

DOI: 10.7652/xjtuxb202001017

燃气轮机叶片前缘旋流冷却的热流固耦合数值研究

周源远¹, 范小军¹, 李亮^{1,2}, 李健武¹, 符阳春¹

(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: 为了探究旋流冷却的热流固特性,建立了旋流冷却热流固耦合模型和纯流体模型,在相同边界条件下对两种模型的旋流冷却性能进行了对比研究,同时分析了热流固耦合模型温度场与结构场的分布特性。研究表明:固体壁面导热对冷气的流动影响较小,但对流体区域的换热会产生一定影响,热流固耦合模型下靶面的换热强度分布更为均匀,沿冷气流动方向高低换热区域的换热强度差异逐渐减小,各喷嘴进口对应高换热区域的换热强度沿流动方向逐渐增大,热流固耦合模型下靶面的平均换热强度比纯流体模型减小了 5.05%;固壁导热对靶面温度有着显著影响,热流固耦合模型靶面温度分布比纯流体模型更为均匀;热流固耦合模型固体区域的整体温度沿着冷气流动方向逐渐升高,整体应力则沿冷气流动方向先增大后减小,靠近叶根和叶顶的区域出现应力集中;整体应变的变化趋势与整体应力变化趋势类似,但在固体传热面上,中部区域出现低应变区域。

关键词: 热流固耦合;旋流冷却;固壁导热

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)01-0135-08

Numerical Research on the Swirl Cooling Using Thermal-Fluid-Structure Coupled Method for Turbine Blade Leading Edge

ZHOU Yuanyuan¹, FAN Xiaojun¹, LI Liang^{1,2}, LI Jianwu¹, FU Yangchun¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

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

Abstract: To analyze the thermal-fluid-structure characteristics of swirl cooling, a thermal-fluid-structure coupled model and a fluid model were established. The swirl cooling performance for two models was compared under the same boundary conditions. The temperature and structure characteristics of the thermal-fluid-structure coupled model were analyzed. Results showed that the solid wall heat transfer has little influence on the cooling air flow field, but the target wall heat transfer intensity is affected by the solid wall heat transfer to some extent. The target wall heat transfer intensity distribution for the thermal-fluid-structure coupled model is more uniform, while the solid wall heat transfer intensity between the high and low heat transfer regions decreases along the cooling air flow direction gradually. The heat transfer intensity of the high heat transfer region corresponding to swirl nozzle inlets increases along the cooling air flow direction. The target wall average heat transfer intensity for the thermal-fluid-structure coupled model has a 5.05% reduction compared with the fluid model. The target wall temperature is

收稿日期: 2019-06-20。 作者简介: 周源远(1994—),男,硕士生;李亮(通信作者),男,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2017-0009-0010)。

网络出版时间: 2019-09-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190926.1055.004.html>

obviously influenced by the solid wall heat transfer. The target wall temperature of the thermal-fluid-structure coupled model is more uniform than the fluid model. The solid region's overall temperature of the thermal-fluid-structure coupled model increases gradually along the flow direction of the cooling air. The overall stress increases first and then decreases along the same direction, and the stress concentration occurs in the area near the hub and shroud. The overall strain has a similar changing trend with the overall stress, but a low strain region appears in the middle region on the solid heat transfer surface.

Keywords: thermal-fluid-structure coupling; swirl cooling; solid wall heat transfer

燃气轮机在航空、舰船、发电等领域占据着重要地位,燃气进口温度的不断提升对透平叶片的冷却性能提出了更高的要求^[1]。在这种情况下开发新型冷却结构成为必然的趋势,而旋流冷却在气动及换热性能上的突出表现使得其在叶片前缘冷却结构中的应用具有合理性与可行性。

旋流冷却研究已经取得了明显进展,Glezer 等首次对比了 3 种不同的旋流冷却结构的换热特性^[2]。Kusterer 等建立了双旋流腔的冷却模型,并传统旋流冷却进行了对比,进一步探索了双旋流冷却结构的流动换热规律^[3]。杜长河等采用数值模拟方法分析了气动与几何参数的变化对旋流冷却流动换热特性的影响^[4-6]。范小军等将包括简单旋流在内的 4 种冷却结构做了系统分析并比较了它们各自的流动换热特性与冷却机理^[7]。刘钊等分析了旋流冷却结构中喷嘴宽度与换热特性之间的关系^[8]。Hedlund 等采用实验的方法研究发现换热系数与冷雷诺数成正相关,与冷气来流温比成负相关^[9]。

