

文章编号: 1000-8055(2008)08-1364-06

叶片内部蒸汽冷却的数值模拟

童齐宝 王锁芳

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 在某燃气轮机第二级导向叶片的基础上,对叶片内部进行了设计并采用内部蒸汽冷却方式. 采用非结构化网格和 Realizable $k-\varepsilon$ 紊流模型,对同时带 15° 、 30° 和 45° 肋的叶片内外流场以及叶片本身进行了三维热耦合的定常数值模拟. 热耦合采用在流固耦合面的热对流和固体导热来实现. 内部冷却介质选用比空气热容大、粘度低的水蒸汽. 结果表明:带肋的通道流场非常复杂,扰流肋的存在使各壁面的换热都得到了增强,相对于光滑通道换热显著,有明显的冷却痕迹,冷却效果明显;采用蒸汽冷却比用空气冷却效果要好;压力面温度普遍低于吸力面温度.

关 键 词: 蒸汽冷却; 热耦合; 肋; 数值模拟

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Numerical simulation of a steam-cooled vane

TONG Qi-bao, WANG Suo-fang

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The steam cooling method was applied in this paper to study the design and characteristics of cooling structure for a vane of gas turbine. The unstructured meshes and realizable $k-\varepsilon$ turbulence model were used to study the flow behaviors both inside and outside the grid-ribbed rectangular channel with 15° , 30° and 45° rib-roughened wall through 3-D coupled numerical simulation. Coupling heat exchange was achieved by heat transfer and solid conduction on the coupled-side of fluid and solid. The cooling medium was steam which had greater C_p and lower viscosity than air. Results show that the flow of the passage is very complex. Heat transfer is enhanced because of the ribs. Ribbed wall has better heat transfer effect than the no rib wall and the cooling effect is obvious. Cooling effect is better by using the steam than by using the air. The numerical result shows the temperature on pressure surface is lower than suction surface.

Key words: steam cooling; heat coupled; rib; numerical simulation

燃气轮机是继蒸汽轮机和内燃机之后的新一代动力装置,是典型的高科技产业.燃气轮机的可靠性、长寿命主要取决于热端部件能否安全可靠地工作,这就对燃气轮机的工作环境设计提出更高的要求,需要有一个有效的冷却系统.燃气轮机输出功率随着进口温度的提高而增大,叶片的冷却可以提高燃气轮机的进口温度,使材料可允

许的温度增大.目前,大多数的燃气轮机叶片还是用空气冷却.近来国内的一些研究机构都提出在燃气轮机中采用蒸汽冷却^[1-3]因为水蒸汽热容大,较好地弥补了空气冷却的缺点.蒸汽冷却技术的应用可以减少冷却密封空气在压气机的抽取量,有利于提高压气机的效率,乃至提高燃气轮机的热效率.蒸汽的纯度也是至关重要的,应避免杂质

收稿日期: 2007-07-18; 修订日期: 2007-12-17

作者简介:童齐宝(1982-),男,江苏南京人,硕士生,研究方向为热能与动力工程专业.

堆积在叶片喷嘴的内表面上。

本文通过对燃气轮机第二级导向叶片燃气流场和蒸汽流场的定常耦合^[4]来得到叶片的温度分布,运用耦合传热计算可以在耦合边界处得到更精确的温度和热流率。

1 数值计算

1.1 计算模型及控制方程

为了提高导向叶片的冷却效果,在叶片内部狭窄通道内布置了大量的扰流肋片以提高内部冷却蒸汽的紊流度提高其换热效果,图 1 所示为网格化肋化通道^[5],以中弧面为界,交错排列,形成的网格状通道。这里采用对流换热冷却的模式进行设计,研究的叶栅一周共有 48 个叶片组成,冷却蒸汽由叶尖进口处流入经过冷却换热后从叶片尾缘劈缝流出,并与主燃气掺混。

