置凹坑来强化换热的一种换热方式。与其他强化结构相比,凹坑结构不但有较高的传热强度,而且流动阻力相对较小。Schukin 等^[11]通过实验研究了不同直径,流量和湍流度对凹坑壁面对流换热的影响。Mahmood 等^[12]用红外热成像技术对通道内凹坑表面的换热和流动进行了实验,发现凹坑内存在涡流,增强了凹坑下游附近的局部努塞尔数。Burgess 等^[13]对凹坑深度的影响进行了实验研究,发现在所有实验雷诺数下,局部努塞尔数随凹坑深度增大而增加。Ligrani 等^[14]对浅凹坑壁面的努塞尔数进行了研究。Moon 等^[15]在通过实验研究了通道内凹坑壁面的平均传热系数和压降,发现相同尺度的球面凹坑与柱面凹坑相比传热系数小而流动阻力大。Syred 等^[16]指出在凹面上的凹坑的换热效果比凸面要好。Azad 等^[17]采用瞬态液晶技术对以凹坑表面为冲击靶面的多孔射流进行了换热实验,表明凹坑表面的传热系数要高于光滑表面。An-

derson 等^[18]通过换热实验发现,在高速时,凹坑间距是影响换热的主要因素,气流低速时,则是凹坑深度对换热的影响较大。

本文研究的支板结构为一楔形的收缩通道,与前文研究相比由于通道厚度减小,换热特性也会有所变化。因此需要对其换热特性进行详细研究。凹坑是一种有效的强化换热方式,通过在通道侧壁面上布置凹坑,采用冲击换热和凹坑强化相结合方式对布置有凹坑的支板内通道壁面换热情况进行了实验研究。采用热色液晶瞬态测温技术^[19]测量传热系数并得出整个展向壁面的努塞尔数,分析了射流雷诺数及凹坑相关参数对支板换热特性的影响。

1 实验装置和方法

图 1 为实验系统示意图,依次由压气机、阀门、质量流量计,加热器、三通、稳压腔和实验测试段组成。实验刚开始时旁通侧的电磁阀打开,由质量流量计控制流量,通过快速加热器对气流进行快速加热。在短时间内,气流温度将达到要求温度时,切换电磁阀开关,关闭旁通电磁阀的同时打开主流路的电磁阀,一定温度的热气流便从主流路进入实验测量段,采用两台高速摄像机拍摄内表面液晶颜色的变化,能够同时兼顾前缘和侧壁面。并且对液晶进行了标定,获得了颜色变化与温度的对应关系。并通过实验件上布置的热电偶经过转换器同步采集气流温度。

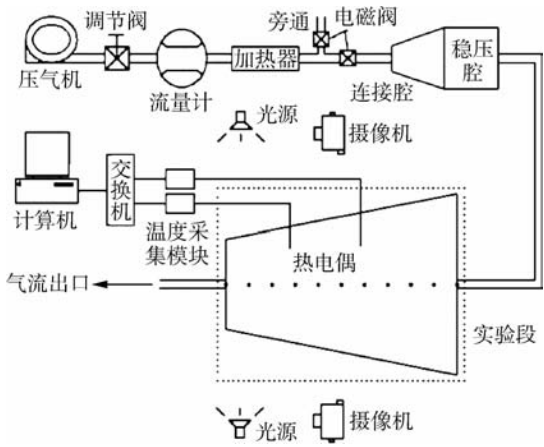


图 1 实验系统图

Fig. 1 Sketch of experiment system

图 2 为支板结构示意图,支板内通道呈楔形,在支板流向方向上布置一排凹坑。凹坑在支板平面上的投影直径 $d=4\text{ mm}$,凹坑的无量纲深度 $\delta/d=0.2$ 均为固定值。对于两组位置不同的出