目前,大部分旋流冷却研究都采用纯流体模型对冷气的流动和换热特性进行分析。由于忽略了透平叶片固体壁面的导热作用,使用纯流体模型进行研究获得的冷却结构靶面换热分布和实际透平叶片相比存在一定差异^[10]。同时,纯流体模型缺少固体区域,无法对固体区域的温度场和结构场(应力、应变)进一步分析。因此,需要探索热流固耦合模型中冷气的流动换热特性和固体区域的温度场、结构场,以进一步了解旋流冷却的特性,也可以为改进透平叶片冷却系统提供一定的参考。本文参考杜长河等建立的叶片前缘旋流腔模型^[11],建立了包含叶片固体壁面区和旋流腔流体区的旋流冷却热流固耦合模型,利用数值计算方法在相同条件下对比研究了热流固耦合模型与纯流体模型下旋流冷却的流动换热规律,并对热流固耦合模型固体区域温度场和结构场的分布进行分析,研究结论有助于推动旋流冷却在透平叶片冷却系统中的应用。

1 计算模型和数值方法

图 1 给出了旋流冷却热流固耦合三维模型,流体部分与纯流体模型相同。如图所示,9 个喷嘴沿旋流腔轴向保持等距排列,出口位于旋流腔末端,喷嘴进口与旋流腔的流体区域外为固壁区域。高速冷气通过喷嘴进入旋流腔,在腔体内形成旋流最终从出口流出。

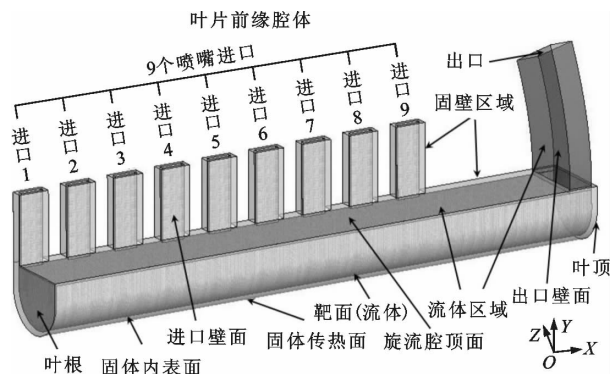
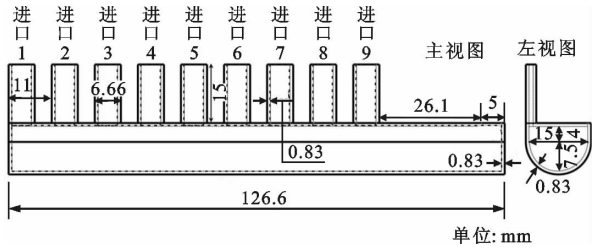


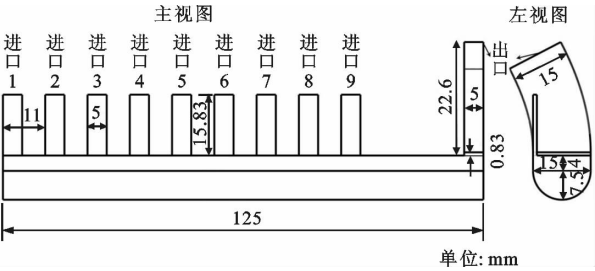
图 1 旋流冷却热流固耦合三维模型

图 2 给出了旋流冷却热流固耦合模型尺寸。参考 Kusterer 建立的流热耦合模型^[12],确定出热流固耦合模型中所有固体壁面厚度均为 0.83 mm。纯流体模型尺寸与热流固耦合模型流体区域的尺寸一致。

在目前有关旋流冷却的研究中,采用热流固耦合研究方法的案例较少,没有直接的实验数据可用于验证。考虑到固体对流场影响较小,Kusterer 等在计算双旋流流热耦合模型时直接采用了纯流体模型的湍流模型^[12]。实际工作过程中燃气轮机叶片与内部结构的变形不能过大,因此本文采用了双向流热耦合和单向流固耦合,忽略了固体变形对流场的影响^[13]。本课题组的 Fan 等采用实验测量的方法对旋流冷却流动换热特性进行了研究,并在进气腔进口雷诺数 $Re_D = 28\ 537$ 和温比为 0.88 的条件下对以上 4 种湍流模型的计算结果进行了对比,发



(a) 固体区域



(b) 流体区域

图 2 旋流冷却热流耦合模型尺寸

现在旋流冷却流动换热的计算过程中标准 $k-\omega$ 模型具有更高的模拟精度^[14]。因此,本文同样采用标准 $k-\omega$ 模型求解旋流冷却流体区域的 RANS 方程组。

本文的计算在 ANSYS Workbench 软件中完成。利用 ICEM 模块分别对固体区域和流体区域进行网格划分,图 3 为热流耦合模型网格示意图。叶根和叶顶处采用 C 型网格,其余部分均采用 H 型网格;流体流动时在壁面附近存在边界层,为了更好地分析边界层区域的流动情况,通过减小流体区域近壁面第一层网格厚度并设定合适的网格增长率来确保 $y^+ < 1$;因流体区域和固体区域分开建模,故划分网格时需确保流固耦合区域网格的连续性。然后,将网格导入 CFX 模块求解三维稳态 RANS 方程和标准 $k-\omega$ 湍流模型,在固体壁面区域求解导热方程,将 CFX 模块中耦合面上的压力以及固体区域的温度作为载荷输入 Static Structure 模块中求解固体区域的结构场。采用迎风差分格式加快计算收敛速度,冷却工质设定为理想气体。参考杜长河和 Kusterer 等对旋流冷却模型边界条件的处理^[4,12],边界条件设定如下:喷嘴进口雷诺数设定为 9 000;进口总温确定为 350 K,湍流强度为 5%;出口给定的平均静压为 0.11 MPa;热流耦合模型的固体传热面与纯流体模型的靶面均给定恒定热流密度 5 kW/m²,热流耦合模型中流体区域和固壁区域接触的表面设为流固交界面,并保持其温度和热通量的连续性;其余各壁面均设定为绝热壁面,所有壁面均保持速度无滑移。

