

气膜孔堵塞对叶片吸力面换热性能影响

李广超, 刘野, 郭云修, 张魏

(沈阳航空航天大学 航空发动机学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要:为研究热障涂层喷涂过程造成的气膜孔堵塞对叶片吸力面换热特性的影响,利用数值模拟方法分析了叶片吸力面气膜孔堵塞比为0.2~0.8时传热系数的变化规律。将吹风比作为控制冷热流体流量比例的气动参数,在其变化范围为0.5~2.0情况下,详细分析了气膜孔堵塞对孔下游肾形涡、叶片壁面传热系数二维分布和展向平均传热系数的影响。结果表明:在吹风比相同的情况下,堵塞比越大,传热系数增幅越大;堵塞使肾形涡尺度和强度显著增大,导致壁面传热系数增大,吹风比越大,这种效应越明显;相比于无堵塞情况,堵塞比为0.2时传热系数基本不变,堵塞比为0.5时传热系数增大5%~7.2%,堵塞比为0.8时传热系数增大9%~12%。

关键词:气膜孔;堵塞比;传热系数;吹风比;数值模拟

中图分类号:TK47 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.11.006

[引用本文格式]李广超,刘野,郭云修,等.气膜孔堵塞对叶片吸力面换热性能影响[J].热能动力工程,2021,36(11):41-46. LI Guang-chao, LIU Ye, GUO Yun-xiu, et al. Influence of blockage inside film cooling hole on heat transfer performance of vane suction surface[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(11): 41-46.

Influence of Blockage Inside Film Cooling Hole on Heat Transfer Performance of Vane Suction Surface

LI Guang-chao, LIU Ye, GUO Yun-xiu, ZHANG Wei

(Department of Aero Engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang, China, Post Code: 110136)

Abstract: In order to study the influence of the film cooling hole blockage caused by the thermal barrier coating process on the heat transfer performance of vane suction surface, the numerical simulation method was used to analyze the change rule of heat transfer coefficient when the film cooling hole blockage ratio of the vane suction surface was from 0.2 to 0.8. The blow ratio was used as the aerodynamic parameter for controlling the cold and hot fluid flow ratios, and the influences of film cooling hole blockage on the downstream kidney-shaped vortex, the 2D distribution of heat transfer coefficient of the vane wall surface and the spanwise average heat transfer coefficient were analyzed in detail when the blowing ratio was from 0.5 to 2.0. The results show that in the case of the same blow ratio, the larger the blockage ratio is, the greater the increase amplitude of the heat transfer coefficient is. The size and intensity of the kidney-shaped vortex increase significantly due to the film hole blockage, leading to the increase of heat transfer coefficient of wall surface. This effect becomes more obvious with the increase of the blowing ratio. Compared with the case without blockage, the heat transfer coefficient has little change at the blockage ratio of 0.2. The heat transfer coefficient is increased by 5% to 7.2% at the blockage ratio of 0.5 and is increased by 9% to 12% at the blockage ratio of 0.8.

Key words: film hole, blockage ratio, heat transfer coefficient, blowing ratio, numerical simulation

收稿日期:2020-11-16; 修订日期:2021-12-30

基金项目:国家科技重大专项(2017-III-0001-0025);国家自然科学基金(51406124);辽宁省教育厅优秀人才计划(LR2019050)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project(2017-III-0001-0025); National Natural Science Foundation of China(51406124); Excellent Talent Plan of Education Department of Liaoning Province(LR2019050)

作者简介:李广超(1979-),男,辽宁沈阳人,沈阳航空航天大学教授。

引 言

燃气轮机涡轮叶片长期经受高温燃气侵蚀,易发生蠕变变形^[1-3]。为降低叶片合金基体温度、延长使用寿命,可采用气膜冷却结构的方法达到这一目的^[4-6]。高效利用冷气需要精确评估叶片型面传热系数分布。Hylton 等人^[7]通过实验得到了 C3X 涡轮导叶中截面的温度分布和传热系数分布,为气膜冷却数值仿真及实验提供参考数据。影响气膜冷却和传热系数的因素众多,包括冷气射流、雷诺数、湍流度和气膜孔形状及排布等。由热障涂层喷涂造成的气膜孔堵塞对气膜冷却效率有重要影响。涡轮叶片吸力面及压力面弧长大于 70% 的区域比叶片型面其它位置更易受吹风比影响^[8],吹风比越大传热系数提升幅度越大^[9],在堵塞状态下吹风比变化对此区域传热影响需要重点关注。张宗卫等人^[10]通过研究表明,在叶栅通道涡作用下,吸力面气膜呈聚敛状,气膜冷却效率和传热系数较高。冷气出流破坏了当地边界层流动状态,导致气膜孔附近传热系数大幅提升^[11],但没有影响叶片表面整体换热变化趋势^[12]。郑添等学者发现,交叉孔冷气出流面积大于圆柱形孔,叶片型面对流传热系数明显高于圆柱形孔^[13],因此由不同堵塞比引起的气膜孔孔型变化对传热系数影响需要深入研究。

