

文章编号:1000-8055(2011)01-0065-07

横流对冲击射流换热特性影响机理的 数值研究

张传杰, 孙纪宁, 谭 屏

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院
航空发动机气动热力科技重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 采用数值模拟的方法对冲击腔上游冲击产生的横流对下游冲击射流的影响进行了研究. 结果表明, ①随横流增大, 射流冲击靶面平均努塞尔数呈现复杂的变化规律. ②横流对冲击靶面平均努塞尔数的影响主要体现在两个方面: 随横流雷诺数增大, 冲击下游的拉伸涡对强度呈现先增大后减小的趋势, 对换热的影响也是先增大后减小; 横流使冲击射流偏移, 导致高换热区域后移. ③射流和横流对于换热强度的影响随着横流增大不断变化, 造成冲击靶面复杂的换热规律.

关 键 词: 横流; 冲击射流; 马蹄涡; 数值模拟; 换热

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Numerical investigation on heat transfer mechanism of impingement jet with cross-flow

ZHANG Chuan-jie, SUN Ji-ning, TAN Ping

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engines,
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100191, China)

Abstract: Numeration analysis was made to simulate the influence induced by upstream jet on downstream jets in impingement chamber. The results shows that, (1) As the cross-flow increases, the heat transfer efficiency on the impinged surface changes in a very complicated way. (2) Cross-flow influences the heat transfer of the impinged surface mainly in two aspects: as the cross-flow Reynolds number increases, the strength of stretched vortex pair downstream of the jet firstly increases and then decreases, resulting in the same influence on the heat transfer of the target surface; the deviation of the impinging jet induced by cross-flow makes the high heat transfer zone move backward. (3) As cross-flow increases, the heat transfer efficiency induced by impingement and cross-flow changes, making the heat transfer on the target surface more complicated.

Key words: cross-flow; impingement jet; horseshoe vortex; numerical simulation; heat transfer

收稿日期:2009-11-27; 修订日期:2010-04-21

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(YWF-10-02-043);“凡舟”青年科研基金(20080402)

作者简介:张传杰(1984—),女,山东济南人,硕士生,主要研究方向为航空发动机高温部件冷却技术.

通讯作者:孙纪宁(1975—),男,辽宁辽阳人,讲师,博士,主要研究方向为航空发动机高温部件冷却及高超声速飞行器热防护.

在现代高性能发动机中,冲击射流靶面的滞止点附近具有很高的局部传热系数,因此射流冲击被广泛应用于热端部件内部冷却,包括燃烧室、涡轮叶片前缘和中弦区等。

对于带横流的冲击冷却,很多学者做过实验和数值研究^[1-9],Taslim^[1]对叶片前缘的横流冲击模型进行了较为详细的实验和数值研究,谭蕾等^[2]针对燃烧室火焰筒内的横流冲击模型进行了数值研究.为探讨叶片中弦区横流对冲击射流换热特性的影响,张大林等^[3]对有均匀横流的冲击换热特性进行了实验研究,重点关注孔排总体换热特性.但这些研究大多集中在多排孔射流,多排孔射流有这样的特点:①相邻孔排之间存在相互作用;②上游孔排产生的横流会对下游孔排的冲击换热产生影响;③每个孔的流量分配不易控制.因此采用多排孔的冲击换热实验会得到冲击靶面综合的换热效果,由于实验的局限性,每个孔的射流流量及所受横流的流量不好控制,因此不能得到带横流的单孔附近的换热情况。

Goldstein 和 Bouchez 等人^[10-11]对带横流的单孔冲击做过实验研究,这些实验研究大多集中在燃烧室,冲击雷诺数在 30 000 以上,冲击距也比较大($Z/D \geq 6$).对带横流的单孔冲击的数值研究则相对较少,Sebastian 等人^[12]曾经做过这方面的研究,冲击雷诺数从 33 400 到 121 300,横流雷诺数在 40 900 以上,冲击距 Z 为 $6D$ 和 $12D$.

