

DOI: 10.7652/xjtuxb201807014

周向喷嘴数对旋流冷却流动传热特性的影响

吴凡, 杜长河, 王杰枫, 范小军, 李亮

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 为了研究在旋流腔周向布置多个喷嘴对旋流冷却特性的影响, 分别建立了保持喷嘴几何尺寸不变和保持喷嘴进口总面积不变的旋流冷却模型。在相同质量流量和喷嘴长宽比的条件下, 采用数值计算方法, 研究了周向喷嘴数对旋流冷却特性的影响, 并分析、对比了两种情况下旋流冷却性能的差异。研究表明: 当保持喷嘴几何尺寸不变时, 靶面平均 Nu 随周向喷嘴数增加而逐渐减小, 但靶面 Nu 分布更加均匀, 由于下游冷气速度受轴向横流影响较大, 高 Nu 区向下方偏移, 旋流腔冷气涡数目随周向喷嘴数增多而逐渐减少, 冷气总压损失也随之减少; 当保持喷嘴进口总面积不变时, 随着周向喷嘴数的增加, 靶面高 Nu 区面积和靶面平均 Nu 先增大然后略有减小, 都在周向喷嘴数为 2 时达到最大值。由于下游冷气速度受轴向冲击影响较小, 在旋流腔轴向下游处, 靶面展向平均 Nu 略有提高, 而总压损失随着周向喷嘴数的增加逐渐增加。

关键词: 燃气轮机; 旋流冷却; 喷嘴; 质量流量; 流动传热

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)07-0094-07

Influence of the Number of Circumferential Nozzles on the Flow and Heat Transfer Characteristics of Swirl Cooling

WU Fan, DU Changhe, WANG Jiefeng, FAN Xiaojun, LI Liang

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

Abstract: To study the effects of the number of circumferential nozzles in vortex chamber on the swirl cooling characteristics, two swirl cooling models were established, keeping the nozzle geometry and the total area of the nozzle inlets unchanged, respectively. At the same mass flow rate and nozzle aspect ratio, the effects of the number of circumferential nozzles on the swirling cooling characteristics were studied by numerical method, and the difference of swirling cooling performance between the two models were compared and analyzed. Results revealed that when the nozzle geometry is unchanged, the target average Nusselt number decreases with the number of nozzles, but the target Nusselt number distribution becomes more uniform. As the downstream air speed is more affected by the axial flow, the high Nusselt number region deflects downward. The number of air vortexes in vortex chamber decreases due to the increase in the number of nozzles, and the total pressure loss also decreases. When the total area of the nozzle inlets is unchanged, as the number of nozzles increases, the area of target high Nusselt number region and the average Nusselt number at first increase and then decrease, and become the largest when the number of nozzles is two. Because the downstream air velocity is less affected by the impact of axial flow, the target spanwise average Nusselt number has a small increase in the axial

收稿日期: 2017-12-28。 作者简介: 吴凡(1995—), 男, 硕士生; 李亮(通信作者), 男, 副教授。

网络出版时间: 2018-04-20

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180420.1538.004.html>

downstream, while the total pressure loss increases with the number of circumferential nozzles.

Keywords: gas turbine; swirl cooling; nozzle; mass flow rate; flow and heat transfer

燃气轮机具有占地面积小、功率密度大、启动速度快等优点,被广泛应用于发电行业、航空动力、舰船推动、燃气输运、分布式能源等领域^[1]。目前,提高燃气透平进口温度是提高燃气轮机效率的有效措施。由于燃气透平进口温度的不断提高,燃气透平叶片材料已经不能承受,因此必须对叶片进行冷却。叶片前缘区域受到高温燃气的直接冲刷,换热强度比较高,所以对叶片前缘冷却的要求更加严格。旋流冷却作为一种新型的叶片前缘冷却方式,具有流动阻力小、冷却能力强和传热分布均匀等优点^[2],已成为叶片前缘冷却的重要研究方向。