燃气温度升高导致单一气冷方式难以满足冷却要求。在叶片外表面喷涂具有一定隔热效果的耐高温热障涂层材料,可以进一步提高冷却效果。但是受限于热障涂层的喷涂工艺,热障涂层对气膜冷却效果有一定的负面影响。这是因为,叶片表面热障涂层喷涂过程造成其粗糙度变化,影响传热系数的大小和分布^[14-15]。王建飞等人^[16]发现,叶片表面粗糙进一步放大了雷诺数对传热系数的影响。热障涂层喷涂过程还导致部分涂层材料堵塞气膜孔,使气膜覆盖面积减小,气膜冷却效率下降^[17]。气膜孔尾缘堵塞导致孔下游肾形涡尺度和强度增大,传热系数提升^[18]。热障涂层导致的气膜孔堵塞和表面粗糙度协同作用使平板表面换热增强^[19]。近年来关于热障涂层堵塞气膜孔对叶片型面气膜冷却效率影响有一些相关研究,但是有关气膜孔堵塞对叶片传热系数影响的研究较少。本文参考气膜孔出口热障涂层沉积形状定义,研究了气膜孔出口不同堵塞比对叶片型面传热系数的影响,为分析热障涂层降

低叶片基体合金温度的效果提供参考。

1 数值模拟

1.1 物理模型和边界条件

吸力面存在气膜孔堵塞的叶栅模型如图 1 所示。叶栅弦长 L 为 407 mm,栅距 C 为 280 mm,叶高 9 mm,计算域中以 9 mm 为一个周期,弦长 L 在 X 轴上的投影 L_x 为 247.8 mm。主流进气方向与 X 轴夹角为 180° ,出气方向与 X 轴夹角为 251.8° 。气膜孔位于吸力面弧长 26% 处,叶片厚度 d 与气膜孔直径 D 的比值为 3。气膜孔轴线与叶片型面夹角即气膜孔射流角 α 为 30° 。沿叶片周向和叶高方向均采用周期性边界条件。

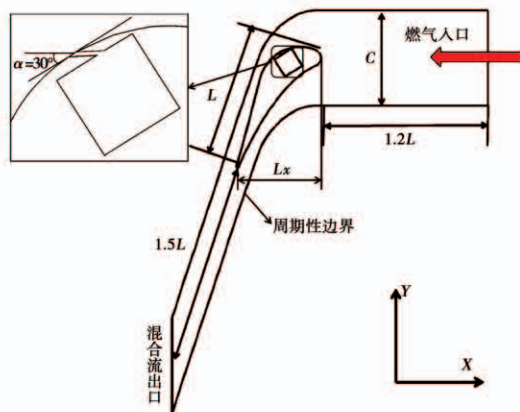


图 1 计算域模型

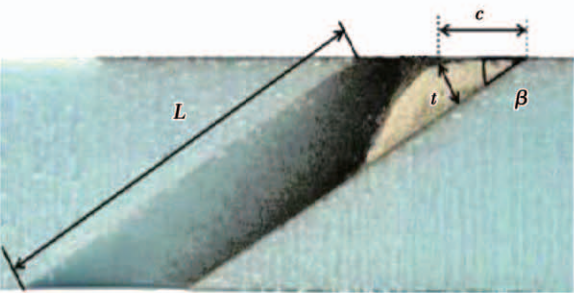
Fig. 1 Computational domain model

气膜孔堵塞几何模型及尺寸定义,如图 2 所示。参考 Whitfield^[18]对气膜孔堵塞模型几何形状的假设,堵塞物模型的中截面是等腰三角形内切圆的一部分,堵塞物堆积角 β 与气膜孔射流角 α 相同。堵塞物最大厚度 t ,等腰三角形的高 h 为 $4/3 t$,堵塞物中截面内切圆半径 r 为 $2.13t$ 。如表 1 所示,建立堵塞比 B 为 0.2, 0.5 和 0.8 时的三个几何模型。堵塞面积随着堵塞比的增大迅速增大, B 为 0.2, 0.5 和 0.8 时相比于 B 为 0 时气膜孔喉部面积分别减少 14%, 50% 和 86%。

