

阵列射流-扰流柱复合冷却结构换热 和压降特性数值研究^{*}

吴 青, 张靖周, 谭晓茗

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 为研究阵列射流-扰流柱耦合换热结构对热端部件综合冷却效果的影响, 采用数值模拟方法研究了阵列射流-扰流柱复合冷却结构的流动换热特性, 重点关注扰流柱相对于射流孔的布置方式(顺排和叉排)、扰流柱直径 d_p 相对于射流孔的直径 d_j 之比($d_p/d_j=0.5, 1, 2$)的影响。为体现阵列射流-扰流柱复合冷却结构的导热-对流强耦合传热过程特征, 引入了靶板加热侧当量对流换热系数的概念, 并分别采用冲击靶面对流换热系数和靶板加热侧当量对流换热系数进行了综合性能的评价分析。研究表明, 采用绕流柱顺排和叉排方式的冲击靶面对流换热相较于光滑靶板分别增加约30%和10%, 而扰流柱相对于射流孔呈顺排方式的对流换热效果要优于叉排方式, 同时, 顺排方式的压力损失系数却低于叉排方式。至于扰流柱相对于射流孔的直径比的影响, 基于冲击靶面和靶板加热侧对流换热系数的综合性能评价存在显著的差异。

关键词: 阵列射流; 扰流柱; 复合冷却结构; 综合性能; 数值模拟

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2020) 05-1112-09

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190303

Numerical Study on Heat Transfer and Pressure Drop of an Integrated Array-Jets and Pin-Fins Cooling Configuration

WU Qing, ZHANG Jing-zhou, Tan Xiao-ming

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to investigate the effects of array-jets and pin-fins coupling structure on comprehensive cooling effect of hot components, a numerical study was performed to investigate the flow and heat transfer characteristics of an integrated array-jets and pin-fins cooling structure, with the main concern on the effects of pin-fins arrangement with respect to the impinging holes (inline and staggered modes) and fin-to-hole diameter ratio ($d_p/d_j=0.5, 1, 2$). In order to consider the highly-coupling feature of heat conduction and heat convection in the integrated cooling structure, an equivalent convective heat transfer coefficient on the heated side of target plate was introduced. By using the convective heat transfer coefficient on targeting surface and the equivalent convective heat transfer coefficient on heated side of target plate, an evaluation on the comprehensive performance of integrated cooling structure was made. The results show that, compared with the smooth target surface, the heat transfer on the target surface with parallel and cross rows of spoiler columns increases by about 30% and 10%, and the inline mode of pin fins is more pronounced on enhancing the convective heat transfer when compared to the staggered mode. Simultaneously, the pressure loss ratio in the inline mode is otherwise less than the staggered

^{*} 收稿日期: 2019-05-14; 修订日期: 2019-08-14。

通讯作者: 吴 青, 硕士生, 研究领域为高温壁面冷却方式。E-mail: 15261805029@163.com

引用格式: 吴 青, 张靖周, 谭晓茗. 阵列射流-扰流柱复合冷却结构换热和压降特性数值研究[J]. 推进技术, 2020, 41(5): 1112-1120. (WU Qing, ZHANG Jing-zhou, Tan Xiao-ming. Numerical Study on Heat Transfer and Pressure Drop of an Integrated Array-Jets and Pin-Fins Cooling Configuration[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(5): 1112-1120.)

mode. With regard to the effect of fin-to-hole diameter ratio, it is found that comprehensive performance evaluation based on the equivalent convective heat transfer coefficient on heated side of target plate is significantly different from that based on the convective heat transfer coefficient on targeting surface.

Key words: Array jets; Pin fins; Integrated cooling structure; Comprehensive performance; Numerical simulation

1 引言

高热流密度条件下的强化传热是高性能热动力装置技术发展面临的一个关键问题。以航空燃气涡轮发动机为例,目前的压气机增压比已达到30,涡轮进口燃气温度接近2000K。根据未来航空燃气涡轮发动机的发展趋势,涡轮进口燃气温度还要进一步提高,由此对热端部件的强化冷却技术指标提出了越来越苛刻的要求。发展高效的冷却方式,在减少冷却用气量的前提下实现热端部件综合冷却效率的提高,已成为发展高性能航空燃气涡轮发动机关键支撑技术之一^[1]。

冲击射流作为一种常规的强化传热技术,已广泛应用于热端部件的冷却结构^[2]。相对于单股或单排射流冲击换热,阵列射流冲击能够在更大的换热表面上形成有效的作用,但同时也由于在受限空间中多股射流所诱导的相干效应和横流效应而使得其流动和换热更为复杂。国内外研究针对阵列射流冲击开展了大量的基础研究,较为系统地揭示出孔阵列布置方式、孔间距、冲击间距、初始横流等因素的影响机制和规律。Florschuetz等^[3-4]研究单向通道内圆孔射流的流场分布和换热效率,给出了流向孔间距、展向孔间距以及通道高度等几何参数的影响,讨论流量分布和几何参数变化对靶面换热的影响机制;在此基础上,进一步研究了具有初始横流的条件下,初始横流温度相对于阵列射流温度对冲击靶面换热的影响,并通过实验揭示了无量纲绝热壁温和努塞尔数与流向孔间距的关系。Huber等^[5]研究发现喷嘴的阵列间距会影响壁面的换热对流换热系数;出流孔的存在能够增加壁面换热系数,但会改变最佳阵列间距;当喷射间距与喷嘴直径之比为0.25和1时,壁面换热均匀度和换热效果较好。Goodro等^[6]在对比射流孔间距为8倍和12倍射流直径的靶面换热系数后发现,在同一流向位置处,8倍射流直径的间距更有利于提高靶面的换热系数。Xing等^[7]则研究了射流孔的排布和射流间距对冲击换热的影响,实验和数值模拟的结果显示,射流孔顺排的换热系数总高于叉排;冲击间距为3倍的冲击孔直径时,靶面