考虑到边界条件中进口冷气流速的影响,利用喷嘴进口冷气流速 V 来定义喷嘴进口雷诺数

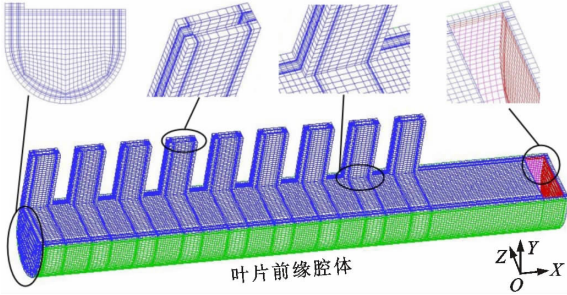
$$Re = \rho V D_h / \mu \quad (1)$$

式中: ρ 为喷嘴进口的冷气密度; μ 为平均动力黏性系数; D_h 为喷嘴 XZ 截面的水力直径。

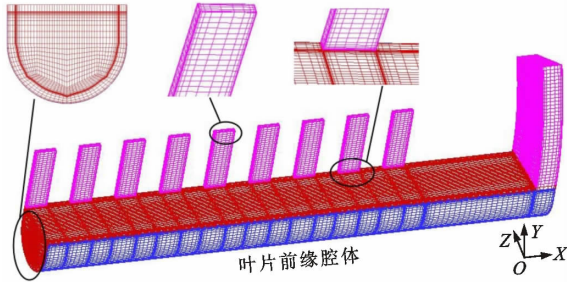
利用冷气进口总温 T_j 和靶面温度 T_w 来确定表征换热强度的 Nu 计算公式

$$Nu = q_w D_h / (T_j - T_w) \lambda \quad (2)$$

式中: q_w 为壁面热流密度; λ 为导热系数。



(a) 固体区域



(b) 流体区域

图 3 热流耦合旋流冷却模型网格

研究表明,应用定向结晶技术获得的材料具有耐高温、力学性能优良的特性^[15]。综合考虑,固体材料选用 DZ125 合金,该合金为正交各向异性材料^[16]。在实际情况下,旋流冷却结构处于叶片前缘,其位移约束十分复杂,为了方便求解,要在保证结构不发生刚体位移的同时又不阻碍结构的自由膨胀,故本文将位移约束简化为叶根和叶顶端固定。陈凯认为这一简化对于研究复杂冷却结构下叶片应力的分布是可行的^[17]。

图 4 给出了热流耦合模型分别在网格数为 373 万、408 万、472 万和 511 万时靶面周向平均努塞尔数 Nu_{span} 沿 X 方向的分布。由图可知,4 种网格数下 Nu_{span} 的变化曲线几乎重合。这说明在研究的网格密度范围内,数值计算结果与网格数无关,因此本文选用节点数为 408 万的计算网格。

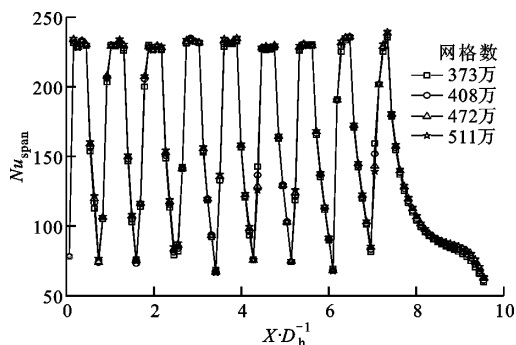
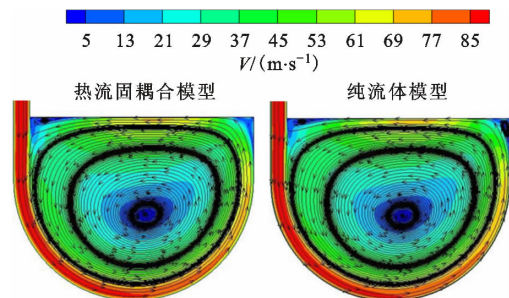