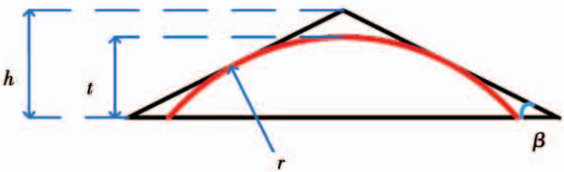
计算模拟边界条件为:主流入口速度为 10 m/s,入口总温 330 K;基于叶片弦长的主流雷诺数为 4.99×10^5 ;冷气总温为 330 K,吹风比为 0.5, 1.0, 1.5 和 2.0;壁面热流密度为 1 000 W/m²。

通常情况下,传热系数受热流密度的影响较小,改变热流密度并不会显著改变传热系数。发动机中的涡轮叶片既不是等热流壁面,也不是恒壁温边界,

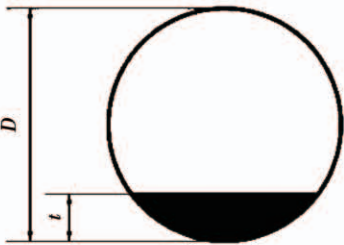
所以通常按照恒热流指定计算边界条件。



(a) 气膜孔堵塞物



(b) 堵塞物尺寸定义



(c) 气膜孔轴向视图

图 2 堵塞物模型
Fig. 2 Blockage model

表 1 气膜孔堵塞物几何尺寸

Tab. 1 Geometrical size of film hole blockage

B	D/mm	t/mm	$\beta/(\text{^\circ})$	r/mm	d
0.2	3	0.6	30	0.8	9
0.5	3	1.5	30	2.0	9
0.8	3	2.4	30	3.2	9

1.2 参数定义

堵塞比定义为:

$$B = t/D$$
 (1)

式中: t —堵塞物最大厚度,mm; D —圆柱形气膜孔直径,mm。

吹风比定义为:

$$M = \rho_c u_c / \rho_g u_g$$
 (2)

式中: ρ_c —冷气密度,kg/m³; u_c —冷气速度,m/s;
 ρ_g —气膜孔出口主流密度,kg/m³; u_g —主流当地速

度,m/s。

传热系数计算式为:

$$H = q / (T_g - T_w)$$
 (3)

式中: T_g —主流总温,K; T_w —壁面温度,K; q —壁面热流密度,W/m²。

无量纲过余温度定义为:

$$\Theta = (T_w - T_c) / (T_g - T_c)$$
 (4)

式中: T_c —冷气温度,K。

1.3 湍流模型和网格无关性验证

如图 3 所示,计算域边界层采用结构网格划分,其余区域采用非结构网格划分。叶栅表面和气膜孔附近的网格加密处理。边界层网格第 1 层高度 0.02 mm,网格增长率为 1.2,共 12 层。数值模拟运用分离式隐式求解器,采用 Realizable $k - \varepsilon$ 湍流模型,压力速度耦合采用 SIMPLC 计算方法,各物理量空间离散均采用二阶迎风格式。采用增强壁面函数处理。计算结果壁面附近 $y^+ < 5$,满足增强壁面函数的要求。