换热系数最高。Zhang等^[8]利用热色液晶测试技术真实地显示出阵列射流的局部传热特征,实现了冲击靶面等温线的可视化和传热系数的定量测量。Weigand等对早期的研究进行了全面的综述^[9]。鉴于阵列射流冲击换热的复杂性,近期依然为研究者所关注^[10-12]。

为进一步提高热端部件内冷结构的强化传热效果和温度均匀性,采用阵列射流和扰流柱的复合冷却无疑更具有优势^[13-15],相对于单纯的阵列射流结构,阵列射流和扰流柱的集成结构内部的流动换热特性更为复杂,影响因素也更多,尤其是扰流柱相对于射流孔的排布方式、扰流柱形状等,国内外研究人员对此已开展了系统的研究^[16-19]。Nakamata等^[16]展开对不同排布方式的冲击射流-扰流柱的复合结构的实验研究,结果表明,扰流柱的排布方式对局部冷却效果影响显著,而射流孔的排布方式对局部冷却效果几乎没有影响。Feng等^[17]关于涡轮叶片内部冲击-针肋结构的模拟结果显示,针肋表面的平均努塞尔数比相应的端壁表面的平均努塞尔数高30%~50%。Ligrani等^[18]对具有微型针肋的冲击表面换热进行研究,结果表明,随着针肋高度的增加,相较于圆形针肋,矩形或三角形针肋产生的涡量也会增加。Chen等^[19]采用数值模拟和实验相结合的方法研究了V型肋对换热的影响,实验和数值模拟结果都显示V型肋强化了冲击中产生的二次流结构,靶板换热最大提升16%。扰流柱的集成虽然带来了表面换热强化的作用,但同时也引起附加的扰流流动阻力,因此权衡其影响不仅需要从换热增加的角度,而且还应考察其流动压降特性,进而得到综合的评价。贺光业等^[20]通过数值模拟的方法对不同形状扰流柱(菱形、正方形、圆形以及椭圆形)的阵列射流冲击复合冷却结构进行了流动换热特性研究,结果表明,扰流柱形状对于换热系数和压力系数的影响程度差异明显,综合考虑换热效果和流动阻力,他们认为圆形扰流柱相对较优。

在阵列射流-扰流柱复合冷却结构中,扰流柱的存在不仅会影响相邻射流间的相互作用以及横流效应,引起冲击靶面对流换热特性的改变;同时,在整体冷却结构中,由于扰流柱的内部导热及其表面对流换热,对综合传热性能也带来很大的影响。目前

的研究更多地关注于扰流柱对冲击靶面对流换热特性的影响,对于阵列射流-扰流柱复合冷却结构的综合传热性能分析尚不深入。本文针对阵列射流冲击-扰流柱复合冷却结构的流动换热开展数值研究,试图从冲击靶面对流换热特性和整体冷却结构综合传热性能两个方面,对扰流柱的作用机制进行更全面的分析,重点关注扰流柱相对于射流孔的布置方式、扰流柱相对于射流孔的直径比对复合冷却结构压降和换热特性的影响。

2 物理模型与计算方法

2.1 物理模型

鉴于阵列射流-扰流柱复合冷却结构中,扰流柱的存在具有导热的作用机制,因此在计算物理模型中将冲击靶板和射流孔板均设置为具有一定壁厚的固体域。根据已有的研究^[9],在阵列射流方式上采用顺排方式,即在流向上的各排射流孔均位于同一个展向截面,如图1(a)所示,冷却气流从冲击孔冲击至壁面后沿通道出口流出。射流孔径 d_j 为2mm,相邻射流孔的流向间距 x_n 和展向间距 y_n 均取为4倍射流孔直径;矩形通道高度或射流冲击间距 H 为2倍射流孔直径,第一排射流孔的中心平面距通道封闭端的壁面距离为4倍的射流孔直径,冲击靶板和射流孔板的壁厚均为1mm。扰流柱设置于射流冲击通道,如图1(b)所示。在本文研究中,扰流柱相对于射流孔的布置方式有两种形式,即顺排和叉排。对于前者,扰流柱位于流向上相邻两排射流孔的中间,对于后者,扰流柱位于相邻4个射流孔的中央。扰流柱直径 d_p 依次选择为0.5倍,1倍和2倍射流孔直径。

针对射流阵列的周期性结构特征,在计算域的展向截取3个展向间距,两侧采用空间周期性边界条件处理,在流向上选取10排射流孔。坐标原点设置于通道封闭端。

阵列射流介质为空气,采用容腔供气的进气方式,如图1(c)所示,在容腔的进口给定均匀的进气速度分布,容腔高度为4mm。

复合冷却结构材料采用GH3536高温合金,其导热系数随温度的变化近似处理为线性关系,在 $t=100^\circ\text{C}$ 时,固体导热系数 $\lambda_s=13.4\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,在 $t=1000^\circ\text{C}$ 时,固体导热系数 $\lambda_s=35.6\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

2.2 边界条件

为得到传热和压降与射流雷诺数的关系,将以相同的平均射流雷诺数为基准,故容腔进口采用设定的射流雷诺数计算所得流量作为质量流量进口,

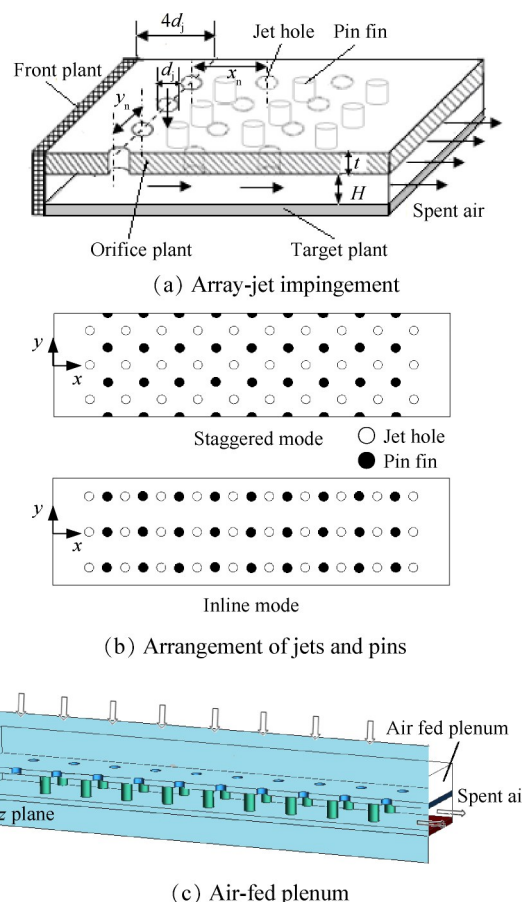


Fig. 1 Schematic diagram of computational model

进口温度为300K,进口的湍流强度和特征长度分别选取为5%和射流孔直径的3%。鉴于多股射流冲击中各射流孔流量分配存在不均匀性,在射流雷诺数定义中采用总体平均方式(Bulk-averaged),即

