

狭缝斜肋内冷通道流动和换热特性的数值研究^{*}

邓贺方, 姜玉廷, 张 建, 陆松兵, 郑 群

(哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 为了探究狭缝斜肋的流动和换热特性, 进一步挖掘传统斜肋的性能, 采用数值模拟的方法, 研究了五种不同位置和倾斜角度的狭缝对45°斜肋流动和换热特性的影响, 计算的进口雷诺数为 $2 \times 10^4 \sim 8 \times 10^4$, 并与传统的实心肋进行了对比分析。结果表明, 狭缝的存在显著改变了冷却通道的流动结构以及换热分布, 降低了冷却通道的阻力损失, 减小了通道整体的强化换热系数, 但同时增加了肋片表面的强化换热系数, 且狭缝的位置和倾斜角度的不同对通道性能也存在一定的影响。对比综合热效率, 狭缝斜肋相比实心肋增加了约12%~15%。

关键词: 内部冷却; 狭缝斜肋; 阻力损失; 换热特性; 数值模拟

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2020) 09-2070-07

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200197

Numerical Study on Flow and Heat Transfer Characteristics of Internal Cooling Channel with Slit Inclined Ribs

DENG He-fang, JIANG Yu-ting, ZHANG Jian, LU Song-bing, ZHENG Qun

(College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to investigate the flow and heat transfer characteristics of slit inclined ribs and further improve the performance of traditional inclined ribs, the effects of five kinds of slits with different locations and angles on flow and heat transfer characteristics of 45° inclined ribs were studied by using numerical simulation method. The inlet Reynolds number calculated in this study is ranged from 2×10^4 to 8×10^4 . A comparison and analysis with traditional solid ribs was conducted. The results show that the slits change the flow structure and heat transfer distribution of cooling channel. The slits decrease the resistance loss and enhanced heat transfer coefficient of cooling channel, but it increases the enhanced heat transfer coefficient of the rib surfaces. On the other hand, the location and the angle of the slits also have some effects on flow and heat transfer performance of cooling channel. The thermal performance factors of the slit inclined ribs increase by 12%~15%, compared with solid ribs.

Key words: Internal cooling; Slit inclined rib; Resistance losses; Heat transfer characteristics; Numerical simulation

1 引 言

航空发动机涡轮叶片工作在高温、高压、高雷诺

数和高速流体的环境中,其表面换热系数相对较高。若采用实心叶片,叶片壁面的温度将远高于材料的耐温极限,所以通常在高温叶片表面采用气膜冷却

^{*} 收稿日期: 2020-04-07; 修订日期: 2020-05-13。

基金项目: 国家自然科学基金(51809065); 黑龙江省自然科学基金(QC2017047)。

作者简介: 邓贺方, 硕士生, 研究领域为航空发动机热端部件传热冷却。E-mail: 652286297@qq.com

通讯作者: 姜玉廷, 博士, 副教授, 研究领域为高温涡轮传热与冷却技术。E-mail: jiangyuting07314@126.com

引用格式: 邓贺方, 姜玉廷, 张 建, 等. 狭缝斜肋内冷通道流动和换热特性的数值研究[J]. 推进技术, 2020, 41(9):2070-2076. (DENG He-fang, JIANG Yu-ting, ZHANG Jian, et al. Numerical Study on Flow and Heat Transfer Characteristics of Internal Cooling Channel with Slit Inclined Ribs[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(9):2070-2076.)

以及热障涂层作为热防护措施,同时在叶片内部使用冷却通道。内冷通道中的冷却气体会带走大量传递到壁面的热量,从而使叶片温度处于正常的工作范围。为了进一步增强换热能力,肋片扰流被广泛应用于内冷通道中,通过肋片的扰流作用使流体发生分离和再附着来强化换热。长期以来,研究人员对肋化冷却通道进行了大量研究,包括通道的几何参数、肋片的几何参数以及气动参数。