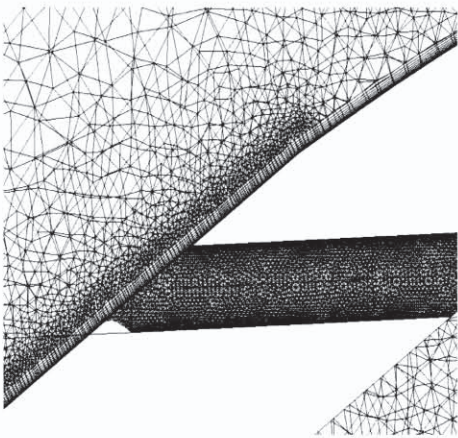


图 3 气膜孔附近网格
Fig. 3 Grids near film hole

为保证达到计算结果的网格无关性要求,通过对壁面边界层网格加密得到 100 万,210 万和350 万节点数的 3 套网格,并进行仿真计算。得到的吸力面传热系数如图 4 所示,图中横坐标为各点轴向坐标 X 与轴向弦长 L_x 的比值,横坐标原点位于叶片前缘,纵坐标为传热系数 H 。网格数量 100 万时的展向平均传热系数与网格数量 210 万时的计算结果最大偏差 12.29%,210 万与 350 万网格数量时的计算结果最大偏差 1.8%,说明 210 万网格数量的计算结果达到网格无关性要求。本文采用 210 万节点数的网格进行计算分析。

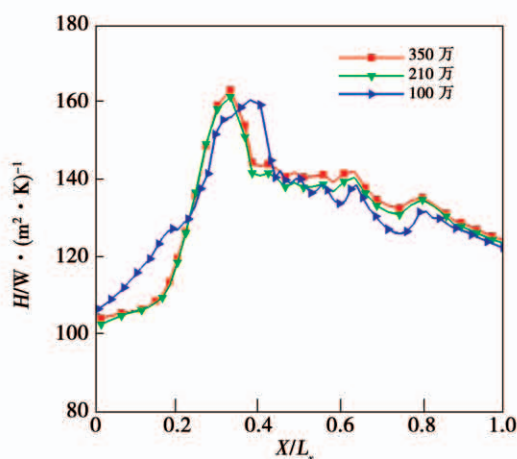


图4 网格数量对吸力面展向平均传热系数影响
Fig. 4 Effect of grid numbers on spanwise average heat transfer coefficient of suction surface

2 计算结果与分析

2.1 传热系数二维分布

吸力面在不同堵塞比条件下模型的传热系数二维分布如图5所示,横坐标 X/D 为叶栅型面上各点距离气膜孔出口的弧长与气膜孔直径的比值;纵坐标 Y/D 为气膜在叶片高度方向的扩展距离与气膜孔直径的比值。在所有吹风比下,当堵塞比 B 为0和0.2时,传热系数分布相差很小。因此,堵塞比 B 为0.2时对传热系数的影响可以忽略不计。吹风比为0.5时,随着堵塞比增大,近孔区域传热系数大于 $160 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 的高传热系数区域面积逐渐减小。

