

DOI: 10.7652/xjtuxb201711002

上游横向间断肋布置方式对气膜冷却性能的影响

郑达仁^{1,2}, 王新军^{1,2}, 张峰^{1,2}, 袁奇^{1,2}

(1. 西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安; 2. 陕西省叶轮机械及动力装备工程实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了采用气膜冷却来保护燃气轮机叶片免受高温侵蚀, 针对进一步提高气膜冷却效率、减少冷却空气消耗量的需求, 提出了带有上游间断肋的气膜冷却结构。采用 $k-\epsilon$ 湍流模型数值研究了带有上游横向肋结构的气膜冷却性能, 分析了横向无间断肋、两侧间断肋、间断数段肋和中间间断肋这 4 种上游不同横向肋布置方式对气膜冷却流动的影响, 比较了 4 种结构的气膜冷却效率和换热系数。结果表明: 横向肋对下游冷气的卷吸能力与肋片长度有关, 与肋片的布置方式无关; 不同肋片布置方式会产生不同的涡结构, 即中心间断肋会诱导主流产生一个与肾形涡旋转方向相反的涡对, 从而增加冷却射流的展向扩散, 有利于提高下游气膜冷却性能, 而两端间断肋会诱导主流产生一个与肾形涡旋转方向相同的涡对, 该涡对会进一步抬离冷却射流, 降低下游气膜冷却性能; 在气膜孔上游布置中心间断肋能提供最高的展向平均绝热气膜冷却效率和实际热降值。

关键词: 气膜冷却; 上游间断肋; 布置方式; 冷却性能

中图分类号: TK263 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)11-0007-07

Effect of Arrangement for Upstream Divided Ramps on Film Cooling Performance

ZHENG Daren^{1,2}, WANG Xinjun^{1,2}, ZHANG Feng^{1,2}, YUAN Qi^{1,2}

(1. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shaanxi Engineering Laboratory of Turbomachinery and Power Equipment, Xi'an 710049, China)

Abstract: To protect the gas turbine blades suffering from the hot gas by adapting the film cooling technology, a novel film cooling geometry with an upstream ramp is proposed in view of the requirement for further increasing adiabatic film cooling effectiveness and decreasing expense of coolant. The performance of film cooling with upstream ramps is numerically investigated with $k-\epsilon$ turbulence model. The effects of arrangement for four different ramps, including the undivided ramp, the ramp divided in the lateral sides, the ramp divided in several positions and the ramp divided in the center, on flow structures are analyzed. The adiabatic film cooling effectiveness and heat transfer coefficient of these four film cooling geometries are compared. The results show that the intensity of entrainment is sensitive to the length of ramp and is independent on the ramp arrangements. Different vortex structures are induced due to the different arrangement for ramps. The ramp divided in the center region generates a pair of vortexes which rotates in the opposite direction with the kidney vortexes, and this pair of vortexes contributes to the lateral spreading of coolant, which increases the film cooling performance. The ramp divided on both sides generates a pair of vortexes which rotates in the same direction with the kidney

收稿日期: 2017-03-10。 作者简介: 郑达仁(1993—), 男, 博士生; 王新军(通信作者), 男, 教授。

网络出版时间: 2017-09-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170908.1049.004.html>

vortexes, and this pair of vortexes lifts off the coolant further, which increases the film cooling performance. The highest adiabatic film cooling effectiveness in the spanwise direction and the highest NHFR (net heat flux reduction) are observed in the case of the ramp divided in the center.