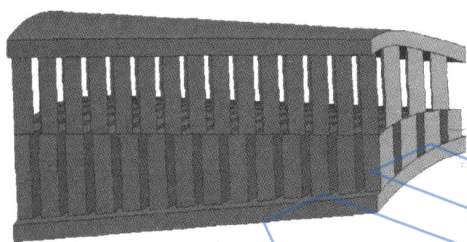


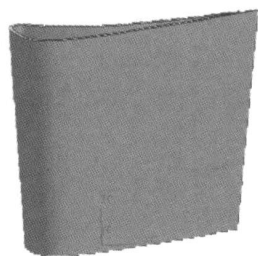
图 1 内部网格化肋化通道(局部)

Fig. 1 Grid-ribbed rectangular channel (Local)

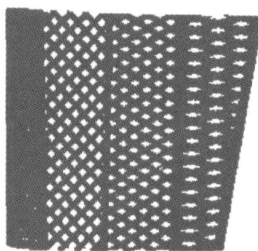
建立流体域和固体域,在这里建立了 3 个独立的区域:叶片固体区域、蒸汽流域和燃气流域,如图 2 所示,周向为周期性边界条件,在 Fluent 中生成两个流固耦合边界面。

建立几何模型,划分网格并提高网格质量,流固耦合处的网格如图 3 所示,上面为燃气流域网格,中间狭长带为叶片厚度区域网格,下面为内部蒸汽流域网格。由于叶片壁很薄,在固体区域布置了较密的网格,网格在耦合面上自动衔接,所以从网格局部放大示意图中可以看出从叶片外表面到叶栅通道边缘呈现由密到疏的分布。

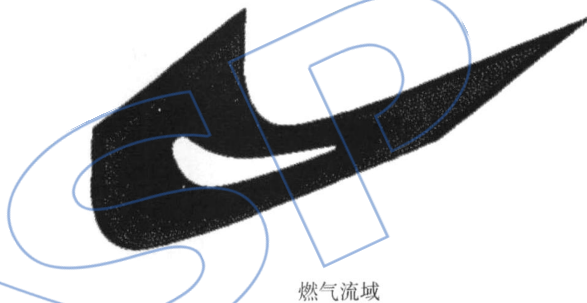
目前关于叶片热环境计算主要采用的是分离迭代求解法,也有称作松弛耦合法。这种方法计算量大而且数据转换麻烦,整个迭代过程中需要采用不同的求解方法,工作量大,求解周期长,并且计算方法不同使得流固边界网格很难统一,数据转换带来一定的误差,作为瞬态分析这种解法就更有所不足。近年来国内一些研究机构关于气热耦合一体化在实际复杂结构的涡轮冷却叶片展开



叶片固体区域



蒸汽流域



燃气流域

图 2 计算流域

Fig. 2 Computational region

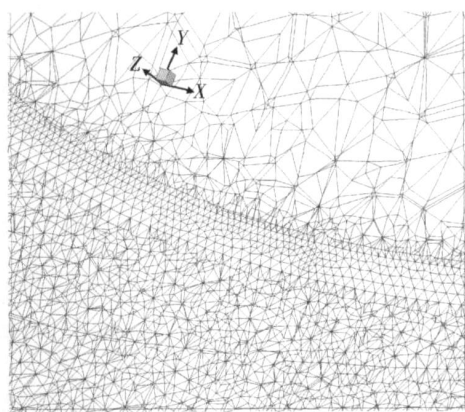


图 3 流固耦合处网格(三维局部)

Fig. 3 Computation grid at coupled-side (3-D local)

了研究,从理论上讲,气热耦合一体化计算可以得到更准确的计算结果,计算效率也大大提高,特别是在对叶片热环境的准确预测提出更高要求时尤为重要。

在热耦合一体化计算中,耦合面上的温度和热流率必须是连续的。对于固体区域,由于密度随空间位置不变,因此不需要求解连续方程和运动方程,只要求解能量方程就可以了。外部燃气对固

体的热流率应与内部蒸汽对固体的热流率相等,在每一个迭代步,应用上个迭代步计算出的温度计算流固耦合面上的热流率,来计算耦合壁面上的温度.