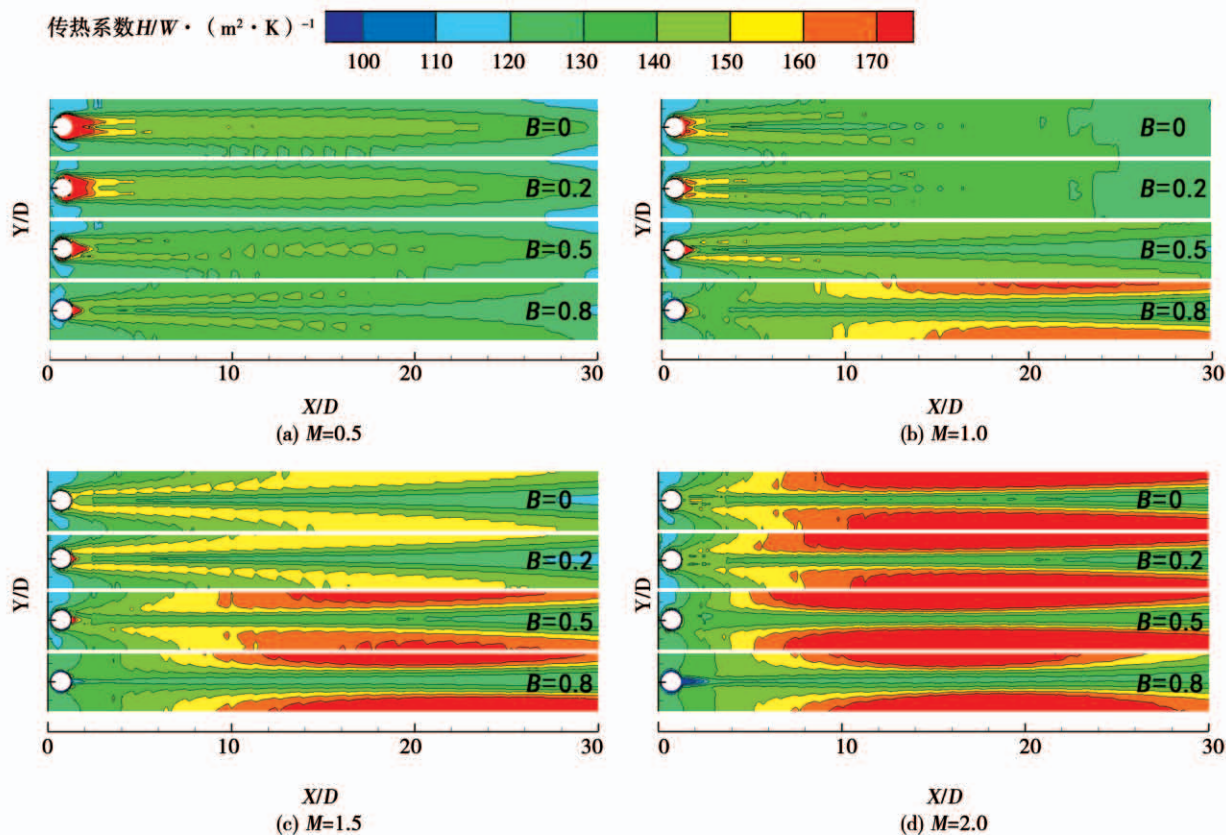


图5 不同吹风比下堵塞比对传热系数分布的影响

Fig. 5 Effect of blockage ratio on distribution of heat transfer coefficient at the different blowing ratios

吹风比 M 为1.0和1.5时,各堵塞比下的传热系数二维分布相似,气膜孔中心线附近区域传热系数较低,中心线两侧出现呈“八”字型对称分布的条状高传热系数区域。随堵塞比增大,条状区域的面积增加、传热系数增大。这是因为大堵塞比使冷气

射流的穿透性增强,射流形成的肾形涡尺度和强度增加,将主流卷吸到壁面,提高了条状区域的传热系数。吹风比为2.0时,通过堵塞比为0.8的气膜孔的冷气射流速度提高,穿透性强,导致肾形涡涡心距离壁面变远、冷气掺混后覆盖面积增大,因此堵塞比

$B=0.8$ 时高传热系数区域面积小于 $B=0.5$ 时。

由图 6 可知,堵塞使冷气射流的垂直壁面动量增大,并形成了肾形涡。近孔区域肾形涡心与壁面距离随堵塞比增大而增加,肾形涡对近孔区域壁面

边界层影响减小,使这一区域的传热系数随之减小。随着主流流动,射流与主流掺混程度增大,冷气对壁面的影响逐渐减小,远孔区域传热系数分布逐渐均匀。

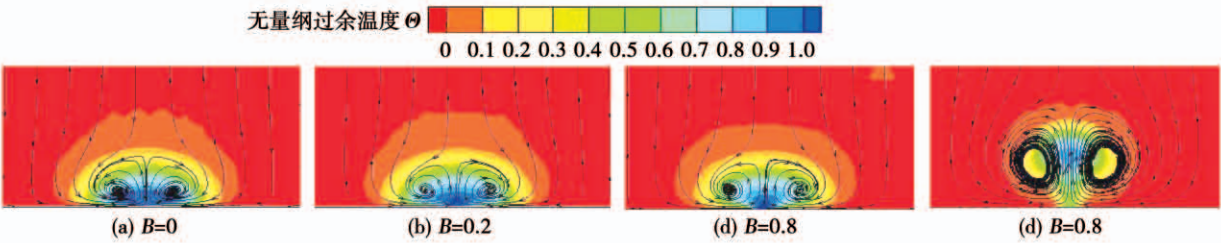


图 6 吹风比 $M=0.5$ 时气膜孔下游 1 倍孔径处截面流线

Fig.6 Sectional streamlines at 1 time of hole diameter downstream of film hole at blowing ratio of 0.5