口缝,较靠近冲击孔的被称为近缝,距离冲击孔相对较远的被称为远缝,图 2 所示为近缝结构。实验中射流雷诺数(Re)范围 6 300~15 900,相邻两凹坑中心的无量纲间距 $s/d=1.8\sim 3.0$,射流入口到凹坑中心的无量纲距离为 $l/d=10\sim 12$ 。

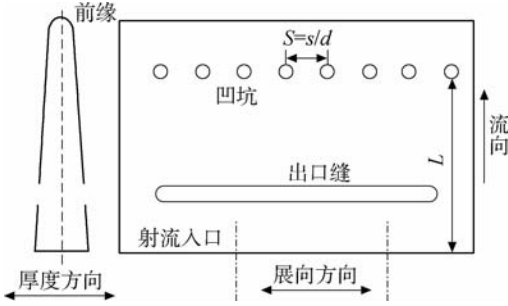


图 2 实验件结构图

Fig. 2 Structure of experiment segment

本文采用热色液晶全表面瞬态测温技术对楔形通道内壁面进行换热测量。文献[19]对其进行了详尽的描述。并且经过计算,本文测量壁面厚度满足半无限大固体要求。在材料的初温 t_0 ,密度 ρ ,比热容 c ,导热系数 κ 均为已知的情况下,实验过程中,通过布置在支板通道内部热电偶记录下测量气流温度 $t_g(\tau)$,从液晶的颜色变化(液晶颜色与温度的对应关系)中得到每个时刻的壁面温度 $t_w(\tau)$ 分布。通过参考文献[19],有如下 $t_w(\tau)$ 的解析表达式:

$$t_w(\tau) = t_0 + \sum_{i=1}^n (t_{g,i} - t_{g,i-1}) U(\tau - \tau_i) \cdot \{1 - \exp[\beta^2(\tau - \tau_i)] \operatorname{erfc}(\beta \sqrt{\tau - \tau_i})\} \quad (1)$$

$$h = \frac{\beta \kappa}{a} = \beta \sqrt{\rho c \kappa} \quad (2)$$

由式(2)即可得到所需局部传热系数 h 。

射流雷诺数 Re 定义式如下:

$$Re = \frac{4\dot{m}}{n\pi\mu d} \quad (3)$$

式中 $\dot{m}$ 为流入实验段的气流总质量流量, d 为冲击孔孔径, n 为冲击孔数目, μ 为气流的动力黏度。局部努塞尔数的定义为

$$Nu = hd/\kappa_g \quad (4)$$

本文瞬态实验中采用的是型号为 SPN/R35C1W 的窄带热色液晶,其带宽为 1°C ,实验中主流温度为 70°C ,壁面初始温度为 25°C 。

液晶换热实验的不确定度分析在文献[20]中有较为详细的描述。具体公式如下:

$$\frac{dh}{h} = \Phi_h \left(\frac{dt}{\theta_g} \right) \quad (5)$$

$$\Phi_h = \frac{[2(1 - \Theta + \Theta^2)]^{\frac{1}{2}}}{\alpha\Theta'} \quad (6)$$

本文实验条件下,过余温比 Θ 范围约为 $0.4\sim 0.7$,可知 Φ_h 值最小约为 5。温度测量误差约为 $\pm 0.4^\circ\text{C}$,气流过余温度 θ_{aw} 约为 $20\sim 40^\circ\text{C}$,则由文献[20]可知,传热系数的不确定度为 $5\%\sim 9\%$ 。