对于流体区域的控制方程采用三维定常 N-S 方程,其守恒运动方程组如下:

连续方程

$$\nabla \cdot (\rho U) = 0$$

动量方程

$$\nabla \cdot (\rho U \otimes U) =$$

$$\nabla \cdot (-\rho \delta + \mu(\nabla U + (\nabla U)^T)) + S_M$$

能量方程

$$\nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E$$

变物性可压缩流体的滞止焓表示如下: $h_{tot} = h + U^2/2$, 这里焓是温度和压力的函数. 对理想气体来说, 理想流体密度的工程热力学方程如下: $\rho = w(p + p_{ref})/R_0 T$

1.2 边界条件

采用质量流率进口, 静压出口对于计算更容易收敛. 总燃气流率为 342.4 kg/s, 总温 $T_{tot} = 1271$ K, 尾缘下游截面为压力出口边界, 压力为 0.74 MPa; 冷却蒸汽为质量流率进口边界, 采用过热蒸汽, 流率为 0.3 kg/s, 方向为气流入射方向, 总温 670 K. 设定壁面为无速度滑移, 外部流场壁面都设置为绝热边界, 叶片与两侧流体交接处设置为热固耦合边界. 依照上面条件对应 Fluent 中设置, 得到边界条件, 网格总数为 455 万左右.

2 计算结果与分析

2.1 燃气流域速度与压力分布

图 4、图 5 显示了燃气流域一半高度流场的速度分布和压力场分布. 从图 4 可以看出尾缘 1 处的速度最大, 其次是尾缘 2 处的速度, 因为内部蒸汽到尾缘处由于出口流道突然变得狭小在流率不变的情况下导致速度突然增大, 使 2 处的速度可达到 460 m/s, 1 处达到了 475 m/s 且在 1 处附近有明显的速度梯度; 最小速度出现在滞止点及靠近滞止点附近的压力面上和尾缘局部地区, 最小达到 28 m/s. 从滞止点出发沿着吸力面方向速度呈现迅速增大后逐渐回落的现象, 这与图 5 的压力场相对应. 从图 5 的燃气流域压力场可以看到进口到出口燃气的压力总体在降低, 压力最小值出现在流域的喉部 1 处.

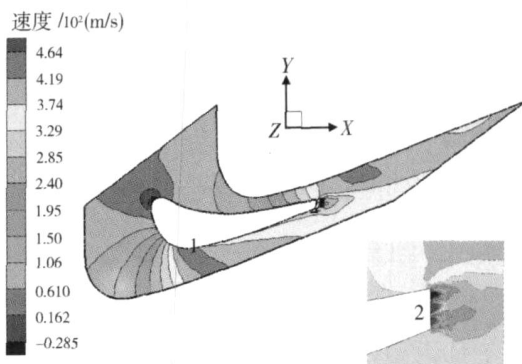


图 4 燃气流域中截面处的速度分布及尾缘放大图

Fig. 4 Velocity vector at mid-section of gas region

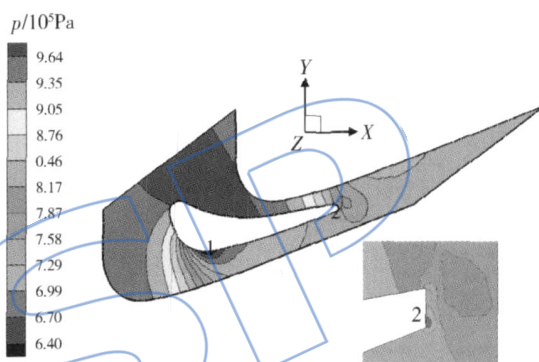


图 5 燃气流域在中截面处的压力分布及尾缘放大图

Fig. 5 Pressure distributions on mid-section of gas region

2.2 内部流场与叶片表面温度分布

图 6 为内部蒸汽流域肋化通道的局部流场, 可以看到从前缘流过来的蒸汽在不同角度肋排间的空隙中相互冲击又急转到另一角度的肋化通道. 在 300 肋与 150 肋间甚至有涡流存在, 而在尾缘处可以看到此时的流线异常密集, 此时在尾缘狭小的出口处速度达到最大, 还可以看到有少量流线向内回流, 这是由于冷却结构的影响, 在局部地区冷气流变小, 无法平衡外部主流的压力产生回流且导致少量燃气流进叶片, 这也解释了下面内腔压力分布图中为什么在靠近尾缘处有狭长的低压带.