早期的研究主要集中在连续的重复平行肋,其影响因素主要包括通道的形状和宽高比 AR ,肋高 e ,肋间距 p 和肋宽 w 等。Han等^[1-3]对内冷通道进行了系统的研究,发现在雷诺数 Re 为 $1.5 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$ 时,肋化通道的换热系数是光滑通道的3倍左右,随着通道的宽高比增大阻力系数急剧增大,因此他们认为小的宽高比通道具有更好的综合热效率。Chung等^[4]也分析了不同宽高比通道对换热的影响,通道宽高比的增加会减小换热系数,在宽高比相同时,可以在肋化壁面上设置纵向肋来增强换热效果。Kaewchoothong等^[5]研究了不同角度的直肋和V肋,其中换热能力最高的为 45° 和 60° V肋,综合热效率最高的为 30° 直肋和 60° V肋。Wright等^[6]指出,简单地增加肋宽并不能提高换热能力,必须同时适当调整肋间距才能改善换热性能。周明轩等^[7]和Yang等^[8]对高阻塞比冷却通道的研究结果也表明,肋间距的选取对换热性能有显著的影响,且上下壁面对称布置肋片的换热能力要明显高于交错布置。Tanda等^[9]对比单侧壁面布置肋片和双侧壁面布置肋片流动换热特性,双侧壁面布置肋片的换热系数比单侧壁面布置肋片提高了10%~19%,然而阻力系数增加到了3倍左右。刘聪等^[10]探究了三角形截面V肋,与传统的矩形截面V肋相比,其换热系数分布更加均匀且换热能力更强。

近年来,为了改善传统肋片的冷却效果,在其基础上又发展了穿孔肋和狭缝肋。通过在固体肋上开设小孔或者狭缝结构,能够有效降低冷却通道的流动阻力,同时还可以减少局部高温,使壁面温度分布更加均匀。相关的研究表明,穿孔肋比狭缝肋有更高的换热能力^[11]。然而狭缝的阻力损失更低,因此仍具有重要的研究意义。Hwang等^[12]实验测量了狭缝肋的换热分布,并且建立了流动与换热的经验关联式。Yang等^[13]在实心肋上对称开设了四个狭缝,并通过数值研究发现这种狭缝肋具有更加剧烈的湍流混合效应,可以显著提高综合热效率。Panigrahi等^[14]和Tariq等^[15]采用PIV技术分别测量了狭缝对矩

形肋和五边形肋的流动结构的影响规律,发现狭缝能够减弱肋片后方的回流,同时使得再附点前移。狭缝的形状同样对流动和换热有显著影响。Zheng等^[16-17]对V形狭缝和变截面狭缝进行了详细研究。另外,Li等^[18]研究了狭缝的长度与肋高之间的关系,结果发现,在低肋上开设狭缝会降低换热系数和阻力系数,而在高肋上开设短的狭缝则能够有效增大换热能力。

上述有关狭缝肋的研究都是针对 90° 直肋,然而实际上斜肋比直肋具有更高的综合热效率,因此为了进一步发掘传统斜肋的性能,本文在 45° 斜肋的基础上,采用数值方法分析不同位置以及倾斜角的狭缝对冷却通道流动和换热特性的影响,旨在为内冷通道的设计提供有益的参考。

2 数值方法

2.1 几何模型

图1为计算所使用的模型结构和尺寸,通道进出口区域各延长400mm以消除进出口效应,中部肋化加热区域长 L 为650mm,通道的横截面为边长80mm的正方形。肋片等间距的布置在通道底面,肋高 e 为10mm,肋宽 w 为5mm,肋间距 p 为80mm,与流向夹角为 45° 。本文研究的肋片如图2所示,Case 1为实心肋,Case 2~6为狭缝肋,所有方案的狭缝入口高度均为2.5mm,其中Case 2的狭缝中心距离肋片底部5mm,Case 3的狭缝中心距离肋片底部6.5mm,Case 4的狭缝中心距离肋片底部3.5mm,Case 5和Case 6在Case 2的基础上分别倾斜 15° 和 30° 。

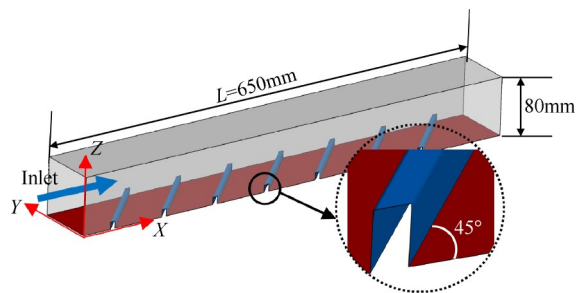


Fig. 1 Schematic of computational domain

2.2 网格划分

采用ICEM CFD对计算模型划分六面体结构化网格,如图3所示。对近壁面以及肋片附近的网格进行加密处理,第一层网格高度为0.015mm,保证在所计算的雷诺数范围内 $y^+ < 1$ 。为了保证计算精度以及节约计算资源,图4给出Case 1和Case 6在进口雷诺

