

DOI: 10.7652/xjtuxb201705006

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

杜长河, 范小军, 李亮, 丰镇平

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 针对航空发动机涡轮动叶片中应用旋流冷却的问题,建立了旋转条件下的旋流腔冷却模型,比较了静止和旋转条件下冲击与旋流冷却的流动传热特性差异,研究了旋转半径和叶片安装角对旋流冷却特性的影响规律。研究表明:叶片旋流腔旋转显著改变旋流冷却气动传热特性,旋转条件下旋流腔产生离心力和科氏力;离心力驱使冷气向叶顶方向运动,加强冷气横向冲击作用,使得高传热区域向叶顶方向偏移;科氏力方向为轴向上游或下游,引起冷气轴向回流,增强冷气掺混,减小射流冷气周向速度,显著降低了传热强度;旋转条件下,旋流冷却传热强度比冲击冷却提高了27.6%;与静止条件相比,旋转数为0.819时冲击冷却传热强度减小了30.0%,旋流冷却传热强度减小了18.6%;叶片旋流腔旋转半径增大时,冷气周向速度稍有减小,靶面平均 Nu 略有减小;叶片安装角增大时,旋流冷却流场和平均 Nu 不变,周向平均 Nu 分布均匀性降低。

关键词: 旋流冷却;旋转半径;叶片安装角;流动传热

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)05-0037-07

Influences of Rotating Radius and Blade Setting Angle on Rotor Vortex Cooling Flow and Heat Transfer Characteristics

DU Changhe, FAN Xiaojun, LI Liang, FENG Zhenping

(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A vortex chamber model under rotating conditions is established to study the application of vortex cooling in aircraft engine turbine rotor blades. The flow and heat transfer behaviors of impingement and vortex cooling under static and rotating conditions are compared and analyzed. The effects of rotating radius and blade setting angle on rotor vortex cooling behavior are studied. Results show that the rotation of blade vortex chamber can change the aerodynamic and thermal performance of vortex cooling significantly. Under rotating conditions, the centrifugal and Coriolis forces are generated in the vortex chamber. The centrifugal force pushes cooling air to the shroud direction and enhances cooling air crosswise impact effect, driving the high heat transfer region deviating downstream. The Coriolis force direction is axial upstream or downstream. It will induce axial back flow of cooling air and enhance cooling air mixing. Therefore, the circumferential velocity of injected cooling air is decreased, thus obviously decreasing the heat transfer intensity. Under rotating conditions, the heat transfer intensity of vortex cooling is 27.6% higher than impingement cooling. Compared with static conditions, the heat transfer intensity of impingement cooling and vortex cooling under rotating

收稿日期: 2016-10-27。 作者简介: 杜长河(1990—),男,博士生;李亮(通信作者),男,副教授,博士生导师。

网络出版时间: 2017-02-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170228.0809.004.html>

conditions will decrease by 30.0% and 18.6%, respectively. When the rotating radius of blade vortex chamber increases, the circumferential velocity of cooling air and the target wall's globally averaged Nusselt number will decrease slightly. With the decrease of blade setting angle, the vortex cooling flow field and the globally averaged Nusselt number almost keep unchanged, and the circumferentially averaged Nusselt number distribution turns more nonuniform.

Keywords: vortex cooling; rotating radius; blade setting angle; flow and heat transfer

涡轮叶片冷却技术是航空发动机研究领域的重要课题,设计高效的冷却系统对于保障航空发动机安全运行有着重要作用。目前,用于涡轮叶片的主要冷却方式包括气膜冷却、冲击冷却、肋片扰流冷却、针肋冷却和旋流冷却。旋流冷却作为一种最新发展的冷却方式,具有独特优良的气动传热性能,已成为航空发动机涡轮叶片冷却领域的研究热点。