在内壁面布置这些扰流肋可以很好的干扰蒸汽流动使蒸汽紊流度增大, 充分的与内壁面相接触, 更好的加强蒸汽与叶片的对流传热. 但是由于冷却流道存在许多折弯使得蒸汽每经过一个折弯压力都有所下降和损失, 从蒸汽进口到出口由 1.30 MPa 下降到 0.574 MPa 左右, 特别是在靠近尾缘最后一个折弯处压力损失最大且压力梯度也最大, 如图 7 所示.

经过耦合计算, 得到叶片表面温度, 如图 8 和

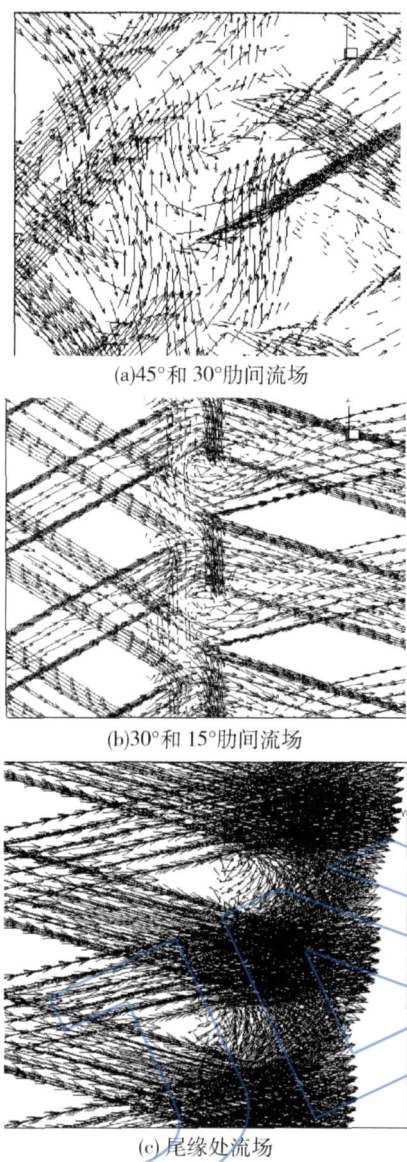


图 6 内部肋化通道流动(局部)

Fig. 6 Flow behaviors inside of ribbed wall (Local)

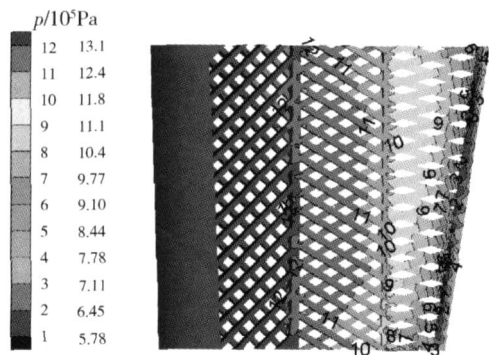


图 7 内部冷却腔压力分布

Fig. 7 Pressure distributions inside of blade

图 9 所示显示了叶片压力面和吸力面的温度分布. 从图 8 和图 9 可以看到叶根处的温度最大达到了 1 160 K 左右, 而大致在 45 肋与 30 肋间的

叶片压力面附近温度最低, 并有很大的低温区域, 压力面普遍低于吸力面上的温度. 由于内部蒸汽冷却流道的存在, 叶片外表面有明显的冷却痕迹, 但在靠近蒸汽入口附近的叶片表面温度梯度和尾缘附近温度梯度比较大, 这些地方的热应力比较大, 在叶片的以后设计和改进中值得注意.