图4 不同网格数下热流固耦合模型的 Nu_{span} 沿 X 方向的分布

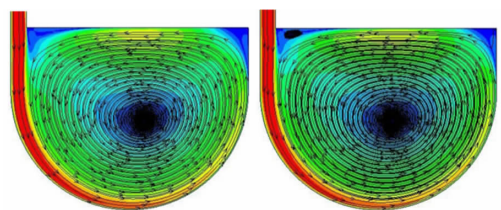
2 结果分析

2.1 热流固耦合模型与纯流体模型的对比分析

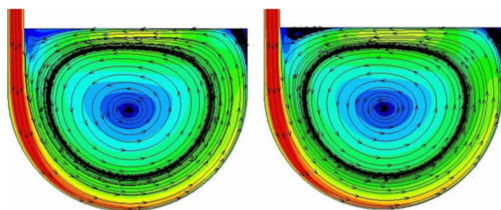
图5给出了热流固耦合模型和纯流体模型的5个喷嘴进口对应的YZ截面流线和速度云图。高速冷气通过喷嘴进入旋流腔,在截面几何中心产生明显的流动涡,距喷嘴进口越远,冷气速度越小。冷气通过位置靠后的喷嘴进入旋流腔时,由于轴向冷气来流的影响,近壁面靠近喷嘴处的速度逐渐减小,喷嘴越靠后,冷气速度减小越快。相对于纯流体模型,热流固耦合模型YZ截面上的速度和流线分布没有



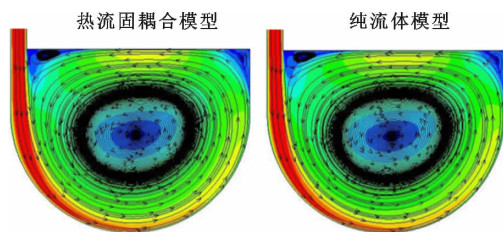
(a)进口1对应截面



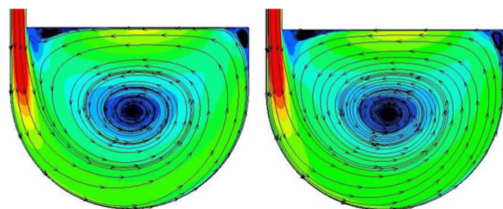
(b)进口3对应截面



(c)进口5对应截面



(d)进口7对应截面



(e)进口9对应截面

图5 不同喷嘴进口对应流体区域YZ截面流线和速度云图

显著区别,这表明固体区域的导热对旋流冷却的流动特性影响不大。

图6给出了两种模型的XZ截面流线和压力云图。冷气进入腔体后沿 X 方向流动,在此过程中压力逐渐减小。冷气在中部旋流引起的离心力的作用下向壁面方向流动,故腔体中心线附近为低压区,而壁面附近区域为高压区。从图6可以看到,旋流腔底部都有一些流动涡产生,两种模型的XY截面流线形态与压力分布也比较类似。综合图5和图6分析可知,固体导热对旋流冷却的流动特性影响不明显。

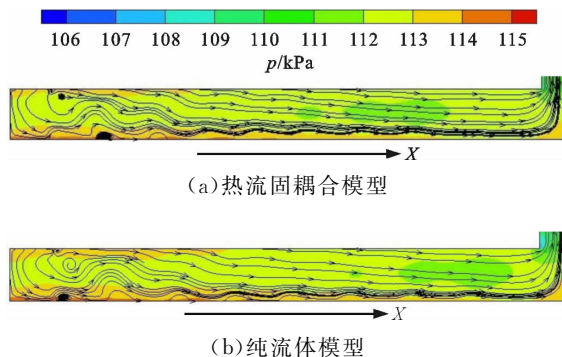


图6 流体区域XZ截面流线和压力云图

本文在分析靶面云图参数时,将三维云图沿着 Z 方向展开成二维云图以方便观察分析。图7给出了两种模型对应靶面的 Nu 云图。冷气通过喷嘴切向射入腔体,破坏了近壁面处的热边界层,形成了条带状高换热区域,喷嘴之间的区域换热强度则比较低。出口处流动方向发生突变,导致冷气冲刷靶面作用减弱,这一区域热边界层较厚,因此换热强度也比较低。比较两种模型的换热强度分布可以发现,

热流固耦合模型的高换热区域面积比纯流体模型小,整体的换热强度也比纯流体模型低。这是因为热流固耦合模型中包含有固体区域,增大了换热过程中的热阻,同时固体的三维导热使得热流固耦合模型靶面总的热流量小于纯流体模型。热流固耦合模型靶面的平均努塞尔数 Nu_a 相比于纯流体模型减小了 5.05%,可见固体壁面的导热对于靶面换热有一定影响。

