

内部结构对空冷叶片换热性能的影响

苏 生, 胡 捷, 刘建军, 安柏涛
(中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190)

摘 要: 为了深入了解空冷透平动叶的冷却机理和冷气流动特性, 对某型燃气轮机透平动叶进行了气-热耦合数值模拟。结果表明, 叶片端部气膜孔可以促进冷气在蛇形通道中的流动, 改善冷却效果; 涡流矩阵通道中子通道的宽度与高度比减小会加大涡流矩阵通道中的流动阻力, 冷气在涡流矩阵通道中能得更充分的利用, 而对尾缘的冷却能力会下降, 致使尾缘温度升高, 因此其高宽比与冷气进口条件存在一个最佳组合关系; 涡流矩阵通道结构与叶尖之间的间隙会降低冷气的利用率。

关 键 词: 空冷叶片; 气热耦合; 叶片端部气膜孔; 蛇形带肋通道; 涡流矩阵通道; 叶尖内部间隙

中图分类号: TK472 文献标识码: A

引 言

随着对燃气轮机性能要求的提高, 透平前燃气温度早已超过涡轮叶片材料所能承受的极限温度, 这促进了人们对高效冷却技术的研究和开发。内部空气冷却作为一种有效的透平冷却形式被普遍采用, 其具体结构形式主要包括带肋蛇形通道、涡流矩阵通道以及各种绕流柱等。带肋蛇形通道的优点在于结构简单, 易于加工; 涡流矩阵通道的结构比较复杂, 其优势在于具有较强的强化换热能力, 同时还能使叶片具有很高的结构强度; 各种形式的绕流柱, 如针肋等, 普遍应用于叶片尾缘劈缝之中, 来改进尾缘的冷却效果。

带肋蛇形通道与涡流矩阵通道是燃气轮机叶片内部冷却中应用非常广泛的结构。对于带肋蛇形通道的研究一般是将其简化为直通道或者 U 形通道^[1-4], 而涡流矩阵通道一般被直接从叶片中单独提取出来或者再加上尾缘劈缝部分进行建模研究^[5-6]。只有在为了得到更准确的叶片温度场而需要进行气热耦合计算时, 才将内部冷却结构考虑到

计算模型中, 而且这些模型往往比较简单^[7-9]。

本文对具有带肋蛇形通道与涡流矩阵通道的复合冷却结构的透平动叶中的流动和换热进行数值模拟, 并考虑了端部开气膜孔、涡流矩阵通道中肋片不同宽度与间距比以及叶片内部涡流矩阵结构与叶尖之间的间隙(以下将叶片内部涡流矩阵结构与叶尖之间的间隙简称为叶尖内部间隙)等具体内冷结构对冷却效果的影响。

1 计算模型

1.1 物理模型

图 1 为计算域及叶片内部结构示意图, 叶片高度约 140 mm。图 2(a)中 A、B 处为叶片端部气膜孔, C 处为叶尖内部间隙位置, A 孔直径为 3 mm, B 孔直径为 5 mm。图 2(b)为叶尖外部结构的放大图。在叶尖有一层凸台, 压力面上凸台由前缘延伸到尾缘, 吸力面上凸台由前缘延伸到叶片中部, 凸台为耐磨材料所对应的几何结构, 此次计算中将其与叶片设置为相同材料, 端部气膜孔被围于凸台中间。由于计算量较大, 暂不考虑凸台与机匣之间的间隙, 即叶顶间隙。

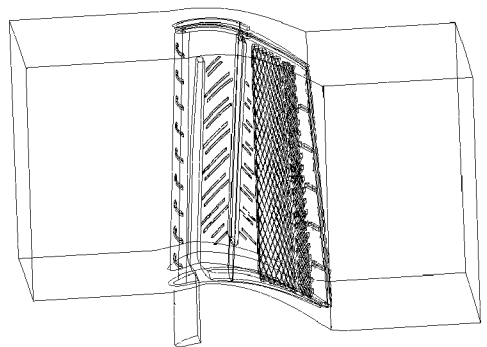


图 1 计算域(方案 4)