Kreith 等实验研究了旋流管的传热和摩擦特性,发现旋转流动因产生较大压力梯度,显著提升传热系数^[1]。Chang 等分析了切向入流产生旋转流的传热提升和流动衰减机理,提出高轴向速度和湍流强度引起传热强度增强^[2]。Glezer 等在燃气轮机涡轮叶片冷却系统中应用旋转流,并探索了3种几何模型下旋流冷却传热性能^[3]。Helund 等测量了不同来流温比和雷诺数条件下旋流冷却的传热强度分布,并得到传热关联式^[4]。Ling 等对比研究了旋流和冲击冷却的传热特性^[5]。Bruschewski 等研究了流道几何形状对涡轮叶片旋流冷却特性影响^[6]。杜长河等提出因冷气密度不均和离心力场引起的径向对流运动,并系统研究了冷气气动参数和旋流腔喷嘴尺寸对旋流冷却流动和传热特性影响机理^[7-9]。在此基础上,范小军等探讨了气膜孔几何位置对旋流冷却特性影响^[10]。

当前,旋流冷却研究大多基于静止模型,然而航空发动机涡轮叶片冷却系统设计中同样应用旋流冷却原理。静叶与动叶中旋流冷却特性不相同,探索旋转模型条件下旋流冷却流动传热特性有重要的科学和工程意义。本文基于杜长河等建立的多喷嘴旋流腔模型^[8],比较分析了静止和旋转条件下冲击与旋流冷却特性,针对旋转条件下旋流冷却效率削弱现象对旋流冷却结构进行优化改型,研究了旋转半径和叶片安装角对旋流冷却流动传热特性的影响规律,以期对航空发动机涡轮叶片冷却系统设计提供重要参考。

1 计算模型和数值方法

图1给出了旋转条件下旋流冷却腔体三维模

型,旋流腔模型绕着Z轴旋转,旋流腔半圆中心线和Z轴夹角 θ 为叶片安装角。冷气通过9只喷嘴进口进入旋流腔内运动,并从出口流出。为了研究叶片旋流腔旋转对旋流冷却传热的影响,靶面区域分为靶面前缘、靶面中心和靶面尾缘。图2给出了旋流冷却腔体模型尺寸,旋流腔模型X方向中心线到旋转Z轴之间直线距离定义为旋转半径R。

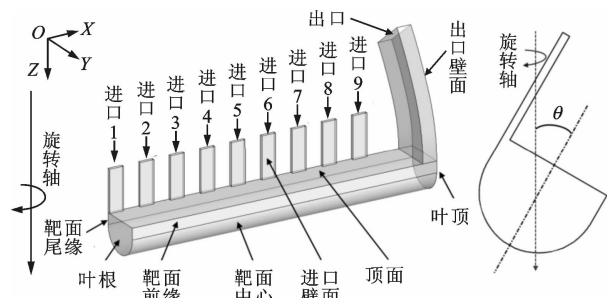


图1 旋转条件下旋流冷却腔体三维模型

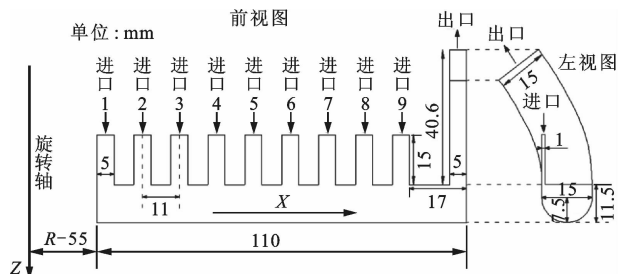


图2 旋流冷却腔体模型尺寸

采用ICEM CFD软件生成旋流腔六面体结构化网格,图3给出了旋流腔模型网格示意图。网格主体采用H型网格划分,叶顶和叶根区域采用C型网格划分以提高网格整体质量。为了满足低雷诺数湍流模型对网格的质量要求,网格壁面处加密使网格尺度 $Y^+ < 1$,进行网格光滑使得网格最小角度大于 20° 。利用ANSYS CFX求解三维稳态黏性RANS方程来模拟旋流冷却流动和传热过程,设置求解器精度为二阶。根据杜长河等的研究,标准 $k-\omega$ 湍流模型对于模拟旋流冷却和系统旋转流动具有较高的精度^[9,11],本文也采用标准 $k-\omega$ 湍流模型。