Kreith 等首次研究了圆管内旋转流动的摩擦阻力和传热特性,发现旋转流动会产生较大径向速度梯度,并且减薄热边界层,因而冷气与壁面的传热强度明显提高^[3]。Glezer 等首次将旋转流动引入到燃气透平叶片冷却应用中,并提出了叶片前缘的旋流冷却结构^[4]。Ligrani 等通过实验指出旋流冷却的高传热特性和 Gortler 涡对密切相连,随着旋流腔内冷气雷诺数的变大,Gortler 涡对不稳定性升高、数量有所增加,所以传热强度明显提高^[5]。Khalatov 等通过实验观察了轴向不同喷嘴数和旋流腔出口结构下旋流腔的传热特性、流动情况和压力损失,并得出旋流腔进出口结构会对旋流冷却有所影响^[6]。杜长河等通过数值研究提出了旋流冷却的径向对流原理,系统地研究了冷气雷诺数、来流温比等气动参数和喷嘴长宽比、高度、轴向数目以及冷气喷射角度对旋流冷却特性的影响^[7-9]。Mousavi 等通过改变周向喷嘴数目分别对简单圆管旋流冷却和双旋流冷却结构进行了数值模拟研究^[10]。

目前,针对旋流冷却中进口喷嘴的研究大多集中于喷嘴长宽比、高度、面积大小以及轴向布置不同喷嘴数目等方面,而对于在旋流腔周向布置不同的喷嘴数的对比分析鲜有发表。有研究表明,周向喷嘴数对旋流冷却流动和传热特性会产生显著的影响^[10],但该研究中数值计算的进口边界条件设置不合理,并没有深入地探究周向喷嘴数对旋流冷却流动和传热的影响机理。针对上述问题,本文以 Ling 等实验所用的叶片前缘冷却结构^[11]为基础,对叶片前缘的旋流冷却结构进行了简化。在相同的质量流量和喷嘴长宽比的条件下,利用数值计算方法研究了在旋流腔周向布置不同喷嘴数的基本机理,并深

入分析了流动和传热特性,旨在说明在周向布置多个喷嘴的冷却结构的优缺点,为优化叶片前缘冷却提供新的思路。

1 计算模型和数值方法

图 1 给出在旋流腔的平面模型示意图。图 1 中旋流腔长度 L 为 525 mm,旋流腔直径 D_h 为 70 mm,喷嘴进口 2 距叶顶距离 f 为 245 mm,进、出口高 h 为 100 mm,出口长 c 为 35 mm,出口宽 e 为 9.38 mm。在出口总质量流量和喷嘴长宽比不变的条件下,本文通过改变旋流腔周向喷嘴数 n 、进口长 b 、进口宽 d 和喷嘴夹角 α ,分两种情形对旋流冷却的流动和传热特性进行了对比分析。保持喷嘴的几何尺寸不变时,喷嘴的各项几何参数如表 1 所示。保持喷嘴进口总面积不变时,喷嘴的各项几何参数如表 2 所示。图 2 给出了周向喷嘴数 $n=1,4$ 时的三维模型图。当保持喷嘴几何尺寸不变时,在旋流腔周向布置 4 个喷嘴,当保持喷嘴进口总面积不变时,改变 n 同时保证了每个喷嘴的几何尺寸一致。

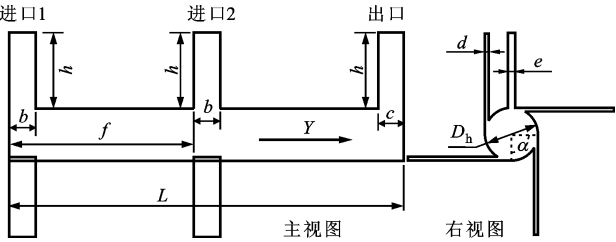


图 1 旋流腔几何模型

表 1 保持喷嘴几何尺寸不变时的喷嘴几何参数

n	b/mm	d/mm	$\alpha/(^{\circ})$
1	35	4.69	0
2	35	4.69	180
3	35	4.69	120
4	35	4.69	90
5	35	4.69	72

图 3 给出了保持喷嘴几何不变时周向喷嘴数 $n=4$ 的网格图。本文所有模型的计算网格都采用 ICEM 软件进行六面体结构化网格划分,主体网格采用 H 型网格划分,在叶根和叶顶处采用碟型网格划分,在喷嘴与旋流腔相切处采用 Y 型网格划分。

