

DOI: 10.7652/xjtuxb201601019

球凹平板冲击冷却性能的数值研究及结构改进

张峰, 王新军, 李军

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用 SST 湍流模型数值研究了球凹平板冲击冷却的流动与换热特性, 分析了 4 种球凹布置形式对带有最大横向流的冲击冷却性能的影响, 提出了球凹布置的改进结构。研究表明: 球凹结构对气流压力损失的影响很小, 展向偏移布置和叉排布置的球凹能够增大通道对称面和下游的湍动能, 顺排布置和流向偏移布置的球凹使通道中心处的湍动能降低; 展向偏移布置和叉排布置的球凹平板换热效果最好, 其次是平板, 然后是顺排布置的球凹平板, 流向偏移布置的球凹平板换热效果最差; 在通道上游, 展向偏移布置的球凹表面换热效果优于叉排布置, 而通道下游的趋势正好相反。综合展向偏移布置和叉排布置的球凹表面换热优点, 布置新的球凹排列方式, 改进布置的球凹表面换热效果与预期的效果相吻合; 通道底面的换热效果基本不受球凹沿对称面的布置位置的影响。

关键词: 冲击冷却; 球凹平板; 强化换热; 数值计算

中图分类号: TK263 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)01-0124-07

Numerical Investigation on the Impingement Cooling Performance and Structural Improvement of Dimpled Plates

ZHANG Feng, WANG Xinjun, LI Jun

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The flow and heat transfer characteristics of impingement cooling on dimpled plates were numerically investigated using SST turbulence model. The effect of four types of dimple arrangements on the impingement cooling performance with maximum crossflow was analyzed and the structural improvement of dimple plates was performed. The results show that the effect of dimple structure on the pressure loss is small. The turbulent kinetic energy acting on the symmetry wall and downstream of channel can be enhanced by the span-wise shifted arrangement and staggered arrangement; while for in-line arrangement and stream-wise shifted arrangement, the turbulent kinetic energy acting on the channel center is reduced. The heat transfer performance for the span-wise shifted arrangement and staggered arrangement is the best, then followed by flat plate, in-line arrangement and stream-wise shifted arrangement. In the upstream of channel, the Nusselt number on the dimpled surface for span-wise shifted arrangement is larger than that for staggered arrangement, while the trend is reversed in the downstream of channel. Considering the heat transfer enhancement on dimpled surface for span-wise shifted arrangement and staggered arrangement, a new dimple arrangement is performed, and the heat transfer performance of dimpled surface for improved arrangement can achieve the desired results. The heat transfer performance on the channel's bottom wall is not significantly dependent on the

收稿日期: 2015-05-30。 作者简介: 张峰(1993—), 男, 博士生; 王新军(通信作者), 男, 副教授。

网络出版时间: 2015-11-04

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20151104.2223.008.html>

dimple arrangement along the symmetrical plane.

Keywords: impingement cooling; dimpled plate; heat transfer enhancement; numerical calculation

射流冲击能使气流边界层变薄,并在冲击靶面处产生强烈的扰动,是强化局部传热传质最有效的方法之一。冲击冷却在工业上应用广泛,如高温金属的冲击冷却、电子芯片的微尺度冲击冷却等^[1]。先进燃气轮机的燃气温度很高,在燃烧室的壁面以及透平叶片前缘也采用冲击冷却方式。

国内外许多学者对冲击冷却开展了大量研究。Xing 等实验和数值研究了平板和带微型肋平板在不同横向流形式下的局部和平均换热性能,结果表明,通道高度越小两种平板的换热效果越好,最小横向流时,布置微型肋平板的换热性能最好^[2-3]。Miller 等研究了冲击孔直径变化和扰流肋对冲击冷却性能的影响,表明冲击孔直径沿流向变化能够改变冲击冷却的换热性能,布置在壁面的扰流肋能够强化通道下游的换热性能^[4]。Kanokjaruvijit 等研究了不同横向流形式和球凹几何结构对球凹平板冲击冷却性能的影响,发现相同接触面积下半圆形球凹结构和椭圆形球凹结构的换热性能非常接近^[5-6]。Xing 等实验研究了通道高度和横向流结构对布置球凹平板冲击换热的影响,结果表明,通道高度越小,平板和球凹平板的换热效果越好,在最小通道高度时,球凹平板在最大和最小横向流工况下的换热性能均优于平板^[7]。张靖周等数值和实验研究了带有横向流的阵列射流在不同的冲击孔排列形式、通道高度和横向流/射流质量流量比下的流动与换热性能^[8]。刘钊等对叶片前缘圆弧靶面的冲击冷却流动与换热性能进行了数值研究^[9]。