收稿日期: 2007-12-19; 修订日期: 2008-09-16

基金项目: 国家 863 计划基金资助项目(2002AA503010 2004AA503010)

作者简介: 苏 生(1981-)男, 四川仁寿人, 中国科学院工程热物理研究所博士研究生。

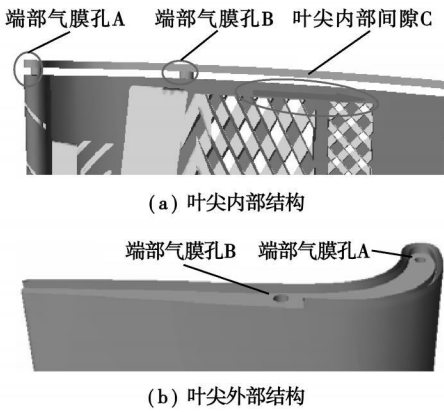


图 2 叶尖结构放大图

图 1 中, 叶片内部的左边部分为带肋蛇形通道, 中间部分为涡流矩阵通道, 右边部分为带加强筋的尾缘劈缝。对于涡流矩阵通道而言, 此次计算采用了两种结构: 一种是肋片倾斜角度为 60° (投影到子午面上, 与流向的夹角) 的整片涡流矩阵通道, 肋片间距与宽度尺寸包括 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 与 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 两种方案; 另一种是将其分为两部分, 左边部分倾斜 60° , 肋片的间距与宽度为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, 右边部分倾斜 45° , 肋片的间距与宽度为 $3\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 图 1 为第二种结构。

在图 1 所示叶片中, 冷气由前缘叶根进入叶片, 流入蛇形通道之后, 一部分通过两个叶片端部气膜孔沿叶尖吸力面后半部分流入主流, 其余冷气通过蛇形通道的两个拐角处进入涡流矩阵通道左边的缝隙, 并由此流入涡流矩阵通道之中, 最终由叶片尾缘劈缝流出, 并掺混在主流之中。

1.2 数值方法

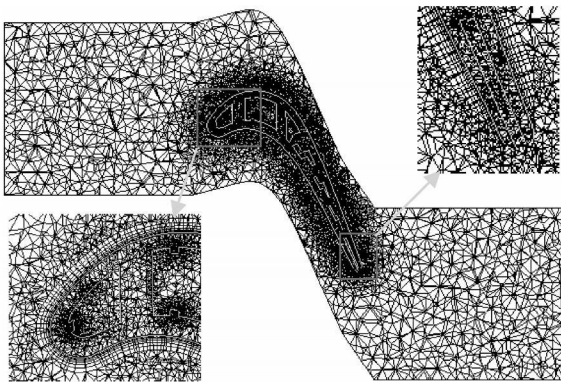


图 3 局部计算网格(方案 1)

采用商业软件 CFX5 进行建模和数值求解。计算程序采用有限体积法及全隐式方法求解三维定常粘性 N-S 方程。数值模拟中选用高雷诺数 $k-\epsilon$ 湍流模型加壁面函数法。计算选用二阶精度计算格

式, 计算残差收敛到 1×10^{-5} 。为了使计算得到的温度场更准确, 数值模拟中采用气热耦合方法, 考虑了叶片的导热。计算网格为非结构网格, 在叶片表面流体一侧采用膨胀边界网格(即三棱柱网格, 共 8 层)。为了便于生成网格, 在方案 3、4 中将叶片固体部分分为两段进行划分, 流体分为主流与冷气两部分进行划分。方案 1 中网格单元数超过 3 M, 方案 2、3、4 中网格单元数超过 4 M, 图 3 是方案 1 的局部计算网格。