当质量、动量和能量方程均方根残差小于 10^{-5} 时,计算值收敛。

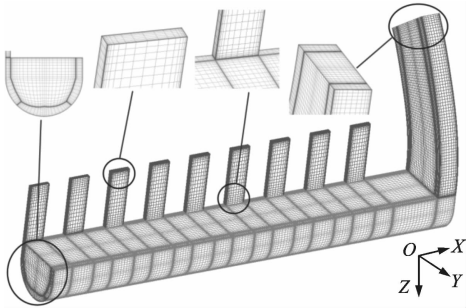


图 3 旋流腔模型网格示意图

定义无量纲对流换热系数

$$Nu = q_w D_h / (T_j - T_w) \lambda \tag{1}$$

式中: q_w 为壁面热流密度; T_j 为进口总温; T_w 为靶面温度; λ 为导热系数; D_h 为腔体横截面水力直径。

定义旋转数

$$R_0 = \frac{\omega D_h}{U} \tag{2}$$

式中: ω 为旋转角速度; U 为轴向平均速度。

冷却工质为理想气体,旋流腔模型给定旋转角速度以获得合适旋转数。参考动叶片冷却相关研究^[11-12],选取研究旋转数为 0.384、0.819,冷却腔体旋转半径为 400~800 mm。9 个喷嘴进口给定速度均为 74.42 m/s,湍流强度为 5%,出口给定平均静压为 0.11 MPa,进口给定总温为 350 K。传热靶面温度为 500 K,其他壁面绝热,所有壁面均保持速度无滑移。旋转数 $R_0=0,0.384,0.819$ 对应叶片旋转角速度 $\omega=0,4\,000,8\,000$ r/min。

图 4 给出了不同网格下平均努塞尔数 Nu_a 随旋转角速度的变化曲线。由图 4 可知,当网格节点数量增加到 539 万时,数值模拟结果对网格数量不敏感。因此,本文采用网格数量为 539 万。

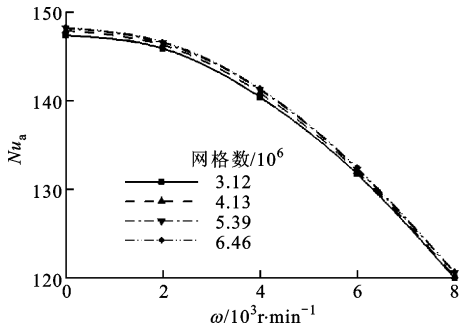


图 4 平均努塞尔数随旋转角速度的变化曲线

2 结果分析

2.1 静止和旋转条件下冲击与旋流冷却对比

对于冲击冷却,冷却腔室主体结构、喷嘴截面积和边界条件与旋流冷却保持一致。旋转半径 $R=600$ mm,叶片安装角 $\theta=0^\circ$,叶片在静止、旋转条件下,旋转数 $R_0=0,0.819$ 。图 5 给出了静止、旋转时 YZ 截面流线和速度云图,沿 X 方向的 1 号、2 号、3 号、4 号 4 个 YZ 截面分别对应进口 1、进口 4、进口 7 和进口 9。由图 5 可知,冲击和旋流冷却冷气流动方式存在着明显差别。对于冲击冷却,冷气通过冲击孔高速射入冷却腔,速度迅速衰减,并在腔体内形成明显对涡。由于冷气受到上游主流的横向冲击作用,冷气喷射速度沿 X 方向逐渐减小。对于旋流冷却,冷气通过喷嘴射入旋流腔形成高速旋转运动。

