

文章编号: 1000-8055(2010)08-1698-07

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

周雷声, 朱惠人, 张霞, 李春林
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 采用窄带热色液晶全表面瞬态测温技术, 对将涡轮发动机进气道支板的冲击腔进行放大和简化后所得的收缩型通道内表面开展冲击换热实验研究, 具体考察了射流孔孔径、冲击距以及通道高度变化对努塞尔数分布及大小的影响。实验结果表明: 孔径和通道高度的增大、冲击距的减小均使通道内部换热得以加强, 但在侧壁和前缘的努塞尔数分布变化及平均努塞尔数增幅不尽相同; 并且通道内部换热受孔径影响最大, 受通道高度的影响最小。

关 键 词: 燃气涡轮; 射流冲击; 换热; 液晶; 瞬态

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Experiment of the effects of geometrical parameters on internal heat transfer in an impinging contraction channel with liquid crystal transient technique

ZHOU Lei sheng, ZHU Hui ren, ZHANG Xia, LI Chun lin

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: An impinging heat transfer experiment in a contraction channel, obtained by simplifying and magnifying the strut in the inlet of a gas turbine engine, was carried out by adopting narrow-band thermochromic liquid crystal (TLC) transient measurement technique. The effects of the diameter of impingement hole, impingent distance and the height of the channel on Nusselt number distribution and quantities were studied. The results show that the heat transfer in the channel was enhanced with the increasing diameter of the impingent holes and the height of the channel, or the decreasing impingent distance. Meanwhile the distribution change of Nusselt number and the increase of mean Nusselt number on the side-wall and the leading edge are different. In addition, the primary dominating factor for the heat transfer in the channel is the diameter of the impinging holes, and the slightest factor is the height of the channel.

Key words: gas turbine; jet impingement; heat transfer; liquid crystal; transient

冲击换热被广泛应用于各个换热领域, 而在燃气涡轮发动机中这种换热方式更是被普遍使用。根据部件位置及需要的不同, 具体冲击构造也

往往各不相同, 其中在进气道部件中由于需要进行防冰处理, 通常采取内部冲击加热和外部气膜加热相结合的气热防冰方式^[1], 其原理及进气道

收稿日期: 2010-01-06; 修订日期: 2010-06-02

作者简介: 周雷声(1979-), 男, 浙江东阳人, 博士生, 主要从事航空宇航推进理论与工程研究。

支板内部具体流动结构可参看文献[2], 本文具体针对进气道支板中的冲击腔内部换热特性开展实验研究, 为便于实验的开展, 首先对其进行了适当简化和放大, 最终得到一带射流的梯形收缩型通道. 目前国内外已对受限通道内部流动及换热特性开展了大量研究工作, 除多数集中于仅对靶面的研究^[3-9]外, 早期 Marsters G F 及 Lee D H 等人^[10-11]曾针对二维偏置缝射流在平行平板表面的流动与换热情况进行了考察, 结果表明在射流开始贴附板面的区域存在分离现象并给出了局部努塞尔数与射流雷诺数、偏移率及流向距离的实验关联式, 随后 Mokhtar W A 等人^[12]又针对三种受限结构进一步对二维偏置缝射流在平行平板表面流动结构展开实验和数值研究, 发现偏置射流在不同受限结构产生不同流动结构并做了适当分析. 但以上这些主要是针对缝射流在平行平板表面的二维流动情况所做的研究, 不仅模型相对简单, 而且换热测量方法也相对落后.

本文则对带圆孔射流且双侧矩形缝出流的梯形收缩通道侧壁及前缘靶面换热情况同时开展实验研究, 不仅在通道结构上要比以往研究复杂, 而且在测量方法上采用了目前较为先进的热色液晶全表面瞬态测温技术^[13], 更为直观地展示了近壁面流动结构与壁面换热特性的紧密关系, 为今后进一步开展对渐缩受限通道中射流三维特性的研

究提供了可靠依据. 另外, 本文主要分析了通道几何参数对换热的影响, 而有关气动参数的影响已在文献[2]予以讨论.