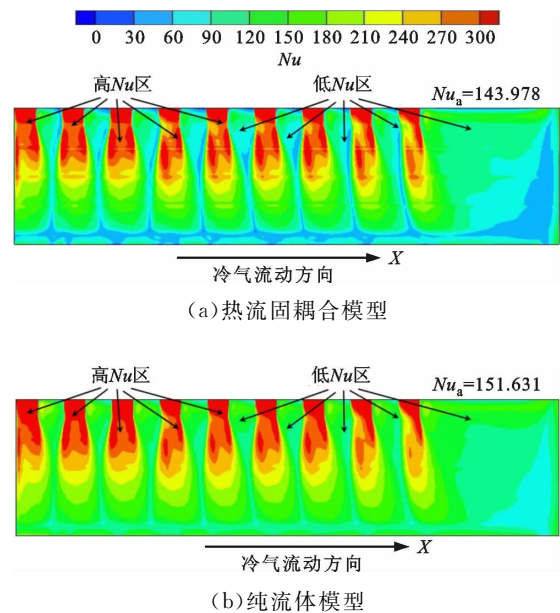


图 7 两种模型靶面的 Nu 云图

图 8 给出了两种模型下靶面的温度云图,从整体上看,两种模型靶面温度分布规律具有相似性。高换热区域换热系数较大,所以温度较低,形成了低温区域,各喷嘴之间的区域温度较高。靶面上靠近

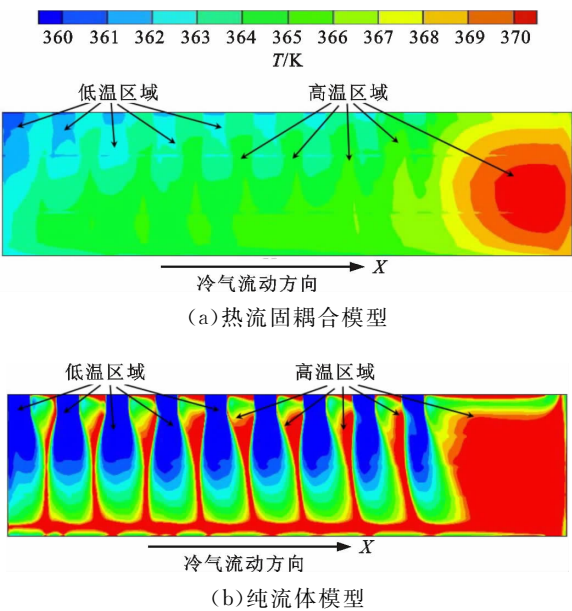


图 8 两种模型的靶面温度云图

出口的位置换热效果较差,因此形成了高温区域。对比后可以发现,热流固耦合模型靶面的温度分布更为均匀。

图 9 给出了两种模型靶面周向平均温度 T_{span} 沿 X 方向的分布。整体上看,纯流体模型靶面周向平均温度分布曲线的波动更为剧烈,在低温区热流固耦合模型靶面周向平均温度更大,在高温区则相反。表 1 给出了两种模型不同位置处的靶面周向平均温度,在低温区温差分别是 1.3 K 和 2.6 K,在高温区温差分别为 6.6 K 和 6.1 K,所以高温区两种模型的靶面周向平均温度差异更明显,表明固体导热对模型靶面温度分布有显著影响。

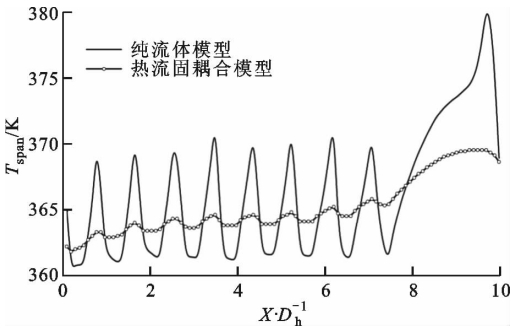


图 9 两种模型靶面周向平均温度沿 X 方向的分布

表 1 两种模型靶面 T_{span} 对比

$X \cdot D_h^{-1}$	区域	T_{span} / K	
		热流固	纯流体
0.16	低温区	361.9	360.6
0.74	高温区	363.4	370.0
3.90	低温区	363.9	361.3
4.28	高温区	364.7	370.8

由式(2)可知

$$T_w = T_j - \lambda Nu / q_w D_h$$

式中 λ 、 D_h 和 T_j 是固定值,所以 T_w 主要与 Nu/q_w 相关。图 10 给出了热流固耦合模型的靶面周向平均热流密度 q_{wspan} 沿 X 方向的分布,可以看到靶面热流密度分布明显不均匀。根据 X/D_h 的值可以发现,热流固耦合模型靶面低温区热流密度大,高温区热流密度小,而纯流体模型靶面上各处热流密度相同,这说明固体导热会对靶面热流密度的分布产生巨大的影响。对比表 2 的 4 组 Nu_{span}/q_{wspan} 的数据可以发现:低温区纯流体模型的 Nu_{span}/q_{wspan} 更大,所以温度更低;高温区纯流体模型的 Nu_{span}/q_{wspan} 更小,所以温度更高。因此,纯流体模型靶面温差更明显。