对于叶片中弦区沿流向不同位置的冲击孔排影响换热的主要因素是冲击流量和横流流量,如果能够控制冲击流量和横流流量,那么用单排孔就可以模拟多排孔的情况。

本文将叶片中弦区导管冲击模型简化为单排孔冲击模型,导管冲击的冲击距相对较短,本文采用冲击距 $Z = D$,冲击雷诺数为 6 000, 8 000, 10 000, 12 000 四种情况,横流雷诺数从 0 到 4 800 进行数值计算,并从流动角度对横流对冲击射流换热特性影响的机理进行了探讨。

1 带横流的冲击冷却模型

本文计算模型是一个带均匀横流的单排三孔冲击腔,如图 1 所示。

横流从左侧入口进入冲击腔,从右侧出口排向大气.冲击射流从三个冲击孔进入冲击腔,冲击到靶面上,和横流一起流出右侧出口.其中中间冲击孔为主要研究对象,两侧冲击孔为辅助结构,可以为中间冲击孔提供近似对称边界条件。

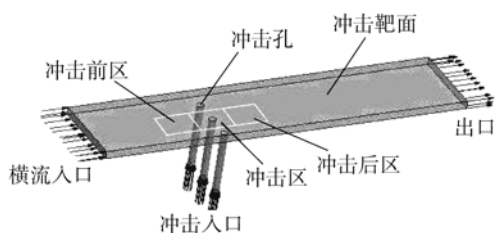


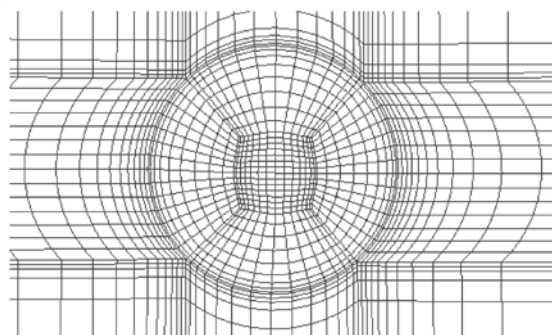
图1 计算模型图

Fig. 1 Computation model

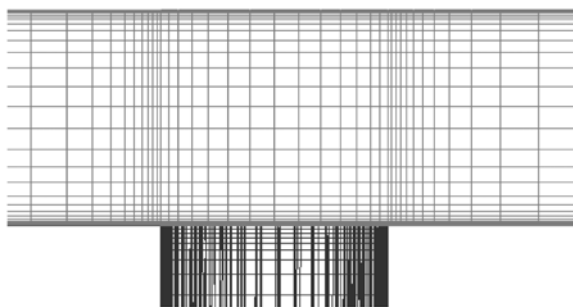
冲击孔直径为 $D_j = D$, 沿展向孔间距 $S = 3.3D$, 冲击距 $Z = D$ 。

定义冲击靶面上三个不同区域分别为冲击区、冲击前区、冲击后区. 三个区域的尺寸均为 $3.3D \times 3.3D$, 三个区域的相对位置如图 1 所示。

本文模型采用六面体网格,二阶迎风格式进行空间离散.为了使计算更为精确,对冲击孔附近和换热靶面附近进行了局部加密,使冲击靶面的 y_{plus} 在湍流模型要求的范围之内.本文首先对比了不同网格密度的计算结果,进行了网格无关解的分析.计算采用的节点数目分别为 19 万、27 万、35 万、41 万.经验证得出,节点数为 35 万和 41 万时的计算结果相差已仅 0.2%.综合考虑,最终计算选取了节点数为 35 万的网格进行计算.网格典型网格如图 2 所示。



(a) 冲击孔附近的网格



(b) 壁面附近的网格

图2 计算模型的典型网格

Fig. 2 Typical grid of calculation model

冲击雷诺数、横流雷诺数的定义分别为

$$Re_j = \frac{u_j D_j}{\nu_j} \quad (1)$$

$$Re_c = \frac{u_c Z}{\nu_c} \quad (2)$$

式中 u_j 为冲击射流入口的速度; u_c 为横流入口的速度。

表面传热系数、努塞尔数、平均努塞尔数和无量纲温度的定义为

$$h = \frac{q}{T_w - \bar{T}} \quad (3)$$

$$Nu = \frac{hD_j}{\lambda} \quad (4)$$

$$Nu_{av} = \frac{h_{av} D_j}{\lambda} \quad (5)$$

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_j - T_c} \quad (6)$$

式中 q 为热流密度, h_{av} 为面积平均表面传热系数; T_w 为壁面温度; T_j 为冲击射流的入口温度; T_c 为横流的入口温度; $\bar{T}$ 为横流和射流混合后的温度, 公式如下:

$$\bar{T} = \frac{m_c T_c + m_j T_j}{m_c + m_j} \quad (7)$$

进口边界: 射流孔入口无量纲温度 $\theta=1$; 横流入口无量纲温度 $\theta=0$ 。

出口边界: 所有参数沿流向的一阶导数为零。

壁面边界: 冲击靶面无量纲温度 $\theta=0$, 其余壁面为无滑移绝热壁面。

本文采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型, 运用商业软件 CFX 进行计算, 壁面采用壁面函数处理, 不断调整网格使冲击靶面的 y_{plus} 在湍流模型要求的范围内。

2 结果分析

2.1 冲击区分析

图3是不同冲击雷诺数时, 冲击区平均努塞尔数随横流雷诺数变化曲线。图中还对无横流时冲击雷诺数为5000的数值计算结果与 Florschuetz 等人^[5]在1981年发表文献的实验结果进行对比, 两者的差异在5%以内。

从图3中可以看出, 随着冲击雷诺数增大, 平均努塞尔数不断增大。随横流雷诺数增大, 平均努塞尔数呈现先增大后减小的趋势: 当横流雷诺数较小时 (如 $Re_c < 1700$), 平均努塞尔数随横流雷

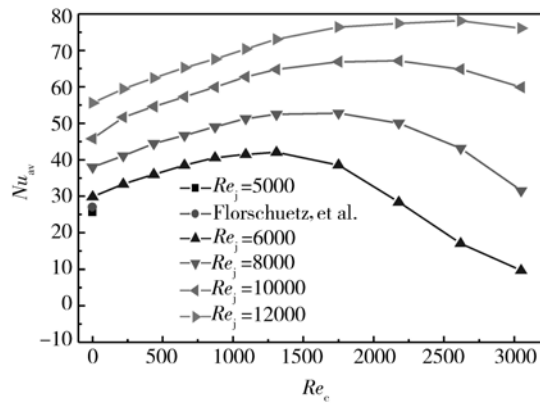


图3 冲击区平均努塞尔数随横流雷诺数变化曲线

Fig. 3 Distribution of average Nusselt number along cross-flow Reynolds number in impingement zone

诺数的增大而增大; 当横流雷诺数较大时 (如 $Re_c > 2000$ 时), 平均努塞尔数随横流雷诺数的增大而减小。

图4(a)是 $Re_c=0, Re_j=8000$ 时, 冲击点附近的流线图。可以看到, 当没有横流时, 射流冲击壁面, 会在冲击点周围形成明显的卷吸涡。在冲击射流自身形成的横流作用下, 冲击点中下游的卷吸涡被拉伸, 形成拉伸涡对。该拉伸涡对通过对流卷吸作用, 可增强主流和冲击靶面贴壁流体的掺混, 强化换热。

当加入横流时 (如 $Re_c=220, Re_j=8000$), 在冲击射流的作用下, 冲击点前出现马蹄涡 (如图4(b))

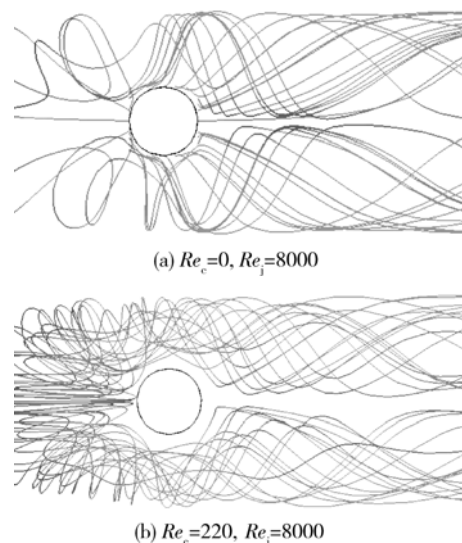


图4 横流雷诺数较小时冲击点附近的流线图

Fig. 4 Streamline around impingement point at lower cross-flow Reynolds number

所示),且该马蹄涡的旋涡方向和冲击射流自身形成的卷吸涡拉伸涡对方向相同,对拉伸涡对起到增强作用.随拉伸涡对强度增大,冲击靶面的换热也将增强.