$$Re_j = \frac{\bar{u}_j d_j}{\nu} = \frac{4m}{n\pi d_j \mu} \quad (1)$$

式中 $\bar{u}_j$ 为阵列射流的平均喷注速度, d_j 为射流孔直径, ν 和 μ 分别为射流(空气)的运动黏度和动力黏度, m 为容腔进口的质量流量, n 为射流孔数目。

冲击靶板的底部给定恒热流,依据发动机典型的工作环境,热流密度取为 $q=5\times 10^5\text{W}/\text{m}^2$ 。

所有的固体壁面均定义为无滑移速度条件,除了通道封闭端一侧采用绝热边界条件之外,其它固体壁面均采用流-固耦合传热方式;计算域展向两侧采用空间周期性边界条件。

设定冷却空气直接排入大气环境,通道出口设为压力出口,出口压力设为 $p_{\text{out}}=101325\text{Pa}$ 。

2.3 计算方法

本文采用Fluent分离隐式求解器进行阵列射流-扰流柱复合冷却结构共轭传热的可压缩流-雷诺时均N-S稳态求解。在湍流模型选择上,预先结合特定

算例^[21]对多个双方程湍流模型进行了对比验证,计算结果如图2所示。图中给出了以射流孔中心为圆心,半径为 r 的圆形区域内靶面的平均努塞尔数沿半径变化趋势。在对比了几种湍流模型的计算结果后发现,Realizable $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型的模拟结果与实验数据的吻合程度相对最好。同时,参考前人开展的数值模拟研究,该湍流模型已被证实在射流冲击换热中具有较好的湍流特性预测精度^[22-24]。因此,本文最终选用 Realizable $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型,结合增强型壁面函数处理进行湍流模化。

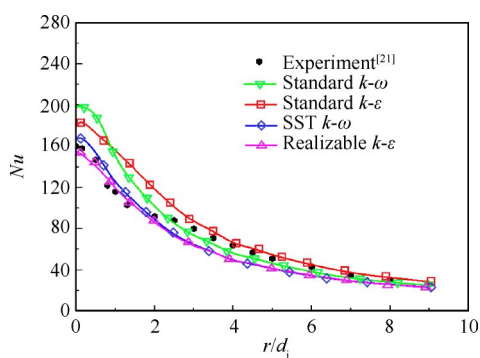


Fig.2 Comparison of CFD data of averaged Nusselt numbers on flat plate with literature data^[21]

计算中,将射流视为理想气体,其黏度和导热率根据 Sutherland 公式进行计算。采用二阶迎风差分方程进行离散,压力-速度耦合采用 SIMPLEC 算法。在计算过程中,当相对残差小于 1×10^{-4} ,认为计算收敛。

2.4 网格划分

使用 ICEM 软件对计算域进行分块网格划分,局部网格如图3所示。对固体近壁面进行网格加密处理,以保证 $z^+ < 1$,满足增强型壁面函数处理的要求。为验证网格无关性,选定 $Re_j = 2 \times 10^4$ 时的扰流柱相对于射流孔叉排模型,计算得到该模型的网格数量在 50, 100, 200, 300, 400, 500 万时靶面热侧的当量平均努塞尔数 $\overline{Nu}_{eq}$ 的变化。如图4所示,当网格数量增加至 300 万时, $\overline{Nu}_{eq}$ 趋于稳定值。综合考虑到网格数量、计算精度以及计算时间后,最终选择计算网格数量大约为 300 万。

2.5 参数定义

对于冲击靶板内侧的换热表面,局部对流换热系数和努塞尔数定义为

$$h_{\text{target}} = \frac{q_{\text{inter}}}{(T_{\text{w,inner}} - T_j)} \quad (2)$$

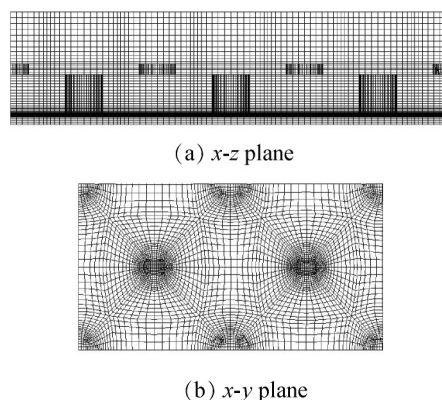


Fig.3 Schematic of local grids

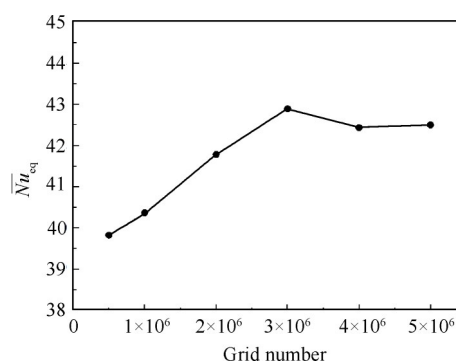


Fig.4 Grid independence study results ($Re=2 \times 10^4$)

$$Nu_{\text{target}} = \frac{h_{\text{target}} d_j}{\lambda} \quad (3)$$

式中 q_{inter} 为冲击靶板内侧的局部热流密度, $T_{\text{w,inner}}$ 为冲击靶板内侧的表面温度, T_j 为冲击射流温度, λ 为射流的导热系数。采用线平均或面积平均的方式,可以获得冲击靶板内侧展向平均努塞尔数 ($\overline{Nu}_{\text{target-x}}$) 或面积平均努塞尔数 ($\overline{Nu}_{\text{target}}$)。