1 实验装置及测量方法

本文采用的实验系统与文献[2]相同, 而在收缩型通道结构及实测量区的选取上则有所不同, 如图 1 所示, 在通道尽头两侧开有 7 条交错排列的矩形缝, 选取中间一条及其相邻两侧各半条矩形缝所在的侧壁内表面(后文简称侧壁)和前缘内表面(后文简称前缘)为测量对象(两虚线间区域), 故其长度同样为缝长的两倍, 由 W 表示, 其余矩形缝所在的通道区域则用于形成周期性边界. 射流孔为单排布置, 孔轴线正对图示各矩形缝横向中部, 孔长 C (即为冲击隔板厚度)和孔间距 S 保持不变, 孔径 d/C 变化范围为 1~2, 冲击距 L/C 为 15~30, 通道高度(即为前缘高度) H/C 为 0.55~3.47; 两排矩形缝与前缘壁面的垂直距离 l_1/C 和 l_2/C 分别为 4.2 和 9.3, 并根据其各自距离对应射流孔的远近分别称为远缝和近缝, 缝长 l_3/C 和缝宽 e/C 分别为 16.3 和 0.69; 另外如图 1 中左侧图所示, 收缩通道截面沿射流方向呈倒置的等腰梯形结构, 底角为 85° , 上底边长即为 H/C , 下底边长则表示为 b/C . 实验中射流孔雷诺数(Re)保持 20000 不变, 其具体定义见文献[2].

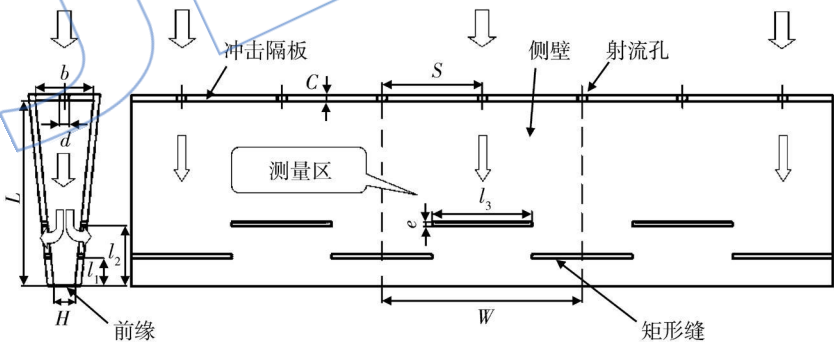


图 1 收缩型通道结构示意图

Fig. 1 Sketch of contraction channel

本文采用热色液晶全表面瞬态测温技术进行换热测量实验, 其原理、数据处理过程及液晶测量不确定度分析在文献[2]中具有详细描述, 这里不再赘述. 图 2 为本文使用的液晶标定曲线, 其横坐标表示温度, 纵坐标为对应色度值, 其测温精度为 0.1°C , 数据处理过程中具体选用 $35.9^\circ\text{C} \sim 36.4^\circ\text{C}$ 这段曲线.

2 实验结果与分析

如图 1 中左侧图所示, 由于通道的左右两个侧面呈对称几何结构, 因此本文实验中只选取其中一个侧面及前缘喷涂液晶并进行换热测量, 具体研究了射流孔孔径 d/C 、冲击距 L/C 及通道高度 H/C 对通道内部换热的影响.