为了提高网格质量,对近壁面处网格进行加密,保证 y^+ 在 1 附近。采用 ANSYS CFX 软件对三维

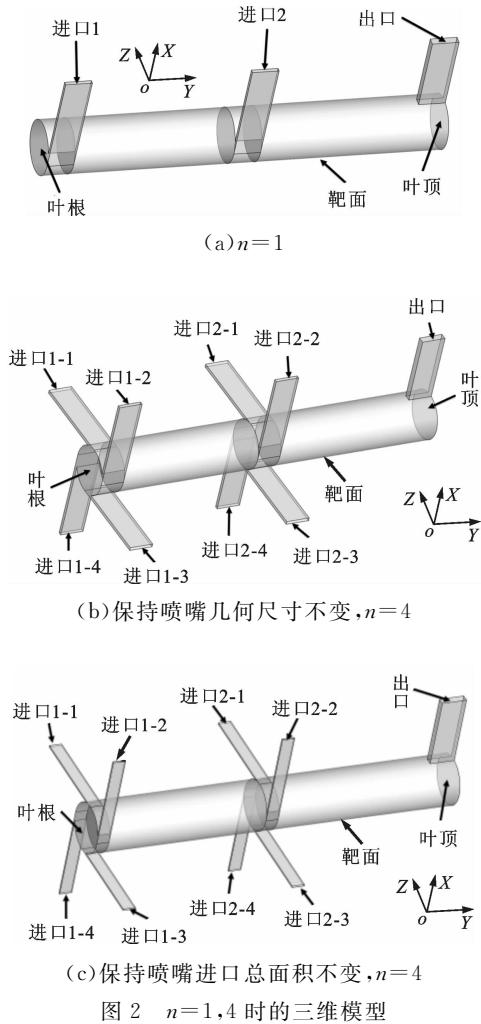


图 2 $n=1,4$ 时的三维模型

表 2 保持喷嘴进口总面积不变时的喷嘴几何参数

n	b/mm	d/mm	$\alpha/({}^\circ)$
1	35.000	4.690 0	0
2	24.749	3.316 0	180
3	20.206	2.708 0	120
4	17.500	2.345 0	90
5	15.652	2.097 5	72

稳态 RANS 方程进行求解,设置求解精度为二阶,冷却工质选用理想气体,采用多重网格收敛技术和时间推进法加快收敛速度。文献[12]指出,对于计算圆管内旋流冷却问题,标准 $k-\omega$ 湍流模型具有最佳的计算精度,因此本文采用标准 $k-\omega$ 湍流模型进行计算。在 CFX 中设置边界条件如下:冷气进口总温为 350 K,湍流强度为 5%,并给定进口质量流量,保证出口总质量流量相同,出口平均静压为 0.11 MPa,传热靶面的恒定温度为 500 K,其他壁面均为绝热,所有壁面都保持速度无滑移。

定义进口雷诺数

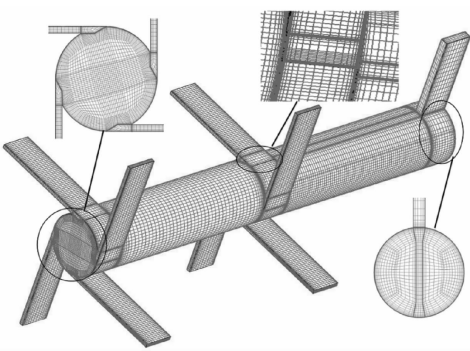


图 3 保持喷嘴几何尺寸不变、 $n=4$ 时的网格

$$Re_j = \rho V_j D_j / \mu \tag{1}$$

式中: ρ 为冷气密度; V_j 冷气进口喷射速度; μ 为动力黏性系数; D_j 为喷嘴进口水力直径。

利用 Nu 来表示换热强度,即

$$Nu = q_w D_h / (T_{in} - T_w) \lambda \tag{2}$$

式中: q_w 为靶面热流密度; T_{in} 为进口总温; T_w 为旋流腔靶面温度; λ 为导热系数; D_h 为旋流腔横截面水力直径。

根据无量纲静压系数 C_{ps} 来描述冷气的静压,即

$$C_{ps} = (P - P_{so}) / (P_{ij} - P_{so}) \tag{3}$$

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

本文选取 $n=1$ 的几何模型进行网格无关性验证,选取的网格数分别为 280、360、420 和 502 万。图 4 给出了 $n=1$ 时不同网格数下展向平均 Nu 沿无量纲长度的变化曲线,当网格数大于 360 万时,计算结果对网格数不敏感,故选用网格数为 360 万的网格进行计算。