数 Re 为 8×10^4 时的网格无关验证结果,对于 Case 1 固体肋,最终计算采用的网格数量为 355 万。对于 Case 6 狭缝肋,当网格数量为 475 万时,继续增加网格数量对努塞尔数的影响不大。最终 Case 2~6 所采用网格数量为 475 万左右。

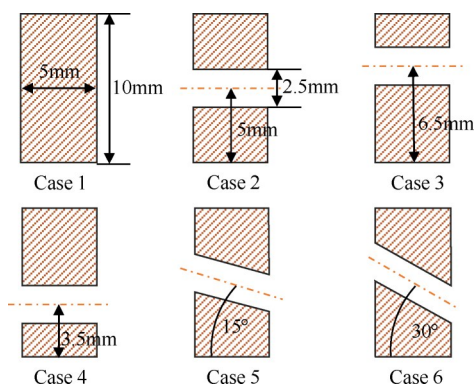


Fig. 2 Cross sections of different ribs

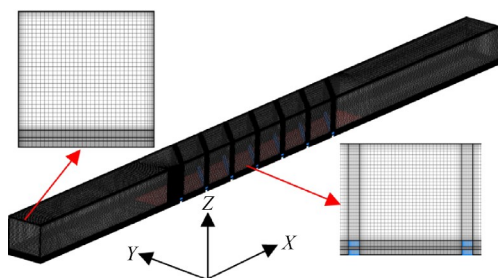


Fig. 3 Schematic of computational mesh

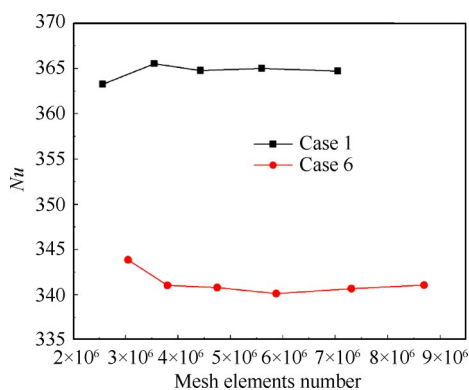


Fig. 4 Variation of area averaged Nusselt number with mesh number

2.3 参数定义和边界条件

进口雷诺数定义为

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (1)$$

式中 ρ 为进口流体密度, U 为进口流速, D 为通道的水力直径, 本文中为 80mm。 μ 为粘性系数。

努塞尔数定义为

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \quad (2)$$

式中 h 为表面传热系数, λ 为流体的导热率。

强化换热系数定义为 Nu/Nu_0 , 其中 Nu_0 采用 Dittus-Boelter 关联式计算, 即

$$Nu_0 = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (3)$$

式中 Pr 为普朗特数, 本文取 0.703。

阻力系数定义为

$$f = \frac{\Delta p}{2\rho U^2 L} \quad (4)$$

式中 Δp 为进出口总压差。

阻力损失定义为 ff_0 , 其中 f_0 采用 Blasius 关联式计算

$$f_0 = 0.079 Re^{-0.25} \quad (5)$$

综合热效率定义为

$$\eta = \frac{Nu/Nu_0}{(ff_0)^{1/3}} \quad (6)$$

冷气进口温度为 293.15K, 湍流度为 5%, 进口质量流量根据进口雷诺数确定, 出口给定为大气压出口, 除了底部壁面和肋片给定等温边界条件 337.15K, 其余所有壁面均为绝热无滑移壁面。

2.4 计算方法及验证

采用商业软件 CFX18.0 进行数值模拟。湍流模型的选取对于计算结果有着重要影响, 以往研究表明, SST 湍流模型在预测肋片扰流时与实验结果吻合较好。为验证数值方法的准确性, 在正式计算前, 将 SST 湍流模型计算得到的平均强化换热系数与 Wright 等^[19] 的实验测量结果进行对比, 如图 5 所示。可观察到, 计算得到的通道加热段强化换热系数 Nu/Nu_0 略小于实验结果, 而在变化趋势上与实验结果保持一致, 尽管在数值上存在 10%~15% 的偏差, 但考虑到实验的误差以及计算模型与真实模型的细微差别, 这种偏差范围是可以接受的。