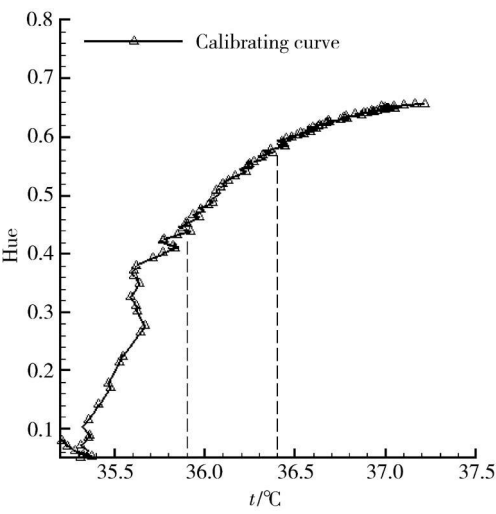


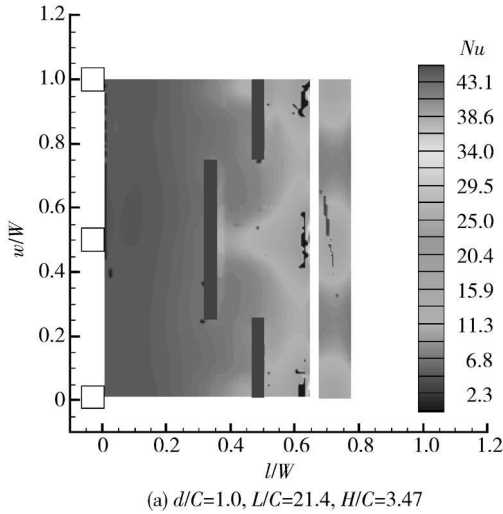
图 2 液晶标定曲线

Fig. 2 Calibrating curve of thermochromic liquid crystal

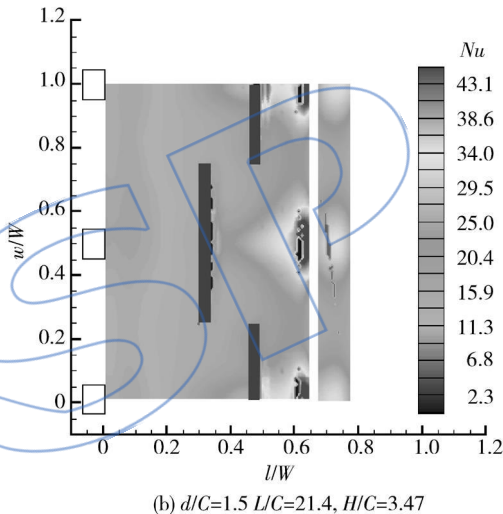
2.1 射流孔孔径 d/C 对 Nu 的影响

图 3 为 $L/C=21.4$ 和 $H/C=3.47$ 时侧壁和前缘 Nu 随射流孔孔径 d/C 变化云图, 为便于分析, 将相同工况下侧壁和前缘的换热云图合并为一张图进行表示, 由左至右依次为侧壁换热云图和前缘换热云图, 图中横坐标始于射流孔出口并沿其轴线指向前缘, 由 l/W 表示, 纵坐标则由图 3 中右图所示测量区左侧水平指向右侧, 表示为 w/W . 另外, 图中最左侧矩形小框表示各射流孔位置及相应孔径的大小, 后文中表示相同.

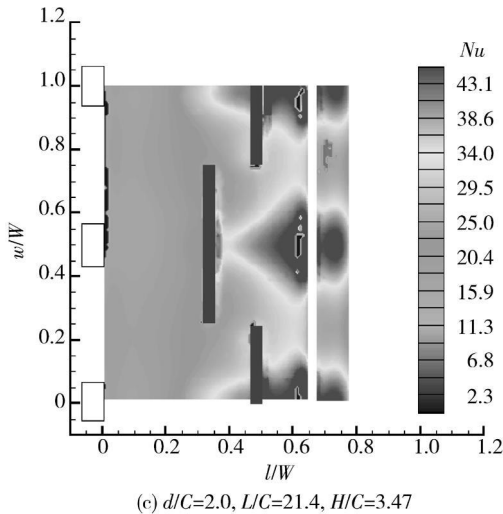
图 3(a) 至图 3(c) 中 d/C 依次为 1.0、1.5 和 2.0. 对比后可知, 各孔径下侧壁和前缘 Nu 分布基本相似, 首先在侧壁下游存在形状类似钟形的高值区域, 具体分布于近缝所在的下游区域以及远缝上、下游两侧区域, 且沿着冲击方向 Nu 逐渐增加; 其次各射流孔中心线所对前缘区域分别存在椭圆形的冲击驻点. 该分布成因分析如下: 射流由射流孔喷射出后, 沿其轴线方向前进并向四周尤其是图示纵向两侧不断扩散减速, 由于此时射流还比较集中, 所以对上游侧面附近区域几乎未造成影响, 当其中一股接近近缝封口时其外围的一小部分在缝的抽吸作用下直接排出腔体, 而剩余的外围大部及射流核心部分则越过缝口继续前行同时不断向四周扩散, 加上通道继续不断收缩, 这部分外围气流达到了侧壁转而形成局部壁面射流, 从而对侧壁下游形成强烈的冲刷同时不断向纵向两侧扩散减速, 由此形成钟形的冲刷区域, 同时射流的核心部分冲击前缘而形成椭圆形驻点, 之后这两部分气流受前缘阻挡后均发生反转并由