目前,对球凹平板冲击冷却的研究主要集中于球凹的几何结构和横向流形式,但对球凹布置形式的研究较少。本文采用 ANSYS-CFX 软件数值研究了球凹布置形式对平板冲击冷却流动与换热特性的影响。

1 计算模型和数值方法

1.1 计算模型

以 Xing 的实验结构^[2]为原型,冲击孔为 9×9 的顺排布置,横向流为单方向出口的最大横向流。为减少计算量,取实验模型的 1/9 为计算对象,坐标原点在端壁面中心处,如图 1a 所示。冲击孔直径 D_j 为 10 mm,冲击孔间距与直径之比 $X/D_j=Y/D_j=5$,冲击通道高度与冲击孔直径之比 $H/D_j=3$ 。

相对于冲击孔的位置,4 种球凹排列形式如图 1b 所示,其中第 2 种排列形式与 Xing 的实验方案^[7]相同。球凹直径与冲击孔直径之比 $D_d/D_j=1.8$,球凹深度与球凹直径之比 $t_d/D_d=0.15$,球凹间距与冲击孔直径之比 $X_d/D_j=Y_d/D_j=5$ 。

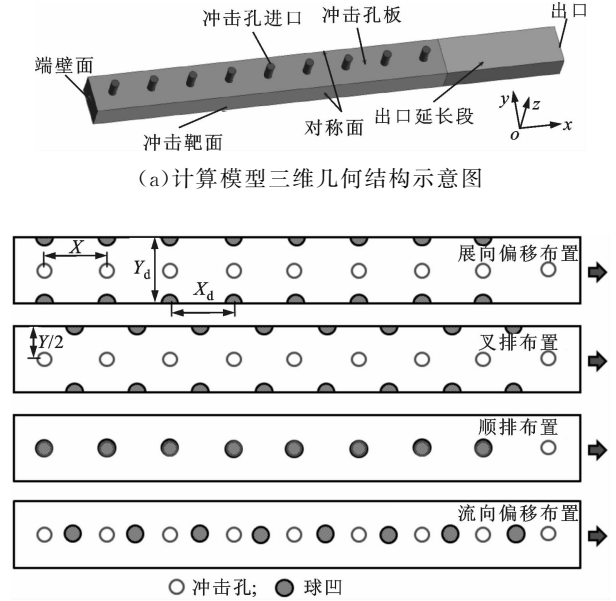


图 1 计算模型示意图

计算区域采用商用软件 ICEM 划分结构化网格,冲击孔和球窝表面采用 O 型网格,其他区域采用 H 型网格,冲击孔、球窝和流动壁面进行局部网格加密。计算区域的整体和局部网格如图 2 所示。