通过阵列射流-扰流柱结构的压力损失系数定义为

$$\psi = \frac{\Delta p}{\rho \bar{u}_j^2 / 2} \quad (4)$$

式中 Δp 为射流进口总压与通道出口静压差, ρ 为射流密度。

注意到,在阵列射流-扰流柱复合冷却结构中,扰流柱表面的对流换热及其内部导热对于总体传热特性具有显著的影响,为此,本文基于冲击靶板加热侧的温度分布,引入了一个修正的“当量”对流换热系数 h_{eq} 概念,即

$$h_{\text{eq}} = \frac{q}{(T_{\text{w,heated}} - T_j)} \quad (5)$$

式中 q 为冲击靶板底部的热流密度, $T_{\text{w,heated}}$ 为冲击靶板加热侧的表面温度。该式以冲击靶板加热侧表面温度与射流温度之差作为传热温差,可以体现

出阵列射流-扰流柱复合冷却结构的总体传热性能。

类似地,阵列射流-扰流柱复合冷却结构的“当量”努塞尔数定义为

$$Nu_{eq} = \frac{h_{eq} d_j}{\lambda} \quad (6)$$

为评价换热增加与压降损失的综合影响,引入综合性能因子^[20],定义为

$$I = \frac{\overline{Nu} / \overline{Nu}_0}{(\psi / \psi_0)^{1/3}} \quad (7)$$

式中下标0表征无扰流柱情形,作为对比基准。基于冲击靶面平均努塞尔数 $\overline{Nu}_{target}$ 和阵列射流-扰流柱复合冷却结构“当量”平均努塞尔数 $\overline{Nu}_{eq}$,综合性能因子分别表示为 I_{target} 和 I_{eq} 。

3 计算结果与分析

3.1 扰流柱相对射流孔排布方式的影响

本节在 $d_p/d_j=1$ 的条件下讨论扰流柱相对射流孔排布方式对流动换热特性的影响。图5为射流平均雷诺数 $Re_j=1.5 \times 10^4$ (或 $u_j \approx 100 \text{ m/s}$)时,光滑靶板、扰流柱叉排于射流孔以及扰流柱顺排于射流孔等方式下冲击靶面上局部努塞尔数的分布云图,图6显示了沿流向的冲击靶面展向平均努塞尔数分布。

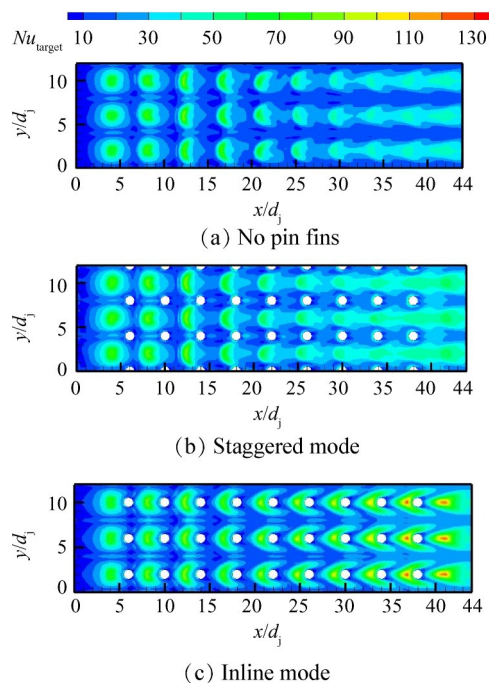


Fig. 5 Local Nusselt number distribution on target surface under $d_p/d_j=1$ and $Re_j=1.5 \times 10^4$

从分布云图中可以看出,在对应于射流冲击的区域存在较高的局部对流换热系数区域,无论是无

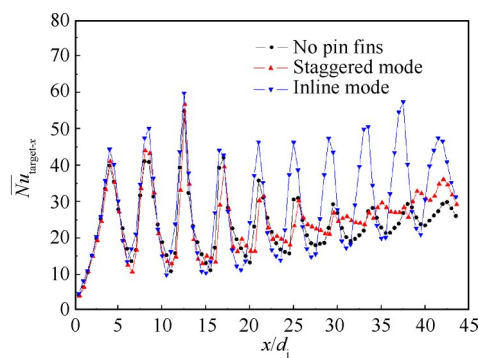


Fig. 6 Laterally-averaged Nusselt number distribution on target surface under $d_p/d_j=1$ and $Re_j=1.5 \times 10^4$

扰流柱还是有扰流柱情形,位于通道封闭端一侧的前2排射流形成类似于单股射流冲击的局部对流换热系数分布特征,且射流冲击驻点完全对应于射流孔轴线;但是,从第4排射流孔始,射流冲击驻点开始偏离于射流孔轴线,特别是在阵列射流的下游,显然这是由于前排射流在通道内所形成的横流影响。如图7和图8所示,在前排的射流可以垂直地冲击于靶面,但在后排的射流则发生明显的偏转。由于前排射流诱导的通道内部横流效应,位于阵列射流后排的射流被强迫发生向下游的偏转,因此其驻点向下游移动且局部对流换热降低;另一方面,伴生与通道横流的共同作用,沿流向的对流换热系数分布均匀性相对于前排区域得到了改善。

扰流柱的存在,对流通道的横流而言起到了绕流作用,相对于扰流柱叉排方式,扰流柱相对于射流孔的顺排方式具有更为显著的作用机制,其一,扰流柱对于紧邻其后的射流具有保护作用,削弱了上游横流对冲击射流的偏转影响,因此射流冲击驻点的局部对流换热得以增强;其二,扰流柱对于上游射流的横流具有更强的绕流作用,而射流孔排之间的区域也由于扰流柱对横流的分流作用,在扰流柱两侧形成较强的对流换热。综上所述,扰流柱在阵列射流中后排的展向平均努塞尔数峰值显著高于叉排方式。