1.3 边界条件

在主流及冷气的进口处给定完全气体质量流量、温度、流向及湍流速度, 并假定进口参数均匀分布, 出口给定静压力。机匣面、轮毂面设置为绝热壁面。根据气、热耦合方法, 叶片内、外表面设置为内部交接面。

各计算方案中, 冷气质量流量占主流流量的 1.37%, 冷气进口温度为主流进口温度的 37.39%。叶片材料假定为 44% 镍钢合金。

2 计算结果及分析

2.1 计算方案

本文研究的重点有 3 个: 涡流矩阵通道不同宽高比的影响; 端部气膜孔的影响; 叶尖内部间隙的影响。为了实现这些目的, 数值模拟中通过改动图 1 所示物理模型的局部结构, 设计了 4 个计算方案, 如表 1 所示。

表 1 计算方案

	端部气膜孔	叶尖内部间隙	涡流矩阵肋片
方案 1	无	无	倾斜 60° , 宽度间距尺寸 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$
方案 2	无	无	倾斜 60° , 宽度间距尺寸 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$
方案 3	有	无	靠前缘: 倾斜 60° , 宽度间距尺寸 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$; 靠尾缘: 倾斜 45° , 宽度间距尺寸 $2\text{ mm} \times 3\text{ mm}$
方案 4	有	有	同方案 3

2.2 计算结果及分析

图 4 是各计算方案中叶片温度场的分布, 给出的各示意图中, 对于压力面, 左边为前缘, 右边为尾缘; 对于吸力面, 左边为尾缘, 右边为前缘; 温度基准值 T_0 为计算模型主流的进口总温。

从图 4 中可以看出, 在各计算方案中, 叶片表面温度不是均匀分布的, 都存在相对低温区及相对高温区。在各计算方案中, 低、高温区的位置是基本一致的, 统一将它们标注在图 4(a) 中, 其中: A、C 处为高温