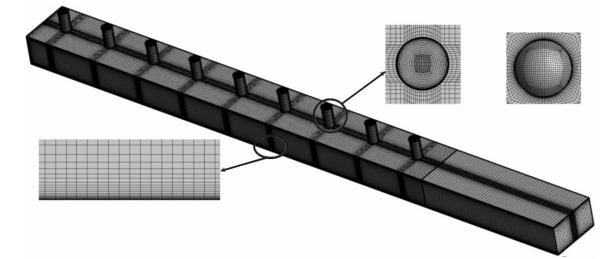


图 2 计算模型网格示意图

1.2 参数定义

进口雷诺数定义为

$$Re = \rho w D_j / \mu \tag{1}$$

式中: ρ 为气流密度; w 为进口速度; D_j 为冲击孔直径; μ 为动力黏性系数。

局部努赛尔数定义为

$$Nu = q D_j / ((T_w - T_j) \lambda) \tag{2}$$

式中: q 为热交换壁面的热通量; T_w 为热交换壁面的温度; T_j 为气流进口温度; λ 为气流热导率。

冲击靶面的映射表面(热交换壁面向冲击靶面映射得到的表面)平均努赛尔数定义为

$$Nu_a = QD_j / ((T_w - T_j)\lambda A) \tag{3}$$

式中: Q 为热交换壁面的总换热量; A 为映射表面积。

冲击靶面的浸润表面(即热交换壁面的总面积)平均努赛尔数定义为

$$Nu_{a,w} = QD_j / ((T_w - T_j)\lambda A_w) \tag{4}$$

式中: A_w 为浸润表面积。

压力损失系数定义为

$$f = 2\Delta p / (\rho w^2) \tag{5}$$

1.3 数值方法及验证

采用商用软件 ANSYS-CFX12.1 数值求解球凹平板冲击冷却的三维定常黏性雷诺时均 N-S 方程,并进行了网格无关性和湍流模型的验证。

图 3 为不同网格数下第 1 个冲击孔出口中心线上的轴向速度分布,表 1 给出了靶面平均努赛尔数,可以看出,当网格数大于 160 万时,计算结果基本不再发生变化。因此,后续对平板冲击冷却的计算均采用 160 万网格数;球凹平板的整体网格节点分布与平板(160 万网格)相同,球凹附近进行网格加密,对球凹平板冲击冷却的计算,采用网格数为 350 万左右。

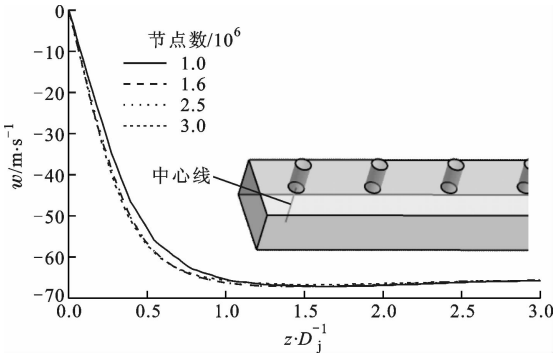


图 3 网格无关性验证

表 1 不同网格数下的靶面平均努赛尔数

网格节点数	100 万	160 万	250 万	300 万
Nu_a	98.53	102.58	102.45	102.90

图 4 是 4 种湍流模型下计算得到的靶面平均努赛尔数与 Xing 的平板冲击冷却实验结果^[2] 对比曲线,其中的 SST 湍流模型的预测结果与实验数据吻合最好。图 5 是采用 SST 湍流模型计算得到的沿中心线的局部努赛尔数分布,说明 SST 湍流模型可

以比较精确地对局部换热情况进行预测。

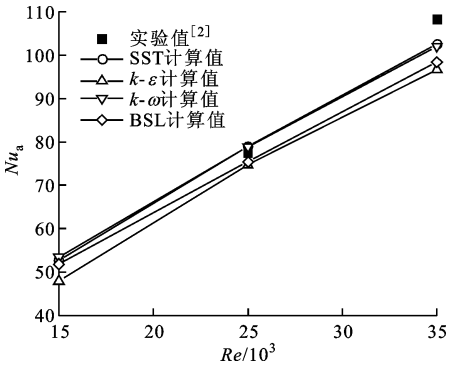


图 4 湍流模型预测的平均努赛尔数与实验值对比

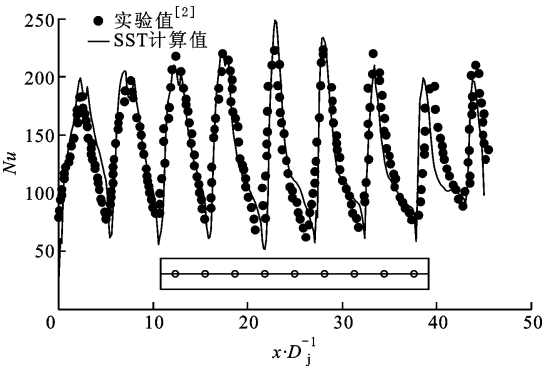


图 5 中心线沿程努赛尔数计算值与实验值对比
($Re=35\ 000$)

1.4 边界条件

计算的边界条件与 Xing 的实验条件^[2] 相同。进口给定 T_j 、 w ,速度由以冲击孔直径为特征长度的进口雷诺数确定($Re=15\ 000, 25\ 000, 35\ 000$)。冲击靶面和球凹表面的温度 T_w 比 T_j 高 30° ,其余壁面为绝热壁面,所有壁面都为无滑移边界条件。左右壁面为对称面,出口为压力出口,气压为标准大气压。

2 计算结果与分析

2.1 流动特性分析

平板冲击冷却是基本的冲击冷却形式,在本文中作为与球凹平板冲击冷却性能对比的参照。图 6 为冲击腔室 $x-z$ 截面处的流线图与相对压力分布云图。可以看出,前 4 个冲击孔的冲击射流竖直冲击到靶面上,靠近出口的冲击射流受到的横向流作用增强,射流往下游偏移明显。比较平板和 4 种球凹平板的冲击射流流线图,可以发现,球凹引起的二次流改变了腔室内的窝结构。图 7 为平板及 4 种球凹平板的压力损失系数随雷诺数的变化。从图 6、7 可以看出,4 种球凹平板的压力分布和损失系数的变