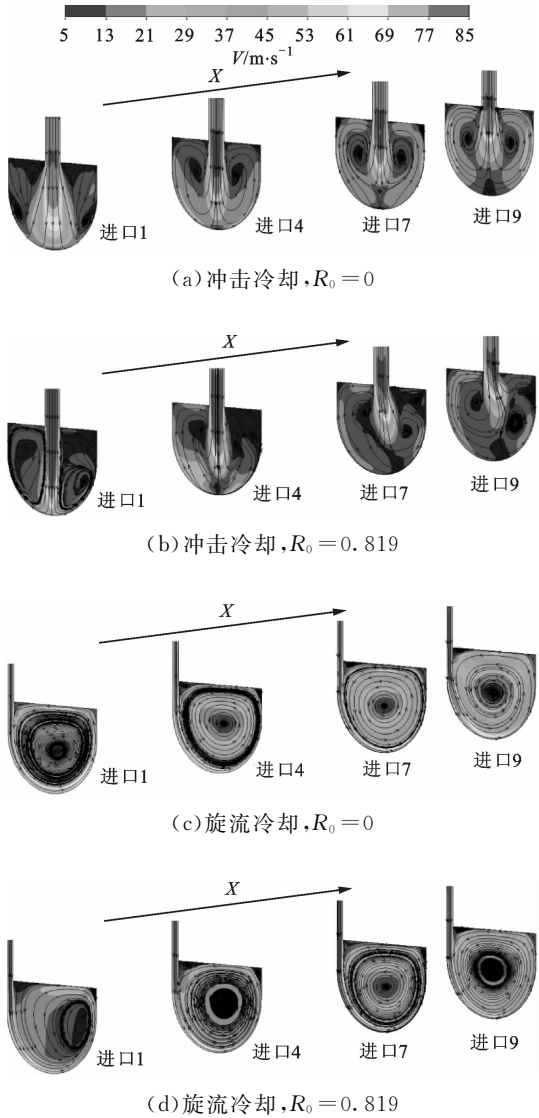


图 5 静止、旋转时 YZ 截面流线和速度云图

由于黏性作用和上游冷气横向冲击,冷气速度逐渐衰减。由于旋流冷气贴壁面流动,喷射冷气受横流冲击的作用较小。

叶片旋转对冲击和旋流冷却的冷气流场有显著影响。旋转条件下,叶片腔体产生离心力和科氏力,离心力驱使冷气向叶顶方向运动,并加强冷气横向冲击作用。对于冲击冷却,冷气喷射方向与旋转轴平行,不受科氏力作用;当冷气冲击在靶面上并向四周扩散时,科氏力与冷气运动方向垂直,加强了冷气的黏性耗散作用。旋转条件下,冷气喷射速度显著减小。对于旋流冷却,冷气主流方向为周向,因此旋流冷却冷气的科氏力方向为轴向。冷气运动方向与旋转轴平行时,轴向科氏力为 0,冷气运动到顶面和靶面中心位置时,科氏力方向分别为轴向上游和下游。在离心力和科氏力作用下,旋转条件下 1 号 YZ 截面冷气旋转中心向靶面前缘移动,1、2 号 YZ 截面冷气速度显著减小,3、4 号 YZ 截面速度影响较小。

为了清晰剖析旋流冷却的旋转中心移动和速度减小现象,图 6 给出了叶片旋流腔静止和旋转时旋流腔冷气三维流线。在叶片旋流腔静止条件下,冷气在腔体内自由旋转,旋转中心与截面几何中心接近。叶片旋流腔旋转条件下,横向主流和离心力会产生冲击作用,冷气轴向速度增大。冷气从进口 1 喷射时,科氏力驱使靶面中心冷气朝轴向下运动,顶面附近冷气朝轴向上运动。冷气在靶面中心处流动时,冷气越接近靶面前缘,冷气朝轴向下运动趋势越明显;冷气在顶面附近流动时,冷气越接近靶面尾缘,冷气朝轴向上运动趋势越明显。因此,冷气旋转运动中心线与 X 轴存在夹角,1 号 YZ 截面位置旋转中心向前缘移动,产生了图 6b 所示的轴向回流现象,轴向回流明显增强冷气掺混,减小射流冷气周向速度。当冷气从进口 4 喷射时,由于上游冷气的横向冲击作用增强,冷气此时旋转半径增大,冲击作用显著,冲击作用削弱顶面附近冷气的轴向回流现象。因此,与 1 号 YZ 截面相比,4 号 YZ 截面的冷气速度大,冷气从进口 7 喷射时,冲击作用继续增强,冷气轴向回流现象完全消失,周向速度衰减程度进一步降低。因此,旋转条件下旋流腔内科氏力使得冷气发生轴向回流,削减冷气周向速度。

