

DOI: 10.7652/xjtuxb201607006

气膜孔几何位置对旋流冷却流动与传热特性的影响

范小军, 杜长河, 李亮, 李森

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 为了研究气膜孔几何位置对旋流冷却特性的影响,建立了带有气膜孔的旋流腔冷却结构,利用流体动力学软件 ANSYS CFX 对比分析了有无气膜孔情况下旋流冷却性能的差异,并研究了气膜孔轴宽比和周向角度对旋流冷却流动和换热特性的影响。研究表明:气膜孔对旋流腔靶面旋流冷气运动产生强烈扰动,使气膜孔上游冷气流速增加,下游冷气流速降低;气膜孔使主流流线向斜下方偏转,增强了整体换热强度且整体压力分布趋于均匀;轴宽比从 0.3 增加到 0.7,气膜孔对整体流动和传热影响不大,轴宽比增加到 0.9,主流小旋涡消失且靶面 Nu 分布更均匀;周向角度小于 0° 时,随着周向角度的增加,气膜孔上游高速区增大,周向角度超过 0° 后,高速区随周向角度增长不明显;随着周向角度增加,周向平均压力系数增加,气膜孔附近高 Nu 区扩大,靶面高 Nu 区分布更均匀。

关键词: 旋流冷却;气膜孔;轴宽比;周向角度

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)07-0032-07

Effect of Bleed Hole Location on Vortex Cooling Flow and Heat Transfer Performance

FAN Xiaojun, DU Changhe, LI Liang, LI Sen

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

Abstract: A vortex chamber model with bleed holes was established to study the effect of bleed hole location on vortex cooling characteristics. The hydrodynamics software ANSYS CFX was used to investigate the difference between vortex cooling systems with and without bleed holes. Detailed analysis was conducted to explore the influences of bleed hole's axis-width ratio and circumferential angle on vortex cooling aerodynamic and thermal behaviors. Results revealed that bleed holes could produce strong disturbance on the cooling air rotational flow, thus increasing the upstream velocity of bleed holes while decreasing the downstream velocity. Bleed holes drive the mainstream deflecting towards the slanting downward direction, enhancing the overall heat transfer intensity and inducing more uniform pressure distribution. When the axis-width ratio increases from 0.3 to 0.7, bleed holes have slight effects on the overall flow and heat transfer performance. However, when the axis-width ratio reaches 0.9, the small mainstream vortexes disappear and the region with high Nu (Nusselt number) becomes more uniform. When the circumferential angle is smaller than 0° , an increase in circumferential angle leads to an obvious increase in high speed region of upstream bleed holes. However, this increasing tendency turns

收稿日期: 2015-12-19。 作者简介: 范小军(1992—),男,硕士生;李亮(通信作者),男,副教授,博士生导师。

网络出版时间: 2016-04-21

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160421.1042.002.html>

weaker when the circumferential angle is larger than 0° . As circumferential angle increases, the circumferential average pressure ratio and high- Nu region near the bleed holes both increase, and the distribution of high- Nu region becomes more uniform.

Keywords: vortex cooling; bleed hole; axis-width ratio; circumferential angle

燃气轮机广泛应用于航空动力、陆用发电、舰船推进等领域,目前其进口燃气温度远远超过叶片材料的耐热极限,尤其叶片前缘区域受到燃气直接冲刷,承载着高热负荷,这对叶片前缘冷却提出了更高的要求。作为提高局部换热系数较为有效的冷却方式,旋流冷却因其高传热强度和小流动阻力等优点日益受到研究者的关注。

科研人员对旋流冷却的机理和影响因素进行了实验和数值研究。Glezer 等首次提出适用于燃气轮机叶片的旋流腔冷却结构,并将旋流冷却应用于燃机叶片的冷却设计^[1]。Kreith 等发现旋流气体因较大径向梯度和较薄热边界层使换热强度显著增强^[2]。杜长河等数值研究了喷嘴几何形状以及雷诺数对旋流冷却性能的影响,发现在大喷嘴长宽比时, Nu 数沿旋流腔周向和轴向的分布较为均匀;随着雷诺数的增大,冷气在旋流腔中的流动结构不变,而冷气速度、湍流动能、压力系数和壁面 Nu 数均显著增大^[3-4]。Hay 等发现传热和旋流强度之间有着较为紧密的联系^[5]。Hedlund 等应用红外探测技术实验研究了温比和雷诺数对旋流传热系数的影响^[6]。Liu 等建立了简单的双进口式旋流腔结构,数值分析了进口高度对前缘旋流冷却的影响,结果表明进口高度对旋涡中心和旋流特性有较大影响^[7]。Al-Zuifi 等采用大涡模拟数值分析了旋转对叶片冷却的影响,发现旋转速度对冷却起主导作用^[8]。Gräf 等数值研究了反肾涡对流动换热的作用,并且发现其对冷气流场产生了十分重要的影响^[9]。