化与平板基本相同。

图 8 为 $y-z$ 截面上的流线和归一化湍动能分布云图,此处采用通道出口平均速度的平方 u^2 对湍动能进行归一化处理。对于平板冲击冷却,射流冲击到靶面后,由滞止点沿径向扩散,在对称面处相遇形成上升流,同时冲击通道中出现一个大尺寸的涡,且在两个对称上升流相遇处产生非常小的反向旋转的二次涡对,Cho 在实验中也发现了此现象^[10]。因此,在两上升流相遇处出现一个低速区,湍动能较低。4 种布置形式下的球凹对横向流及靶面上的径向扩散流的扰动作用存在明显的差别。

$x/D_j=2.5$ 截面位于冲击通道上游,横向流影响非常小。展向偏移布置的球凹位于展向相邻的冲击孔中间,对相遇处的气流有较强的扰动作用,使得二次涡对膨胀,湍动能增强。顺排布置的球凹位于冲击射流的滞止点处,射流冲击到球凹内部,弯曲的球凹结构抑制了射流的径向扩散,使对称面处的湍动能降低。叉排布置和流向偏移布置的球凹分别位于展向偏移布置和顺排布置的球凹下游($x/D_j=5$ 截面处),两种球凹布置形式在 $x/D_j=2.5$ 截面上的流动情况与平板相似。

$x/D_j=35$ 截面位于冲击通道下游,横向流较大,迫使 $x/D_j=32.5$ 处的冲击射流向下游 $x/D_j=35$ 截面处偏移,如图 6 所示,冲击射流与横向流的相互扰动使截面中心处的湍动能增大。对称面附近的湍动能受横向流和壁面径向射流的影响,叉排布置的球凹加强了对称面处气流的扰动,使湍动能增大。展向偏移布置的球凹位于 $x/D_j=35$ 截面的上游,离冲击位置的距离比叉排布置的球凹远,径向射流克服横向流向上游流动使球凹附近气流流速较小,球凹对气流的扰动较小,对称面处的湍动能较小。流向偏移布置的球凹位于截面中间位置,冲击射流冲破横向流后到达球凹处,球凹加强了冲击射流和横向流之间的扰动,使湍动能增大。顺排布置的球凹位于流向偏移布置球凹的上游,阻碍了横向流与冲击射流之间的扰动,湍动能较小。

图 9 为距冲击靶面 0.5 mm 截面上的归一化湍动能分布云图。可以看出,上游冲击滞止点处的湍动能较低,因为上游的横向流作用很小,滞止点处的射流受到的扰动很小,下游横向流增大,加强了与冲击射流的扰动,湍动能增大。展向偏移布置与叉排布置的球凹使对称面处的湍动能增大,且展向偏移布置球凹在上游的湍动能强化效果明显,叉排布置球凹在下游的湍动能强化效果更好,与图 8 的现象

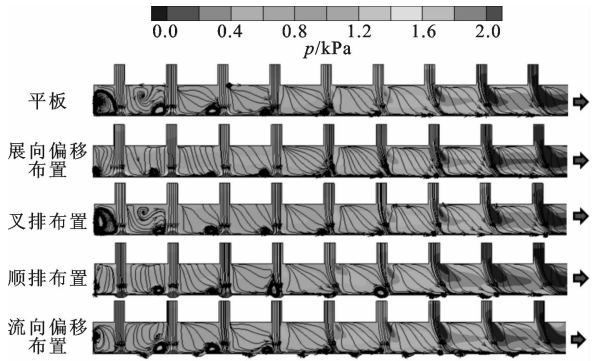


图 6 $x-z$ 截面处的流线和相对压力分布云图 ($Re=35\ 000$)