冲击和旋流冷却的传热特性与冷气的流场结构紧密相关,图 7 给出了静止和旋转时靶面 Nu 云图。由图 7 可知,冲击与旋流冷却传热原理存在显著区别。对于冲击冷却而言,冷气通过高速冲击靶面来

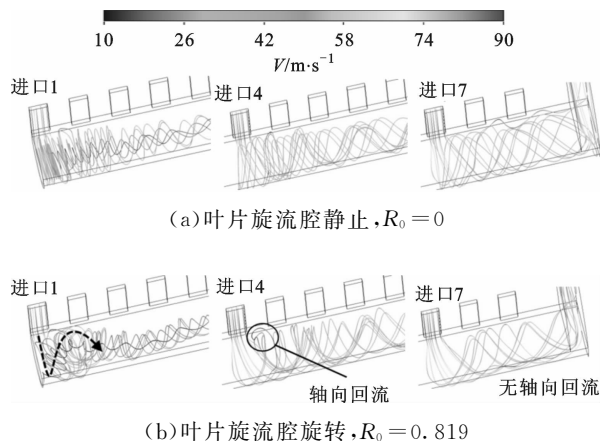


图 6 静止和旋转时旋流腔内冷气三维流线

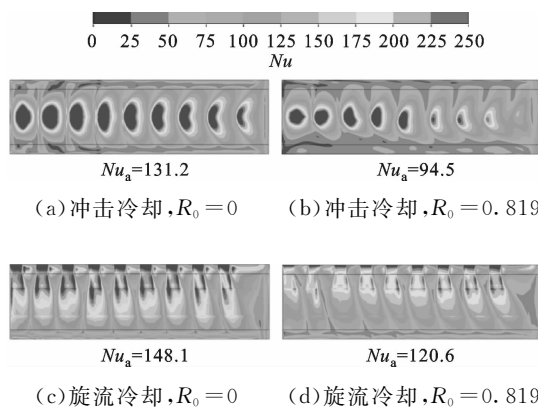


图 7 静止和旋转时靶面 Nu 云图

减薄热边界层,在冲击点附近形成圆形高传热区,由于冲击冷气受横流作用明显,轴向下流处高传热区域缩小并变成半月形。对于旋流冷却而言,冷气旋转运动引起强烈壁面冲刷作用,减薄热边界层,形成带状高传热区域。当冷气向周向下流运动时,壁面冲刷作用减弱、热边界层增厚,显著减小传热强度。旋流冷气抗横流作用较强,传热强度沿轴向衰减并不明显。静止条件下,旋流冷却的传热强度比冲击冷却提高了 12.9%。

旋转条件下,对于冲击冷却,由于离心力加强了横向冲击作用,科氏力加强了冷气黏性耗散作用,传热强度明显降低。对于旋流冷却,冷气横流使得靠近出口处高传热区域明显向叶顶方向偏移,叶片旋流腔旋转引起冷气周向速度衰减,使得传热强度相比静止条件下显著降低。旋转条件下冲击和旋流冷却传热强度沿轴向分布规律不同。冲击冷却传热衰减主要由横流冲击作用导致,冷气的横向冲击沿 X 方向逐渐增强。旋流冷却传热衰减主要由旋流冷气轴向回流引起,冷气的轴向回流沿 X 方向逐渐衰减。因此,旋转条件下,冲击冷却高传热区的换热强