Keywords: film cooling; divided upstream ramp; arrangement; cooling performance

随着燃气轮机技术的不断发展,燃气进口温度不断提高,这使得高温部件的温度远远超出常规金属材料的熔点,而冷却保护则成为进一步提高燃气轮机效率的关键。

国内外学者就气膜冷却的流动特性和冷却效率开展了大量的研究工作。Kelso 等人研究发现,冷却剂从气膜孔流出,在气膜孔周围形成4种涡流,其中肾形涡对绝热气膜冷却效率的影响最大^[1]。Na 等人首先提出了一种在气膜孔前布置斜坡的新型气膜冷却结构,研究表明,这种新型结构能够抑制马蹄涡,有效提高展向绝热气膜冷却效率^[2]。Hammami 等人在文献[2]的基础上提出了金字塔形斜坡结构,研究发现该斜坡能够促使主流形成反肾形涡,削弱肾形涡强度,从而提高冷却剂在壁面的覆盖效果^[3]。Halder 等人研究了上游斜坡对双排气膜孔气膜冷却性能的影响,发现上游斜坡不仅能提高第1排气膜孔下游的绝热气膜冷却效率,也能提高第2排气膜孔下游的绝热气膜冷却效率^[4]。Montomoli 等人提出了一种契合前倾扩张孔的斜坡结构,发现这种新型斜坡结构能够提高前倾扩张孔的展向平均绝热气膜冷却效率^[5]。Elwekeel 等人将弧形直肋分别布置在气膜孔上游和下游,比较了弧形直肋的布置位置对气膜冷却性能的影响^[6]。Abdala 等人数值研究了弧形肋宽度对绝热气膜冷却效率的影响,发现当直肋宽度为 $D/8$ 时,气膜展向扩张能力最好^[7]。Zhang 等人数值研究了直肋高度的不均匀分布对绝热气膜冷却效率和换热系数的影响,研究表明,肋片中间高度较低时会促使主流形成反肾形涡,削弱肾形涡强度,提高绝热气膜的冷却效率^[8]。

目前,关于带有上游斜坡或者直肋的研究都采用上游无间断肋结构,忽视了上游间断肋对气膜冷却性能的影响,且忽略了上游间断肋布置方式对气膜冷却流动特性和冷却性能的影响。本文采用商业软件 ANSYS-CFX 数值研究了带有上游间断肋的气膜冷却性能,获得了上游无间断肋、两边间断肋、中间数段间断肋和中间间断肋4种上游肋布置方式对气膜冷却流动特性的影响规律,比较了4种布置方式对气膜冷却效率和换热能力的影响。

1 计算模型和数值方法

1.1 计算模型

图1给出了计算模型结构示意图。图2给出了上游横向肋具体结构示意图。研究时所选单个圆形气膜孔的直径 $D=10$ mm,气膜孔间距 $P=3D$,长径比 $L/D=3.5$,倾角 $\alpha=30^\circ$ 。横向肋位于气膜孔上游,与气膜孔前缘的距离为 D 。4种横向肋横截面均为 $W \times H=2$ mm $\times$ 3 mm 的矩形,其中肋沿流向长度 W 为 2 mm,沿法向长度 H 为 3 mm。结构1为上游横向无间断肋结构,结构2~结构4为间断肋结构。结构2为两边间断且间隔6 mm,结构3为横向间断成5段且每段间隔3 mm,结构4在中间间断且间隔12 mm,其他几何尺寸见图2。图3给出了结构2计算模型局部网格示意。

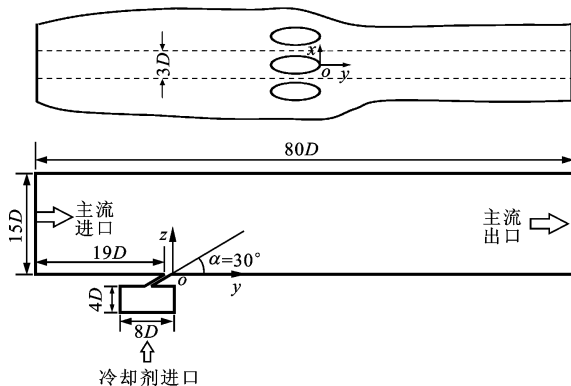


图1 计算模型结构示意图

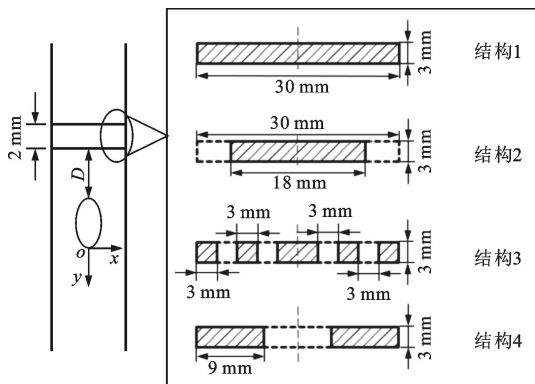


图2 横向肋具体结构示意图

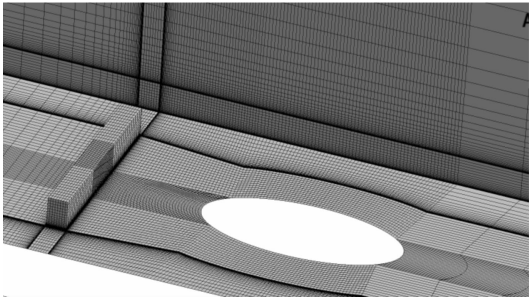


图 3 计算模型局部网格示意

1.2 数值方法及验证

采用商业软件 ANSYS-CFX 数值求解了三维定常黏性雷诺时均 N-S 方程。

对 4 种上游横向肋气膜冷却结构进行了网格无关性验证,图 4 给出了结构 4 中心线上的绝热气膜冷却效率 η 沿流向的变化。从图中可以看出,当网格数达到 502 万时,再增加网格数对计算结果的影响可以忽略。因此,在后续计算中网格数取 502 万。同样,对其他 3 种横向肋气膜冷却结构进行了网格无关性验证,具体图像不再给出,结构 1~结构 3 所选取网格数分别为 482 万、503 万和 658 万。