目前,旋流冷却的研究成果主要基于单纯的旋流腔内冷结构模型,很少考虑带有气膜孔复合冷却结构下旋流冷却的流动和换热特性。Shen 指出气膜孔几何位置对 U 型通道的气动和换热有着重要影响^[10]。事实上,气膜孔布置同样对旋流冷却特性有着显著影响,研究复合冷却结构下旋流腔的流动与传热特性对于指导叶片前缘冷却结构的优化设计有着重要意义。针对以上的研究,本文以杜长河等建立的叶片前缘旋流冷却模型为基础^[4],构建了带有气膜孔的旋流腔结构,数值研究了气膜孔几何位置对旋流冷却流动和换热特性的影响规律,以期加强对复合冷却方式下叶片前缘旋流冷却的机理认识。

1 计算模型和数值方法

图 1 给出带气膜孔的旋流冷却腔的几何模型。主体旋流腔结构及其尺寸依据实际燃机第一级静叶的前缘结构建立,采用矩形喷嘴切向进气。由于实际燃机叶片前缘冷却由内部冷却和气膜冷却组成,因此在腔体壁面开设气膜孔以更真实模拟实际叶片前缘旋流冷却情况。由图 1 可知,冷气从 9 个矩形进口垂直射入腔室,主流冷气在旋流腔中旋转运动并从出口流出,小部分冷气从 18 个气膜孔流出。表 1 给出了旋流腔结构的几何参数。本文保持主体腔室几何参数、气膜孔间距和数量不变,通过改变气膜孔轴向位置和周向角度 α (逆时针为正)来研究气膜孔几何位置变化对旋流冷却流动和传热特性的影响。气膜孔轴向位置的轴宽比为

$$S = L_1/b \tag{1}$$

不同气膜孔几何位置的工况分布如表 2 所示。

图 2 给出了旋流腔结构计算模型和网格图。计算网格采用 ICFM 软件生成,主体网格采用 H 型网

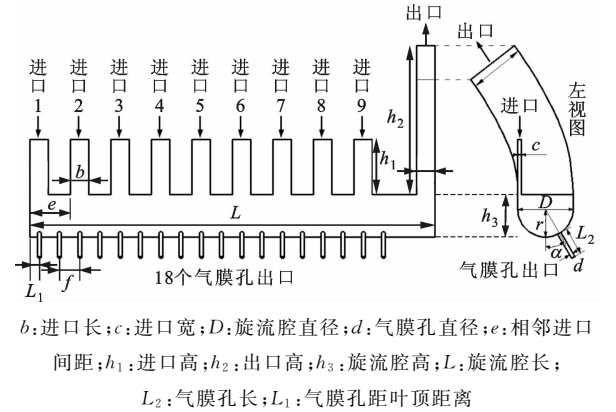


图 1 旋流腔几何模型

表 1 旋流腔几何参数 mm

参数	数值	参数	数值
b	5	h_1	15
c	1	h_2	40.6
D	15	h_3	11.5
d	1	L	110
e	11	L_2	7.5

表 2 气膜孔变几何位置工况

工况	S	$\alpha/(^{\circ})$
1	0.5	0
2	0.3	0
3	0.7	0
4	0.9	0
5	0.5	-60
6	0.5	-30
7	0.5	30
8	0.5	60

格划分,叶根和叶顶进行 C 型网格划分,为了提高网格质量,气膜孔附近区域进行了内、外 O 型网格划分。利用 ANSYS CFX 软件求解全三维 RANS 方程进行流动换热模拟,计算总体精度为二阶,工质为理想气体。杜长河等指出标准 $k-\omega$ 湍流模型对于计算旋流冷却问题具有最佳的计算精度^[4],本文也采用标准 $k-\omega$ 湍流模型进行计算。边界条件是:进口总温为 350 K,进口湍流强度为 5%,变化进口流速保证旋流腔雷诺数 $Re=10\ 000$;出口平均静压为 0.11 MPa;单个气膜孔出口质量流量为进口总质量流量的 1%;由于传热靶面为主要换热面,故给定传热靶面温度为 500 K,其他壁面绝热,所有壁面均保持速度无滑移。