对于阵列射流冲击,各排射流孔的流量分配存在显著的不均匀性,如图9所示。对于后排射流,由于其距离通道出口的流程短,射流更易于排出,因而具有更高的射流速度;相反地,位于前排的射流孔,由于流程较长且受到后排射流的阻碍,单排孔的质量流量要小于后排。在扰流柱通道中,各排射流孔的流量分配不均匀性有增大的趋势,体现出扰流柱对上游流动的影响。在扰流柱相对于射流孔顺排方式下,由于扰流柱对于下游的射流具有保护作用,同

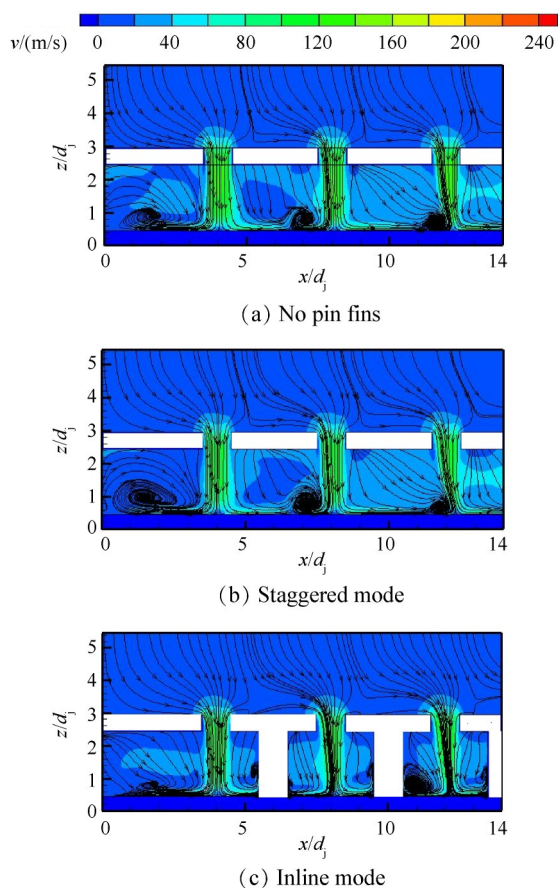


Fig. 7 Local streamlines in front rows of array-jets

时,阵列射流后排的流量分配大,因而可以显著增强局部的对流换热。

图10给出了冲击靶板的靶面和加热侧面积平均努塞尔数以及压力损失系数随射流冲击雷诺数的变化。由图10(a)可以看出,无论是冲击靶面还是加热侧的面积平均努塞尔数随射流冲击雷诺数的增加基本呈现出线性增加的趋势,扰流柱相对射流孔顺排方式的换热强化效果更为显著。在无扰流柱情形下,冲击靶面的面积平均努塞尔数与加热侧的面积平均努塞尔数基本一致,但是在有扰流柱时,加热侧的当量平均努塞尔数 $\overline{Nu}_{eq}$ 较冲击靶面平均努塞尔数 $\overline{Nu}_{target}$ 有较大幅度的提高。从图10(b)可以看出,压力损失系数 ψ 随着射流冲击雷诺数的增加有一定的提高,这是由于射流平均速度加大导致其通过射流孔的流动损失增加,同时,射流冲击靶面后壁面射流的壁面剪切加剧,沿通道流向的流动损失也会有相应增加。存在扰流柱时,压力损失系数相对于单纯的阵列射流冲击有较大的增加,但顺排方式的压力损失系数却低于叉排方式。

图11(a)给出了扰流柱排布方式对于冲击靶面和加热侧换热增加比的影响。以无扰流柱情形作为

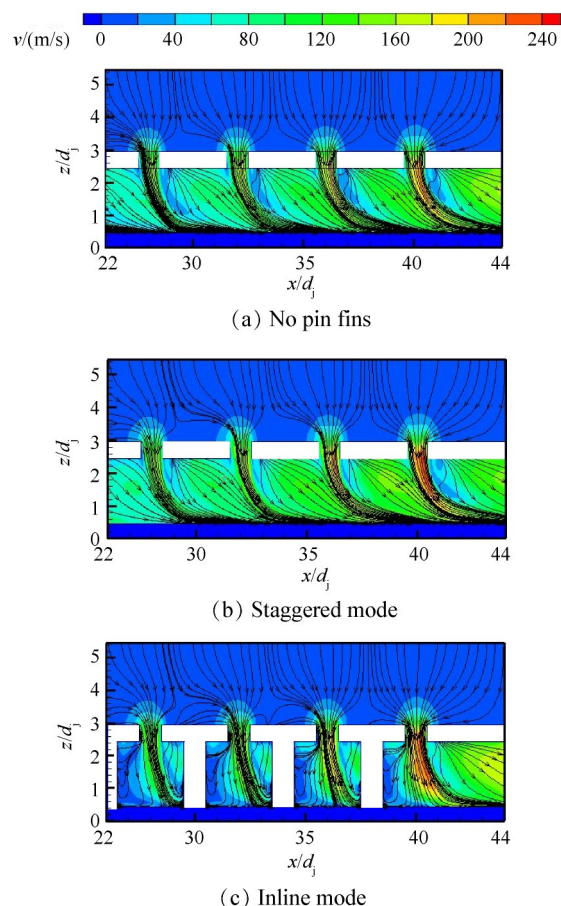


Fig. 8 Local streamlines in rear rows of array-jets

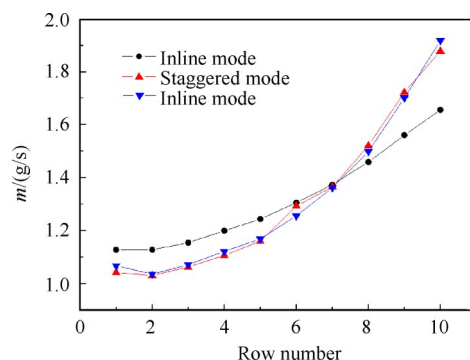


Fig. 9 Flow rate distribution through jet holes

对比基准,可以发现,扰流柱顺排和叉排方式的冲击靶面对流换热增加约30%和10%,在所涉及的射流冲击雷诺数范围内变化很小;然而,对于加热侧,当量对流换热增加比与射流雷诺数关系甚大,随着射流雷诺数的增加,当量对流换热增加比减小,这是由于,在较小的射流雷诺数下,射流冲击换热的强度相对较弱,此时扰流柱的导热及其表面对流换热对于阵列射流-扰流柱复合冷却结构的总体传热的贡献更加显著,在 $Re_j=1 \times 10^4$ (或 $u_j \approx 76 \text{ m/s}$) 时,扰流柱顺排和叉排方式的当量对流换热增加比分别达到1.7和