区, B 处为低温区。叶片最高温度以热斑形式出现在尾缘, 最低温度出现在蛇形通道位于叶尖的拐角处。

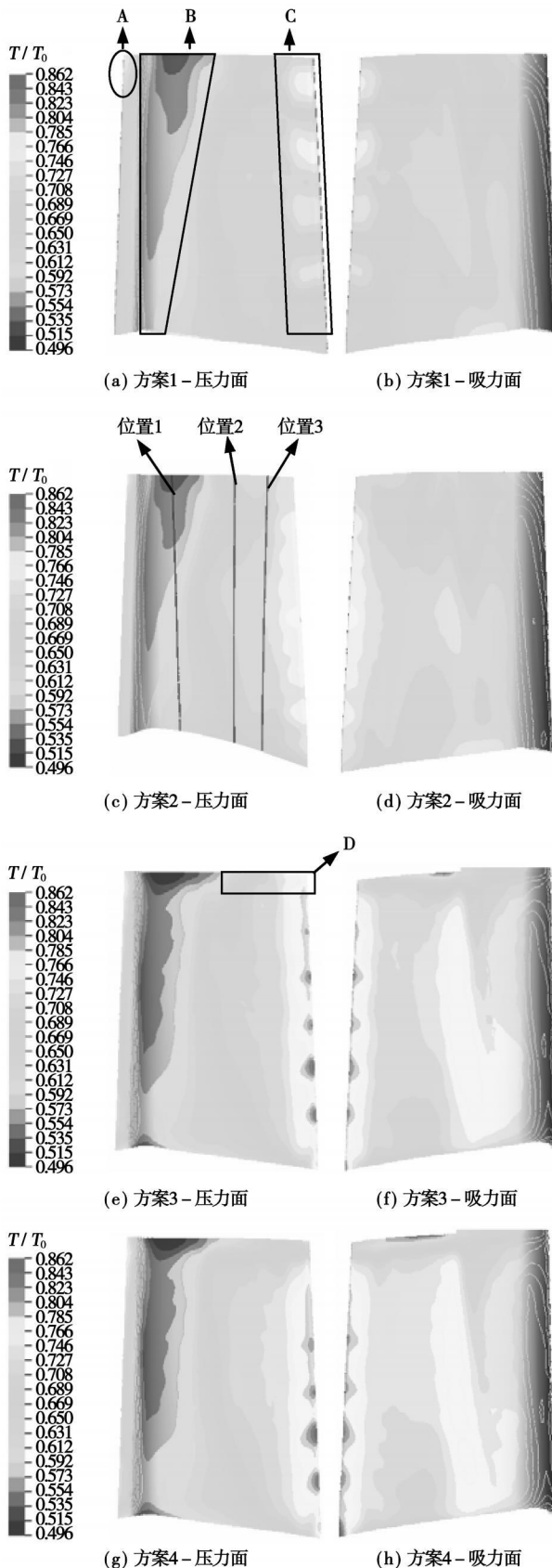


图 4 各计算方案的叶片表面温度分布

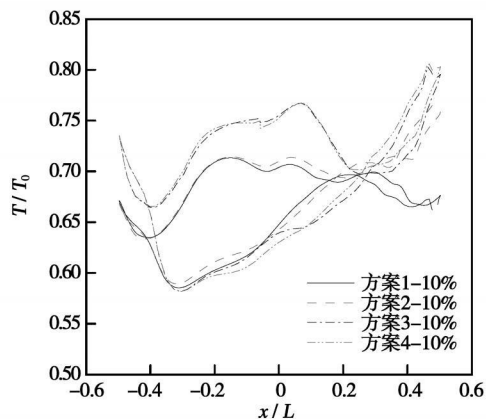
从流动来看, 冷气进入叶片之后, 在蛇形通道的 180° 拐角处产生很大的压降, 而且其下游的涡流矩阵通道具有较大的流阻, 于是, 蛇形通道后半段成为涡流矩阵通道上游的高压冷气集气腔, 而且此位置的冷气温度较低, 最终在此位置形成了大面积的相对低温区。在没有叶片端部气膜孔的方案中, 叶尖前缘的内部结构存在流动死角, 在 A 处产生了相对高温区。另外, 当冷气流过涡流矩阵通道到达尾缘劈缝时, 产生了较大的压降, 在局部地方甚至不能平衡主流的压力而产生主流流体进入劈缝的情况, 而且劈缝中的冷气温度已经较高, 冷却效果下降, 最终导致了尾缘劈缝 C 处相对高温区的出现。

在图 4 中, 相对于方案 1、2 的结果来看, 方案 3、4 中叶尖前缘 A 处没有出现相对高温区, 而且叶片前缘蛇形通道位置 B 处的相对低温区的范围有所扩大, 说明叶片端部气膜孔改善了 U 形拐角处的流动。靠近前缘的叶片端部气膜孔消除了叶尖前缘内部结构中的流动死角。两个叶片端部气膜孔都能适当地减轻 U 形拐角处由流体堆积而引起的堵塞, 从而有利于蛇形通道后半段中的流动, 让更大流量的冷气流经蛇形通道后半段之后, 由靠近叶根处流进涡流矩阵通道之中, 使得涡流矩阵结构左边的各个子通道的入口气流条件趋于一致, 改善了涡流矩阵通道的冷却效果。但是, 图 4 也明显地显示, 采用端部气膜孔之后由于经过尾缘流出的冷气量下降, 使得尾缘 C 处的温度上升了不少, 说明对于叶片端部气膜孔的设计有较大优化空间。