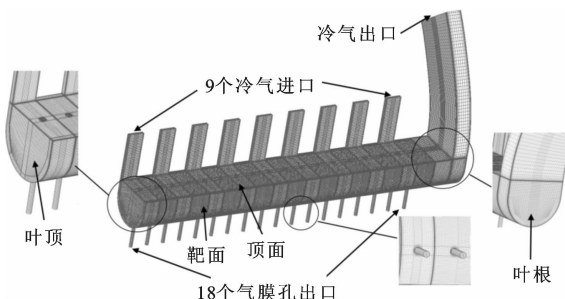


图 2 旋流腔计算模型和网格图

定义旋流腔雷诺数

$$Re = \rho V_t D_1 / \mu \quad (2)$$

式中: ρ 为平均冷气密度; V_t 为旋流腔轴向平均速度; D_1 为腔体横截面水力直径; μ 为平均动力黏性系数。

利用努塞尔数来表征换热强度,即

$$Nu = q_w D_1 / (T_w - T_j) \lambda \quad (3)$$

式中: q_w 为壁面热流密度; T_w 为靶面温度; T_j 为冷气进口总温; λ 为导热系数。

定义量纲为 1 压力系数来描述冷气的静压,即

$$C_{ps} = (P - P_{so}) / (P_{ij} - P_{so}) \quad (4)$$

式中: P 为冷气静压; P_{so} 为出口静压; P_{ij} 为进口总压。

本文针对工况 1 进行了网格无关性验证分析,图 3 给出靶面平均努塞尔数随网格数量的变化曲线,最终确定计算网格数量为 1 000 万。

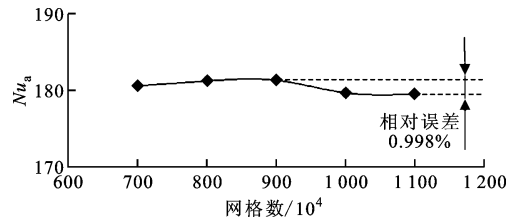


图 3 网格无关性分析

2 结果分析

2.1 气膜孔对旋流冷却的影响

本节选取工况 1 和不加气膜孔两种工况对比分析气膜孔对旋流冷却流动和传热特性的影响规律。为了保证对比分析的公平性,保持两种工况的进口冷气流量相同。图 4 给出两种工况下典型进口冷气流动情况。

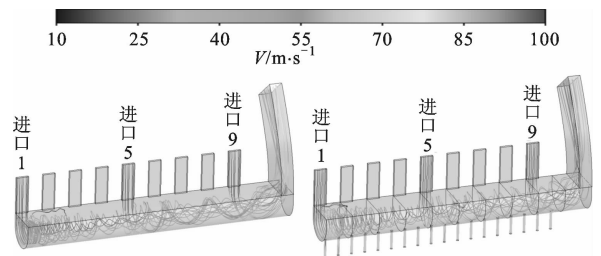


图 4 无气膜孔和有气膜孔旋流腔内三维流线

首先,对两者共性进行分析。从单个进口来看,冷气从进口切向射入旋流腔中,形成高速旋流并向下游运动,流动在径向方向收缩,在轴向方向拉长。这是因为高速冷气在遇到圆形靶面后速度降低,形成的旋流在冷气流量的持续增加下产生径向速度梯度向下游流动。随着旋转流动向下游发展,周向速度降低使得流动径向收缩,轴向速度增加导致流线逐渐拉长。从整体上看,旋流冷气与轴向主流产生强烈掺混,使轴向和周向速度变大,流线向内收缩趋势减弱。在靠近出口附近处,由于冷气流动接近叶根壁面,冷气速度略有增加。

其次,对有无气膜孔的差别进行分析。存在气膜孔情况时,高速旋流冷气一部分从气膜孔流出,导致旋流腔流量减小,轴向流速降低,从而降低了流线拉长程度。图 5 给出了有无气膜孔情况下旋流腔 yz 截面流动细节图,由图 5 可知,由于气膜孔的抽吸作用,气膜孔上游冷气流速增大,下游流速减小。这是因为高速冷气流在流入气膜孔时,冷气产生分

离,部分冷气进入气膜孔,气膜孔内部与旋流腔内部压差使得上游冷气流速增大。进入气膜孔的冷气冲击孔壁使孔内右侧流速增加,而在气膜孔左侧产生低速回流区;未进入气膜孔的大部分冷气脱离气膜孔上游壁面后重新冲击在气膜孔下游壁面,产生新的边界层。因此,气膜孔存在对旋流冷却内部流动产生强烈扰动,改变了腔体内冷气的速度分布。