2.2 传热系数展向平均值

各吹风比下不同堵塞比模型的相对传热系数如

图 7 所示。纵坐标 H/H_0 为相对传热系数,即有气膜冷却时传热系数与无气膜叶栅传热系数的比值。

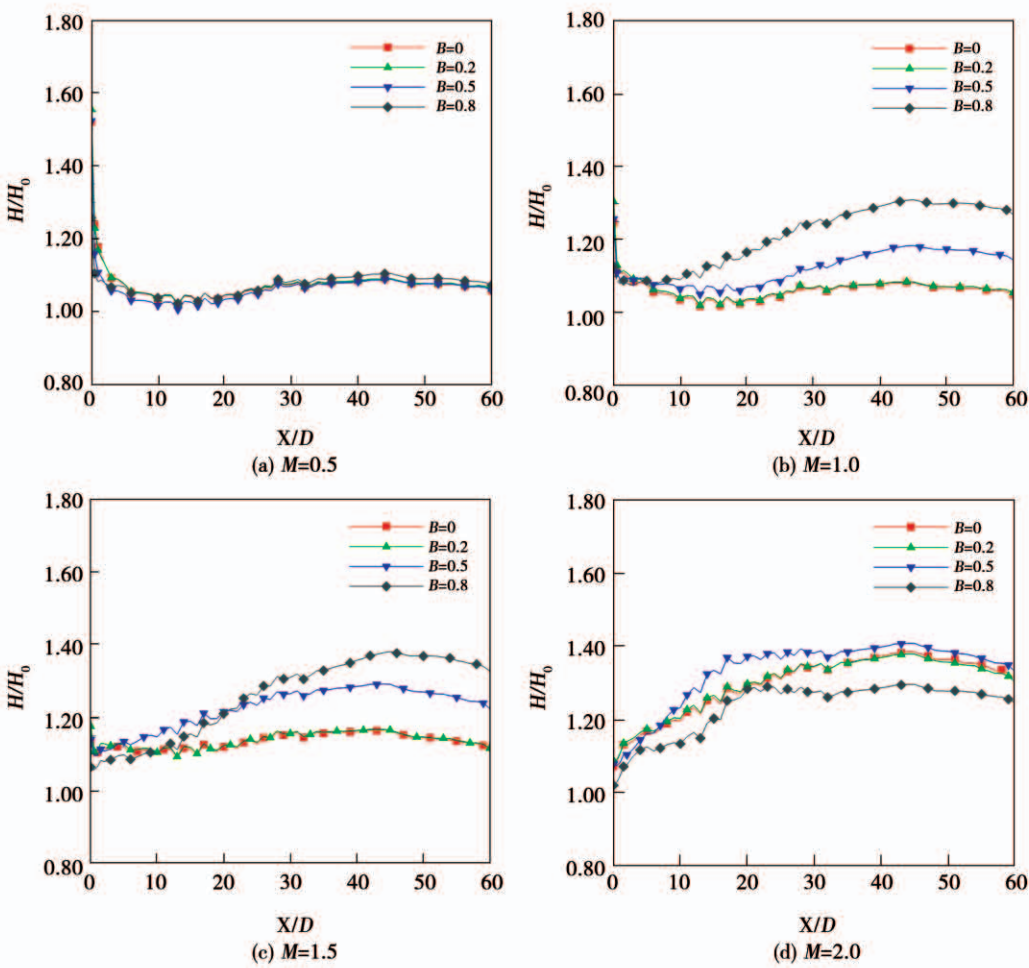


图 7 各吹风比下堵塞比对相对展向平均传热系数影响

Fig.7 Effect of blockage ratios on relative spanwise average heat transfer coefficients at the different blowing ratios

在 4 种吹风比下, $B=0.2$ 与 $B=0$ 时的展向平均相对传热系数曲线非常接近, 说明小堵塞比 0.2 对传热系数影响很小。吹风比为 0.5 时, 4 种堵塞比下的相对传热系数曲线及数值相差较小。吹风比为 1.0 时, $B=0.5$ 比 $B=0$ 时的相对传热系数高出 1% ~ 5%; $B=0.8$ 比 $B=0$ 时的相对对传热系数高出 2% ~ 9%。吹风比为 1.5 时, $B=0.5$ 比 $B=0$ 时的相对传热系数高出 1.72% ~ 7.21%。在 $X/D < 9$ 的区域, $B=0.8$ 比 $B=0$ 时的相对传热系数低 1% ~ 11.30%; 在 $X/D > 9$ 区域, $B=0.8$ 比 $B=0$ 时的相对传热系数最大高出 12%。吹风比为 2.0 时, $B=0.5$ 时的孔下游相对传热系数比 $B=0$ 时高出 1% ~ 6.35%; $B=0.8$ 时的相对传热系数比 $B=0$ 时低 3.79% ~ 7.59%。这与传热系数的二维分布结果是一致的。