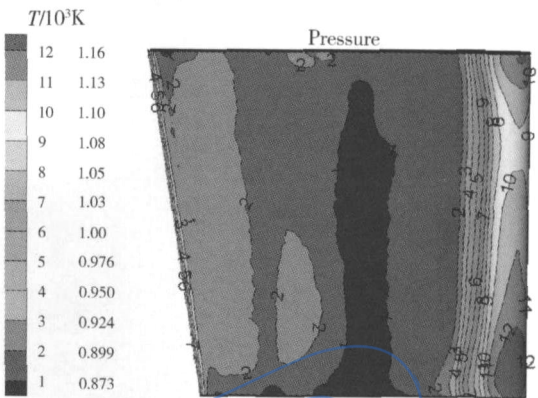


图 8 叶片压力面表面温度分布图
Fig. 8 Temperature distributions on suction surface of blade

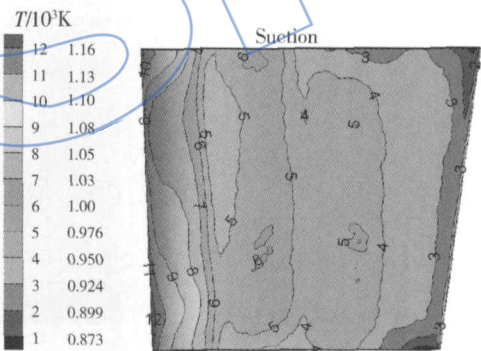


图 9 叶片吸力面表面温度分布图
Fig. 9 Temperature distributions on pressure surface of blade

2.3 几种不同工况下叶片表面温度分布

为了更好的分析蒸汽冷却的优点, 下面将与空气冷却做比较. 表 1 是蒸汽和空气主要物性参数对比, 特别是两者的比热相差很大, 这将直接导致两者的冷却效果不同.

在相同模型基础上采用空气冷却, 除物性参数与蒸汽不同外其他边界条件与蒸汽冷却设置相同, 并和没有冷却结构的光滑通道相比较. 图 10 列举了在用空气和蒸汽冷却时的叶片表面分布图, 可以直接看到不同工况下叶片压力面和吸力面上的温度分布对比情况.