(a) $d/C=1.0, L/C=21.4, H/C=3.47$



(b) $d/C=1.5, L/C=21.4, H/C=3.47$



(c) $d/C=2.0, L/C=21.4, H/C=3.47$

图 3 Nu 随 d/C 的变化云图

Fig. 3 Variations of Nu distribution with d/C

远缝两个端部流出腔体; 而另一股冲击射流, 在达到远缝缝口之前, 其外围已扩散至侧壁而形成壁面射流, 并与冲击射流核心继续前行, 当到达缝口时, 由于射流的充分扩散和流速的大幅降低, 因此

绝大部分在缝口抽吸作用下排出腔体, 而小部分的剩余气流也同样越过缝口冲刷下游侧壁及前缘, 最后也经由远缝端部排出腔体. 另外, 随着孔径的增加, 侧壁和前缘换热明显增强, 并且侧壁下游区域及前缘增幅较大, 特别是远缝一侧增强最为明显, 同时, 侧壁高值区域向上游略有扩散. 这是由于孔径增加使冲击射流半径和流量均随之增大, 这一方面使冲击射流扩散程度逐渐加深, 另一方面也使壁面射流起始点向侧壁上游方向提前; 同时由于射流孔径的增大使其流速下降, 各矩形缝的抽吸作用也随之加强, 而且远缝因出流量增幅比近缝更大, 从而对其附近侧壁的冲刷也更剧烈, 故换热增幅也更明显.

图 4 则为侧壁与前缘平均努塞尔数($\overline{Nu}$) 随射流孔孔径 d/C 变化曲线, 由图可知侧壁和前缘 $\overline{Nu}$ 均随 d/C 增加而增大, 且在前缘呈加速上升趋势; 相同孔径下, 前缘 $\overline{Nu}$ 数值也要高于侧壁.

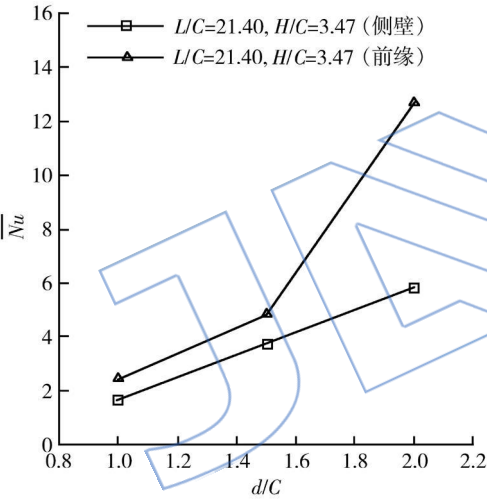
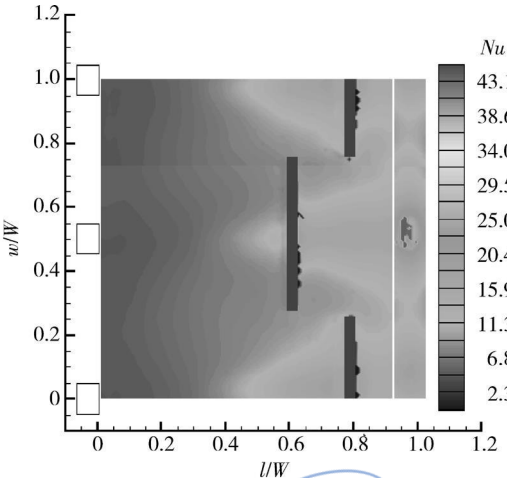