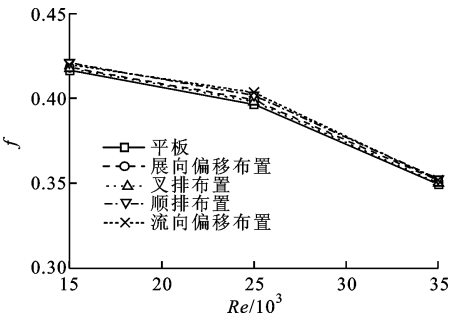
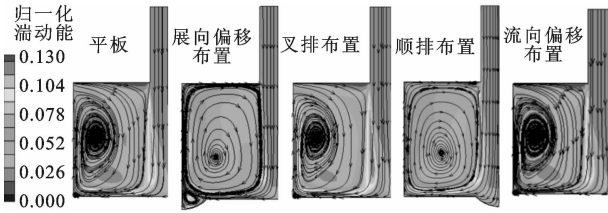
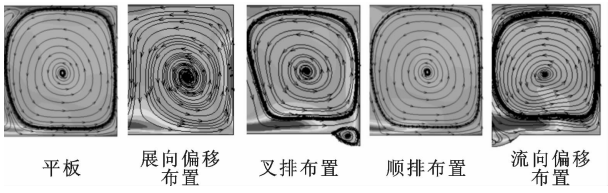


图 7 压力损失系数随雷诺数的变化



(a) $x/D_j=2.5, Re=35\ 000$



(b) $x/D_j=35, Re=35\ 000$

图 8 $y-z$ 截面处的流线和归一化湍动能分布云图

和描述相吻合。两种球凹布置对气流的扰流作用使得通道下游中间位置的湍动能增大,因此展向偏移布置和叉排布置的球凹平板整体湍动能大于平板。顺排布置和流向偏移布置的球凹抑制了壁面径向流的扩散,使湍动能降低,与图 8 相吻合,整体湍动能比平板小。

2.2 换热特性分析

图 10、11 分别给出了平板和 4 种球凹平板的映射表面平均努赛尔数和浸润表面平均努赛尔数随雷

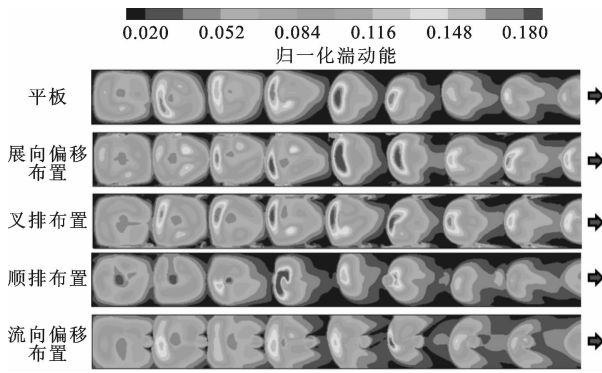


图 9 距冲击靶面 0.5 mm 处截面上的归一化湍动能分布云图($Re=35\ 000$)

雷诺数的变化,可以看出,随雷诺数的增大,平均努赛尔数增大。展向偏移布置和叉排布置的球凹平板映射表面平均努赛尔数最大,其次是平板,顺排布置与流向偏移布置的球凹平板映射表面平均努赛尔数比平板小,且流向偏移布置的换热效果最差。由图 8、9 可知,顺排布置和流向偏移布置时,对称面处的湍动能较小,且球凹结构抑制了壁面径向流的扩散,使中心处的湍动能减小,整体的换热效果变差。展向偏移布置和叉排布置的球凹平板在通道下游的湍动能大于平板,增大了下游靶面的努赛尔数,且两球凹结构对对称面处的气流有较强的扰动作用,强化了对称面处的换热效果,使平均努赛尔数增大。

比较图 10 与图 11 可以看出,4 种球凹平板的浸润表面平均努赛尔数与映射表面平均努赛尔数基本相同,由球凹结构所带来的表面积增大对换热效果的影响非常有限,4 种球凹布置主要通过改变径向流和横向流的流动情况来影响靶面的换热效果。

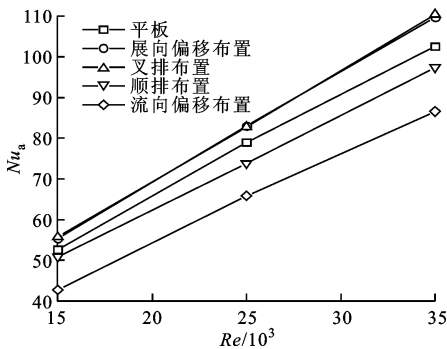


图 10 映射表面平均努赛尔数随雷诺数的变化

图 12 为平板和 4 种球凹平板在不同雷诺数下换热量的对比。可以看出,随着雷诺数的增大换热量增大,展向偏移布置与叉排布置的球凹平板换热量最大,且两者的换热量基本相同,其次是平板,然后是顺排布置的球凹平板,流向偏移布置的球凹平