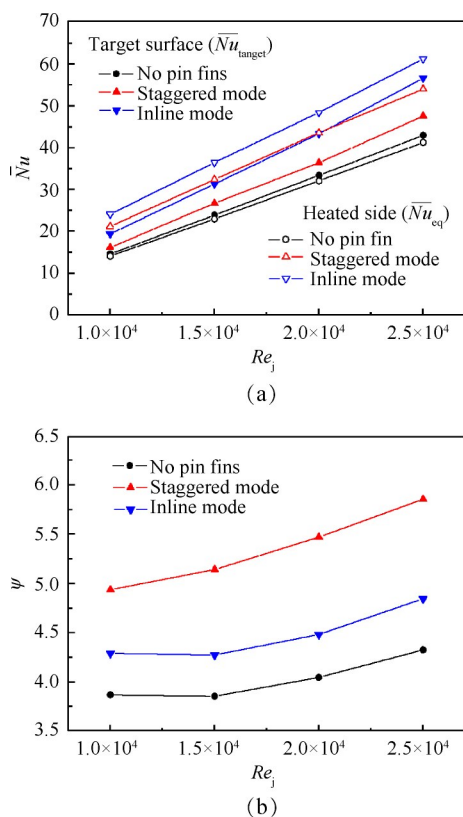


Fig. 10 Effect of pin-fins arrangement on area-averaged Nusselt number and pressure loss coefficient

1.5, 在 $Re_j = 2.5 \times 10^4$ (或 $u_j \approx 128 \text{ m/s}$) 时, 当量对流换热增加比也分别达到 1.5 和 1.3。

图 11(b) 给出了扰流柱排布方式对于综合性能因子的影响, 显然, 扰流柱顺排方式要优于叉排方式。同时注意到采用冲击靶面的对流换热增加比与采用加热侧的对流换热增加比进行综合性能的评价存在较大的差异。前者反映了扰流柱对于冲击靶面对流换热增强与压降损失的综合影响, 后者则反映了扰流柱对于阵列射流-扰流柱冷却整体结构传热-压降的综合影响。由于扰流柱表面的对流换热及其内部导热作用在阵列射流-扰流柱复合冷却结构的总体传热中得以体现, 因此 I_{eq} 的数值要大于 I_{target} 。

3.2 扰流柱相对射流孔直径比的影响

本节在扰流柱相对射流孔叉排方式下, 讨论扰流柱相对射流孔直径比的影响。

图 12 显示了 $Re_j = 1.5 \times 10^4$ 时的冲击靶板加热侧温度分布, 可以看出, 随着扰流柱直径的增加, 在除了紧邻冷却结构封闭端之外的冲击靶板区域, 加热侧的温度呈现出显著的降低, 表明阵列射流-扰流柱复合冷却结构的总体传热得以强化。

然而, 若以冲击靶面的对流换热来评价扰流柱直径的影响, 则会出现截然不同的结果, 见图 13 和图

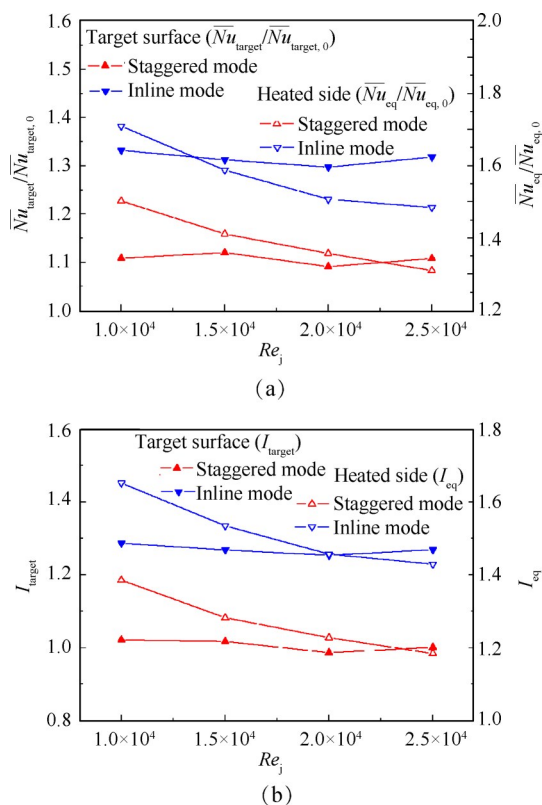


Fig. 11 Effect of pin-fins arrangement on $\bar{Nu}/\bar{Nu}_0$ and I

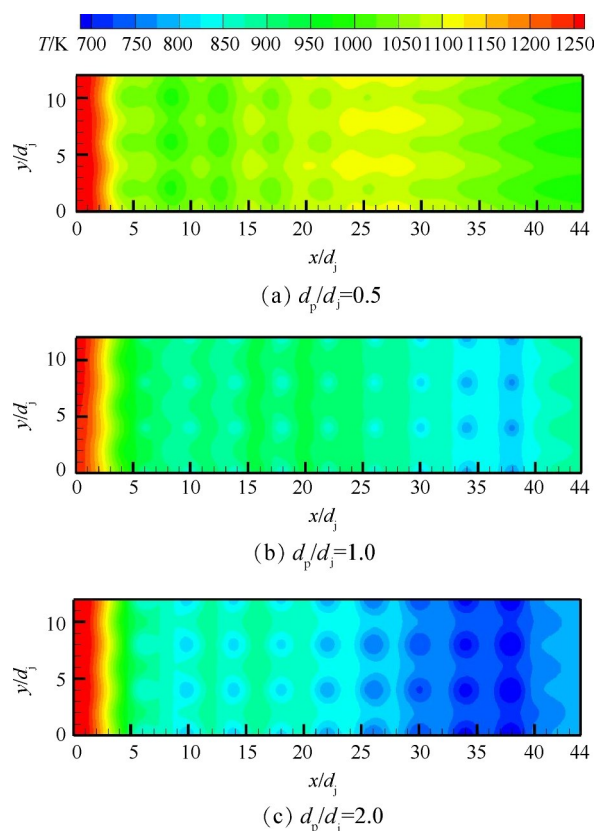


Fig. 12 Temperature distributions on the heated side under $Re_j = 1.5 \times 10^4$