图 4 $\overline{Nu}$ 随 d/C 变化曲线
Fig. 4 Variations of $\overline{Nu}$ with d/C

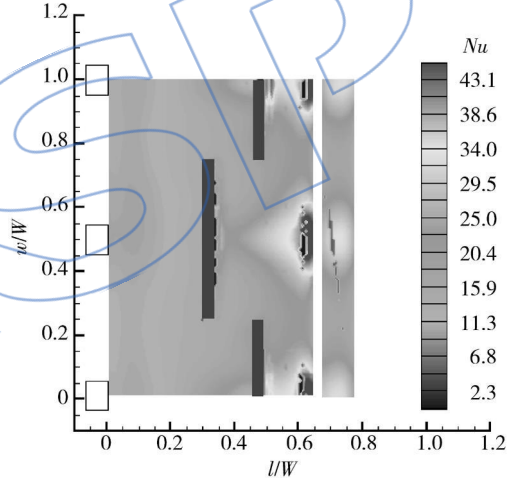
2.2 冲击距 L/C 对 Nu 的影响

图 5 为 $d/C=1.5$ 和 $H/C=3.47$ 时 Nu 随冲击距 L/C 变化云图, 为便于分析, 此处引入图 3 (b) 并标注为图 5 (b), 后文中出于同样原因标注为图 7(a), 图 5(a) 至图 5(c) 中 L/C 分别为 30.0, 21.4 和 15.0. 可以看出, 随冲击距变化, 侧壁和前缘换热强度及分布都有明显变化. 具体分析如下, 侧壁和前缘 Nu 整体数值随冲击距的减小均较快增长, 前缘增幅更为明显, 而且钟形高值区域逐渐向侧壁下游压缩, 特别是在冲击距 L/C 进一步缩小至 15 时, 已被压缩至远缝和前缘之间的狭长区

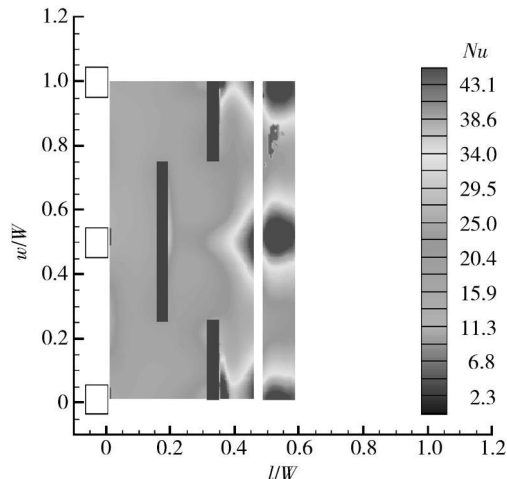
域, 同时射流向纵向两侧扩散程度也大幅加深, 在侧壁其他区域 Nu 则趋于均匀, 再则, 前缘驻点也愈趋明显并且形状由椭圆向圆形过渡. 这主要



(a) $d/C=1.5, L/C=30.0, H/C=3.47$



(b) $d/C=1.5, L/C=21.4, H/C=3.47$



(c) $d/C=1.5, L/C=15.0, H/C=3.47$

图 5 Nu 随 L/C 变化云图

Fig. 5 Variations of Nu distribution with L/C

是由于冲击距的减小,一方面使射流由射流孔喷出后因未及时得到扩散而使壁面射流的起始点向侧壁下游延迟,并造成前缘驻点更趋圆形;另一方面,使冲击射流对侧壁下游和前缘的冲击速度随之增大,反射后对整个通道内扰动也随之加强,不仅使前缘换热增幅显著,同时造成通道内整体换热也趋于均匀。