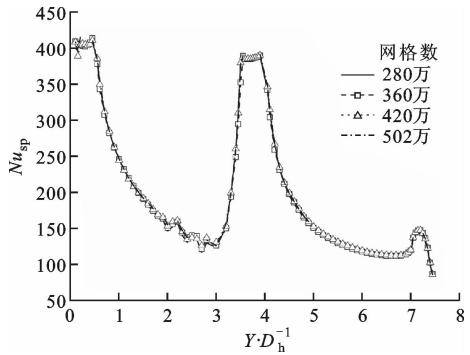


图 4 展向平均 Nu 沿无量纲长度的变化

2 结果分析

2.1 流动特性的对比分析

图 5 给出了改变周向喷嘴数, $Y \cdot D_h^{-1} = 0.019$ 时,进口 1 的 XZ 截面流线和速度云图。冷气通过

喷嘴进口沿切向高速射入腔体,并在腔体内形成明显的旋转流动,随着冷气远离喷嘴进口,冷气速度沿周向逐渐衰减。由图 5a 可知,冷气周向速度随着 n 的增多而减小。这是因为在总质量流量相同的情况下,随着 n 的增多,喷嘴进口总面积逐渐增大,导致冷气进口速度相应减少,离心力不足以让冷气维持在壁面运动,因而旋流低速区面积不断增大。由于冷气沿周向均匀布置的多个喷嘴切向射入,XZ 截面旋流低速区向几何中心靠拢,冷气流速分布沿周向更加均匀。

由于冷气进口总面积都相同,在相同的流量情况下,每个喷嘴进口的冷气速度大致相同。由图 5b 可知:随着 n 的增多,为保持喷嘴进口总面积不变,每个喷嘴进口截面的宽度 d 逐渐减小;冷气速度梯度沿半径方向逐渐变大,冷气沿周向多个喷嘴切向进入旋流腔,以相同速度冲刷壁面边界层,阻碍壁面的边界层发展,冷气速度沿周向衰减变慢,冷气在旋流腔壁面保持高速流动。

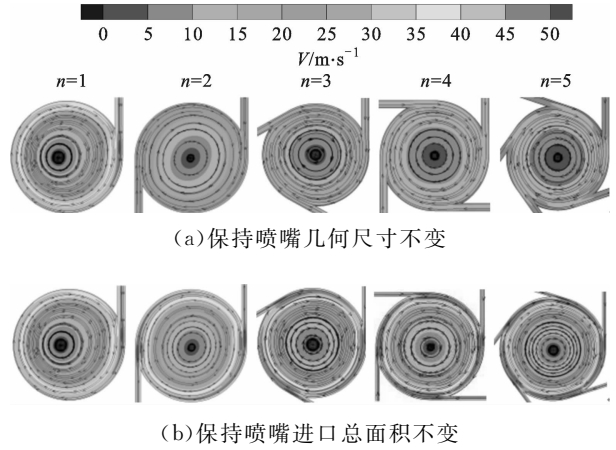


图 5 $Y \cdot D_h^{-1} = 0.019$ 时进口 1 的 XZ 截面流线和速度云图

图 6 给出了保持喷嘴进口总面积不变时旋流腔三维流线。由图 6 可知,冷气以较高速度切向射入旋流腔中形成旋流,并在腔体内旋转向下游流动,随着 n 的增多,流线分布规律大致相同。从喷嘴进口 1 喷射出来的冷气流线先径向向内收缩,然后径向向外扩张,而且周向喷嘴数几乎不影响喷嘴进口 2 的冷气流线分布,而当周向布置多个喷嘴时,冷气流线径向向内收缩更明显。这是由于冷气沿周向多个喷嘴进入冷气腔时,周向相邻喷嘴喷射出的冷气会产生冲击作用,进而造成冷气间的动量损失。此外,喷嘴进口 2 喷射出来的高速气流和上游冷气发生动量交换,并且靠近出口位置压力较低,下游冷气周向速度增大,导致离心力增大,所以冷气流线径向向外