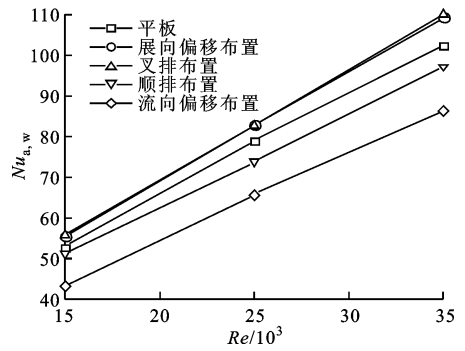


图 11 浸润表面平均努赛尔数随雷诺数的变化

板换热量最小。球凹表面积相对端壁表面积较小,且流动分离使球凹表面的换热效果较差,因此 4 种布置形式下的球凹表面换热量与端壁面的换热量相比非常小。

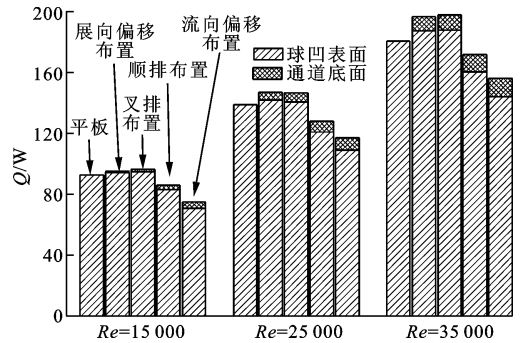


图 12 平板和 4 种球凹布置形式的换热量的对比

图 13 为平板和 4 种球凹平板的靶面努赛尔数分布云图。可以看出,冲击射流滞止点处的努赛尔数最大,随着壁面径向流的扩散,努赛尔数显著降低,两相邻射流相遇处(如对称面等)的换热效果最差。冲击区域的努赛尔数沿流向先增大后减小,这是因为上游区域的横向流较弱,对冲击射流的影响很小,与冲击射流的掺混加强了壁面附近气流的扰动,使换热强化;下游区域的横向流增强,对冲击射流有较强的吹扫作用,使射流难以直接到达壁面,减小了冲击射流在壁面的覆盖区域,使换热恶化。

由 2.1 节的流动分析可知,展向偏移布置与叉排布置的球凹对对称面处的气流有较强的扰动作用,强化了对称面处的换热。由图 13 可以看出,在通道上游,展向偏移布置的球凹表面换热效果优于叉排布置,而下游趋势正好相反。这是因为在通道上游,冲击射流受横向流的影响较小,射流能够竖直冲击到靶面上,使得滞止点离展向偏移布置的球凹较近,气流沿展向流向球凹,速度较大,强化换热效果明显;此时叉排布置的球凹离冲击滞止点较远,且位于展向和流向两对相邻射流相遇处,气流速度很

小,强化换热效果较差;在通道下游,横向流增强,迫使冲击射流向出口偏移,使得展向偏移布置的球凹处在展向和流向两对相邻射流的相遇处,且处于冲击滞止点上游,流向球凹的横向流和径向流方向相反,流动减弱,强化换热效果较差,叉排布置的球凹与滞止点距离较近,横向流沿流向流动,径向流沿展向流向球凹,强化换热效果较好。在通道下游,横向流速度增大,两种球凹布置对横向流的扰动较大,增大了通道下游的湍动能,减轻了横向流吹扫冲击射流带来的换热恶化,改善了通道下游的换热性能。顺排布置和流向偏移布置的球凹抑制了冲击射流在靶面上的径向扩散,使得换热效果变差。

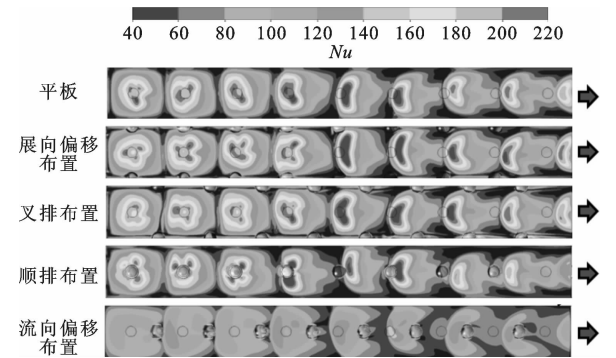


图 13 平板和 4 种球凹布置的努赛尔数分布云图
($Re=35\ 000$)