图 10(a) 是用空气冷却, 无冷却结构, 光滑通道时叶片表面温度分布图, 在叶根和吸力面上有

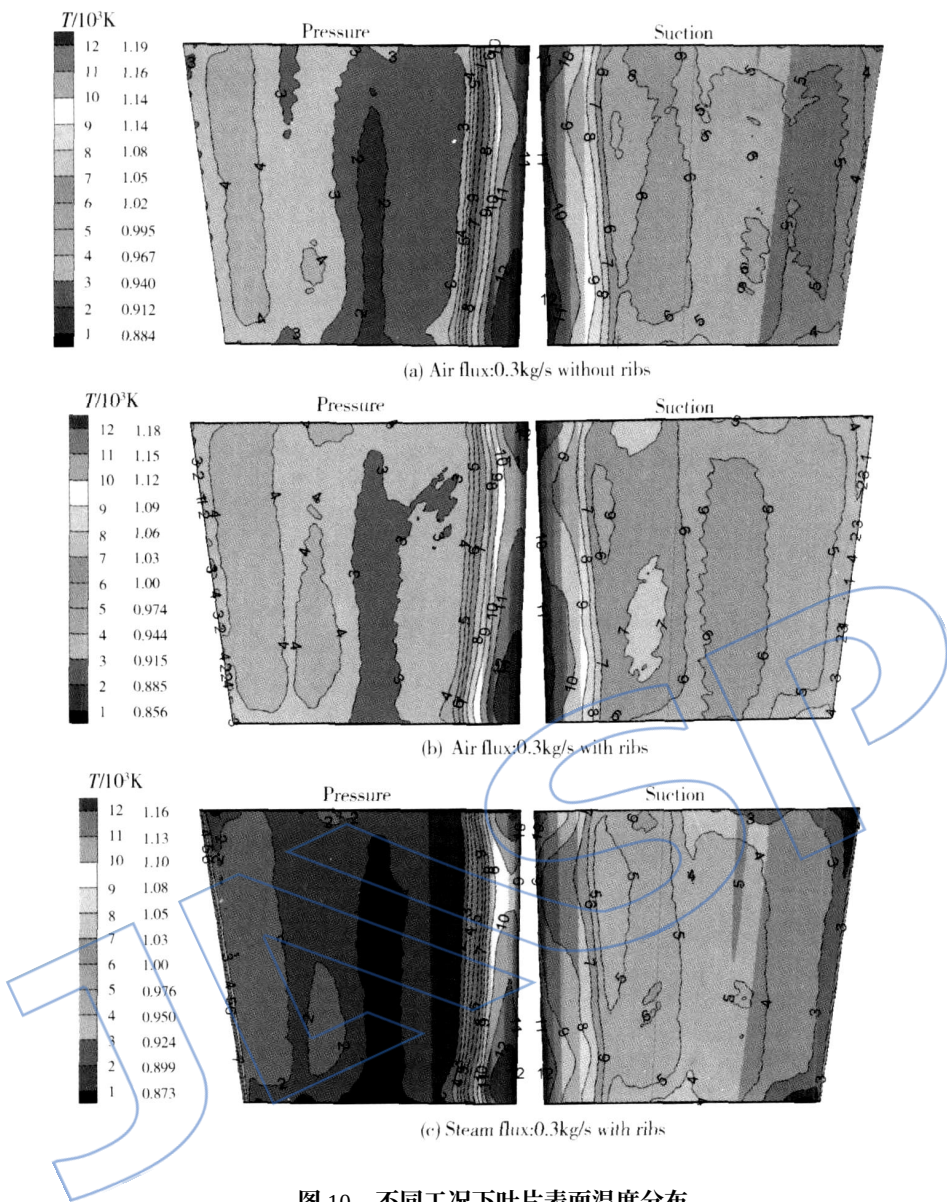


图 10 不同工况下叶片表面温度分布

Fig. 10 Temperature distributions on surface of blade with different cooling means

表 1 空气和蒸汽的物性参数
Table 1 Parameters of air and steam

参数	空气	蒸汽
比热/ (J/ (kg · K))	1 067	2 120
导热系数/ (W/ (m · K))	0.05	0.056
粘性系数/ 10 ⁻⁵ (kg/ (m · s))	1.789 4	1.34

很大的高温区域,明显区别于带冷却结构时的温度分布,而且温度分布不均匀,在局部区域产生较高的热应力。从图 10 温度分布图可以看到由主流引起的受热最严重的区域都是叶片前缘根部,这是由于叶片内部的冷却结构导致叶根附近冷气流动比较微弱,成为冷却的死角,形成了高温区。有冷却结构的叶片表面温度明显区别于无冷却结构

时的温度,冷却痕迹明显,且冷却结构叶片表面温度普遍降低,温度分布比较均匀,压力面温度普遍比吸力面低。用蒸汽代替空气和增加蒸汽流率都能很好的降低叶片表面温度,从最高温度和低温区域的变化可以看出冷却效果明显。

图 11 是沿着叶高一半做出的中间流面线为空间载体的温度分布图,它的横坐标为这条流面线上的无量纲距离,在前缘处它的值为 0,尾缘处它的值为 1。

在表 1 中列出了 3 条不同的半封闭冷却线,从上到下依次为光滑通道空气冷却线,有肋化通道空气冷却线,流率为 0.3 kg/s 带肋蒸汽冷却线,很明显 4 条曲线平均温度不同。最上面不带肋,空气流率为 0.3 kg/s 的冷却线,叶片外表面