扩张。当周向布置多个喷嘴时,从喷嘴进口 1 喷射出来的冷气流线在旋流腔下游沿轴向拉伸距离变短。这说明下游冷气抗横流作用增强,有利于旋流腔的均匀换热。

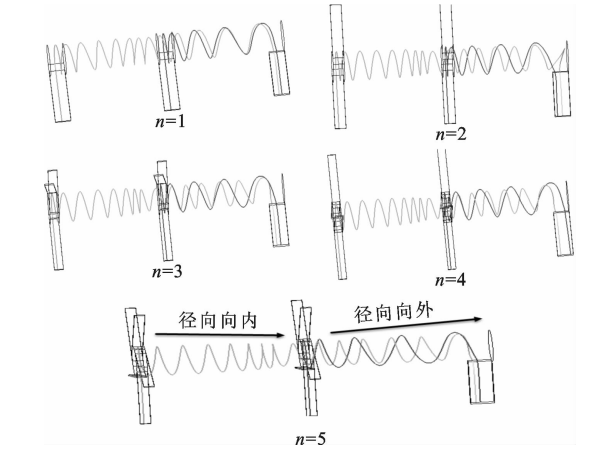
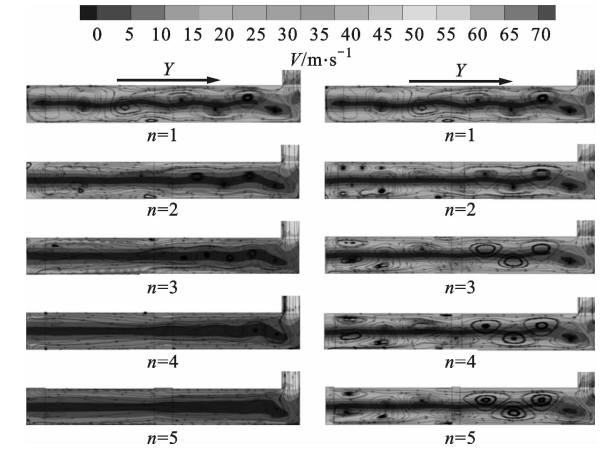


图 6 保持喷嘴进口面积不变时旋流腔三维流线图

图 7 给出了改变 n 时 XY 截面流线和速度云图。由图 7a 可知,随着 n 的增多,喷嘴进口冷气速度逐渐减小,冷气速度分布更均匀,冷气湍流强度减少。沿轴向下流,当 $n > 2$ 时冷气涡数目发生骤降,当 $n = 3$ 时冷气涡数量为 6, $n = 4$ 时冷气涡数量为 2, $n = 5$ 时冷气涡数量降为 1,而 $n = 2$ 时冷气涡数量为 8,在进口 1 附近冷气涡直径有所减小。

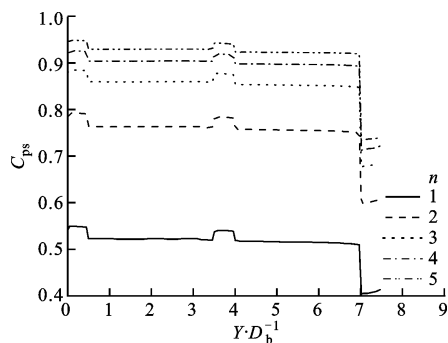


(a) 保持喷嘴几何尺寸不变 (b) 保持喷嘴进口总面积不变
图 7 改变周向喷嘴数 n 时 XY 截面流线和速度云图

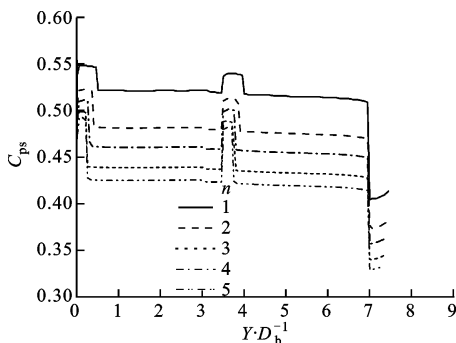
由图 7b 可知,当 n 增多时,喷嘴进口 2 和出口之间的冷气涡结构受到的影响很小,在喷嘴进口 1 附近的涡系结构受到影响较大。在喷嘴进口 1 附近,冷气涡数量随 n 的增多呈现先增加后减少的趋势,并且在 $n = 2$ 时达到最大。当 $n = 1$ 时冷气涡数量为 3,当 $n = 2$ 时冷气涡数量为 8,当 $n > 2$ 时冷气涡数量为 5,冷气涡的尺度则呈现先减小后增大的