另外,由图 6 可知,随冲击距 L/C 减小侧壁及前缘 Nu 均随之增大,且增幅也较接近,但前缘仍加速上升,而侧壁却有所减缓;相同冲击距下,前者也要大于后者。

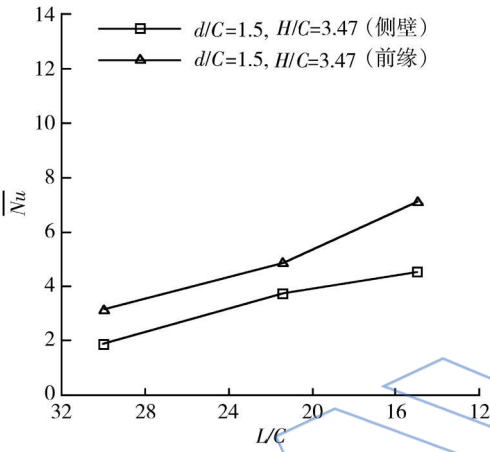
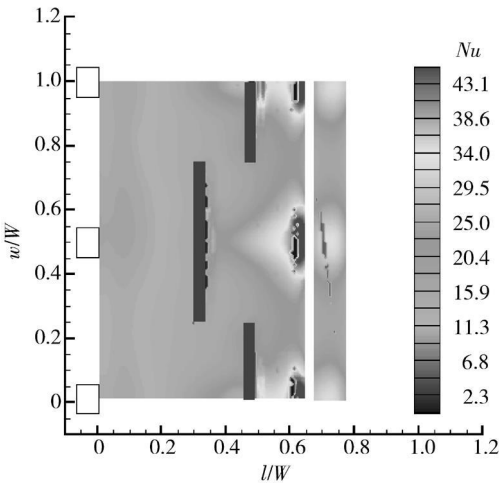


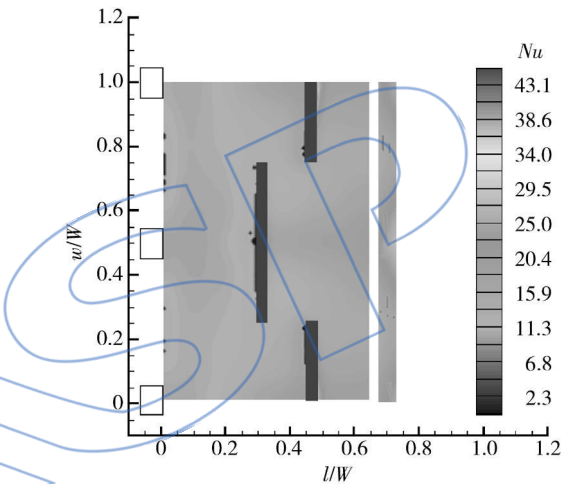
图 6 Nu 随 L/C 变化曲线
Fig. 6 Variations of Nu with L/C