2.3 改进布置的球凹平板换热性能

由 2.2 节可知,在上游区域,展向偏移布置的球凹表面换热效果优于叉排布置,而下游区域,叉排布置的球凹表面换热性能更好。因此,综合展向偏移布置和叉排布置的球凹表面换热优点,布置一种新的球凹布置形式(改进布置),使上游的 4 个球凹位置与展向偏移布置的球凹相同,下游与叉排布置相同,如图 14 所示。

图 15 为改进布置的球凹平板努赛尔数分布云图,与图 13 比较可以看出,改进布置的球凹表面热

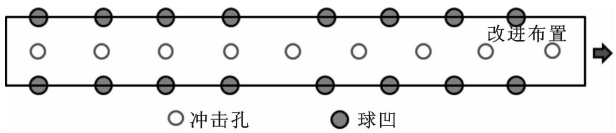


图 14 球凹 5 的排列方案示意图

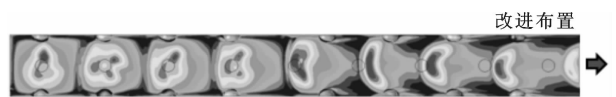


图 15 球凹 5 布置形式的努赛尔数分布云图
($Re=35\ 000$)

效果在通道上游优于叉排布置,在通道下游优于展向偏移布置,与预期的效果相吻合。图 16 为 3 种球凹布置形式的球凹表面和底面平均努赛尔数对比。可以看出,改进布置的球凹表面平均努赛尔数大于展向偏移布置和叉排布置,3 种球凹布置形式的底面平均努赛尔数基本相同,即通道底面的换热效果基本不受球凹沿对称面的布置位置的影响。

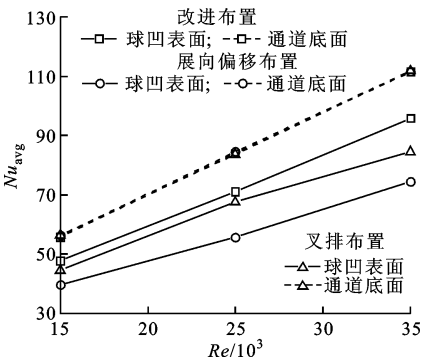


图 16 3 种球凹布置形式的球凹表面和底面平均努赛尔数

3 结 论

本文数值研究了球凹布置形式对球凹平板冲击冷却性能的影响,分析了 4 种球凹布置形式的流动与换热特性,并对球凹布置进行了改进,结论如下。

(1)球凹结构对气流压力损失的影响较小,展向偏移布置和叉排布置的球凹能够增大通道对称面和下游的湍动能,顺排布置和流向偏移布置的球凹使通道中心处的湍动能降低。

(2)展向偏移布置和叉排布置的球凹平板换热效果最好,其次是平板,然后是顺排布置的球凹平板,流向偏移布置的球凹平板换热效果最差。在通道上游,展向偏移布置的球凹表面换热效果优于叉排布置,而通道下游的趋势正好相反。

(3)综合展向偏移布置和叉排布置的球凹表面换热优点,布置了新的球凹排列方式(改进布置)。改进布置的球凹表面平均努赛尔数大于展向偏移布置和叉排布置,在上游的换热效果优于叉排布置,下游的换热效果优于展向偏移布置,与预期的效果相吻合。通道底面的换热效果基本不受球凹沿对称面的布置位置的影响。

参考文献:

[1] WEIGAND B, SPRING S. Multiple jet impingement; a review [J]. Heat Transfer Research, 2011, 42(2): 101-142.
[2] XING Y, SPRING S, WEIGAND B. Experimental