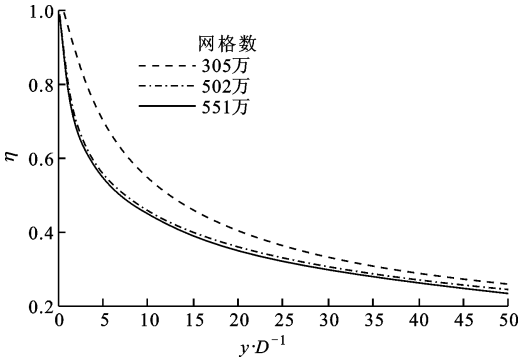


图 4 网格无关性验证

采用了 $k-\epsilon$, SST, $k-\omega$, RNG $k-\epsilon$ 这 4 种湍流模型对带有上游斜坡气膜冷却的绝热气膜冷却效率进行了模拟,并与文献[9]的实验数据进行了比照。图 5 给出了中心线上的绝热气膜冷却效率沿流向的变化。从图中可以看出,4 种湍流模型都有相同的变化趋势,而 $k-\epsilon$ 湍流模型与实验的误差最小,特别是在气膜孔出口尾缘下游,能较准确地诠释中心线上绝热气膜冷却效率的特性。图 6~图 7 分别给出了不同吹风比 M 下, $k-\epsilon$ 湍流模型计算的中心线上绝热气膜冷却效率沿流向的变化、展向平均绝热气膜冷却效率 η_{av} 沿流向的变化及其与实验数据^[9-10] 的对比。从图 6~图 7 中可以看出, $k-\epsilon$ 湍流模型可以很好地诠释不同吹风比下的绝热气膜冷却效率特性,能够很好地模拟不同吹风比下展向平均绝热气

膜冷却效率沿流向的分布。图 8 给出了 $k-\omega$ 湍流模型计算的换热系数的比值 h/h_0 (h_0 为无射流时壁面换热系数) 及其与实验数据^[9] 的对比。从图中可以看出, $k-\omega$ 湍流模型计算所得结果与实验数据吻合较好。