2 实验结果和分析

2.1 射流雷诺数对换热特性的影响

由于通道几何结构的对称性,仅对其中一侧壁面的换热实验结果加以展示。本文中所有云图均为通过 MATLAB 程序对实验视频处理所得,具体方法见文献[19]。图 3 为射流雷诺数对换热的影响,左侧为光滑壁面的换热结果,右侧为带凹坑壁面结构的换热结果。对比可知,带凹坑结构与光滑壁面结构的换热结果分布类似,两者的努塞尔数分布在正对每个冲击孔出口存在一个沿流向呈长条状高值区域。与光滑壁面相比,沿流向凹坑壁面在出口缝和凹坑下游附近均形成一个峰值。相同雷诺数下凹坑壁面侧壁驻点的换热明显较高。在凹坑处努塞尔数相对较低,在凹坑尾缘的换热较高,形成换热高值区。这是因为凹坑的存在,使得壁面的换热增强。同时,在经过凹坑后壁面的换热分布沿着展向范围有所增加,使得壁面换热分布均匀性增加。随着射流雷诺数的增大,凹坑壁面和光滑壁面的高努塞尔数分布范围均增大。

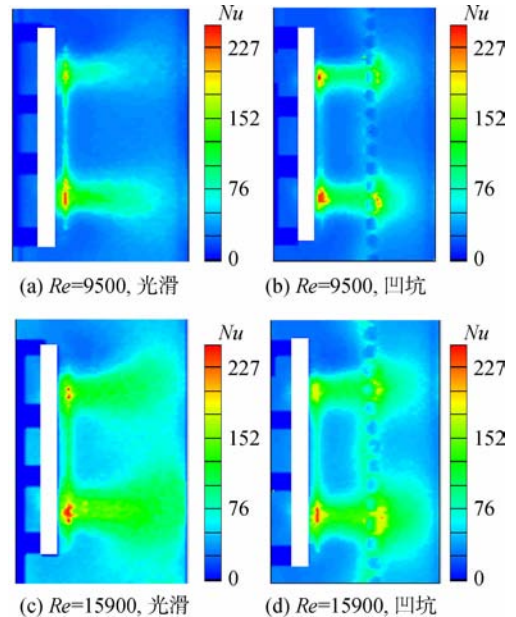


图 3 努塞尔数分布随雷诺数变化

Fig. 3 Variation of Nu distribution with Re

气流从冲击孔冲出来后,射流难以接触壁面,导致紧邻出口处的传热系数比较小。沿流向继续流动,射流发生扩散并冲刷壁面,因而壁面换热增强。射流沿射流中心方向继续向前,由于射流速度高且比较集中,只有少量的气体通过出口缝流出,大部分气体继续沿流向向支板前缘方向流动,但出口缝的抽吸作用使得其下游侧气流扰动加大,换热得以加强,并在出口缝下游形成换热峰值。在凹坑附近区域,由于凹坑的存在,气流在流经凹坑处壁面突然下陷,边界层被破坏,从而在凹坑的背风面形成了一个低速回流区,造成这里的换热相对较弱。气流继续向前发展,会在迎风面的曲面上形成新的边界层并有强烈的冲刷作用,使得凹坑的迎风面传热系数相对较高。当射流的雷诺数增加,射流的流速和气流量相应增大,因此壁面换热的强度和范围也明显增加,凹坑尾缘附近的换热也相应增强。

图 4 为光滑壁面和凹坑壁面在冲击入口位置沿着流向方向的努塞尔数分布情况对比。可以发现出口缝下游的位置出现了一个峰值,并且其大小相差不大,但是凹坑表面的区域更大。沿流向继续向前,在凹坑位置出现了一个峰值,说明凹坑起到了强化换热的作用。继续向前,在前缘位置的努塞尔数值则相差不大。

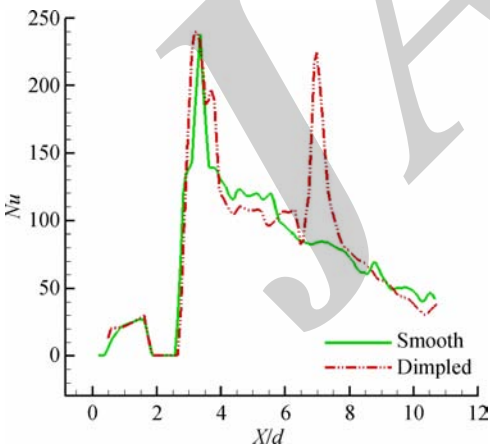


图 4 冲击孔中心截面沿流向努塞尔数分布
Fig. 4 Nu along the flow direction at impingement hole centre section