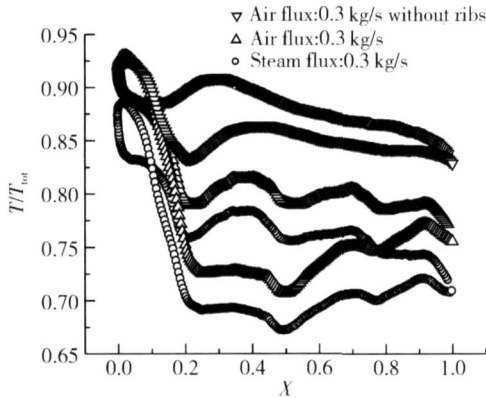


图 11 不同冷却方式叶片表面温度对比图

Fig. 11 Contrast of temperature distributions on surface of mid-section with different cooling means

最高温度由 0.931 倍 T_{tot} 下降到 0.725 倍 T_{tot} , 平均温度为 0.847 倍 T_{tot} ; 紧接着下面带肋, 空气流率为 0.3 kg/s 的冷却线叶片外表面最高温度由 0.936 倍 T_{tot} 下降到 0.697 倍 T_{tot} , 平均温度为 0.774 倍 T_{tot} ; 最下面蒸汽流率为 0.3 kg/s 时的冷却线, 最高温度由 0.905 倍 T_{tot} 下降到 0.688 倍 T_{tot} , 平均温度为 0.714 倍 T_{tot} , 温度分布趋势与董威等^[6]和董瑜^[7]等有一定的相似。由冷却效果的比较可以看到带肋比不带肋冷却效果好, 蒸汽冷却效果比空气冷却效果好, 物性参数的不同确实影响叶片的换热效果。

3 结 论

1) 在叶片内壁面上布置扰流肋片可以加强蒸汽与叶片的对流换热, 内部冷却流道曲折压力损失变大, 在尾缘处压力损失最大且梯度最大。

2) 采用蒸汽冷却后, 对比空气冷却可以看到叶片表面温度明显下降, 冷却效果比空气要好, 并且叶片表面温度分布较为均匀, 局部区域存在温度梯度。

3) 通过数值模拟计算发现, 采用气热耦合的方法研究热环境下冷却叶片是有效的。

参考文献:

- [1] Facchini B, Ferrara G, Innocenti L. Blade cooling improvement for heavy duty gas turbine: the air coolant temperature reduction and the introduction of steam and mixed steam/air cooling[J]. Int. J. Therm. Sci., 2000, 39: 74-84.
- [2] Kruger U, Kusterer K, Lang G. Analysis of the influence of cooling steam conditions on the cooling efficiency of a steam-cooled vane using the conjugate calculation technique[R]. ASME Turbo Expo 2001- GT-0166.
- [3] 胡宗军, 吴铭岚. 采用蒸汽冷却的各种燃气轮机循环性能分析[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(3): 335-338. HU Zongjun, WU Minglan. Performance analysis of various gas turbine cycles using steam cooling[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1999, 33(3): 335-338. (in Chinese)
- [4] 李海滨, 冯国泰, 王松涛, 等. 涡轮三维叶栅的气热耦合数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(5): 770-772. LI Haibin, FENG Guotai, WANG Songtao, et al. Numerical simulation method of aerodynamics-thermodynamics coupling in 3-D turbine cascade[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(5): 770-772. (in Chinese)
- [5] 张勃, 吉洪湖, 张靖周, 等. 网格式肋化通道换热与总压损失特性研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(2): 201-205. ZHANG Bo, JI Honghu, ZHANG Jingzhou, et al. Experimental study of heat transfer and total pressure drop of a grid-ribbed rectangular channel[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(2): 201-205. (in Chinese)
- [6] 董威, 黄维娜. 某型发动机涡轮冷却叶片的流动换热耦合计算研究[J]. 燃气涡轮实验与研究, 2006, 19(2): 14-17. DONG Wei, HUANG Weina. Coupled computation study of the cooling turbine blade[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2006, 19(2): 14-17. (in Chinese)
- [7] 董瑜, 郑洪涛, 杨凡. 蒸汽冷却叶片耦合传热的数值模拟[R]. 南京: 中国航空学会第六届动力年会, 2006, CSAA 06-P-116.