综合来看, 堵塞比 B 为 0.2 时对传热系数分布及大小影响极小, 可以忽略。吹风比为 0.5, 1.0 和 1.5 时, 孔下游传热系数随着堵塞比增大而增大, B 为 0.5 时传热系数最大增加 5% ~ 7.2%。阻塞比为 0.8 时传热系数最大增加 9% ~ 12%。吹风比为 2.0 时, 孔下游传热系数随堵塞比增大而增加, 但由于冷气射流穿透性增强, 吹风比为 2.0 时, 堵塞比 B 为 0.8 时的传热系数小于堵塞比 B 为 0.5 时。

3 结 论

通过数值模拟分析了涡轮叶片吸力面气膜孔堵塞对叶片表面换热特性的影响, 得到的结论如下:

(1) 整体上堵塞比 B 为 0.2 时对传热系数数值及分布的影响很小, 可以忽略不计; B 为 0.8 时对传热系数的影响最大, 使传热系数数值最大增加 5% ~ 7.2%; B 为 0.5 时对传热系数的影响介于两者之间, 使传热系数的数值最大增加 9% ~ 12%。

(2) 堵塞使冷气射流向主流区域穿透能力增强。随着堵塞比增大, 冷气射流脱壁情况愈发严重。堵塞使肾形涡尺度和强度增大, 导致壁面传热系数增大, 随吹风比增大, 这种效应更为明显。

(3) 气膜孔堵塞导致的换热增强对叶片冷却具有不良影响, 导致传热系数分布不均匀、气膜冷却性能下降, 设计气膜孔结构时应该考虑如何避免气膜孔堵塞的情况发生。

参考文献:

- [1] HAN J C. Fundamental gas turbine heat transfer [J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2013, 5(2): 021007.
- [2] ITO S, GOLDSTEIN R J, ECKERT E R G. Film cooling of a gas turbine blade [J]. Journal of Engineering for Power, 1978, 100(3): 476.
- [3] 戴 萍, 林 枫. 燃气轮机叶片气膜冷却研究进展 [J]. 热能动力工程, 2009, 24(1): 1-6, 139.
DAI Ping, LIN Feng. Key developments of industrial gas turbine [J]. Thermal Power Generation, 2009, 24(1): 1-6, 139.
- [4] 李月茹, 戴 韧, 王 蛟, 等. 双层板冲击-气膜复合冷却结构冷却性能的数值分析 [J]. 热能动力工程, 2015, 30(4): 535-540, 648-649.
LI Yue-ru, DAI Ren, WANG Jiao, et al. Numerical analysis on cooling performance of combined impingement and film cooling on double-layered plate [J]. Thermal Power Generation, 2015, 30(4): 535-540, 648-649.
- [5] SHEFFLER K D, GUPTA D K. Current status and future trends in turbine application of thermal barrier coatings [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1988, 110(4): 605-609.
- [6] SAHITH, M S, GIRIDHARA G, KUMAR R S. Development and analysis of thermal barrier coatings on gas turbine blades - a review [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(1): 2746-2751.
- [7] HYLTON L D, MIHELIC M S, TURNER E R, et al. Analytical and experimental evaluation of the heat transfer distribution over the surfaces of turbine vanes: final report [M]. General Books LLC, 2012.
- [8] SMIRNOV E M. Recent progress in numerical simulation of highly three-dimensional turbulent flows and endwall heat transfer in turbine blade cascades [J]. Heat Transfer Research, 2011, 42(1): 25-44.
- [9] LIU Dong-dong, TAO Zhi, LUO Xiang. Experimental investigation of heat transfer characteristics on turbine endwall with full coverage film cooling [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 140: 295-303.
- [10] 张宗卫, 朱惠人, 刘 聪. 全气膜冷却叶片表面传热系数和冷却效率研究 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(7): 103-107.
ZHANG Zong-wei, ZHU Hui-ren, LIU Cong. Heat transfer coefficient and film cooling effectiveness on a full-film cooling vane [J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2012, 46(7): 103-107.
- [11] 朱惠人, 马 兰, 许都纯. 孔位对涡轮叶片表面气膜冷却传热系数的影响 [J]. 推进技术, 2005, 26(4): 302-306.
ZHU Hui-ren, MA Lan, XU Du-chun. Influences of position of hole-rows on film cooling heat transfer of turbine blade surface [J]. Journal of propulsion technology, 2005, 26(4): 302-306.