2.3 通道厚度 H/C 对 Nu 的影响

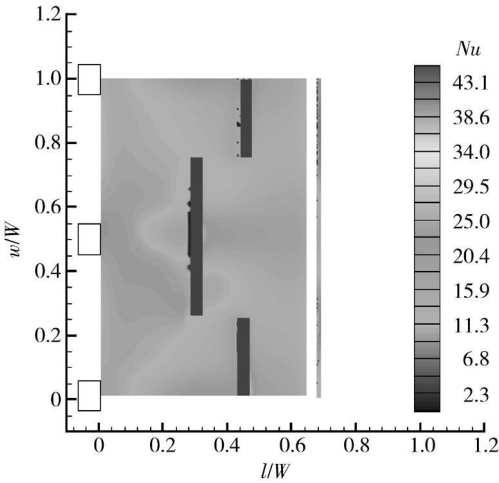
图 7 为 $L/C=21.4$ 和 $d/C=1.5$ 时侧壁和前缘 Nu 随通道高度 H/C 变化云图,图 7(a)~图 7(c) 中 H/C 依次为 3.47, 2.00 和 0.55。由图可知,通道高度变化也使侧壁和前缘换热情况发生较大改变。首先在侧壁,随通道高度减小,各个钟形 Nu 高值区域在横向逐渐向上游扩散,特别是在 H/C 减小至 0.55 时,已越过近缝接近射流孔附近区域,而在纵向尤其是在侧壁下游靠近前缘的区域,各高值区域界线却逐渐变得模糊,换热趋向均匀,但同时下游区域的整体换热强度也大幅削弱;其次在前缘,通道高度减小使其整体换热强度也明显减弱,并且驻点也逐渐隐去,换热分布也愈趋均匀。这些变化主要是由于随通道高度减小,射流在通道高度方向上的扩散严重受阻,从而引起其向纵向两侧扩散大幅加强,因此相邻射流间的掺混也不断加剧,这一方面造成侧壁下游区域和前缘的换热更趋均匀,另一方面这种剧烈掺混又致使射流严重失速,在强烈的抽吸作用下其绝



(a) $d/C=1.5, L/C=21.4, H/C=3.47$



(b) $d/C=1.5, L/C=21.4, H/C=2.00$



(c) $d/C=1.5, L/C=21.4, H/C=0.55$

图 7 Nu 随 H/C 变化云图

Fig. 7 Variations of Nu distribution with H/C

大部分由近缝和远缝缝口直接排出,进而导致越过缝口的射流因流量和流速均过低而未能对下游侧壁及前缘形成有效的冲刷,故引起整体换热强度的下降。图中可以发现,当 H/C 进一步减小至

0.55 后,侧壁下游区域换热更趋均匀,并且整体换热强度也进一步减弱,前缘驻点也基本消失。由此可以看出,通道高度的减小给通道内部尤其是侧壁下游区域和前缘的换热带来较大不利。

图 8 则为 $\overline{Nu}$ 随 H/C 变化情况,由图可知,随着通道高度的减小,侧壁和前缘 $\overline{Nu}$ 均随之减小,但在侧壁的降幅有所减缓,而在前缘则加速下降,特别是在 H/C 由 2 减小至 0.55 过程中,换热情况发生逆转,前缘 $\overline{Nu}$ 快速降至侧壁以下,这说明通道高度减少对前缘整体换热更为不利。

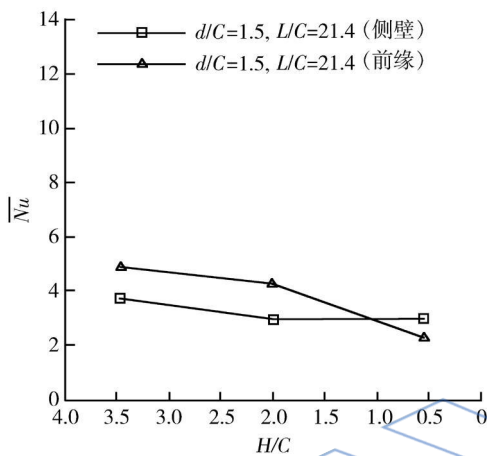


图 8 $\overline{Nu}$ 随 H/C 变化曲线

Fig. 8 Variations of $\overline{Nu}$ with H/C

3 结 论

1) 随射流孔孔径增加,侧壁和前缘整体努塞尔数均显著增大,但整体换热分布则基本不变;侧壁及前缘平均努塞尔数随之增加,且前缘增长较快,相同孔径下,前缘数值要高于侧壁。