图 5 所示为通道壁面平均努塞尔数($\overline{Nu}$)随雷诺数的变化情况,在实验的雷诺数范围内,凹坑壁面的平均努塞尔数要高于光滑壁面。同时,两者的平均努塞尔数均随雷诺数的增大而增加。在雷诺数较小时,凹坑壁面的换热要比光滑壁面高出很多,但是随着雷诺数增加,其差距有减小的趋

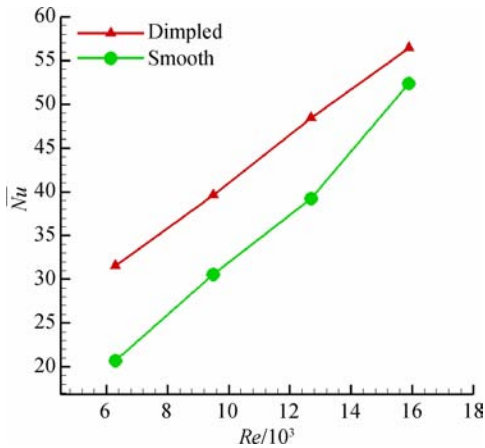


图 5 凹坑壁面的平均努塞尔数
Fig. 5 $\overline{Nu}$ of dimpled wall

势。这是因为在小雷诺数下,射流速度较低,能够充分扩散至壁面与凹坑作用,使得凹坑效果明显。当雷诺数逐渐增大,射流的初速增大,射流还未充分扩散就流向前方,不能较好的与凹坑作用,导致强化效果不明显。

2.2 凹坑间距 s/d 对换热的影响

图 6 为相同雷诺数下 $Re=6\,300$ 时,努塞尔数随凹坑间距的变化情况。左右两侧凹坑间距 s/d 分别为 3.0 和 1.8。可以看出,当凹坑间距变小,在出口缝下游区域驻点位置的换热增加明显。射流的高换热覆盖区域在展向范围上有所增大。在凹坑位置处的低换热区域没有太大变化,但是凹坑尾缘附近壁面的换热有了大幅度的增强。当凹坑分布变密,射流的高努塞尔数分布区域沿展向变宽。但是凹坑加密后,与 $s/d=3.0$ 结构相比沿流向方向高换热的覆盖区域有一定的减小,同时前缘区域的换热稍微减弱。

因为气流进入凹坑,在背风面形成低速回流区,在凹坑的迎风面,由于气流重新附着到凹坑面上并形成新的边界层,换热强度逐渐增大,气

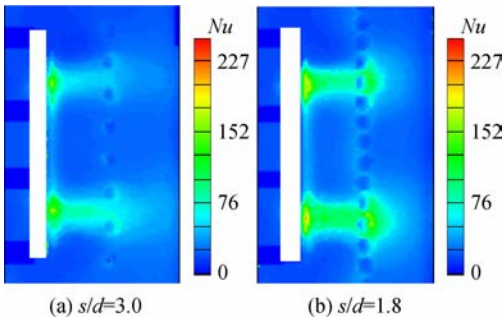


图 6 努塞尔数分布随凹坑间距变化情况 ($Re=6\,300$)
Fig. 6 Variation of Nu distribution with s/d ($Re=6\,300$)

流流出凹坑后,在尾迹区的换热仍然较强,随着气流远离尾缘流更远区域,尾迹的影响逐渐减小,换热减弱。当凹坑的分布加密时,相邻凹坑之间产生的涡旋互相作用,扰动更加明显,使得凹坑尾缘区域换热增加明显。同时,由于扰动增加,气流的流动阻力增加,所以到达前缘的气流流速变小,对前缘的强化效果减弱。对于出口缝下游区域,由于凹坑强烈的扰动作用,使得气流流出的速度增加,出口的抽吸作用增强,所以出口缝下游出现换热的高值区。