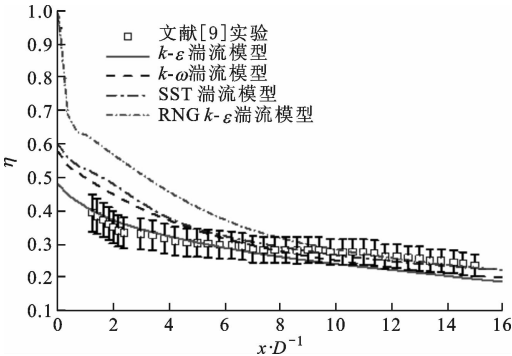


图 5 不同湍流模型中心线上绝热气膜冷却效率

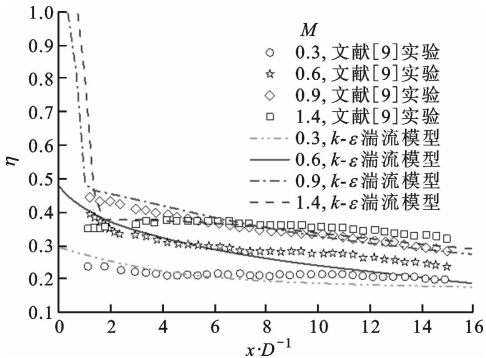


图 6 不同吹风比下中心线上绝热气膜冷却效率

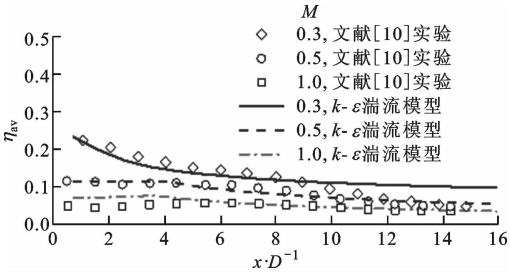


图 7 不同吹风比下展向平均气膜冷却效率

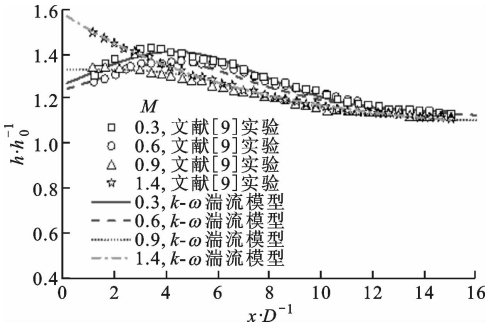


图 8 换热系数的比值沿流向的分布

因此,本文在后续的模拟研究中,采用 $k-\epsilon$ 湍流模型模拟绝热气膜冷却效率,采用 $k-\omega$ 湍流模型模拟换热系数。

1.3 参数定义

气膜冷却的参数定义如下。吹风比

$$M = \frac{\rho_c u_c}{\rho_m u_m} \tag{1}$$

式中: ρ_m 、 ρ_c 分别是主流和冷却剂的密度; u_m 、 u_c 分别是主流和冷却剂的速度。

绝热气膜冷却效率

$$\eta = (T_{aw} - T_m)/(T_c - T_m) \tag{2}$$

式中: T_{aw} 为壁面温度; T_m 为主流温度; T_c 为冷却剂温度。

相对温度

$$\theta = (T - T_m)/(T_c - T_m) \tag{3}$$

换热系数

$$h = q_w/(T_w - T_{aw}) \tag{4}$$

实际热降(NHFR)

$$\gamma_{NHFR} = 1 - \frac{q_w}{q_0} = 1 - \frac{h}{h_0}(1 - 1.5\eta) \tag{5}$$

1.4 边界条件

表 1 给出了计算边界条件。主流进口给定总温 T_m 和进口速度 V_m ,主流出口给定静压。冷却剂进口给定总温 T_c 和质量流量 m_c ;主流进口扰动度 Γ_{um} 和冷却剂进口扰动度 Γ_{uc} 均为 0.5%;所有壁面均为绝热无滑移。

表 1 计算边界条件

T_m/K	298.15	T_c/K	318.15
$V_m/m \cdot s^{-1}$	15	密度比	0.97
$\Gamma_{um}/\%$	0.5	M	1,1.5,2

2 计算结果及分析

2.1 流动结构

图 9 给出了横向肋之后的压力分布云图。从图中可以看出,在横向肋之后区域压力较低,这是因为横向肋抬升了流体的缘故。图 10 给出了主流边界层流线图。从图中可以看出,在横向肋与气膜孔之间的区域,冷却剂被卷吸,这是因为横向肋之后区域压力较低的缘故。从图 10 中还可以看出,结构 1 的卷吸强度大于其他 3 种间断肋结构,结构 2~结构 4 的卷吸强度相同。这是因为结构 1 的横向长度大于其他 3 种结构,抬升流体的能力最强,低压区压力最低,其他 3 种间断肋的横向长度相同,主流通流能力