2) 随冲击距减小,侧壁和前缘整体努塞尔数也随之增大,且整体换热分布发生较大改变,侧壁高值区域向下游压缩,前缘驻点愈趋明显并趋近圆形;侧壁及前缘平均努塞尔数也不断增加,且增幅相近,相同冲击距下,前缘数值也高于侧壁。

3) 随通道高度减小,侧壁和前缘整体换热强度均有所降低,而整体换热分布则渐趋均匀;侧壁及前缘平均努塞尔数也随之减小,且前缘下降最快。

4) 冲击孔孔径对通道内部换热的影响最大,冲击距次之,通道厚度最小。

参考文献:

[1] 沈海军,史友进.飞机防冰与除冰的若干技术[J].飞机工

程,2004(1):54-57.

SHEN Haijun, SHI Youjin. Several techniques on anti-icing and de-icing[J]. Aircraft Engineering, 2004(1): 54-57. (in Chinese)

[2] 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 Hui ren, 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)

[3] 孔满昭,刘海涌,刘松龄,等.有错排射流冲击的短通道流场研究[J].航空动力学报,2006,21(1):65-70.

KONG Manzhao, LIU Haiyong, LIU Songling, et al. Investigation of flow fields in a short confined channel with staggered jet impingement[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(1): 65-70. (in Chinese)

[4] 唐庆如.冲击加多斜孔双层壁对流与冲击换热优化研究[J].航空动力学报,2007,22(3):375-379.

TANG Qingru. A study of optimization of convection and heat transfer of impingement/effusion double wall[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(3): 375-379. (in Chinese)

[5] 梁卫颖,刘海涌,刘松龄,等.有冲击的受限通道内流场的数值仿真[J].计算机仿真,2007,24(3):274-277.

LIANG Weiying, LIU Haiyong, LIU Songling, et al. Numerical investigation of flow field in a confined channel with impingement[J]. Computer Simulation, 2007, 24(3): 274-277. (in Chinese)

[6] Kanokjaruvijit K, Martine Botas R F. Heat transfer and pressure investigation of dimple impingement[J]. Journal of Turbomachinery, 2008, 130(1): 011003. F011003. 11.

[7] Sung M K, Mudawar I. Effects of jet pattern on single phase cooling performance of hybrid micro channel/micro circular jet impingement thermal management scheme[J]. Heat and Mass Transfer, 2008, 51(19-20): 4614-4627.

[8] 毛军逵,刘震雄,郭文.小间距冲击凹柱面靶板换热特性实验[J].推进技术,2008,29(2):143-148.

MAO Junkui, LIU Zhenxiong, GUO Wen. Experiment of heat transfer on concave surface in single jet impingement cooling system in small jet to target space[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(2): 143-148. (in Chinese)

[9] 马龙,王建华,吴向宇,等.利用红外技术进行层板冷却特性实验研究[J].航空动力学报,2008,23(4):657-661.

MA Long, WANG Jianhua, WU Xiangyu, et al. Experimental investigation of the cooling performance of lamilloy using infrared thermal imaging technique[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(4): 657-661. (in Chinese)

[10] Marsters G F, Howkins B, Kortschak E. Heat transfer to a plane wall from a heated, ventilated plane jet[J]. Heat and Mass Transfer, 1980, 23(3): 301-309.

[11] Lee D H, Kim K C. Flow and heat transfer measurements of a wall attaching offset jet[J]. Heat Mass Transfer,

1996, 36(14): 2907-2913.

[12] Mokhtar W A, Khalil M F, Elshorbagy S Z, et al. Experimental and numerical parametric study of the plane offset jet impinging on a flat surface[R]. AIAA 2005-5012, 2005.

[13] 郭涛, 朱惠人, 许都纯, 等. 热色液晶瞬态测量全表面传热系数的技术研究[J]. 测控技术, 2007, 25(9): 67-74.

GUO Tao, ZHU Hui ren, XU Du chun, et al. Research on transient measurement of heat transfer coefficient distribution with liquid crystal technique[J]. Journal of Measuring and Controlling Technology, 2007, 25(9): 67-74. (in Chinese)