图 7 所示,为整个实验壁面平均努塞尔数随着凹坑间距的变化情况。可以发现,在实验的雷诺数范围内,凹坑的间距越小,整个壁面的平均换热效果越强。

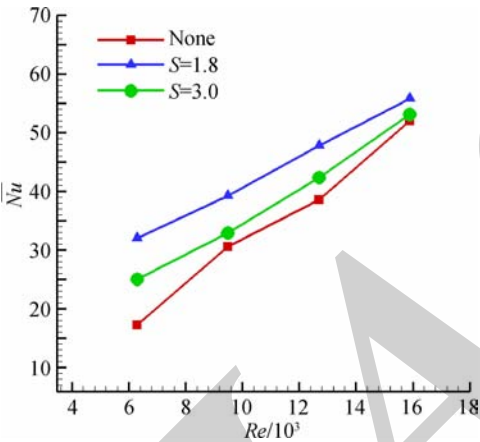


图 7 不同间距下壁面平均努塞尔数随雷诺数的变化
Fig. 7 Variation of wall average $\overline{Nu}$ with Re in different dimple spaces

2.3 射流入口到凹坑距离 l/d 对换热的影响

图 8 为努塞尔数分布随射流入口到凹坑的距离 l/d 的变化情况。射流入口到凹坑距离分别为 $l/d=10, 12$ 。雷诺数大小分别为 6 300 和 12 700。从努塞尔数分布云图可以看出,不同距离凹坑换热的分布情况类似,在出口缝下游和凹坑尾缘区域都会形成换热相对较高区域。在雷诺数为 6 300 时, $l/d=10$ 结构在出口缝下游区域和凹坑尾缘区域的换热明显高于 $l/d=12$ 的结构。当雷诺数增大为 12 700 时,两个结构在出口缝下游区域的换热差别不大。 $l/d=10$ 结构在凹坑尾缘的换热要高于另一个结构,但是 $l/d=12$ 结构在前缘的换热要高于前者。 $l/d=10$ 的结构与 $l/d=12$ 结构相比,距离射流入口更近,高努塞尔数的分布区域在展向范围上要大于后者。但是 $l/d=$