相同,因此卷吸作用对冷却剂展向扩张能力的影响相同。

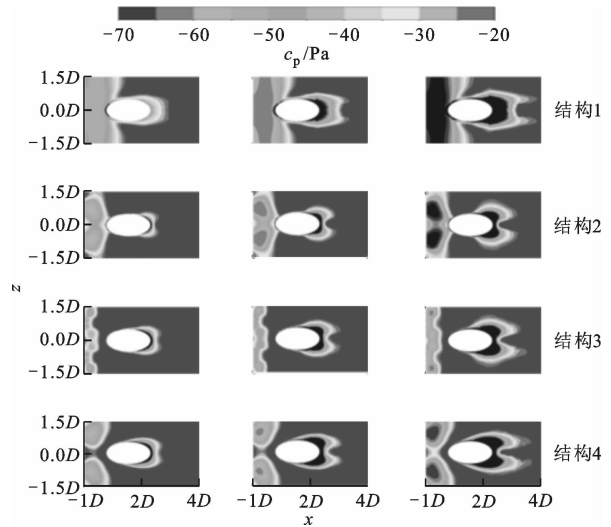


图 9 压力分布云图

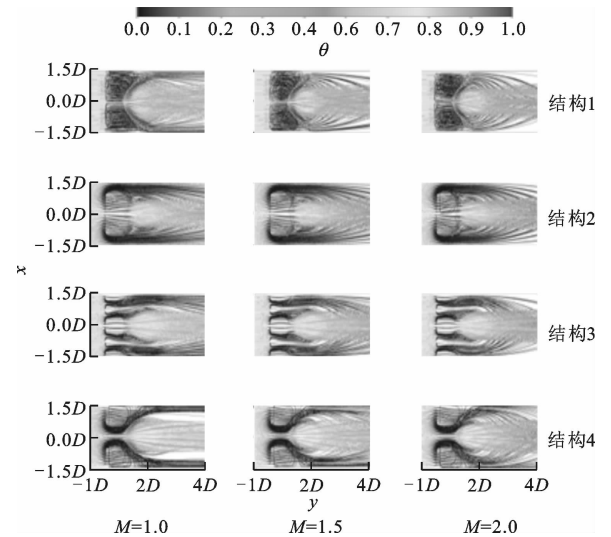
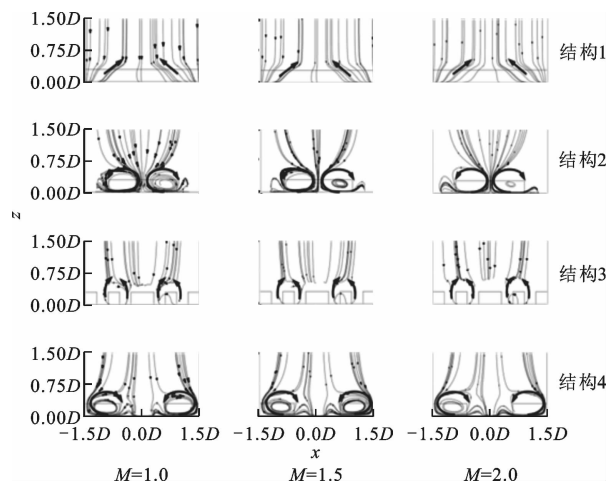


图 10 主流边界层流线图

图 11 给出了横向肋之后位于 $y/D = -2.5$ 处 $x-z$ 截面上的流线图。从图中可以看出:结构 1 的流体没有形成横向流动的涡流,而微弱的横向流动是由角涡引起;结构 2 形成了与肾形涡流动方向相同的涡流,由此增强了肾形涡的强度;结构 3 的间断数量较多,由此形成了一系列涡流对,该涡流对强度相同,旋转方向相反,相互抵消,并没有对肾形涡产生较大影响;结构 4 形成了与肾形涡流动方向相反的涡流,由此削弱了肾形涡的强度。

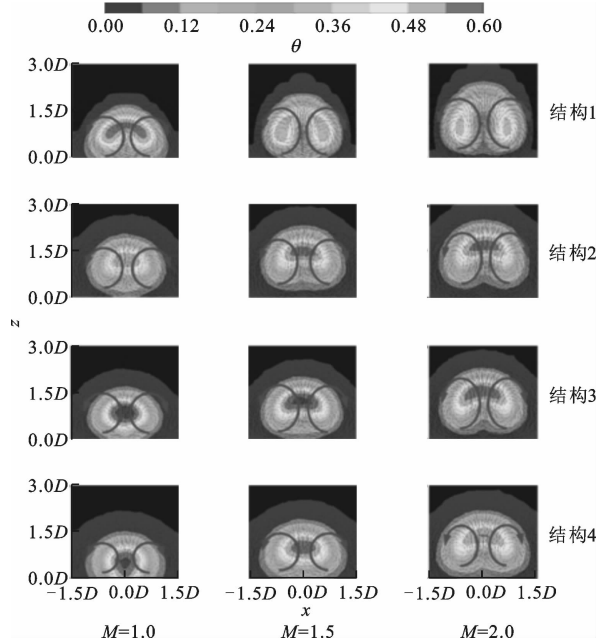
从上述的分析可以得出,4 种结构中横向肋与气膜孔之间的区域会发生冷却剂卷吸。结构 2 中,主流形成与肾形涡流动方向相同的涡流,增强了肾形涡强度;结构 3 中,产生的一系列涡流对没有对肾

图 11 横向肋后位于 $y/D = -2.5$ 处 $x-z$ 截面流线图

形涡产生重要影响;结构 4 中,主流形成与肾形涡流动方向相同的涡流,削弱了肾形涡的强度。冷却剂的卷吸增强了冷却剂展向扩张能力和气膜覆盖效果,削弱了肾形涡的强度,同样也增强了冷却剂展向扩张能力和气膜覆盖效果,因此在横向肋下游,冷却剂展向扩张能力和气膜覆盖效果是冷却剂的卷吸和反肾形涡综合作用的结果。