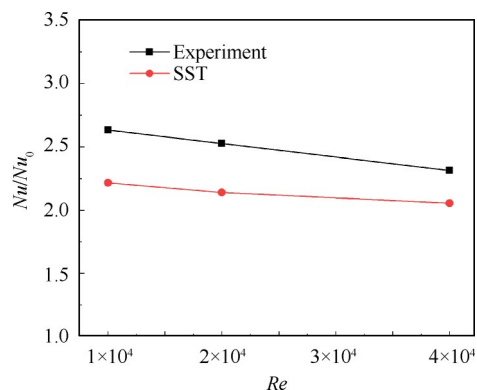


Fig. 5 Comparison between the numerical and experimental results

3 结果与讨论

3.1 流动特性分析

图6给出了各个方案下三个截面的 X 向速度分布云图,选取具有代表性的第三根肋片附近的截面进行分析。对于同一个方案, $Y/D=0.75$ 时, $X-Z$ 截面的主流流速要明显小于另外两个截面,因为对于斜肋通道,在内侧壁面附近会存在一个角涡,并且角涡的转速较低会导致换热系数减小。对比不同的方案,Case 1实心肋的后方低速区要比其他狭缝更大。对于Case 2~4,随着狭缝水平高度的降低,其低速区面积也逐渐减小。此外,随着倾斜角度的增大,底面附近的低速区也随之减小,然而,在上肋后方的低速区面积又逐渐增大。

图7为不同截面的速度流线图,显然,狭缝的存在使得流场结构发生了显著改变。肋片的扰流会使得附近的流动发生分离,对于Case 1实心肋,分离作用更加明显,在肋后方产生了较大的回流涡,这必然会导致更高的阻力损失。而对于狭缝肋,由于部分

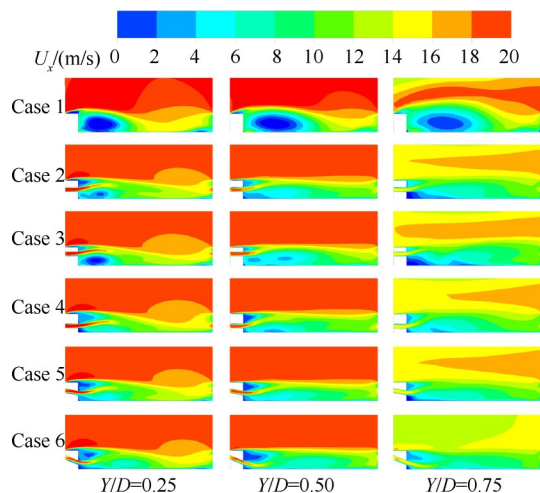


Fig. 6 Velocity distributions on three $X-Z$ slices at $Re=8 \times 10^4$

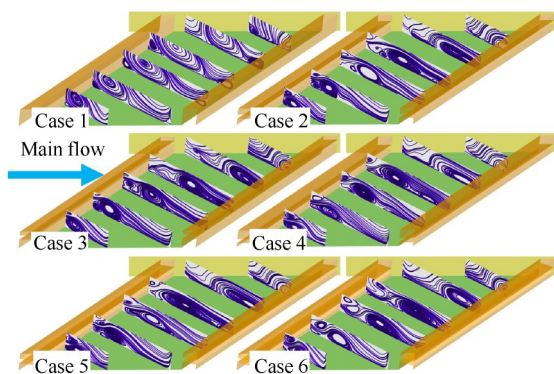


Fig. 7 Streamlines for six slices at $Re=8 \times 10^4$

主流流经狭缝形成了高速的二次射流,与肋后方的低速回流区混合产生强烈的冲击,改变了壁面附近的流动结构,狭缝的形式不同,产生的影响也不一样。与实心肋相比,壁面附近的回流涡沿流向移动更远,这种位移是由狭缝下游的强剪切流引起的,同时还在上肋附近产生一个较小的回流涡。以Case 2为基准,Case 3的狭缝位置更高,上肋较薄,导致其附近的回流涡更小,而在Case 4中狭缝的位置较低,Case 5和Case 6具有一定的倾斜角,这些都导致了上肋厚度的增加,从而使得上肋附近的回流涡变大。