当横流进一步增大(如 $Re_c = 1750$, $Re_j = 8000$),从图 5(a)可以看到,拉伸涡对变得细长,强度降低,其对换热的增强作用也迅速减弱.

如再增大横流(如 $Re_c = 2620$, $Re_j = 8000$),如图 5(b)所示,拉伸涡对的强度不再有明显变化,其对换热的增强作用不再显现.

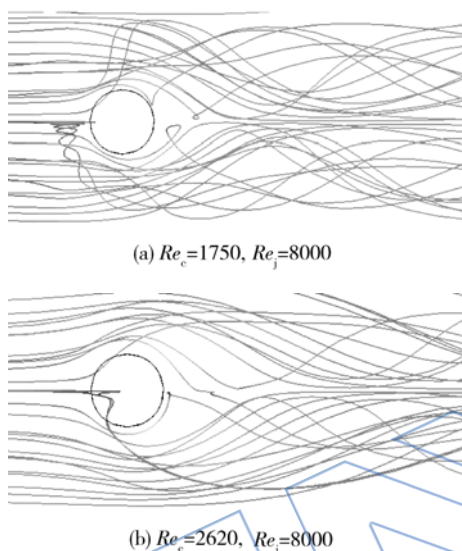


图 5 横流雷诺数较大时冲击点附近的流线图
Fig. 5 Streamline around impingement point at higher cross-flow Reynolds number

但从图 6 所示的冲击孔中心截面的速度矢量图中可以看出:当 $Re_c = 1750$, $Re_j = 8000$ 时(如图 6(a)),横流对冲击射流出现了一定的偏转作用.这将使冲击点后移,相应的高换热区域也随之后移.

当 $Re_c = 2620$, $Re_j = 8000$ 时(如图 6(b)),冲击点后移更为严重,在冲击区域范围内,高换热区域所占比例越来越小,也将导致平均努塞尔数不断减小.

图 7 为冲击点附近努塞尔数分布图,从图中可以明显看出随着横流的不断加大,冲击点附近的高换热区域不断后移.

从上述讨论可知,横流通过两种作用对冲击靶面平均努塞尔数产生影响.一方面,横流和冲击射流相互作用产生的马蹄涡对冲击射流自身的拉伸涡对产生增强作用,使换热增强,平均努塞尔数