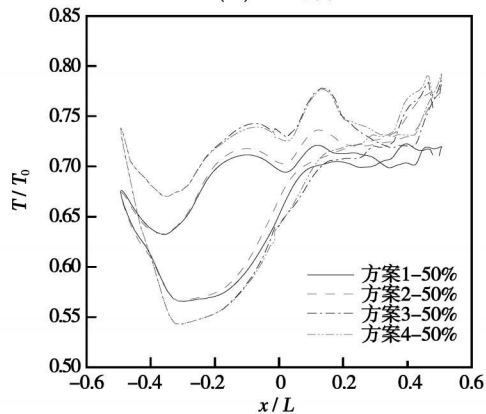
而方案 3、4 的结果与方案 2 的结果相比, 其温度梯度较高的区域向尾缘出口方向移动, 而且面积有所减小。这是因为在方案 3、4 中涡流矩阵通道靠近尾缘部分采用了宽度与间距为 $2\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的肋片, 其效果是使流经此处的冷气沿轴向的流动更加均匀了。综合 4 个方案的结果来看, 随着靠近尾缘的肋片的宽度与间距尺寸的减小, 尾缘高温区的温度梯度有下降的趋势, 而且叶片温度分布的均匀性更好。

图 5 给出了不同叶高处的叶片外表面温度分布, 其中横坐标为当地相对弦长, 可以看出, 在相同的轴向位置上, 叶片压力面温度普遍低于吸力面温度, 其最大差值出现在叶片中部。在 10% 与 90% 叶高位置上, 叶片压力面的最低温度基本一致; 在 50% 叶高处, 采用端部气膜孔的两个方案的最低温度有所降低, 蛇形通道后半段中的流速有所上升。图中显示, 采用端部气膜孔之后, 前缘、尾缘、中部吸力面温度都有所上升。前缘温度上升体现了采用端部气膜孔之后冷气

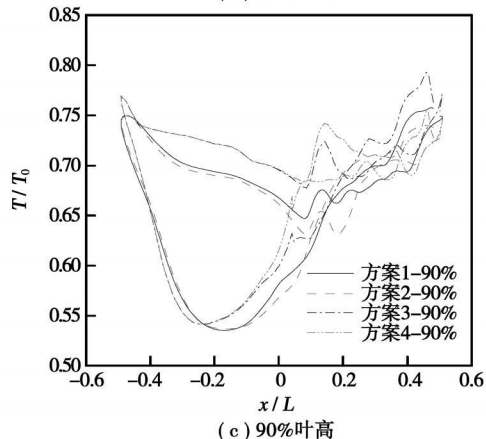
在蛇形通道拐角的流动得到了改善,尾缘与中部吸力面温度上升是由于一部分冷气从叶尖流入主流所致。从叶片尾缘处的温度曲线来看,随着涡流矩阵肋片结构的加密,尾缘附近的冷气冷却能力逐渐减弱,形成了尾缘温度逐渐升高的趋势。



(a) 10%叶高



(b) 50%叶高

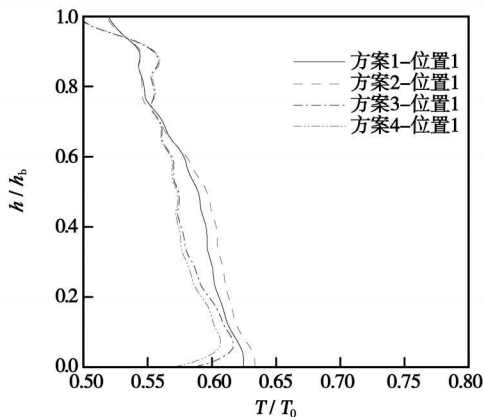


(c) 90%叶高

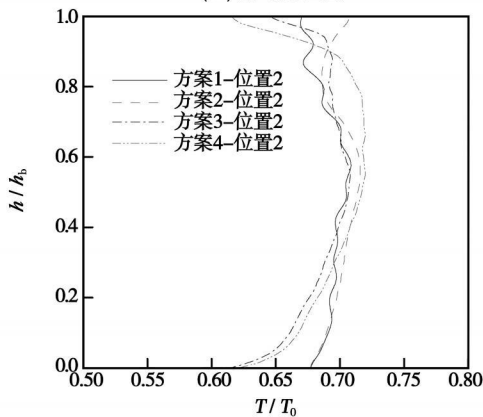
图5 不同叶高处叶片外表面温度分布

图6是3个轴向位置上叶片压力面外表面温度沿叶高的分布。3个轴向位置如图4(c)中所标识,它们由垂直于轴向的面与叶片表面相交得到,其中,位置1对应于蛇形通道后半段;在方案1、2中,位置2、3对应于涡流矩阵通道;在方案3、4中,位置2对应于叶片中部4 mm×4 mm 涡流矩阵通道,位置3