图8给出了不同方案的阻力损失 f/f_0 随进口雷诺数的变化曲线,随着进口雷诺数的增加,阻力损失也逐渐增加。Case 1实心肋的阻力损失要远高于狭缝肋,是狭缝肋的1.5~1.8倍。Case 6的阻力损失仅次于Case 1,这是由于Case 6的狭缝倾斜角较大,二次射流对底面的冲击更大造成的,而Case 5的狭缝倾斜角较小,因此其阻力损失略高于相同高度的Case 2。对比水平狭缝方案Case 2~4,其阻力损失随着狭缝水平高度的增加而减小。

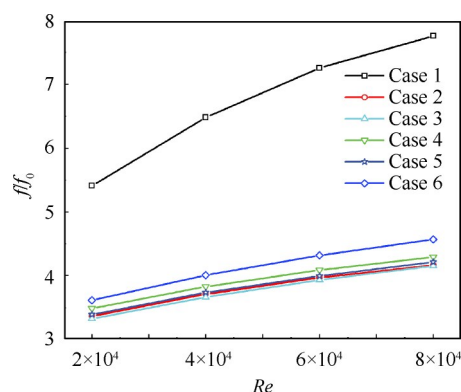


Fig. 8 Variation of friction factor ratios with Reynolds numbers

3.2 换热特性分析

流动结构的变化必然会导致换热能力的改变,图9为进口雷诺数 $Re=8 \times 10^4$ 时的底面强化换热系数 Nu/Nu_0 的分布云图。由于肋片等间距布置,其换热分布也呈现出周期性变化,同时受壁面和斜肋共同作用产生的角涡影响,主流方向底面右侧的换热能力要高于左侧。Case 1实心肋的换热能力明显高于其他方案,尤其是 Nu/Nu_0 大于3.2的强换热区域面积较大。而Case 2~4的强化换热系数 Nu/Nu_0 分布差别较小,说明狭缝水平高度的变化对底面换热影响较小,肋后方的强换热区的分布呈现“丫”字形。需要注意的是,当狭缝的水平高度逐渐降低时,肋前方的条状

强换热区逐渐消失。此外,对于狭缝倾斜角较小的 Case 5,整体的强化换热系数分布与水平狭缝方案基本相同。而对于 Case 6,其狭缝倾斜角较大,强换热区出现了间断,被分为肋后的小面积区域以及肋下游位置的大面积区域。

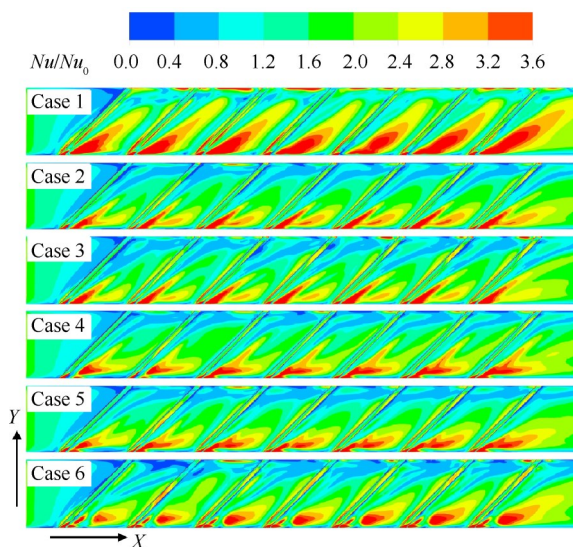


Fig. 9 Heat transfer distribution on the bottom surface at $Re=8\times 10^4$

对于带肋通道,除了流动分离和再附,主流对肋片的直接冲击也能使得强化换热系数增加。图 10 给出了进口雷诺数 Re 为 8×10^4 ,不同方案的第四根肋片的强化换热系数 Nu/Nu_0 分布云图。可以发现不论是实心肋还是狭缝肋,其靠近底面的强化换热系数都相对较小,而肋片顶部附近的强化换热系数则相对较大,主要这是由于沿流向的速度分布差异所导致的,如图 6 所示,底部的流向速度小于主流区域,因而对肋片产生的冲击作用也相对较小。另外由于主流在流经狭缝时,其沿流向的速度会增加,因在狭缝的入口附近也出现了强换热区域。总的来说,对于狭缝肋,其上肋的换热能力要强于下肋。