度沿 X 方向衰减,旋流冷却高传热区换热强度沿 X 轴增大。旋转条件下,旋流冷却的传热强度比冲击冷却提高了 27.6%。与叶片静止条件对比, $R_0 = 0.819$ 时冲击冷却、旋流冷却传热强度分别减小了 30.0%、18.6%,因此旋转条件下旋流冷却的传热性能更优。

旋转条件下旋流冷却传热强度降低,本文保持旋流腔主体结构不变,设计喷嘴角度向轴向上游方向偏移 10° 。图 8、9 分别给出了旋流腔改型前后 YZ 截面流线、速度云图和靶面 Nu 云图。由图 8、9 可知,旋流腔改型后冷气周向旋转速度增大,传热强度提高了 1.7%。

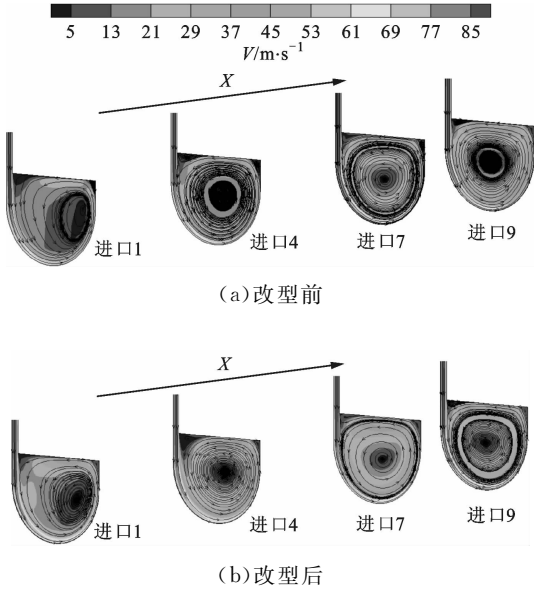


图 8 旋流腔改型前后 YZ 截面流线和速度云图

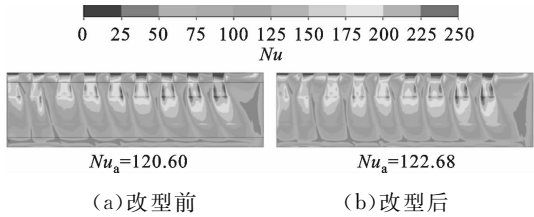


图 9 $R_0 = 0.819$ 时旋流腔改型前后靶面 Nu 云图

2.2 旋转半径对旋流冷却特性影响

图 10 给出了不同旋转半径下 YZ 截面流线和速度云图。总体来说,旋转半径对旋流腔冷气流动结构影响较小,叶片旋流腔旋转半径增大,冷气的离心力和科氏力随之增大,冷气的掺混作用增强,冷气的周向速度减小。由图 10 可知,叶片旋流腔旋转半径增大,冷气周向速度衰减程度不明显。