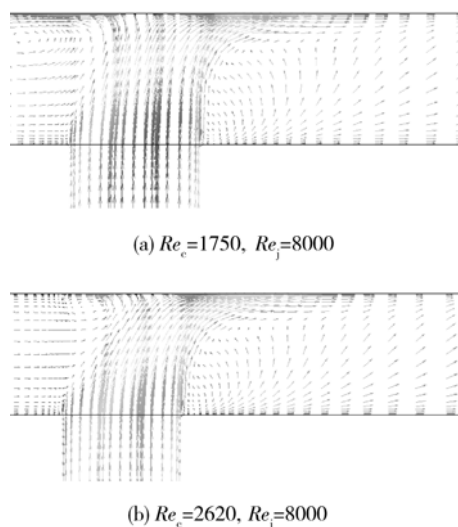


图 6 冲击孔中心截面的速度矢量图

Fig. 6 Velocity vector on central section of impingement hole

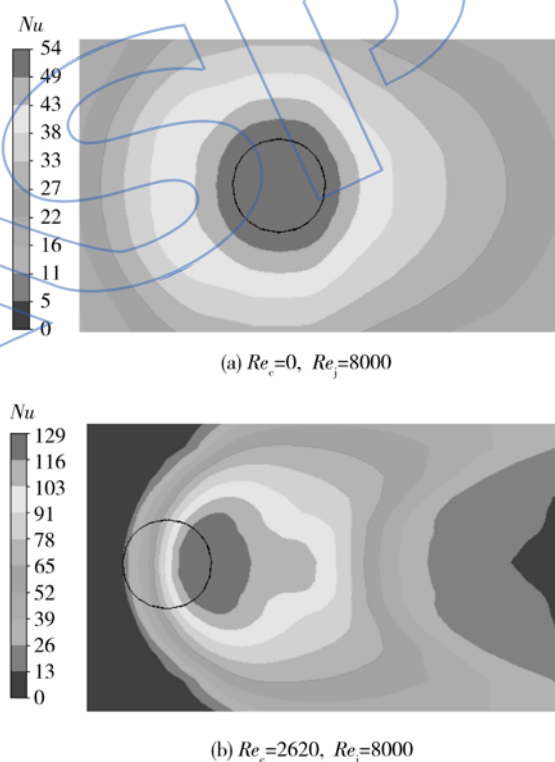


图 7 冲击点附近努塞尔数分布图

Fig. 7 Distribution of Nusselt number around impingement point

增大;当横流增大到一定程度,拉伸涡对强度降低,换热增幅减弱,对平均努塞尔数影响逐渐消失.另一方面,较大横流使冲击点后移,冲击区内的高换热区域所占比例减小,引起冲击区平均努塞尔数减小.

2.2 冲击前区分析

图 8 是不同冲击雷诺数时,冲击前区平均努塞尔数随横流雷诺数变化曲线。

从图 8 中可以看出,随着冲击雷诺数的加大,冲击前区的平均努塞尔数不断增大,随横流雷诺数增大,平均努塞尔数不断减小。

从 2.1 节分析可知,随横流雷诺数增大,使冲击换热的高换热区域后移,相应的冲击射流在冲击前区的影响也随高换热区域后移而不断减小,冲击上游区域中的换热将由冲击主导逐渐过渡为横流主导。在本文研究范围内,横流流量增大引起的换热能力的增加远小于高换热区后移带来的冲击换热能力的减弱,这致使冲击前区的换热越来越差,平均努塞尔数不断下降。

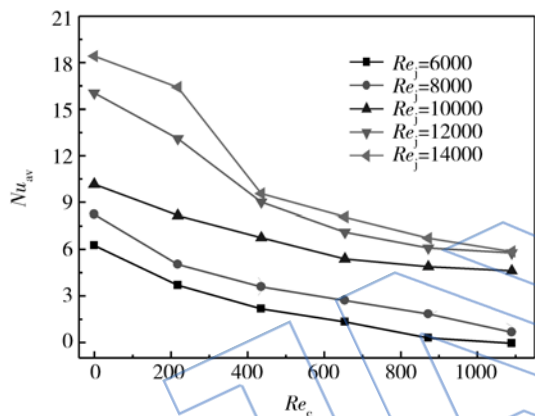


图 8 冲击前区平均努塞尔数随横流雷诺数变化曲线

Fig. 8 Distribution of average Nusselt number with cross-flow Reynolds number in front impingement zone

2.3 冲击后区分析

图 9 是不同冲击雷诺数时,冲击后区平均努塞尔数随横流雷诺数变化曲线。

从图 9 中可以看出,随着横流雷诺数的增大,冲击后区平均努塞尔数呈现双波峰的变化趋势,且随着冲击雷诺数的增大,曲线两个波峰及一个波谷均后移。

当横流雷诺数比较小时(如 $Re_c = 220$, $Re_j = 8000$),随着横流雷诺数的增大,拉伸涡对强度在马蹄涡的作用下增强(如图 4(b)),这将引起冲击后区换热增强,平均努塞尔数增大,平均努塞尔数曲线开始进入第一次上升过程。

当横流雷诺数增大到一定程度(如 $Re_c = 880$, $Re_j = 8000$)后,拉伸涡对在横流作用下,强度

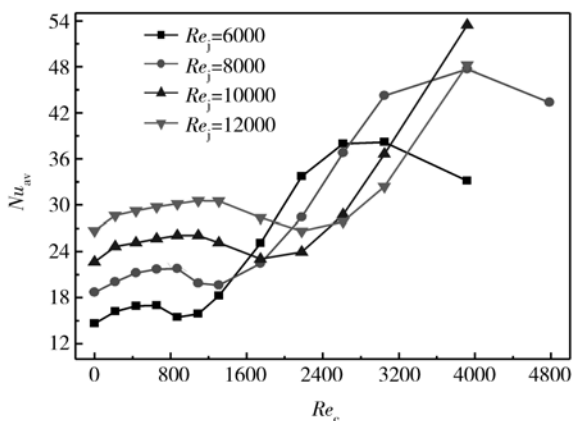


图 9 冲击后区平均努塞尔数随横流雷诺数变化曲线

Fig. 9 Distribution of average Nusselt number along cross-flow Reynolds number in behind impingement zone