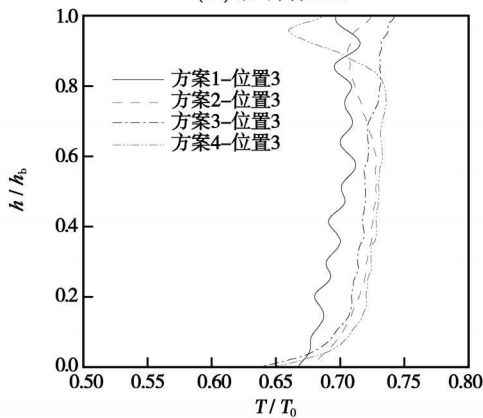
对应于靠近尾缘的2 mm×3 mm 涡流矩阵通道。从图6中可以看出,涡流矩阵肋片结构加密之后,沿叶高叶片中部的温度分布更光滑;采用端部气膜孔之后,叶根的温度有所下降,这跟蛇形通道后半段中的流动得到改善有关;增加叶尖内部间隙(图2(a)中C处)之后,叶尖靠近尾缘部分的温度下降不少,同时造成了较大的温度梯度。从分布规律来看,对于前缘的位置1上,叶根温度较高,沿叶高逐渐降低;位置2上则是中部较高;位置3上除了方案4之外基本上沿叶高呈增加趋势。