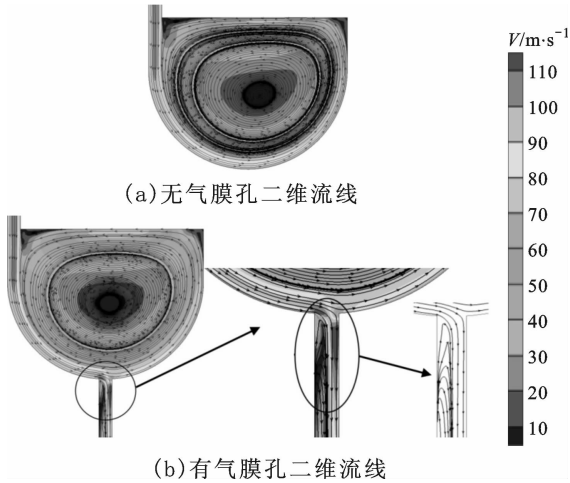
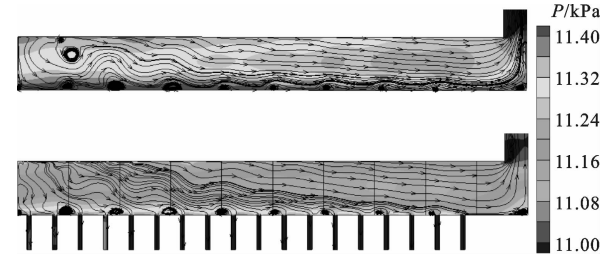


图 5 无气膜孔和有气膜孔时 yz 截面流动细节

图 6 给出了旋流腔 xz 截面流线和压力分布云图,由图 6 可知,在每个进口对应的旋流腔底部形成小旋涡,旋涡尺寸沿着流动方向逐渐减小,旋涡附近冷气流动方向变化较大。这是由于冷气在流动过程中轴向速度不断衰减,当遇到新的高速冷气时,两种不同速度的冷气相互掺混,产生旋涡;随着冷气轴向速度的增加,其与进口高速冷气速度差越来越小,因而旋涡尺寸逐渐减小。对于无气膜情况,冷气在进口 1、2 附近形成一个大旋涡;对于有气膜情况,由于一部分冷气流入气膜孔而导致大旋涡消失,沿着气膜孔方向速度分量较大,整体流动波动较小。此外,受气膜孔的抽吸作用,有气膜孔的流线一致向斜下方偏转,而无气膜孔的流线主要沿轴向分布。这也将导致有气膜孔时旋流腔冷气对壁面冲刷更剧烈,使得换热强度增加。在无气膜孔时,旋流腔压力呈现壁面处高、中间低的分布,且随流动方向整体降低。这是因为冷气在旋流腔内旋转前进,受到离心力的作用有向四周扩散的趋势,由于壁面的存在使得壁面处压力高、中间压力低,而后随着流动进行,轴向冷气速度逐渐增加,与下游新的冷气混合后使得径向速度降低,离心作用相应减弱,因而压力整体降低。在有气膜孔时,旋流腔压力较低,分布比无气膜孔时均匀,气膜孔附近区域压力略有升高。这是因为部分高速冷气直接从气膜孔流出,降低了冷气

的径向速度,使得冷气在离心力作用下对壁面的挤压减弱,因而压力分布较无气膜孔均匀,并且气膜孔附近由于流动受到扰动使得局部压力升高。所以,气膜孔的存在使得旋流腔整体压力分布趋于均匀。



气膜孔存在对旋流腔换热强度有着显著影响,图 7 给出了有无气膜孔时靶面 Nu 分布云图。首先从两者共性方面进行分析,旋流腔喷嘴进口附近存在两个条状高 Nu 区,而其中间区域 Nu 略低。这是因为高速冷气在流入靶面时速度很快,冲刷靶面热边界层,大大减薄热边界层厚度,明显提高换热强度。由于进口冷气还会与旋流腔内低速冷气混合,高速冷气向两端扩散,出现两个条状高 Nu 区域。在出口处,由于出口转折角的存在,有回流区形成,因此热边界层较厚,换热强度低,出现低 Nu 区。有气膜孔情况下,气膜孔附近靶面换热增强,不仅使进口条状高 Nu 区拉长,而且气膜孔下游也出现条状高 Nu 区。气膜孔的存在使得上游流速增加,因而进一步减薄热边界层,增加换热强度,使高 Nu 区拉长。冷气流经气膜孔时产生分离,并冲击在气膜孔下游壁面从而重新生成边界层,增强冷气的掺混,所