不再增强,并出现减弱趋势,强化换热能力降低,相应的平均努塞尔数减小,平均努塞尔数曲线达到第一波峰,并开始进入第一次下降过程。

当横流雷诺数达到 1310 时($Re_j = 8000$),从速度矢量图(如图 10 所示)看,冲击射流在横流作用下开始出现偏移趋势。再增大横流雷诺数,则冲击射流出现比较明显的偏移($Re_c = 1750$, $Re_j = 8000$,如图 6(a)所示),相应的冲击射流的高换热区域也将冲击区逐渐进入到冲击后区,引起冲击后区平均努塞尔数增大,平均努塞尔数曲线在达到波谷谷底后,再次升高,进入第二次上升过程。

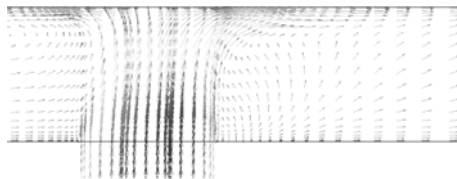


图 10 $Re_c = 1310$, $Re_j = 8000$ 的速度矢量图

Fig. 10 Velocity vector at $Re_c = 1310$, $Re_j = 8000$

当横流雷诺数达到 3920 时,冲击射流在横流作用下偏移强烈,其对壁面的冲击换热能力开始下降,平均努塞尔数曲线也达到了第二波峰。

当进一步增大横流雷诺数(如 $Re_c = 4790$, $Re_j = 8000$,如图 11 所示),冲击射流将无法直接冲击到壁面,难以形成高换热区域,则冲击后区的总体换热能力减弱,平均努塞尔数开始出现减小趋势,平均努塞尔数曲线进入第二次下降过程。

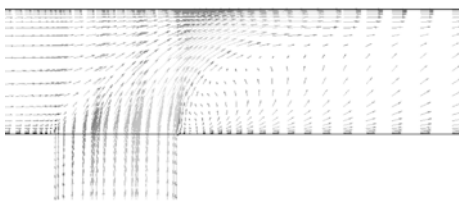


图 11 $Re_c = 4790, Re_j = 8000$ 的速度矢量图
Fig. 11 Velocity vector at $Re_c = 4790, Re_j = 8000$

对于不同冲击雷诺数,当冲击雷诺数增大时,其产生的卷吸涡拉伸涡对强度也较大,需要较高的横流雷诺数才能将其拉伸至足够弱,因此平均努塞尔数双波峰曲线的第一波峰随冲击雷诺数增大呈现后移趋势.如图 12 所示,当 $Re_c = 880$ 时, $Re_j = 8000$ 的拉伸涡对的强度已经很弱,但是 $Re_j = 12000$ 的拉伸涡对的强度还很强.

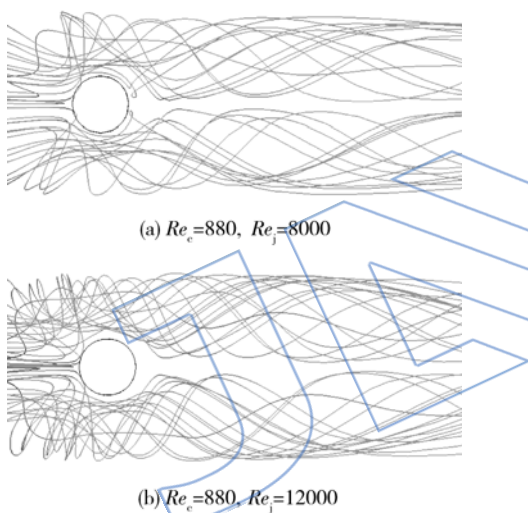


图 12 横流雷诺数相同,冲击雷诺数不同时
冲击点附近流线图
Fig. 12 Streamline around impingement point
at the same cross-flow Reynolds number
and different impingement
Reynolds numbers

同样,冲击射流的惯性随冲击雷诺数增大而增大,需要较高的横流雷诺数才能使高冲击雷诺数的冲击射流产生相似的偏移量,因此,其曲线中的波谷和第二波峰也随冲击雷诺数增大呈现后移趋势.相同横流雷诺数时, $Re_j = 8000$ 的偏移量(如图 6(b)所示)明显小于 $Re_j = 12000$ 的偏移量(如图 13 所示).