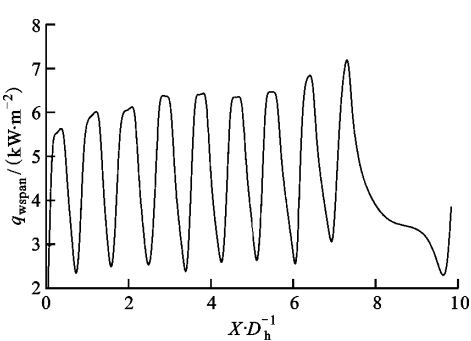


图 10 热流固耦合模型靶面周向平均热流密度沿 X 方向的分布

表 2 两种模型靶面 Nu_{span}/q_{wspan} 对比

$X \cdot D_h^{-1}$	区域	$Nu_{span} \cdot q_{wspan}^{-1}/(m^2 \cdot W^{-1})$	
		热流固	纯流体
0.16	低温区	0.042	0.051
0.74	高温区	0.036	0.025
3.90	低温区	0.036	0.048
4.28	高温区	0.033	0.023

2.2 热流固耦合模型温度分布特性

图 11 是热流固耦合模型固体区域的温度分布云图。从图中可知,沿着冷气流动方向固体整体温度逐渐升高,低温区集中于冷气流动方向的上游,高温区则位于下游。在旋流腔顶面区域,沿轴向中间区域的温度低于靠近吸力面和压力面区域的温度。在叶顶区域,温度沿 Y 方向减小。从图中还可以看到,固体传热面的温度分布有比较明显的变化,需要做进一步分析。

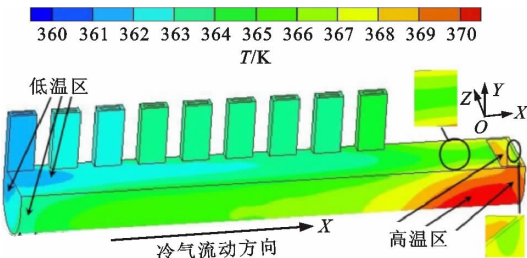
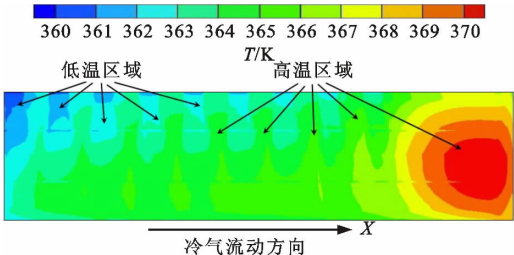
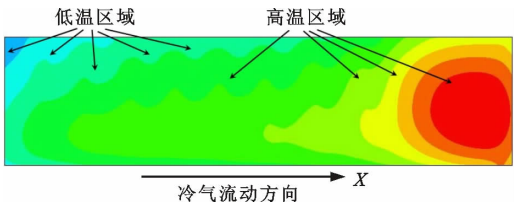


图 11 热流固耦合模型固壁区域温度分布云图

图 12 给出了热流固耦合模型下靶面和固体内表面的温度分布云图。由图可以看出:沿着冷气流动方向,喷嘴进口对应区域形成了低温区域,靶面的低温区域更为明显,固体内表面在第一个进口之后低温区域与高温区域的界限已经非常模糊;在靠近出口段的位置处,固壁内表面的高温区域面积明显比靶面的高温区域大。



(a)热流固耦合模型靶面



(b)热流固耦合模型固体内表面

图 12 热流固耦合模型温度分布云图

2.3 热流固耦合模型应变应力分布特性

图 13 是旋流冷却固体区域等效应力(下文均简称为应力)分布云图。从图中可以看出,进口 1 的应力比较高,在进口左侧出现高应力区域,这是由于约束设定以及进口处形状发生突变所引起的应力集中。此外,在其余进口位置以及旋流腔顶面靠近出口区域的应力都比较低,旋流腔体的应力比进口位置的应力高,叶根与叶顶处应力也比较大。

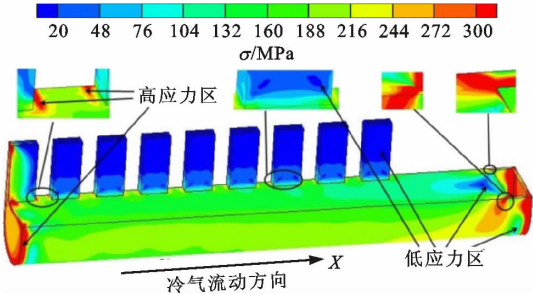


图 13 旋流冷却固体区域应力分布云图

图 14 给出了热流固耦合模型固体传热面和固体内表面的应力分布云图。整体上看,两个表面沿冷气流动方向的两端都出现了应力集中现象。这是由于两端的固体形状都发生了较大变化,同时两端靠近存在固定约束的叶根与叶顶,所以两端应力出现了局部增高。图 14 中的局部放大图显示出,两个表面与喷嘴两端接触位置处的应力也比较高。冷气经喷嘴进入旋流腔的位置应力较小,其原因是接触位置处的结构变化较大,且冷气边缘与附近区域有较大的温度梯度,而冷气经过喷嘴进入旋流腔时内部的温度变化并不大。