- and numerical investigation of heat transfer characteristics of inline and staggered arrays of impinging jets [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2010, 132(9): 092201.
- [3] XING Y, SPRING S, WEIGAND B. Experimental and numerical investigation of impingement heat transfer on a flat and micro-rib roughened plate with different crossflow schemes [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(7): 1293-1307.
- [4] MILLER N, SIW S C, CHYU M K, et al. Effects of jet diameter and surface roughness on internal cooling with single array of jets [C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2013. New York, USA: ASME, 2013: 95400.
- [5] KANOKJARUVIJIT K, MARTINEZ-BOTAS R F. Jet impingement on a dimpled surface with different crossflow schemes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(1): 161-170.
- [6] KANOKJARUVIJIT K, MARTINEZ-BOTAS R F. Heat transfer and pressure investigation of dimple impingement [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2008, 130(1): 011003.
- [7] XING Y, WEIGAND B. Experimental investigation of impingement heat transfer on a flat and dimpled plate with different crossflow schemes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(19): 3874-3886.
- [8] 张靖周, 李永康, 谭晓茗, 等. 阵列射流冲击冷却局部对流换热特性的数值计算与实验研究 [J]. 航空学报, 2004, 25(4): 339-342.
- ZHANG Jingzhou, LI Yongkang, TAN Xiaoming, et al. Numerical computation and experimental investigation on local convective heat transfer characteristics for jet array impingement [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(4): 339-342.
- [9] 刘钊, 丰镇平, 宋立明. 实际叶片前缘冲击冷却流动和换热的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(1): 5-9.
- LIU Zhao, FENG Zhenping, SONG Liming. Numerical study on flow and heat transfer of impingement cooling on leading edge of actual turbine blade [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(1): 5-9.
- [10] CHO H H, RHEE D H. Local heat/mass transfer measurement on the effusion plate in impingement/effusion cooling systems [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2001, 123(3): 601-608.
- [本刊相关文献链接]**
- 季家东, 葛培琪, 毕文波. 换热器内弹性管束流体组合诱导振动响应的数值分析. 2015, 49(9): 24-29. [doi: 10.7652/xjtuxb201509005]
- 周俊安, 刘立军, 肖萍, 等. 带叶片扩压器离心压缩机模型级内流研究. 2015, 49(9): 30-35. [doi: 10.7652/xjtuxb201509006]
- 王伟, 曹军义, 林京, 等. 一种非线性双稳态人体运动能量俘获技术. 2015, 49(8): 58-63. [doi: 10.7652/xjtuxb201508010]
- 褚坤明, 王家序, 蒲伟, 等. 混合润滑状态下滤波减速器的啮合冲击分析与修形方法. 2015, 49(7): 140-148. [doi: 10.7652/xjtuxb201507023]
- 王世柱, 李志刚, 李军, 等. 补汽对透平级气动性能和静叶汽封转子动力特性影响的数值模拟. 2015, 49(5): 56-61. [doi: 10.7652/xjtuxb201505009]
- 曾立飞, 刘观伟, 毛靖儒, 等. 调节阀内流型分布及利用声音突变判别流型转变的方法. 2015, 49(5): 116-121. [doi: 10.7652/xjtuxb201505018]
- 李兴文, 晁攸闯, 吴坚, 等. 水中金属丝电爆炸冲击波一维数值模拟. 2015, 49(4): 1-5. [doi: 10.7652/xjtuxb201504001]
- 刘小民, 赵嘉, 李典. 单圆弧等厚叶片前后缘多元耦合仿生设计及降噪机理研究. 2015, 49(3): 1-10. [doi: 10.7652/xjtuxb201503001]
- 刘小民, 李烁. 仿鸭翼前缘蜗舌对多翼离心风机气动性能和噪声的影响. 2015, 49(1): 14-20. [doi: 10.7652/xjtuxb201501003]
- 于渤, 韩宾, 倪长也, 等. 空心及 PMI 泡沫填充铝波纹夹芯梁冲击性能实验研究. 2015, 49(1): 86-91. [doi: 10.7652/xjtuxb201501014]
- 陈洁, 郭洁, 邱爱慈, 等. 特快波前下金属氧化物电阻片伏安特性试验研究. 2014, 48(10): 54-59. [doi: 10.7652/xjtuxb201410009]
- 蒋进科, 方宗德, 苏进展. 宽斜齿轮多目标修形优化设计. 2014, 48(8): 91-97. [doi: 10.7652/xjtuxb201408016]
- 闵为, 冀宏, 王峥嵘, 等. 单级压力调节阀的阻尼孔射流响应特性分析. 2014, 48(6): 80-85. [doi: 10.7652/xjtuxb201406014]
- 张超, 徐自力, 刘石, 等. 采用热固双向耦合模型的转子热应力计算方法研究. 2014, 48(4): 68-72. [doi: 10.7652/xjtuxb201404012]
- 冯斌, 梅雪松, 杨军, 等. 数控机床摩擦误差自适应补偿方法研究. 2013, 47(11): 65-69. [doi: 10.7652/xjtuxb201311012]
- 张健, 赵桂平, 卢天健. 泡沫金属在冲击载荷下的能量吸收特性. 2013, 47(11): 105-112. [doi: 10.7652/xjtuxb201311019]

(编辑 赵炜 苗凌)