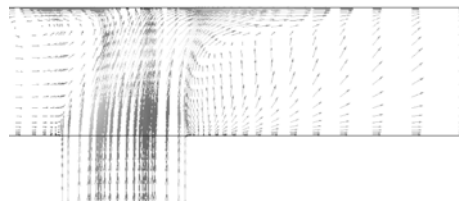


图 13 $Re_c = 2620, Re_j = 12000$ 时速度矢量图
Fig. 13 Velocity vector at $Re_c = 2620, Re_j = 12000$

3 结 论

1) 横流对射流冲击靶面平均努塞尔数的影响非常复杂:随横流雷诺数增大,在冲击区域,平均努塞尔数呈现先增大后减小的趋势;在冲击上游区域,平均努塞尔数不断减小;在冲击下游区域,平均努塞尔数呈现双波峰曲线形式.

2) 横流对冲击靶面平均努塞尔数的影响主要体现在两个方面:随横流雷诺数增大,冲击后区的拉伸涡对强度呈现先增大后减小的趋势,对换热的影响也是先增大后减小;横流使冲击射流发生偏移,导致高换热区域后移,直至冲击射流无法直接冲击壁面,换热降低.

3) 拉伸涡对和射流偏移两方面强度随着横流增大不断变化,是引起冲击靶面复杂的换热规律的主要原因.

参考文献:

- [1] Taslim M E, Bethka D. Experimental and numerical impingement heat transfer in an airfoil leading-edge cooling channel with cross-flow[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2009, 131(1): 011021(7 pages).
- [2] 谭蕾,张靖周,谭晓茗.非均匀横流作用下冲击射流冷却的数值研究[J].航空动力学报, 2006, 21(3): 528-532.
TAN Lei, ZHANG Jingzhou, TAN Xiaoming. Numerical investigation of jet impingement cooling with non-uniform crossflow[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(3): 528-532. (in Chinese)
- [3] 张大林,常海萍,韩东.有初始横流的冲击壁面强化的换热特性实验研究[J].航空动力学报, 1996, 11(1): 269-272.
ZHANG Dalin, CHANG Haiping, HAN Dong. An experimental study of heat transfer by jet impingement on roughened surface with initial crossflow[J]. Journal of Aerospace Power, 1996, 11(1): 269-272. (in Chinese)
- [4] Pamula G, Ekkad S V, Acharya S. Influence of crossflow-induced swirl and impingement on heat transfer in a two-pass channel connected by two rows of holes [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2001, 123(2): 281-287.

- [5] Florschuetz L W, Truman C R, Metzger D E. Streamwise flow and heat transfer distributions for jet array impingement with crossflow[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1981, 103(2): 337-342.
- [6] Florschuetz L W, Metzger D E, Su C C. Heat transfer characteristics for jet array impingement with initial cross-flow[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1984, 106(1): 34-41.
- [7] Metzger D E, Florschuetz L W, Takeuchi D I, et al. Heat transfer characteristics for inline and staggered arrays of circular jets with crossflow of spent air[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1979, 101(3): 526-531.
- [8] Katti V V, Prabhu S V. Influence of spanwise pitch on local heat transfer for multiple jets with crossflow[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2008, 22(4): 654-668.
- [9] Katti V V, Prabhu S V. Influence of streamwise pitch on the local heat transfer characteristics for in-line arrays of circular jets with crossflow of spent air in one direction[J]. Heat Mass Transfer, 2009, 45(9): 1167-1184.
- [10] 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(9): 1377-1382.
- [11] Bouchez J P, Goldstein R J. Impingement cooling from a circular jet in a cross flow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1975, 18(6): 719-730.
- [12] Spring S, Weigand B, Krebs W, et al. CFD heat transfer predictions of a single circular jet impinging with crossflow [C] // Proceedings of 9th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. San Francisco, CA, USA: AIAA/ASME, 2006: 1-11.

JALSP