图 12 给出了位于 $y/D = 6$ 处 $x-z$ 截面上的速度矢量图和相对温度分布云图。从图中可以看出,随着吹风比的增大,肾形涡的高度增加。这是因为,随着吹风比的增大,冷却剂动量增大,冷却剂与主流掺混的强度增大,所以肾形涡的高度增加。从图中还可以看出,在同一吹风比下,结构 2 肾形涡最高,冷却剂展向扩张能力最差,结构 3 的次之,结构 4 的最低,但结构 4 冷却剂展向扩张能力最好。这是因为,3 种间断肋结构(结构 2~结构 4)中,肋下游都会卷吸冷却剂,其间断肋横向长度相同,对冷却剂的卷吸强度相同的缘故。结构 2 中,两边间断肋在卷吸冷却剂的同时,会诱导主流形成与肾形涡旋转方向相同的涡流,从而增强了肾形涡的强度。所以,卷吸冷却剂和这一对旋转涡流的综合作用结果使得肾形涡高度最高,但冷却剂的展向扩张能力和表面覆盖效果最差。结构 3 中,中间间断数段肋在卷吸冷却剂的同时,会诱导主流形成一系列旋转方向相反的涡流对,这些涡流对对肾形涡的影响较小,因此肾形涡高度较结构 2 低,冷却剂展向扩张能力和表面覆盖效果都较结构 2 好。结构 4 中,中间间断肋在卷吸冷却剂的同时,还诱导主流形成一对与肾形涡旋转方向相反的涡流(反肾形涡),从而削弱了肾形涡的强度,因此结构 4 的肾形涡高度最低,冷却剂展向扩张能力和覆盖效果最好。结构 1 中,横向无

断肋仅仅卷吸冷却剂,并没有形成对肾形涡有影响的涡流对,虽然卷吸冷却剂的强度较大,但对削弱肾形涡的强度和冷却剂扩张能力的增强作用不大,因此其肾形涡高度较结构 4 高,冷却剂展向扩张能力也较结构 4 差。综上所述,结构 4 的肾形涡高度最低,冷却剂展向扩张能力和表面覆盖效果最好。

图 12 $y/D = 6$ 处 $x-z$ 截面上的速度矢量图和相对温度分布云图

2.2 绝热气膜冷却效率

图 13 给出了不同吹风比下展向平均气膜冷却效率沿流向的分布。从图中可以看出,在相同吹风比下,结构 4 展向平均绝热气膜冷却效率最高,结构 2 展向平均绝热气膜冷却效率最低。这是因为,结构 4 的间断肋形成了与肾形涡旋转方向相反的反肾形涡,削弱了肾形涡强度,而结构 3 对肾形涡的作用不大,结构 2 形成了与肾形涡旋转方向相同的涡流,增强了肾形涡的强度,由于这 3 种结构对冷却剂卷吸的强度相同,所以结构 4 的展向平均气膜冷却效率最高。结构 1 没有形成反肾形涡,尽管对冷却剂的卷吸强度更大,但对冷却剂的卷吸和反肾形涡的综合作用效果不如结构 4。因此,结构 1 展向平均气膜冷却效率较结构 4 低。

图 14 给出了结构 4 在不同肋高下展向平均绝热气膜冷却效率的分布。从图中可以看出,随着间断肋高度的增大,结构 4 展向平均绝热气膜冷却效率增加。这是因为,随着间断肋高度的增加,肾形涡强度降低,冷却剂展向扩张能力和表面覆盖效果增大,展向平均气膜冷却效率增大。

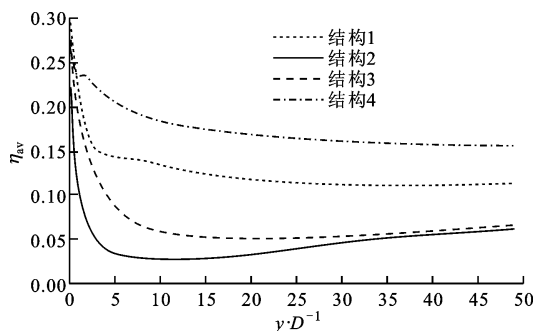
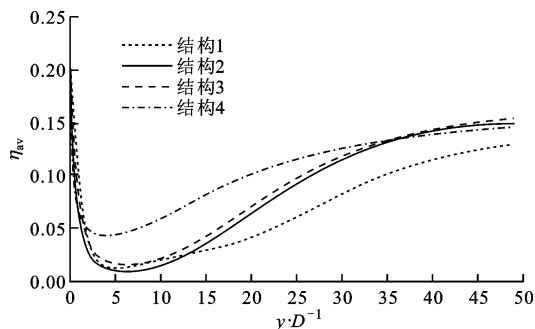
(a) $M=1$ (b) $M=2$