(a) 沿叶高位置1



(b) 沿叶高位置2



(c) 沿叶高位置3

图6 不同位置处叶片外表面温度沿叶高分布

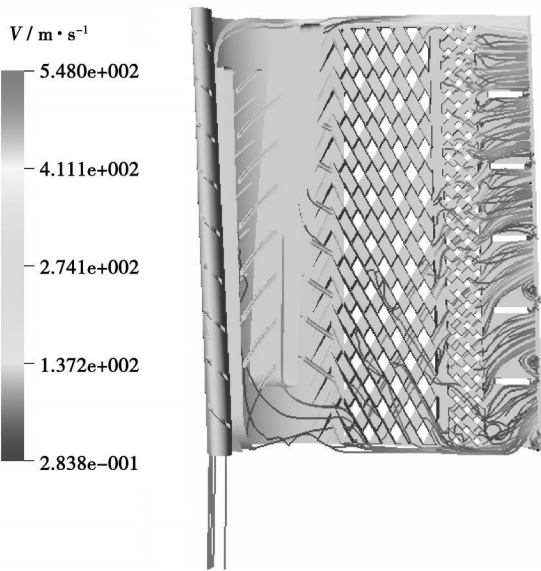


图 7 方案 4 中流经叶片尾缘劈缝的部分流线

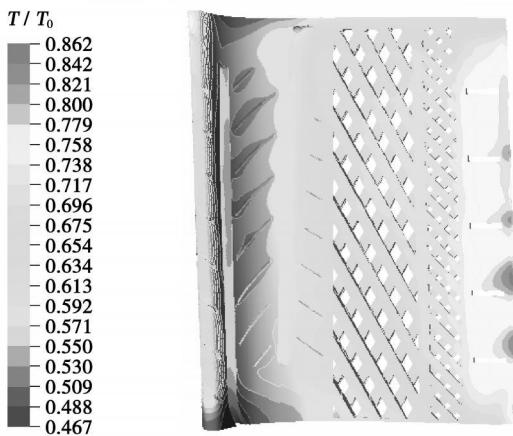


图 8 方案 4 中叶片内表面温度分布

图 7 是方案 4 中流经尾缘劈缝的部分流线图, 图 8 是方案 4 中叶片内表面温度分布图。方案 4 中采用叶尖内部间隙的目的是为了改善涡流矩阵通道中的流动并使尾缘叶尖得到很好的冷却。从图 4 的结果来看, 在方案 3 中 D 区域既没有出现温度最高点, 也没有出现温度梯度最高点, 说明方案 3 中 D 区域已经得到了较好的冷却, 所以方案 4 中由靠近叶尖处的尾缘劈缝流出的冷气量与方案 3 基本相同即可。由图 7 可以看出, 方案 4 中, 从叶尖内部间隙流出的冷气速度较大, 利用率很低, 造成了冷气的浪费。结合图 7 和图 8 来看, 叶片尾缘上的热斑位置与冷气流动息息相关, 如果流经叶尖内部间隙的冷气能更多地由当地的涡流矩阵子通道流入涡流矩阵通道中, 并最终使劈缝中冷气速度的向心分量(图 7 中的向下速度分量)得到增加, 则尾缘上由于回流引

起的热斑可以得到适当的抑止。综合上面的分析来看, 当离尾缘越近时, 叶尖内部间隙应该越小, 让当地的冷气尽可能多的进入涡流矩阵通道, 从而得到充分利用。

3 结 论

采用气热耦合方法对某型空气冷却的透平动叶中的叶片端部气膜孔、叶尖内部间隙的作用, 以及涡流矩阵通道中肋片宽度与间距尺寸对冷却效果的影响做了数值研究, 发现:

(1) 叶片端部气膜孔的存在是很有必要的, 它促进了冷气在蛇形通道中的流动, 改善了涡流矩阵通道的冷气入口条件, 而且可以对维护叶片内部结构带来方便;

(2) 在不考虑叶顶间隙的情况下, 叶尖内部间隙会造成对冷气的浪费, 其靠近尾缘处的间隙应该越小越好;

(3) 涡流矩阵通道中, 随着肋片宽度与间距的减小, 叶片温度场趋于更加均匀, 但是, 冷气在其中受到的流动阻力增大, 使得叶片尾缘温度由于受冷却而下降的幅度减小。

参考文献:

- [1] MAGI A, MONTOMOLI F, ADAMI P, et al. Experimental and numerical investigation of stationary ribbed ducts [R]. ASME Turbo Expo, GT2004-53180, 2004.
- [2] 邓宏武, 张 伟, 陶 智. 旋转状态下带肋 U 形通道内换热的实验研究 [J]. 推进技术, 2000, 21(1): 26-29.
- [3] LIU T M, HWANG Y S, LI Y C. Flowfield and pressure measurements in a rotating two-pass duct with staggered rounded ribbed skewed 45° to the flow [R]. ASME Turbo Expo, GT2004-53173, 2004.
- [4] MAURER M, VON WOLFERSDORF J, GRITSCH M. An experimental and numerical study of heat transfer and pressure loss in a rectangular channel with V-shaped ribs [J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(4): 800-808.
- [5] BUNKER R S. Latticework (vortex) cooling effectiveness part 1: stationary channel experiment [R]. ASME Turbo Expo, GT2004-54157, 2004.
- [6] ACHARYA S, ZHOU F G, LAGRONE J, et al. Latticework (vortex) cooling effectiveness part 2: rotating channel experiments [R]. ASME Turbo Expo, GT2004-53983, 2004.
- [7] HAN Z X, DENNIS B H, DULIKRAVICH G S. Simultaneous prediction of external flow-field and temperature in internally cooled 3-D turbine blade material [R]. ASME Turbo Expo, 2000-GT-253, 2000.
- [8] 姜 澎, 黄洪雁, 冯国泰. 空气冷却涡轮叶片气热耦合计算数值计算 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(12): 2036-2038.
- [9] 刘振侠, 张丽芬. 采用热-流耦合方法对气冷涡轮叶片换热的计算 [J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(2): 315-319.