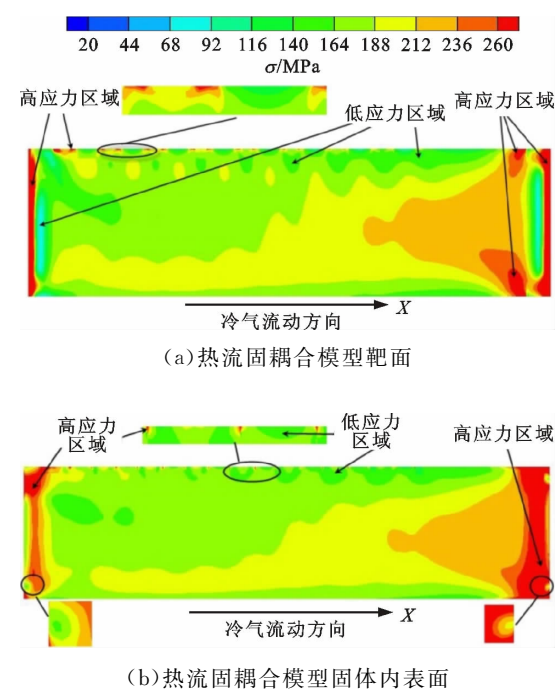


图 14 热流耦合模型应力分布云图

图 15 是旋流冷却固体区域总应变(下文均简称为应变)分布云图,可以看到叶根叶顶附近区域的应变很小。这是因为叶根叶顶区域设置为固定约束,位移为 0,单元的变形受到限制。沿冷气流动方向各喷嘴进口应变逐渐增加,其中 1 号喷嘴沿 X 方向应变逐渐增加,其余各喷嘴沿 Y 方向应变逐渐增加,但 2 号喷嘴靠近旋流腔顶部区域的应变先减小后增大。旋流腔顶部区域沿冷气流向应变逐渐增大,在冷气下游靠近吸力面和压力面的区域为高应变区,靠近出口处的应变较低。

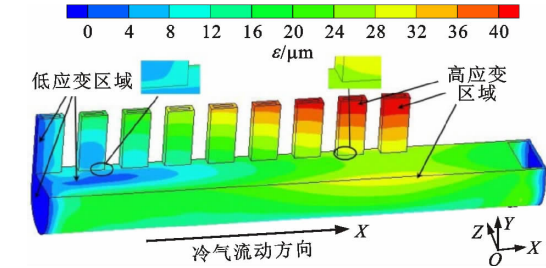


图 15 旋流冷却固体区域应变分布云图

图 16 是热流耦合模型下固体传热面和固体内表面的应变分布云图。固体传热面与固体内表面应变趋势相近,沿冷气流向两端的区域及沿轴向下流的中部区域是低应变区,冷气流动方向上游压力面一侧局部区域和下游吸力面、压力面靠近旋流腔顶端的区域为高应变区。固体传热面的最大应变为 0.031 1 mm,固体内表面最大应变为 0.028 8 mm。固体传热面整体的应变比固体内表面大,这是因为

固体传热面的应力大于固体内表面的应力。

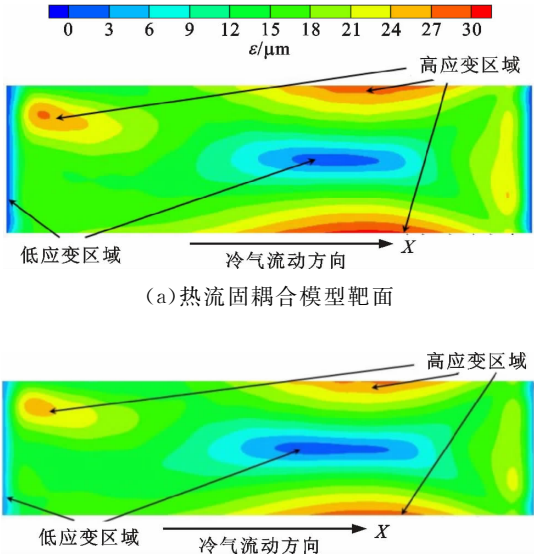


图 16 热流耦合模型应变分布云图

3 结 论

本文建立了适合于透平叶片前缘结构的旋流冷却热流耦合模型和纯流体模型,在相同边界条件下对两种模型的旋流冷却性能进行了对比研究,并分析了热流耦合模型的温度场与结构场的分布,所获得结论中的定性规律对于其他工况的研究有一定的参考价值。研究得到的主要结论如下。