图 11 为不同进口雷诺数下通道底面(不包括肋片)的平均强化换热系数 Nu/Nu_0 分布曲线。可以发

现,所有方案的 Nu/Nu_0 都随着进口雷诺数增加而略微下降。Case 1 实心肋通道底面的强化换热系数 Nu/Nu_0 要明显高于狭缝肋,大约为狭缝肋的 1.25 倍左右,这是因为实心肋诱导的流动分离和再附要更强,所以如果冷却通道壁面需要更高的换热能力,则实心肋的性能要优于狭缝肋。而对于狭缝肋 Case 2~6,底面强化换热系数 Nu/Nu_0 相差较小,且进口雷诺数不同,其变化的幅度也不同。总的来说,对比所有狭缝肋方案的底面强化换热系数,Case 4 和 Case 6 最大,其次是为 Case 5,最小为 Case 2 和 Case 3。

图 12 给出了不同进口雷诺数条件下肋片表面的平均强化换热系数 Nu/Nu_0 分布曲线。与底面的换热分布相反,Case 1 实心肋表面强化换热系数要小于狭缝肋的,这是由于狭缝入口具有更高的流向速度因而产生的冲击也更加剧烈。且随着进口雷诺数增加,实心肋表面 Nu/Nu_0 呈现出先上升后下降的变化趋势,且与狭缝肋的差距也逐渐缩小。对比不同的狭缝肋,不难发现在进口雷诺数为 2×10^4 时, Nu/Nu_0 相差并不大,但随着进口雷诺数增加其差距逐渐变大。在本文研究的所有方案中,Case 2 具有最强换热能力,其强化换热系数与实心肋相比提高了 10%~25%。Case 3 和 Case 4 的强化换热系数次之,Case 5 和 Case 6 的最小。可以发现,对于肋片表面的换热能力,具有水平狭缝的斜肋普遍大于具有倾斜角狭缝的斜肋。

冷却通道的整体平均强化换热系数 Nu/Nu_0 随进口雷诺数的变化如图 13 所示,其中 Case 1 实心肋的整体强化换热系数最高。而狭缝肋的强化换热系数 Nu/Nu_0 大小排序依次为 Case 4、Case 6、Case 2 以及 Case 5 和 Case 3,这说明狭缝的位置较低或倾斜角较大时,换热能力相对较强。可以发现,当进口雷诺数较小时,狭缝肋整体换热能力与实心肋相差并不大,甚至 Case 4 的 Nu/Nu_0 大小与实心肋相当。综合对比图 12 和图 13 的曲线变化趋势,可以推测如果进一步减小进口雷诺数,Case 4 的强化换热系数将会高于实心肋。

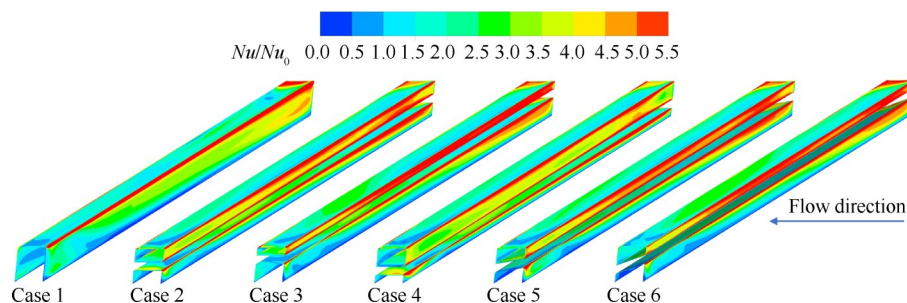


Fig. 10 Heat transfer distribution on the rib surface at $Re=8\times 10^4$

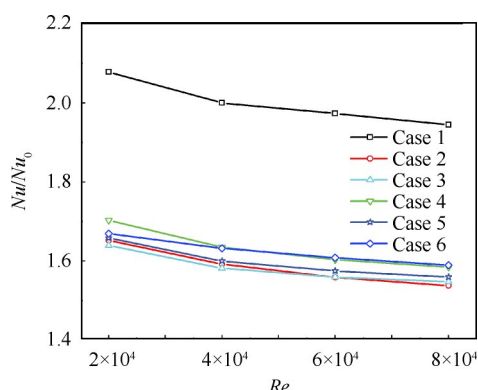


Fig. 11 Variation of bottom surface heat transfer enhancement with Reynolds numbers