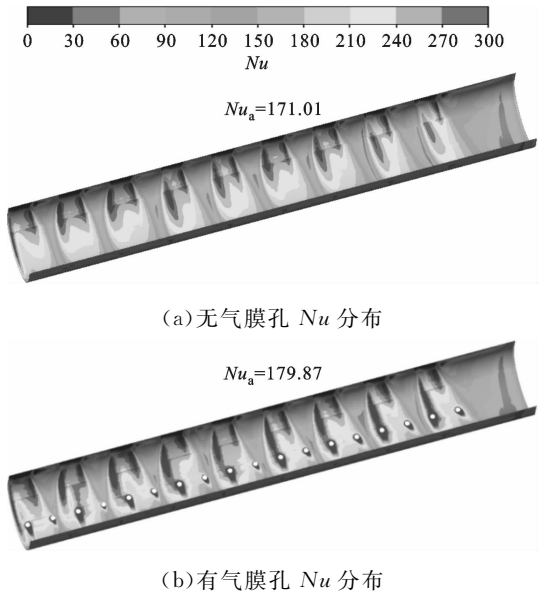


图 7 无气膜孔和有气膜孔 Nu 分布云图

以此处换热强度高。虽然气膜孔的存在使得旋流腔中冷气流量减少,但是气膜孔加强了冷气的扰动,改变了腔体内部的流线和压力分布。与单纯旋流内冷结构相比,气膜孔的存在使得 Nu_a 提高了 5.2%。

2.2 气膜孔轴向位置对旋流冷却的影响

保持气膜孔周向角度 $\alpha=0^\circ$, 选取轴宽比 S 为 0.3、0.5、0.7 和 0.94 时 4 种工况来分析轴向位置对旋流冷却特性的影响。图 8 给出 4 种工况下 xz 平面流线和压力分布云图, 给出了进口 1、2 与气膜孔相对位置的示意图。由图 8 可知, 4 种工况下的压力分布基本相同, 呈现旋流腔壁面附近压力高、中间低、沿流动方向逐渐降低的趋势, 而在气膜孔内部压力普遍较低。随着 S 增大, 冷气在气膜孔附近形成的旋涡变小, 特别当 $S=0.9$ 时很多小旋涡消失。这是由于在 $S=0.9$ 时相邻气膜孔十分接近进口两侧, 一部分冷气从气膜孔流出, 与主流冷气的混合作用减弱, 从而旋涡减小甚至消失。

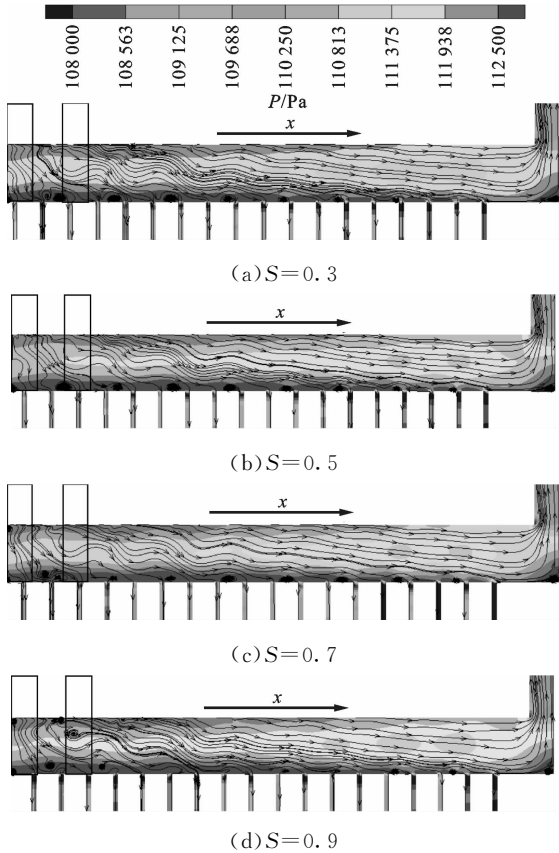


图 8 $\alpha=0^\circ$ 时不同 S 下 xz 截面流线和压力分布云图

图 9 给出了不同轴宽比下压力系数沿轴向的分布曲线。压力系数沿着轴向下流方向逐渐波动降低, 波峰对应喷嘴进口位置, 而波谷对应相邻喷嘴中间位置。在气膜孔对应位置处, 由于气膜孔抽吸作用, 压力系数发生突降。在靠近出口处, 由于冷气运

动角度发生转折, 压力系数也会突降。总体上, 轴宽比越大, 压力系数波动越小。这是由于相邻气膜孔十分接近进口截面的两端, 流速变化较为平缓, 导致此处压力系数波动较小。