14。在所研究的三个扰流柱直径比下, $d_p/d_j = 1$ 时的冲击靶面对流换热最强, 相对于 $d_p/d_j = 1$ 的情况, $d_p/d_j = 0.5$

的绕流作用降低,而 $d_p/d_j=2$ 时,在扰流柱尾缘形成尺度较大的回流(见图13(c)),由于扰流柱尾缘回流区充斥着低动量的流体,壁面的对流换热降低。因此,在大的扰流柱直径下,冲击靶面的对流换热甚至可能低于无扰流柱的情形,如图14所示。

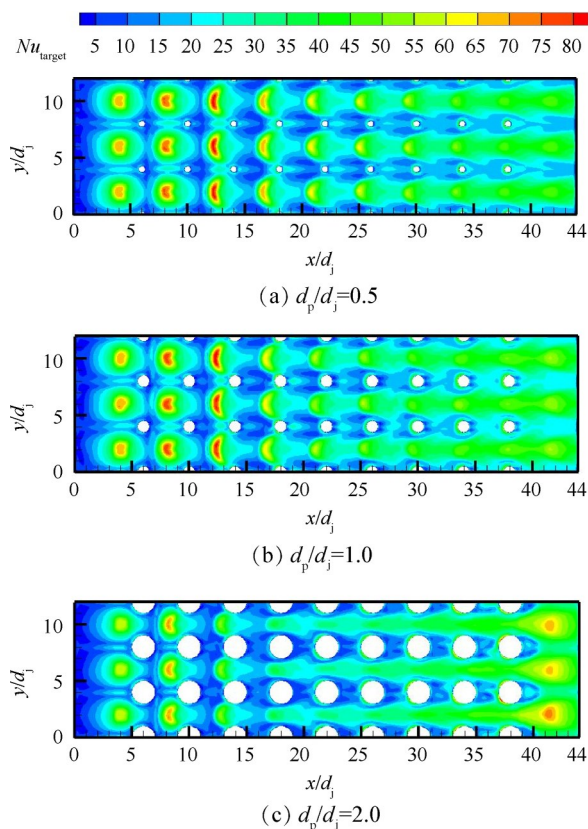


Fig. 13 Local Nusselt number distribution on target surface under staggered mode and $Re_j=1.5 \times 10^4$

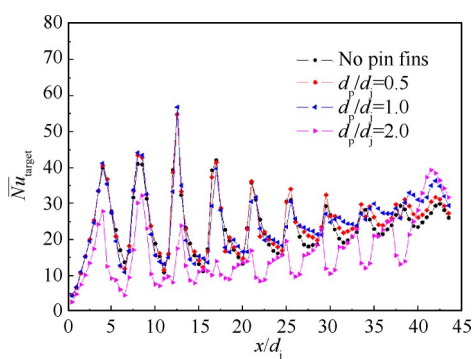


Fig. 14 Laterally-averaged Nusselt number distribution on target surface under staggered mode and $Re_j=1.5 \times 10^4$

图15给出了扰流柱直径比对于综合性能因子的影响。相对于扰流柱扰流柱排布方式的影响(见图11(b)),可以更加清晰地阐明采用冲击靶面的对流换热增加比与采用加热侧的对流换热增加比进行综合性能的评价所存在的差异,甚至得出截然相反的结论。若采用冲击靶面的对流换热增加比进行评

价,则大直径扰流柱的综合性能因子低于1,而采用加热侧的对流换热增加比进行评价,则发现大直径扰流柱的综合性能因子在 $Re_j=1 \times 10^4$ 和 1.5×10^4 时最高,在更高的射流雷诺数下,基本与 $d_p/d_j=1$ 的综合性能因子相同,明显高于 $d_p/d_j=0.5$ 的综合性能因子。鉴于阵列射流-扰流柱复合冷却结构的传热过程具有高度的导热-对流耦合特征,因此,仅仅考察冲击靶面的对流换热特性是不全面的。

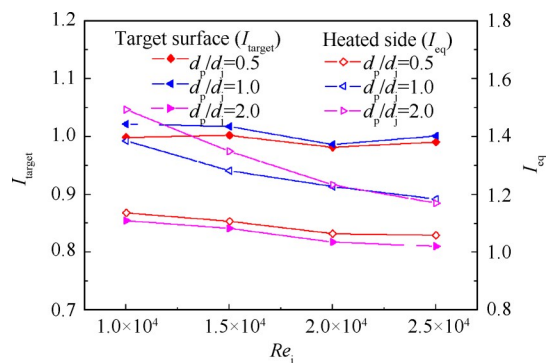


Fig. 15 Effect of fin-to-hole diameter ratio on I

4 结论

针对阵列射流冲击-扰流柱复合冷却结构,数值研究分析了扰流柱相对于射流孔的布置方式(顺排和叉排)、扰流柱相对于射流孔的直径比($d_p/d_j=0.5, 1, 2$)对于压降和换热特性的影响,主要研究结论如下:

(1) 扰流柱相对于射流孔呈顺排方式的对流换热效果要优于叉排方式,就冲击靶面的对流换热而言,两者的对流换热相对于无扰流柱情形分别增加约30%和10%;同时,顺排方式的压力损失系数却低于叉排方式。