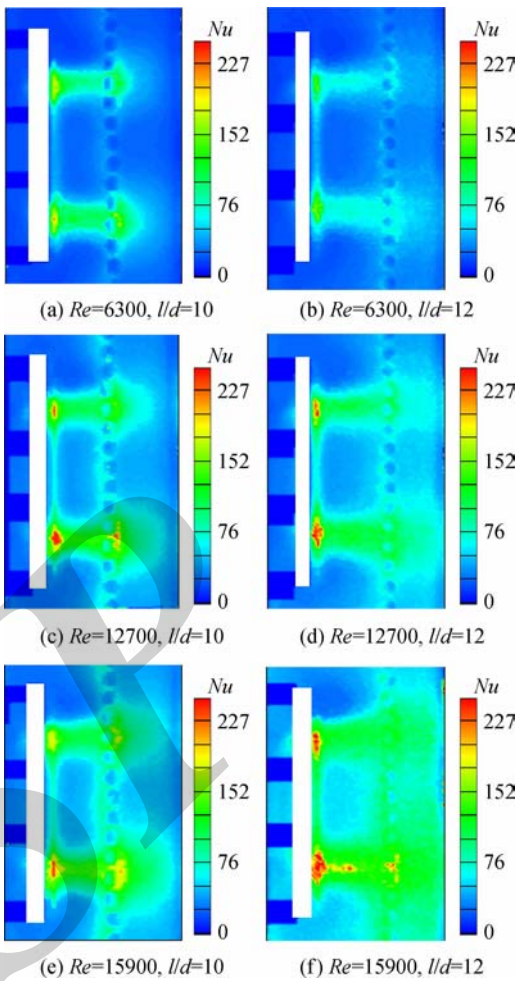


图 8 努塞尔数分布随 l/d 变化情况
Fig. 8 Variation of Nu distribution with l/d

12 结构沿流向的分布要稍高于 $l/d=10$ 的结构。

因为气流从射流孔进来后,射流向前不断发展和扩散,在向前发展过程中不断冲刷布置有凹坑的壁面。由于 $l/d=10$ 结构距离入口较近,所以射流发展到这里还具有一定的速度并与凹坑进行对流换热。对于 $l/d=12$ 结构,凹坑距离入口就要远一些,在雷诺数为 6 300 时,射流的初速度相对较小,不足以充分的与凹坑作用。所以此时凹坑的作用较弱,造成凹坑附近尾缘区域换热较小。当雷诺数增加到 12 700 时,此时射流核心具有较高的速度,所以射流能够充分向前发展,并覆盖到前缘附近区域,通过凹坑的扰动作用使得前缘区域的换热明显增加。

图 9 为不同雷诺数下支板内壁面不同区域平均努塞尔数随 l/d 的变化关系。通过对比发现, $l/d=10$ 情况下,侧壁的平均换热效果明显; $l/d=12$ 时,前缘的平均换热效果较好。这个结果表明,在小雷诺数下,凹坑的位置靠近出口缝时,能够较大的增强侧壁的换热;当雷诺数增大,

凹坑位置越靠近前缘时,则越能较大程度增强前缘的换热效果。

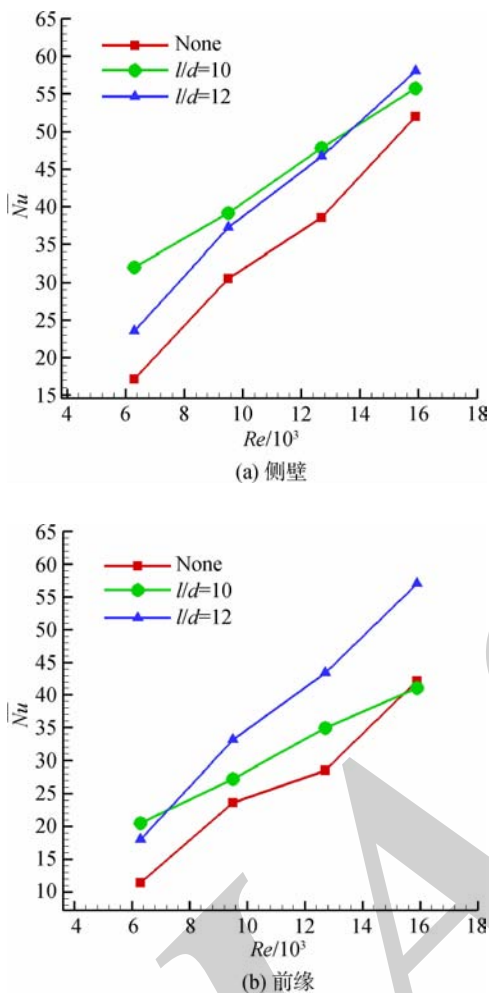


图 9 l/d 对不同区域的平均努塞尔数影响
Fig. 9 Variation of $\overline{Nu}$ of different zones with l/d

2.4 凹坑排数 N 对换热的影响

图 10 为努塞尔数随凹坑排数变化情况。双排凹坑分布于前缘和远缝之间的位置,是在左侧单排凹坑基础上,在其下游再添加一排的结果,两排凹坑间距一致,并用叉排布置。从实验结果云图发现,两种结构的努塞尔数分布相似,在出口缝下游形成换热高值区,凹坑尾缘的局部努塞尔数均有所增强。但是双排结构的峰值要明显高于单排。这是因为凹坑加密后,对出口缝下游附近的气流扰动作用增加,换热也就增强。