图 11 给出了不同旋转半径下旋流腔靶面 Nu 云图。由图 11 可知,靶面 Nu 云图和冷气流场细节

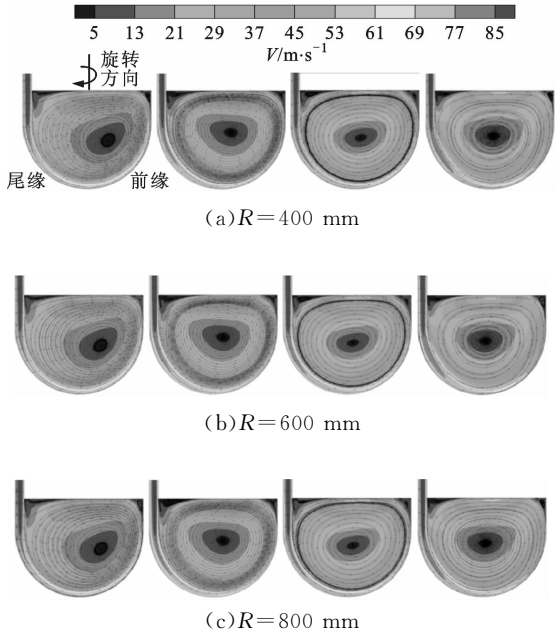


图 10 $R_0 = 0.384, \theta = 0^\circ$ 时不同旋转半径下 YZ 截面流线和速度云图

紧密相关。旋转半径增大,冷气流动结构变化较小,冷气周向速度略有衰减。因此,靶面传热强度分布变化较小,靶面平均努塞尔数略有减小。

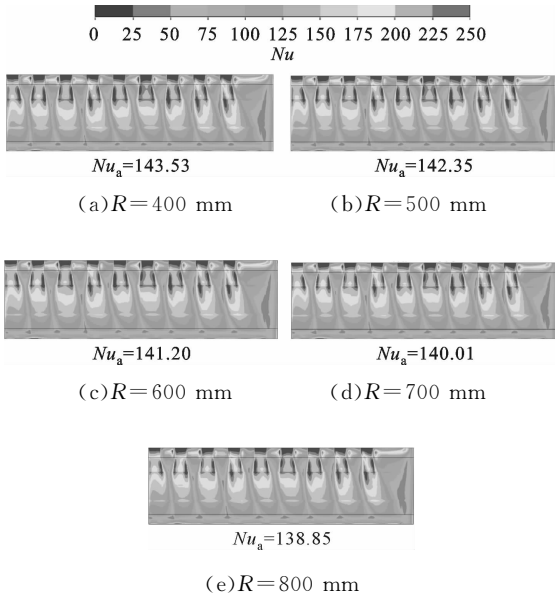


图 11 $R_0 = 0.384, \theta = 0^\circ$ 时不同旋转半径下靶面 Nu 云图

2.3 叶片安装角对旋流冷却特性影响

图 12 给出了不同叶片安装角下 YZ 截面流线和速度云图。叶片安装角增大,旋流腔内的冷气流场结构和冷气周向速度变化很小。这是因为叶片安装角变化时,离心力影响不变,只有科氏力影响冷气方向的区域发生变化。对于旋流腔壁面区域冷气,与旋转轴平行壁面区域科氏力为 0,与旋转轴垂直

壁面区域科氏力方向为轴向上游或下游。叶片安装角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围变化时,离心力和科氏力引起的轴向回流变化较小,引起冷气掺混和周向速度变化较小,因此叶片安装角对旋流冷器流场影响较小。

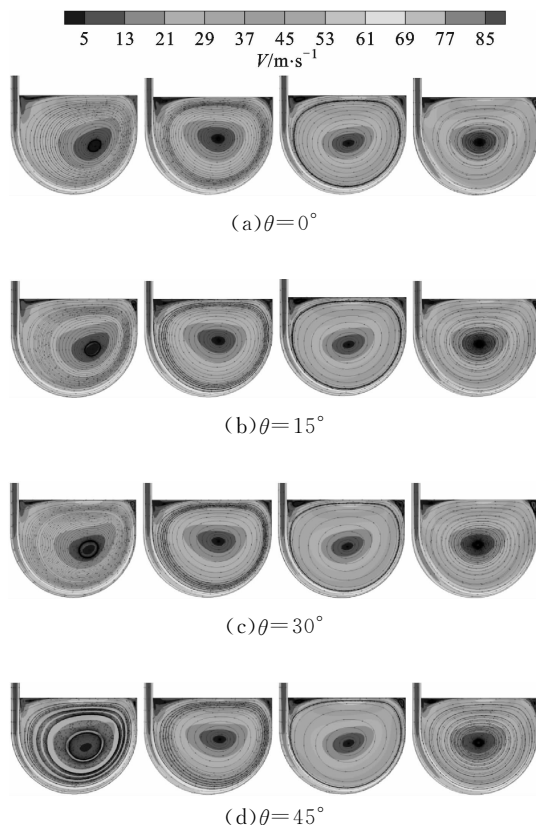


图 12 $R_0=0.384, R=600$ mm 时不同叶片安装角下 YZ 截面流线和速度云图

图 13、14 分别给出不同叶片安装角下靶面 Nu 云图和周向平均 Nu 沿 X 轴分布曲线。由图 13、14 可知,叶片安装角对旋流冷却靶面的传热强度影响很小,叶片安装角增大,平均 Nu 几乎没有变化,周向平均 Nu 分布均匀性降低。