(2) 引入了冲击靶板加热侧当量对流换热系数,可以体现出阵列射流-扰流柱复合冷却结构的导热-对流耦合传热性能。研究表明,采用冲击靶面的对流换热增加比与采用加热侧的对流换热增加比进行综合性能的评价存在显著的差异。

(3) 若以冲击靶面的对流换热来评价扰流柱直径的影响, $d_p/d_j=1$ 时的冲击靶面对流换热最强, $d_p/d_j=2$ 的综合性能因子低于1;而采用加热侧的对流换热增加比进行评价, $d_p/d_j=2$ 的综合性能因子在 $Re_j=1 \times 10^4$ 和 1.5×10^4 时最高,在更高的射流雷诺数下与 $d_p/d_j=1$ 的综合性能因子基本相同。

参考文献

[1] Bunker R S. Gas Turbine Heat Transfer: Ten Remaining

- Hot Gas Path Challenges[J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2007, 129: 441-453.
- [2] Martin H. Heat and Mass Transfer Between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces [J]. *Advances in Heat Transfer*, 1977, 13: 1-60.
- [3] Florschuetz L W, Truman C R, Metzger D E. Stream-wise Flow and Heat Transfer Distributions for Jet Array Impingement with Crossflow[J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1981, 103: 337-342.
- [4] Florschuetz L W, Metzger D E, Su C C. Heat Transfer Characteristics for Jet Array Impingement with Initial Crossflow [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1984, 106: 34-41.
- [5] Huber A M, Viskanta R. Effect of Jet-Jet Spacing on Convective Heat Transfer to Confined, Impinging Arrays of Axisymmetric Air Jets [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1994, 37: 2859-2869.
- [6] Goodro M, Park J, Ligrani P, et al. Effects of Hole Spacing on Spatially-Resolved Jet Array Impingement Heat Transfer [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51: 6243-6253.
- [7] Xing Y, Spring S, Weigand B. Experimental and Numerical Investigation of Heat Transfer Characteristics of In-line and Staggered Arrays of Impinging Jets [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2010, 132(9).
- [8] Zhang Jingzhou, Li Ligu. High-Resolution Heat Transfer Coefficients Measurement for Jet Impingement Using Thermochromic Liquid Crystals [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2001, 14(4): 205-209.
- [9] Weigand B, Spring S. Multiple Jet Impingement-A Review [J]. *Heat Transfer Research*, 2011, 42: 101-142.
- [10] Shan Y, Zhang J Z, Xie G N. Convective Heat Transfer for Multiple Rows of Impinging Air Jets with Small Jet-To-Jet Spacing in a Semi-Confined Channel [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 86: 832-842.
- [11] 闫建坤, 郭 涛, 朱惠人, 等. 微尺度阵列射流冲击结构换热特性实验研究[J]. 推进技术, 2016, 37(9): 1681-1687. (YAN Jian-kun, GUO Tao, ZHU Hui-ren, et al. Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics on Micro-Scale Array Jet Impingement [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(9): 1681-1687.)
- [12] Ren Z, Buzzard W C, Ligrani P M, et al. Impingement Jet Array Heat Transfer: Target Surface Roughness Shape, Reynolds Number Effects[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2017, 31(2): 346-357.
- [13] Yamawaki S, Nakamata C, Imai R, et al. Cooling Performance of an Integrated Impingement and Pin Fin Cooling Configuration [R]. *ASME GT 2003-38215*.
- [14] Funazaki K, Hachiya K. Systematic Numerical Studies on Heat Transfer and Aerodynamic Characteristics of Impingement Cooling Devices Combined with Pins [R]. *ASME GT 2003-38256*.
- [15] 赵乃芬, 谭晓茗, 李业芳, 等. 高致密多孔层板结构选型研究[J]. 推进技术, 2014, 35(11): 1517-1522. (ZHAO Nai-fen, TAN Xiao-ming, LI Ye-fang, et al. Research on Structures of High-Density Laminate Porous Plates [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(11): 1517-1522.)
- [16] Nakamata C, Mimura F, Matsushita M, et al. Local Cooling Effectiveness Distribution of an Integrated Impingement and Pin Fin Cooling Configuration[R]. *ASME GT 2007-27020*.
- [17] Feng X X, Tian S Q, Bai J T, et al. Numerical Investigation of an Integrated Impingement and Pin-Fin Cooling Configuration in a Wedge Duct[R]. *ASME GT 2014-26185*.
- [18] Ligrani P M, Ren Z, Buzzard W C. Impingement Jet Array Heat Transfer with Small-Scale Cylinder Target Surface Roughness Arrays[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 107: 895-905.
- [19] Chen L L, Brakmann R G A, Weigand B, et al. Experimental and Numerical Heat Transfer Investigation of an Impingement Jet Array with V-Ribs on the Target Plate and on the Impingement Plate[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2017, 68: 126-138.
- [20] 贺业光, 郭曾嘉, 李润东, 等. 扰流柱形状对冲击冷却综合换热效率影响研究[J]. 推进技术, 2019, 40(1): 212-221. (HE Ye-guang, GUO Zeng-jia, LI Run-dong, et al. Numerical Simulation of Efficiency Index of Impingement Cooling System with Different Pin Fins Shapes [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(1): 212-221.)
- [21] Baughn J W, Shimizu S. Heat Transfer Measurements from a Surface with Uniform Heat Flux and an Impinging Jet [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1989, 111: 1096-1098.
- [22] Zuckerman N, Lior N. Impingement Heat Transfer: Correlations and Numerical Modeling[J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2005, 127: 544-552.
- [23] Singh D, Premachandran B, Kohli S. Experimental and Numerical Investigation of Jet Impingement Cooling of a Circular Cylinder [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 60: 672-688.
- [24] Mohammadpour J, Zolfagharian M M, Mujumdar A S, et al. Heat Transfer under Composite Arrangement of Pulsed and Steady Turbulent Submerged Multiple Jets Impinging on a Flat Surface [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 86: 139-147.

(编辑:朱立影)