- (1) 固体导热对旋流冷气的流动方式影响较小,但对模型的流体区域换热有一定影响。两种模型中靶面的换热强度分布具有相似性,靶面上靠近喷嘴处形成了条带状的高换热区。热流耦合模型中换热强度的分布比纯流体模型更为均匀,但前者靶面平均换热强度比后者降低了 5.05%。
- (2) 靶面温度分布受固体导热的影响明显。两种模型靶面的温度分布有相似性,但热流耦合模型中靶面温度分布更为均匀。
- (3) 在热流耦合模型固体区域中,沿冷气流动方向温度逐渐升高,叶根叶顶以及靠近叶根的固体区域温度较低,固体内表面温度分布更均匀,但二者温差不大。
- (4) 热流耦合模型高应力区域主要位于叶根叶顶和与喷嘴两端接触的旋流腔顶面等位置,靠近叶根喷嘴的应力比其余喷嘴更高。固体传热面和固体内表面的应力分布类似,靠近叶根叶顶处和与喷嘴固壁两端接触的位置为高应力区,而冷气通过喷嘴进入旋流腔的位置应力则相对较小,靠近出口处

应力有明显升高。

(5)靠近叶根和叶顶的固体区域应变都很小。沿着冷气流动方向喷嘴固体区域的应变逐渐增大,旋流腔顶面的应变先略有减小后又增大,但靠近出口处应变有所减小。固体传热面和固体内表面总应变分布趋势类似,应变较大的区域在沿轴向上游的压力面一侧和下游压力面、吸力面靠近旋流腔顶部的位置。

参考文献:

- [1] 孙岳. 燃气轮机叶片内置扰流肋的流动与换热数值研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2017: 1-9.
- [2] GLEZER B, MOON H K, O'CONNELL T. A novel technique for the internal blade cooling [C]// Proceeding of ASME Turbo Expo 1996. New York, USA: ASME, 1996: V004T09A015.
- [3] KUSTERER K, LIN G, BOHN D, et al. Heat transfer enhancement for gas turbine internal cooling by application of double swirl cooling chambers [C]// Proceeding of ASME Turbo Expo 2013. New York, USA: ASME, 2013: V03AT12A027.
- [4] DU Changhe, LI Liang, LI Sen, et al. Effects of aerodynamic parameters on steam vortex cooling behavior for gas turbine blade leading edge [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2016, 230(4): 354-365.
- [5] DU Changhe, LI Liang, WU Xin, et al. Effect of jet nozzle geometry on flow and heat transfer performance of vortex cooling for gas turbine blade leading edge [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 1020-1032.
- [6] 杜长河, 范小军, 李亮, 等. 喷射角度和喷嘴数对旋流冷却流动与传热特性的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(4): 76-80.
DU Changhe, FAN Xiaojun, LI Liang, et al. Influences of jet angle and jet nozzle number on flow and heat transfer characteristics of swirl cooling [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(4): 76-80.
- [7] 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 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(7): 37-43.
FAN Xiaojun, DU Changhe, LI Liang, et al. Comparative analysis for flow and heat transfer behavior of blade leading edge among four cooling structures [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(7): 32-38.
- [8] LIU Z, LI J, FENG Z P. Numerical study on the effect of jet slot height on flow and heat transfer of swirl cooling in leading edge model for gas turbine blade [C]// Proceeding of ASME Turbo Expo 2011. New York, USA: ASME, 2011: 1495-1504.
- [9] HEDLUND C R, LIGRANI P M, GLEZER B, et al. Heat transfer in a swirl chamber at different temperature ratios and Reynolds numbers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(22): 4081-4091.
- [10] HEIDMANN J D, KASSAB A J, DIVO E A, et al. Conjugate heat transfer effects on a realistic film-cooled turbine vane [C]// Proceeding of ASME Turbo Expo 2003. New York, USA: ASME, 2003: 361-371.
- [11] 杜长河, 范小军, 李亮, 等. 喷嘴长宽比和雷诺数对旋流冷却流动与传热特性的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(12): 124-129.
DU Changhe, FAN Xiaojun, LI Liang, et al. Effects of jet nozzle aspect ratio and Reynolds number on flow and heat transfer characteristics of vortex cooling [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(12): 124-129.
- [12] KUSTERER K, BÜHLER P, LIN G, et al. Conjugate heat transfer analysis of a blade leading edge cooling configuration using double swirl chambers [C]// Proceeding of ASME Turbo Expo 2016. New York, USA: ASME, 2016: V05BT11A010.
- [13] 肖力伟. 基于流热耦合方法的燃气轮机透平叶片强度与寿命分析 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018: 4-6.
- [14] FAN X J, LI L, ZOU J S, et al. Local heat transfer of vortex cooling with multiple tangential nozzles in a gas turbine blade leading edge cooling passage [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126: 377-389.
- [15] 赵旺初. 国产 F 级燃气-蒸汽联合循环技术的发展 [J]. 热能动力工程, 2008(2): 200.
ZHAO Wangchu. Development of domestic F-class gas-steam combined cycle technology [J]. Thermal and Power Engineering, 2008(2): 200.
- [16] 付娜. 某航空发动机涡轮盘和叶片的强度分析与寿命计算 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006: 32-35.
- [17] 陈凯. 燃气涡轮冷却结构设计 with 气热弹多场耦合的数值研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 99-108.

(编辑 荆树蓉)