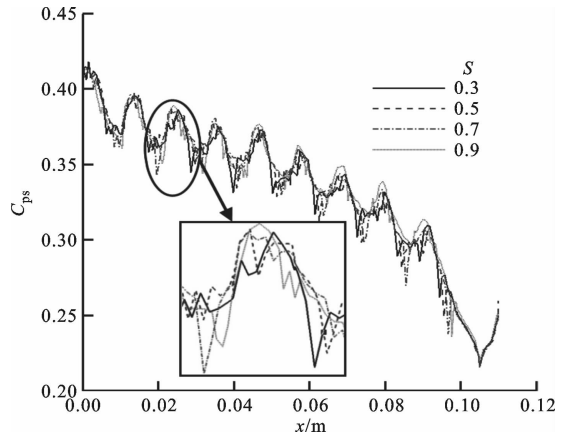


图 9 $\alpha=0^\circ$ 时不同 S 下压力系数沿轴向分布曲线

图 10 给出了不同轴宽比下靶面 Nu 分布云图。由图 10 可知, 当 S 从 0.3 增加到 0.5、0.7 增加到 0.9 时, 平均换热系数 Nu_a 增加, 而 $S=0.5, 0.7$ 时 Nu_a 相差不大。分析其原因是, Nu 分布云图中的每一个矩形进口冷气左边的速度要略大于右边的速度。当 S 从 0.3 增加到 0.5、0.7 增加到 0.9 时, 结合图 8 可知, 处于相邻进口间的气膜孔位置逐渐向进口冷气左端偏移, 平均换热系数增加。 $S=0.5, 0.7$ 时两者气膜孔和冷气进口相对位置关系十分接近, 因此平均换热系数相似。此外, $S=0.9$ 时, 相邻两个气膜孔十分靠近进口两端, 因此冷气从进口流入后一部分直接从气膜孔流出, 向两侧扩散较弱, 流速保持较高水平, 减薄热边界层, 出现较大的高 Nu 区域。

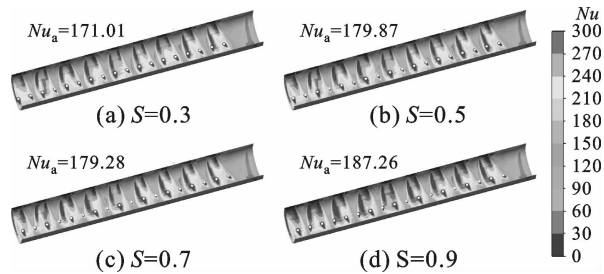


图 10 $\alpha=0^\circ$ 时不同 S 下靶面 Nu 分布云图

2.3 气膜孔周向角度对旋流冷却的影响

固定 $S=0.5$, 选取周向角度为 $-60^\circ, -30^\circ, 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 时 5 种工况来分析周向角度对旋流冷却的影响。图 11 给出了不同周向角度下沿轴向不同截面处的流线和速度云图, 4 个截面位置分别对应进

口 1、4、7、9。由图 11 可知,随着冷气射入旋流腔,其速度急剧减小,并形成大尺度旋涡,随着冷气沿着轴向流动,旋涡中心沿轴向方向基本不变。气膜孔周向角度对冷气流速有着显著影响,呈现出气膜孔上游流速高下游流速低的分布规律。当 $\alpha < 0^\circ$ 时,随着周向角度增加,气膜孔左侧高速区域扩大;当 $\alpha > 0^\circ$ 时,高速区域增长缓慢。这是因为气膜孔虽然会对进口冷气产生扰动,但这是在冷气速度较高的前提下。当 $\alpha > 0^\circ$ 时,气膜孔上游冷气速度较小,气膜孔对冷气的流速增长的影响不再明显。