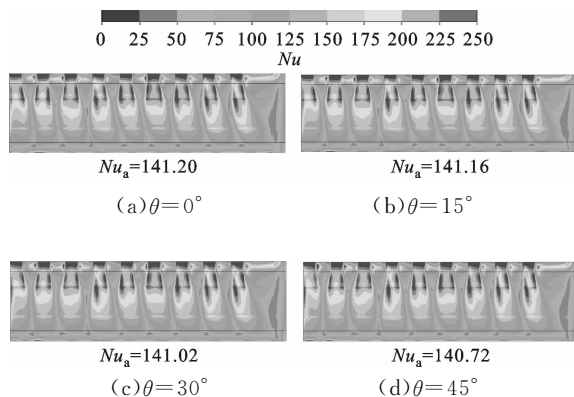


图 13 $R_0=0.384, R=600$ mm 时不同叶片安装角下靶面 Nu 云图

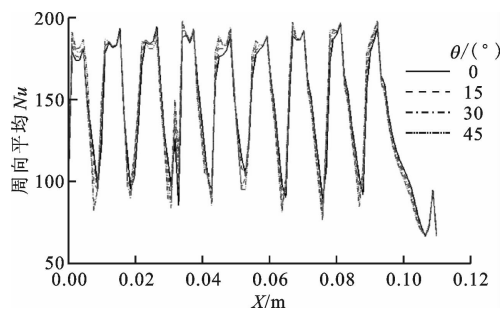


图 14 不同叶片安装角下周向平均 Nu 沿 X 轴分布

3 结 论

本文构建了航空发动机叶片旋流冷却模型,利用数值模拟的方法比较分析了静止和旋转条件下冲击与旋流冷却的流动传热特性,研究了旋转半径和叶片安装角对旋流冷却特性影响规律,得到主要结论如下。

(1)旋转条件下冷却腔产生离心力和科氏力,离心力驱使冷气向叶顶方向运动,加强冷气横向冲击作用。对于冲击冷却,科氏力加强冷气黏性耗散。对于旋流冷却,科氏力方向为轴向,引起冷气轴向回流,增强冷气掺混,减小射流冷气周向速度。

(2)旋转条件下,旋流冷却由于横流和离心力引起冲击作用,靠近出口处高传热区域明显向叶顶方向偏移。叶片旋流腔旋转引起冷气周向速度衰减,使得传热强度较静止条件下显著降低。

(3)旋转条件下,旋流冷却的传热强度比冲击冷却提高了 27.6%。与静止条件对比, $R_0=0.819$ 时冲击冷却与旋流冷却传热强度分别减小了 30.0%、18.6%。

(4)对动叶旋流冷却结构进行改型,设计喷嘴角度向轴向上游方向偏移 10° 。旋转条件下,改型后旋流腔传热强度提高了 1.7%。

(5)叶片旋流腔旋转半径增大时,冷气受到离心力和科氏力随之增大,冷气掺混作用增强,冷气周向速度稍有减小,靶面平均努塞尔数略有减小。

(6)叶片安装角增大时,旋流冷却流场和平均 Nu 几乎不变,周向平均 Nu 分布均匀性降低。

参考文献:

- [1] KREITH F, MARGOLIS D. Heat transfer and friction in turbulent vortex flow [J]. Applied Scientific Research: Section A, 1959, 8(1): 457-473.

(下转第 148 页)