(编辑 董 斌)

中国城市垃圾典型组分热解特性及动力学研究 = A Study of Pyrolysis Characteristics and Kinetic Analysis of Typical Constituents of Municipal Solid Wastes in China [刊, 汉] / ZHANG Chu, YU Juan, FAN Di, et al (Thermal Energy Research Institute, College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 561 ~ 566

A thermogravimetric analytic test has been conducted of typical constituents of municipal solid wastes in eight categories and a pyrolysis index was proposed to feature the pyrolysis characteristics. The higher the pyrolysis index, the easier the waste can be pyrolyzed. The results of the study indicate that raising its heating rate is conducive to increasing the pyrolysis index. With a same pyrolysis index and particle diameter, the pyrolysis capacity of the constituents in question can be ranked in the following order from high to low: waste plastic, waste paper, waste leather, melon peels, chemical fibers, fallen leaves, plants and waste rubber, among which the waste plastic has a pyrolysis index way above that of other seven constituents. By adopting an integral method to process the pyrolysis test data, reaction kinetics parameters and a reaction-rate control equation were obtained, thereby establishing a kinetics model for the corresponding operating conditions and temperature intervals. It has been found that for different waste constituents, their reaction mechanism may be different, and so will be their corresponding pyrolysis kinetic models. **Key words:** MSW (municipal solid waste), constituent, pyrolysis, thermogravimetric analysis, kinetics analysis

内部结构对空冷叶片换热性能的影响 = The Influence of Inner Structures on the Heat Exchange Performance of Air-cooled Blades [刊, 汉] / SU Sheng, HU Jie, LIU Jian-jun, et al (Engineering Thermophysics Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 567 ~ 571

To gain a profound understanding of the cooling mechanism and cold-air flow characteristics of air-cooled turbine buckets, an air-thermal coupled numerical simulation has been conducted of the buckets in question. It has been found that blade tip air-film holes can speed up the cold air flow in the coil-tube passages and improve cooling effectiveness. The reduction of the width-height ratio of the sub-channel in the vortex matrix passage can increase the flow resistance in the affected passage, leading to a fuller utilization of the cold air in the passage. However, this may lower the cooling capacity of the cold air and contribute to a temperature rise at the trailing edge. Hence, there exists an optimum make-up relationship between the width-height ratio and the cold-air inlet condition. Furthermore, the clearance between the vortex matrix passage structure and the blade tip may lower the utilization rate of the cold air. **Key words:** air-cooled blade, air-thermal coupling, blade-tip air-film hole, coil tube finned passage, vortex matrix passage, blade-tip inner clearance

考虑蒸汽热力行为的凝汽器喉部流动模拟 = A Condenser-throat Flow Simulation With Due Consideration of Steam Thermodynamic Behavior [刊, 汉] / ZHANG Lei-lei, CUI Guo-min, GUAN Xin, et al (Thermodynamic Engineering Research Institute, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 572 ~ 576

By adopting steam condensation nucleus formation theory and from the viewpoint of describing the microscopic mechanism governing the steam condensation nucleus formation, an analysis of the distribution law of spontaneous condensation nucleus and its formation rate was conducted respectively and a probabilistic model, established for steam molecule condensation. On this basis, a simulation calculation was performed of the thermodynamic behavior of the steam passing through the condenser throat of a steam turbine by adopting a direct simulation Monte Carlo method. In addition, the influence of the steam wetness in the condenser throat on the flow resistance and uniformity was studied. The calculation results show that with the steam thermodynamic behavior being taken into consideration, the flow resistance of the steam can be reduced, and in the meantime the steam distribution in the flow field of the condenser throat can also be improved to a certain degree. **Key words:** condenser-throat, steam thermodynamic behavior, condensation nucleus, nucleus formation rate theory, DSMC (direct simulation Monte Carlo method)-based simulation