图 11 为整个实验壁面平均努塞尔数随 N 变化情况。由图可知,凹坑的存在使得整个壁面的换热有了一定的增加。在小雷诺数下,单排和双排的平均努塞尔数均值相差较大。当雷诺数增大,单

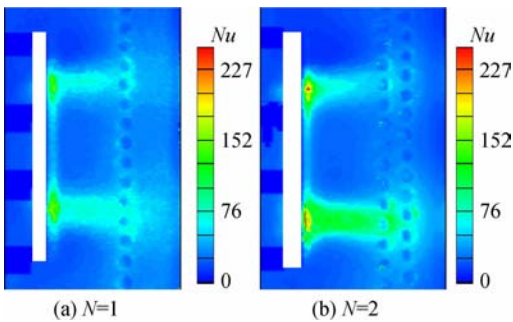


图 10 努塞尔数分布随 N 的变化 ($Re=6300$)
Fig. 10 Variation of Nu distribution with N ($Re=6300$)

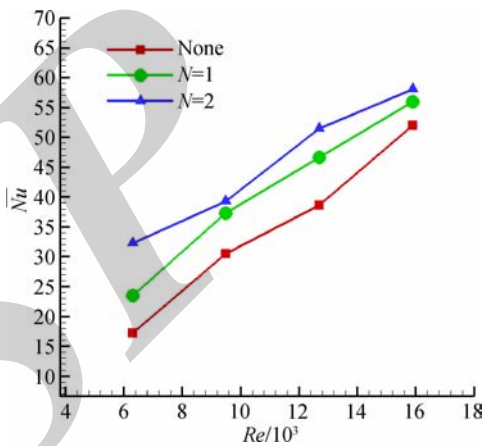


图 11 整个壁面平均努塞尔数随 N 的变化
Fig. 11 Variation of $\overline{Nu}$ with N for whole wall

排凹坑结构平均努塞尔数与双排的差距有减小的趋势。这是因为凹坑加密后,随着雷诺数的增加,射流沿着流向的流阻也相应的变大,导致强化效果减弱。但是无论单排还是双排结构都增加了整个实验壁面的平均换热效果。

3 结 论

本文通过实验对带凹坑壁面楔形通道的冲击换热特性进行了研究。得到了以下结论:

- 1) 带凹坑壁面与光滑壁面相比,努塞尔数分布的云图相似,但是前者的平均换热效果更强。两者的换热强度均随雷诺数的增加而增强。
- 2) 凹坑间距越小,整个壁面的平均换热效果越强。
- 3) 雷诺数较小时,凹坑的位置越靠近出口缝,越能够增强侧壁的换热;在较大雷诺数时,凹坑位置靠近前缘,则能够较大程度增强前缘的换热效果。
- 4) 随着凹坑的排数增加,整个壁面的平均努塞尔数增大。

参考文献:

- [1] GOLDSTEIN R J, BEHBAHANI A I. Impingement of a circular jet with and without cross flow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1982, 25(25): 1377-1382.
- [2] GOLDSTEIN R J, SOBOLIK K A, SEOL W S. Effect of entrainment on the heat transfer to a heated circular air jet impinging on a flat surface[R]. International Journal of Heat Transfer, 1990, 33(3): 608-611.
- [3] GOLDSTEIN R J, SEOL W S. Heat transfer to a row of impinging circular air jets including the effect of entrainment[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1991, 34(8): 2133-2147.
- [4] MOKHTAR W. Aerodynamics of the inclined offset turbulent jets[R]. AIAA 2006-911, 2006.
- [5] 谭蕾, 张靖周, 杨卫华. 半封闭肋化通道射流冲击的实验[J]. 航空动力学报, 2008, 23(9): 1678-1683.
TAN Lei, ZHANG Jingzhou, YANG Weihua. Experimental research on jet impingement inside semi confined rib-roughed channel[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(9): 1678-1683. (in Chinese)
- [6] 周雷声, 朱惠人, 杨祺, 等. 带射流的收缩型通道内部换热特性液晶瞬态实验[J]. 航空学报, 2010, 31(1): 35-40.
ZHOU Leisheng, ZHU Huiren, YANG Qi, et al. Internal heat transfer experiment with liquid crystal transient technique in contraction channel with jet[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(1): 35-40. (in Chinese)
- [7] 周雷声, 朱惠人, 张霞, 等. 几何参数对带射流收缩型通道换热特性影响的液晶瞬态实验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(8): 1698-1704.
ZHOU Leisheng, ZHU Huiren, ZHANG Xia, et al. Experiment of the effects of geometrical parameters on internal heat transfer in an impinging contraction channel with liquid crystal transient technique[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(8): 1698-1704. (in Chinese)
- [8] 王克菲, 朱惠人, 张斌, 等. 带气膜孔出流和侧向出流的冲击换热实验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(5): 1011-1017.
WANG Kefei, ZHU Huiren, ZHANG Bin, et al. Experiment of impingement heat transfer with film holes bleeding and side bleeding[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(5): 1011-1017. (in Chinese)
- [9] 吴宏, 刘裕盛, 徐国强. 带前缘冲击复杂叶片内冷通道换热特性实验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12): 2641-2647.
WU Hong, LIU Yusheng, XU Guoqiang. Experimental investigation on heat transfer in complex internal cooling blade channel with leading-edge[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(12): 2641-2647. (in Chinese)
- [10] 单文娟, 毛军逵, 李毅, 等. 斜向冲击强化换热特性试验[J]. 航空动力学报, 2013, 28(3): 701-708.
SHAN Wenjuan, MAO Junkui, LI Yi, et al. Experiment on heat transfer characteristics with inclined impingement[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(3): 701-708. (in Chinese)
- [11] SCHUKIN A V, KOSLOV A P, AGACHEV R S. Study and application of hemispherical cavities for surface heat transfer augmentation[R]. ASME Paper 95-GT-59, 1995.
- [12] MAHMOOD G I, HILL M L, NELSON D L, et al. Local heat transfer and flow structure on and above a dimpled surface in a channel[J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 123(1): 115-123.
- [13] BURGESS N K, LIGRANI P M. Effects of dimple depth on nusselt numbers and friction factors for internal cooling in a channel[R]. ASME Paper GT2004-54232, 2004.
- [14] LIGRANI P M, BURGESS N K, WON S Y. Nusselt numbers and flow structure on and above a shallow dimpled surface within a channel including effects of inlet turbulence intensity level[R]. ASME Paper GT2004-54231, 2004.
- [15] MOON S W, LAU S C. Turbulent heat transfer measurements on a wall with concave and cylindrical dimples in a square channel[R]. ASME Paper GT2002-30208, 2002.
- [16] SYRED N, KHALATOV A, KOZLOV A, et al. Effect of surface curvature on heat transfer and hydrodynamics within a single hemispherical dimple[J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(3): 609-613.
- [17] AZAD G S, HUANG Y, HAN J C. Jet impingement heat transfer on dimpled surfaces using a transient liquid crystal technique[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2000, 14(2): 186-193.
- [18] ANDERSON A M, CHAPIN D M. The effects of dimpled surface geometry on heat transfer in an impinging jet flow[J]. International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2002, 372(2): 73-80.
- [19] 郭涛, 朱惠人, 许都纯, 等. 热色液晶瞬态测量全表面换热系数的技术研究[J]. 测控技术, 2006, 25(9): 67-69.
GUO Tao, ZHU Huiren, XU Duchun, et al. Research on transient measurement of heat transfer coefficient distribution with liquid crystal technique[J]. Measurement and Control Technology, 2006, 25(9): 67-69. (in Chinese)
- [20] YAN Y, OWEN J M. Uncertainties in transient heat transfer measurements with liquid crystal[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2002, 23(1): 29-35.

(编辑:叶青)