图13 不同吹风比下展向平均绝热气膜冷却效率分布

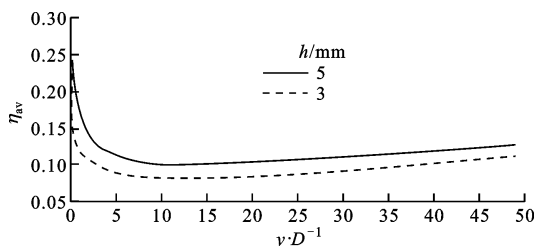


图14 在不同肋高下结构4展向平均绝热气膜冷却效率分布

2.3 换热系数

图15给出了不同吹风比下换热系数比沿流向的分布。从图中可以看出,随着吹风比的增大,换热系数增大。这是因为,吹风比越大,冷却剂的动量越大,与主流的掺混强度越大,流体扰动强度越大,流体与壁面的换热强度越大。从图中还可以看出:结构1的换热系数最低,结构2~结构4的换热系数基本相同。这是因为,结构1为横向无间断肋,对流体的扰动有限,而结构2~结构4的间断肋结构增强了流体的扰动程度,增大了流体与壁面的换热强度,又因结构2~结构4中间断肋长度相同,对流体的扰动程度相同,所以相应换热系数基本相同。随着吹风比的增大,结构1与结构2~结构4的换热系数相差越大,即随着吹风比的增大,间断肋对流体的扰动强度增加的贡献越大。

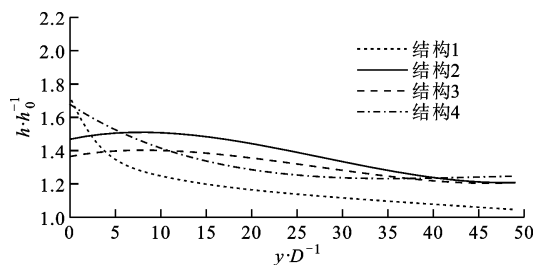
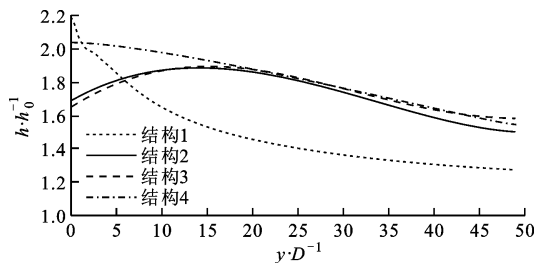
(a) $M=1$ (b) $M=2$

图15 不同吹风比下展向平均换热系数比沿流向的分布

2.4 评价系数

图16给出了评价系数(实际热降 γ_{NHFR})随吹风比的分布。从图中可以看出,随着吹风比的增大,实际热降值降低。这是因为,吹风比越大,冷却剂与主流的掺混强度越大,肾形涡强度越大,气膜覆盖效果最差,阻碍热量传递的能力越弱。从图中还可以看出,在相同吹风比下,结构4的实际热降值最大,对热量传递的阻碍能力最强。这是因为,相比其他结构,结构4对冷却剂的卷吸和反肾形涡的综合作用最强,肾形涡强度最小,气膜冷却效果最好,阻碍热量传递的效果最好。

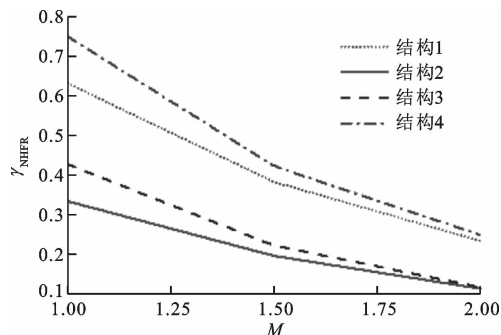


图16 实际热降随吹风比的分布

3 结论

上游横向肋间断的布置方式可增强气膜冷却流动的复杂性。本文数值研究了上游横向肋不同间断布置方式对气膜冷却流动特性和冷却性能的影响,比较了4种横向肋布置方式的绝热气膜冷却效率和换热特性,分析了4种结构对气膜冷却效果的影响,

结论如下。

(1) 4 种结构均对冷却剂产生卷吸。结构 1 对冷却剂的卷吸强度最大,结构 2~结构 4 的卷吸能力相同。结构 2 形成了与肾形涡流动方向相同的涡流,由此增强了肾形涡强度;结构 3 形成了一系列涡流对,对肾形涡没有影响;结构 4 形成了与肾形涡流动方向相反的涡流,由此削弱了肾形涡强度。气膜冷却效果是冷却剂的卷吸和反肾形涡综合作用的结果。