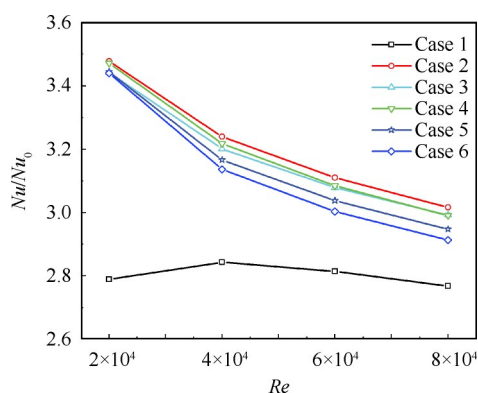


Fig. 12 Variation of rib surface heat transfer enhancement with Reynolds numbers

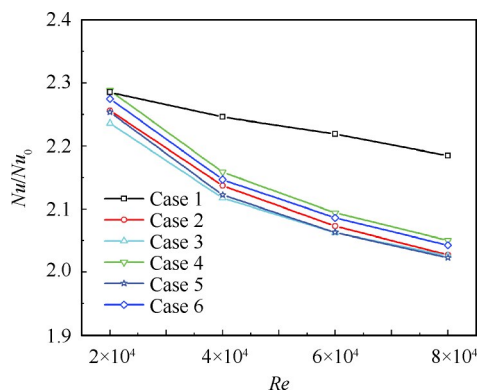
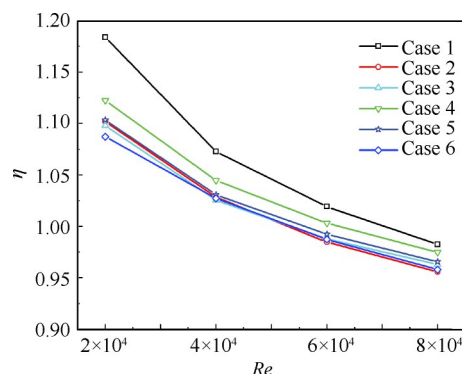


Fig. 13 Variation of cooling channel heat transfer enhancement with Reynolds numbers

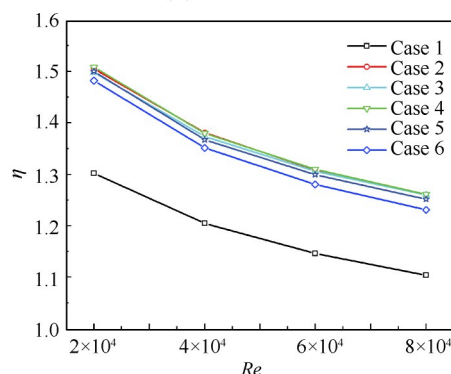
3.3 综合热效率对比

为了综合对比不同方案的流动和换热特性,图14给出了不同进口雷诺数下冷却通道底面和整个冷却通道的综合热效率 η 分布曲线。与Case 1实心肋相比,仅考虑底面的换热能力,狭缝肋的 η 普遍低于实心肋,并不能有效提高冷却通道的性能。事实上,叶片内部的肋片通常都是由金属材料制造,具有良好的导热性能,因而需要进一步考虑通道底面以

及肋片表面的整体换热能力。如图14(b)所示,当考虑了肋片表面的换热能力后,狭缝肋通道的综合热效率相对于实心肋具有明显的提高,以实心肋Case 1为基准,其中 η 最高的为Case 2和Case 4,提高了15%左右,其次为Case 3和Case 5,提高了13.5%左右,而Case 6由于狭缝的倾斜角较大增大了阻力损失,因此在所有狭缝肋方案中综合热效率表现最差,与实心肋相比提高了12%左右。



(a) Bottom surface



(b) Cooling channel

Fig. 14 Variation of thermal performance factors with Reynolds numbers

4 结论

本文采用数值模拟方法研究了不同狭缝斜肋冷却通道的流动和换热特性,分析了通道内的流动结构、阻力损失,强化换热系数和综合热效率,以评估狭缝斜肋的性能,根据研究结果,可以得到以下结论:

(1)在实心肋上布置狭缝显著改变了通道内的流动结构,包括肋后的低速区和回流涡。此外,还能有效降低阻力损失。

(2)与实心肋相比,狭缝斜肋的底面强化换热系数有所减小,而肋片表面的强化换热系数有所增加。总体来说,实心肋的换热能力要强于狭缝斜肋。

(3)对比不同方案的综合热效率,狭缝斜肋相比实心肋具有更好的热性能。其中综合热效率较高 Case 2 和 Case 5 的相比实心肋增加了约 15%,而综合热效率最低的狭缝肋 Case 6 相比实心肋也增加了约 12%。