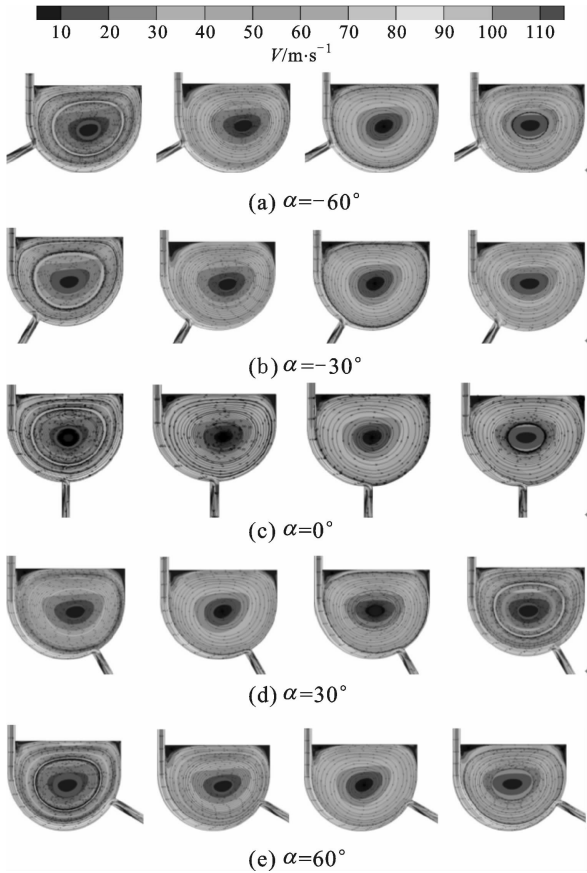


图 11 $S=0.5$ 时不同 α 下 yz 截面流线和速度云图

图 12 给出了不同周向角度下压力系数沿轴向的分布。由图 12 可知,不同周向角度下压力系数分布规律相似,但是数值随着周向角度的增加而增加。当 $\alpha < -30^\circ$ 或 $\alpha > 30^\circ$ 时,压力系数增幅增大。

图 13 给出了不同周向角度下靶面 Nu 的分布云图。由图 13 可知,气膜孔周向角度对 Nu_a 的影响较小,但对 Nu 分布有着显著影响。当 $-60^\circ \leq \alpha \leq 0^\circ$,即进口冷气与气膜孔同侧时,气膜孔附近高 Nu 区较小;随着角度的增加,靶面高 Nu 区分布趋于均匀,但数量级降低。 Nu 区分布均匀性指靶面沿着轴向、周向高 Nu 区较低 Nu 区多的程度,高

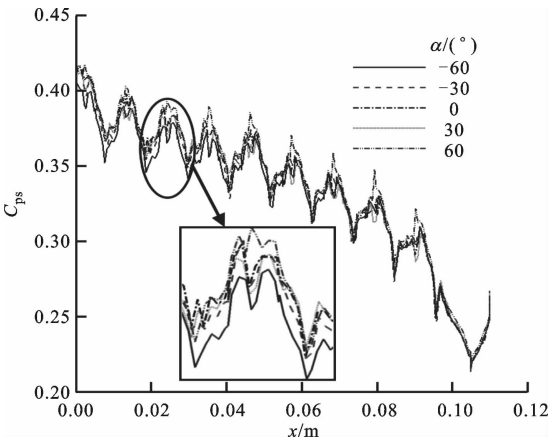


图 12 $S=0.5$ 时不同 α 下压力系数沿轴向分布

Nu 区更多、分布更均匀。上述现象的形成机理可以用图 11 来解释,由于气膜孔周向角度较小,有一半气膜孔处于进口冷气冲刷区外围,因此这些气膜孔周围冷气流速较低,热边界层较厚,高 Nu 区较小。随着 α 增加,气膜孔逐渐处于冷气冲刷区边界处,使其上游冷气速度逐渐增大,从而热边界层减薄,换热强度增加,出现逐渐拉长的两条高 Nu 区且分布更均匀。此外,周向角度越大,气膜孔对进口冷气中部影响越小,因此中部高 Nu 区越小,总体数量级就越低。

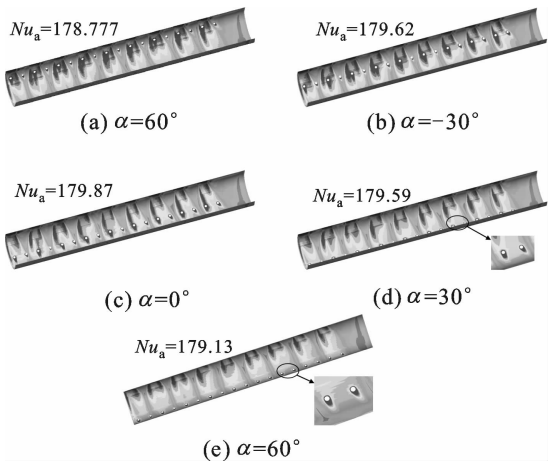


图 13 $S=0.5$ 时不同 α 下靶面 Nu 分布云图

当 $0^\circ < \alpha \leq 60^\circ$ 时,即进口冷气与气膜孔异侧,气膜孔附近高 Nu 区较大,且随着周角度的增加,气膜孔对冷气冲刷区的影响越来越小,甚至条状高 Nu 区消失,整体 Nu 分布更均匀,但数量级更低。由图 11 可知,当 $\alpha > 0^\circ$ 时,气膜孔对上游冷气的加速作用很小,因此对换热强度的增加很小,两条高 Nu 区变小且分布更加均匀,数量级更低,靶面 Nu 分布与无气膜孔的情况类似。又由于气膜孔完全处在冷气冲刷区下游,加上气膜孔的扰动,气膜孔附近高 Nu 区