(2) 结构 4 展向平均绝热气膜冷却效率最高,结构 2 展向平均气膜冷却效率最低。这是因为,结构 4 既卷吸冷却剂,也形成了反肾形涡,且对冷却剂的卷吸强度和反肾形涡强度综合作用最好。

(3) 结构 2~结构 4 均增强了扰流和换热能力,换热系数高于结构 1。结构 4 实际热降最大,气膜覆盖效果最好,阻碍热量传递能力最强。

参考文献:

- [1] KELSO R M, LIM T T, PERRY A E. An experimental study of round jets in cross-flow [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1996, 306: 111-144.
- [2] NA S, SHIH T I P. Increasing adiabatic film-cooling effectiveness by using an upstream ramp [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2007, 129(4): 464-471.
- [3] HAMMAMI Z, AZZI A, DELLIL S A, et al. Improving adiabatic film-cooling effectiveness by using an upstream pyramid [J]. *Computational Thermal Sciences: An International Journal*, 2016, 81: 135-146.
- [4] HALDER P, SAMAD A. Enhancement of film cooling effectiveness using upstream ramp [C] // *ASME 2012 Gas Turbine*. New York, USA: ASME, 2012: 551-557.
- [5] MONTOMOLI F, D'AMMARO A, UCHIDA S. Numerical and experimental investigation of a new film cooling geometry with high P/D ratio [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 66: 366-375.
- [6] ELWEKEEL F N M, ABDALA A M M, HUANG D. Upstream and downstream step curvature effects on film cooling effectiveness and flow structures [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2015, 40 (12): 3697-3707.
- [7] ABDALA A M M, ELWEKEEL F N M. An influence of novel upstream steps on film cooling performance [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 93: 86-96.

- [8] ZHANG F, WANG X, LI J. The effects of upstream steps with unevenly spanwise distributed height on rectangular hole film cooling performance [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 102: 1209-1221.
- [9] CHEN S P, CHYU M K, SHIH T I P. Effects of upstream ramp on the performance of film cooling [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, 50 (6): 1085-1094.
- [10] BARIGOZZI G, FRANCHINI G, PERDICHIZZI A. The effect of an upstream ramp on cylindrical and fan-shaped hole film cooling: part ii-adiabatic effectiveness results [C] // *ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air*. New York, USA: ASME, 2007: 115-123.

[本刊相关文献链接]

- 徐亮,兰进,高建民,等.一种类螺纹孔结构的旋转射流换热特性数值模拟. 2017, 51(9): 11-18. [doi: 10. 7652/jxtxb201709002]
- 席雷,徐亮,高建民,等.蒸汽冷却厚壁通道传热性能的耦合传热研究. 2017, 51(9): 32-38. [doi: 10. 7652/jxtxb201709005]
- 翟颖妮,刘存良.高主流湍流度下大倾角异型气膜孔冷却特性实验研究. 2017, 51(7): 16-23. [doi: 10. 7652/jxtxb201707003]
- 范小军,杜长河,李亮,等.4 种冷却结构对叶片前缘流动换热影响的比较研究. 2017, 51(7): 37-43. [doi: 10. 7652/jxtxb201707006]
- 李劲劲,何坤,晏鑫,等.透平叶片近前缘端壁处换热性能的研究. 2017, 51(7): 44-50. [doi: 10. 7652/jxtxb201707007]
- 黄琰,晏鑫,何坤,等.压力面侧小翼结构对凹槽叶顶冷却传热性能的影响. 2017, 51(7): 51-56. [doi: 10. 7652/jxtxb201707008]
- 费昕阳,王新军,陆海空.平板冲击发散冷却流动与换热特性的数值模拟. 2017, 51(7): 57-61. [doi: 10. 7652/jxtxb201707009]
- 李法敬,高建民,史晓军,等.电主轴轴心冷却用环路热虹吸管的传热特性. 2017, 51(7): 90-97. [doi: 10. 7652/jxtxb201707014]
- 阮一逍,薛绒,赖欢,等.单液氮液滴在气流中的蒸发运动特性研究. 2017, 51(6): 147-152. [doi: 10. 7652/jxtxb201706023]
- 杜长河,范小军,李亮,等.旋转半径和叶片安装角对动叶旋流冷却流动和传热特性的影响. 2017, 51(5): 37-42. [doi: 10. 7652/jxtxb201705006]
- 王宏朝,单希壮,杨志刚.利用矩阵风扇的发动机舱流场优化. 2017, 51(3): 14-19. [doi: 10. 7652/jxtxb201703003]

(编辑 苗凌)