致 谢:感谢国家自然科学基金、黑龙江省自然科学基金的资助。

参考文献

- [1] Han J C. Advanced Cooling in Gas Turbines 2016 Max Jakob Memorial Award Paper[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2018, 140(11).
- [2] Han J C, Ou S, Park J S, et al. Augmented Heat Transfer in Rectangular Channels of Narrow Aspect Ratios with Rib Turbulators [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1989, 32(9): 1619-1630.
- [3] Han J C, Park J S. Developing Heat Transfer in Rectangular Channels with Rib Turbulators [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1988, 31(1): 183-195.
- [4] Chung H, Park J S, Park S, et al. Augmented Heat Transfer for Angled Rib with Intersecting Rib in Rectangular Channels of Different Aspect Ratios [R]. *ASME 2014-GT-26924*.
- [5] Kaewchoothong N, Maliwan K, Takeishi K, et al. Effect of Inclined Ribs on Heat Transfer Coefficient in Stationary Square Channel[J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2017, 7: 344-350.
- [6] Wright L M, Gohardani A S. Effect of Turbulator Width and Spacing on the Thermal Performance of Angled Ribs in a Rectangular Channel ($AR=3:1$) [R]. *ASME 2008-IMECE-66842*.
- [7] 周明轩, 薛树林, 贺宜红, 等. 高阻塞比肋化通道对流换热特性实验研究[J]. 推进技术, 2018, 39(2): 335-341. (ZHOU Ming-xuan, XUE Shu-lin, HE Yi-hong, et al. Experimental Investigation on Convective Heat Transfer Characteristics of High Blockage Ribs Channel[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(2): 335-341.)
- [8] Yang W, Xue S, He Y, et al. Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics of High Blockage Ribs Channel [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 83: 248-259.
- [9] Tanda G, Abram R. Forced Convection Heat Transfer in Channels with Rib Turbulators Inclined at 45 Deg [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2009, 131(2): 112-121.
- [10] 刘 聪, 王 钊, 张宗卫. 带三角形 V 肋和反向 V 肋内冷通道强化换热机理研究[J]. 推进技术, 2019, 40(9): 2040-2049. (LIU Cong, WANG Zhao, ZHANG Zong-wei. Investigation on Heat Transfer Augmentation in a Inner-Cooling Passage with Triangular V-Shaped and Inverse V-Shaped Ribs [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(9): 2040-2049.)
- [11] Liou T M, Chen S H, Shih K C. Numerical Simulation of Turbulent Flow Field and Heat Transfer in a Two-Dimensional Channel with Periodic Slit Ribs [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(22): 4493-4505.
- [12] Hwang J J, Liou T M. Heat Transfer Augmentation in a Rectangular Channel with Slit Rib-Turbulators on Two Opposite Walls [R]. *ASME 1995-GT-41*.
- [13] Yang Y T, Hwang C W. Numerical Calculations of Heat Transfer and Friction Characteristics in Rectangular Ducts with Slit and Solid Ribs Mounted on One Wall [J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2004, 45(4): 363-375.
- [14] Panigrahi P K, Schroeder A, Kompenhans J. Turbulent Structures and Budgets Behind Permeable Ribs [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2008, 32(4): 1011-1033.
- [15] Tariq A, Sharima N, Mishra M. Aerothermal Characteristics of Solid and Slitted Pentagonal Rib Turbulators [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2018, 140(6).
- [16] Zheng D, Wang X, Yuan Q. Numerical Investigation on the Flow and Heat Transfer Characteristics in a Rectangular Channel with V-Shaped Slit Ribs [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2019, 101: 56-67.
- [17] Zheng D, Wang X, Yuan Q. The Flow and Heat Transfer Characteristics in a Rectangular Channel with Convergent and Divergent Slit Ribs [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 141: 464-475.
- [18] Li X, Xie G, Liu J, et al. Parametric Study on Flow Characteristics and Heat Transfer in Rectangular Channels with Strip Slits in Ribs on One Wall [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 149(11).
- [19] Wright L M, Fu W L, Han J C. Thermal Performance of Angled, V-Shaped, and W-Shaped Rib Turbulators in Rotating Rectangular Cooling Channels ($AR=4:1$) [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2004, 126(4): 604-614.

(编辑:朱立影)