较大。

综合以上分析,当 $-60^\circ \leq \alpha \leq 0^\circ$,即进口冷气与气膜孔同侧时,气膜孔附近高 Nu 区较小; α 越大,靶面高 Nu 区分布越均匀,但数量级越低。当 $0^\circ < \alpha \leq 60^\circ$,即进口冷气与气膜孔异侧时,随着角度增加,气膜孔对冷气冲刷区的影响越来越小,甚至条状高 Nu 区消失,但气膜孔附近高 Nu 区增大。

3 结 论

本文建立了带有气膜孔的叶片前缘旋流冷却结构模型,通过求解 RANS 方程和标准 $k-\omega$ 湍流模型,对比分析了有无气膜孔情况下旋流冷却性能差异,研究了气膜孔轴宽比和周向角度对旋流冷却流动和换热特性的影响,主要结论如下。

(1)气膜孔存在对旋流冷却内部流动产生强烈扰动,使气膜孔上游冷气流速增加,下游流速降低,气膜孔内形成低速回流区。气膜孔使旋流腔主流冷气流线向斜下方偏转,压力分布更加均匀。

(2)气膜孔对旋流冷却流动和传热特性有着显著影响。气膜孔加强了进口冷气的换热效果,并在气膜孔下游出现高 Nu 区。气膜孔的存在虽然减少了冷气流流量,但平均换热强度提高了 5.2%。

(3) $0.3 < S < 0.7$ 时,轴宽比对冷气流流动和靶面 Nu 分布影响较小; $S=0.9$ 时主流很多小旋涡消失,靶面 Nu 分布更均匀。当 S 从 0.3 增加到 0.5、0.7 增加到 0.9 时,平均换热系数 Nu_a 增加,而 0.5 和 0.7 两种工况 Nu_a 相差不大。

(4)当 $\alpha < 0^\circ$ 时,随着周向角度增加,气膜孔左侧高速区域扩大;当 $\alpha > 0^\circ$ 时高速区域增长缓慢。压力系数随着周向角度的增加而增加。

(5)气膜孔周向角度对靶面平均换热系数影响较小,对 Nu 分布有着显著影响。 $-60^\circ \leq \alpha \leq 0^\circ$ 时,即进口冷气与气膜孔同侧,气膜孔附近高 Nu 区较小;周向角度越大,靶面高 Nu 区分布越均匀,但数量级越低。 $0^\circ < \alpha \leq 60^\circ$ 时,即进口冷气与气膜孔异侧,随着周向角度的增加,气膜孔对冷气冲刷区的影响越来越小,但气膜孔附近高 Nu 区较大。

参考文献:

[1] GLEZER B, MOON H K, O'CONNELL T. A novel technique for the internal blade cooling [C]//Proceed-

ings of ASME Turbo Expo 1996. New York, USA: ASME, 1996: V004T09A015.

- [2] KREITH F, MARGOLIS D. Heat transfer and friction in turbulent vortex flow [J]. Applied Scientific Research: Section A, 1959, 8(1): 457-473.
- [3] DU C, LI L, WU X, 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, 2015, 93: 1020-1032.
- [4] 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.
- [5] HAY N, WEST P D. Heat transfer in free swirling flow in a pipe [J]. Journal of Heat Transfer, 1975, 97(3): 411-416.
- [6] HEDLUND C R, LIFRANI 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.
- [7] LIU Z, LI J, FENG Z. 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]//ASME Turbo Expo 2013; Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2013: V03AT12A029.
- [8] AL-ZURFI N, TURAN A, NASSER A. Numerical investigation of rotation effects on anti-vortex film-cooling holes [J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2016, 96(1): 133-162.
- [9] GRAF L, KLEISER L. Flow-field analysis of anti-kidney vortex film cooling [J]. Journal of Thermal Science, 2012, 21(1): 66-76.
- [10] SHEN Zhongyang, QU Huancheng, ZHANG Di, et al. Effect of bleed hole on flow and heat transfer performance of U-shaped channel with dimple structure [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 66: 10-22.

(编辑 赵炜 苗凌)