趋势,当 $n=1$ 时冷气涡直径最大, $n=2$ 时冷气涡直径最小,当 $n>2$ 时冷气涡直径几乎不变,但相比于 $n=2$ 时有所增加。

图8给出了改变周向喷嘴数 n 时冷气静压系数沿 $Y \cdot D_b^{-1}$ 的分布曲线。由图8可知:冷气静压系数沿轴向分布规律大致相同,波峰对应喷嘴进口位置;在靠近出口处,由于冷气运动角度发生转折和出口处压力较低,冷气速度增大,压力系数发生突降,而且压力系数沿轴向下游逐渐下降,但是下降趋势平缓,这说明冷气静压沿轴向损失较小,只在出口处出现较大损失。当保持喷嘴几何尺寸不变时,随着 n 的增加,冷气速度逐渐降低,在总压几乎不变的情况下,导致冷气静压系数逐渐增大;当保持喷嘴进口总面积不变时,随着 n 的增加,冷气高速旋流区面积逐渐增大,在总压几乎不变的情况下,冷气静压系数会随着 n 的增加而减小,喷嘴进口截面宽度逐渐减小,当总压几乎保持不变时,冷气静压系数波峰的幅值相应升高。



(a) 保持喷嘴几何尺寸不变



(b) 保持喷嘴进口总面积不变

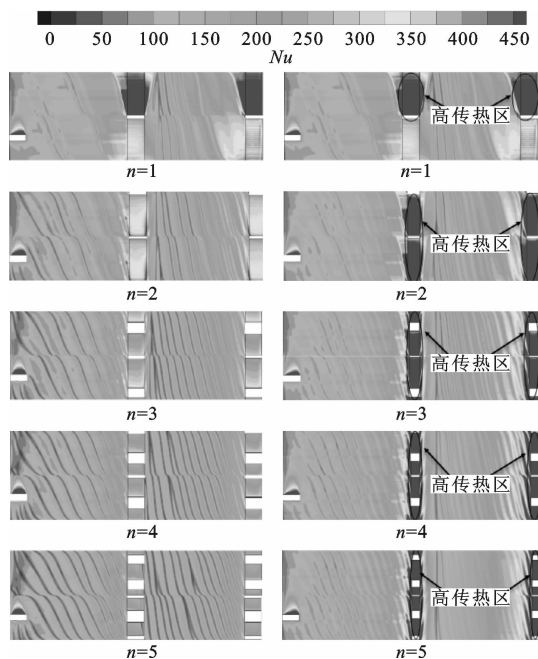
图8 改变 n 时静压系数的变化

2.2 传热特性的对比分析

图9给出了改变周向喷嘴数 n 时靶面 Nu 云图分布。由图9a中可知:随着 n 的增多,进口冷气的喷射速度逐渐减小;导致冲刷壁面边界层作用减弱,

热边界层变厚,高传热区的换热强度显著减小,但靶面的传热均匀性随之变好。此外,由于进口喷射速度的减小,下游冷气受到上游冷气的轴向冲击作用增强,导致高换热区向轴向下游倾斜更明显。

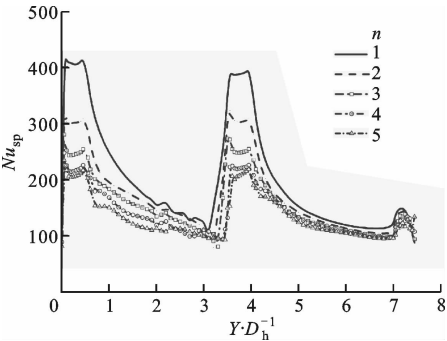
由图9b可知,当保持喷嘴进口总面积都不变时,沿周向布置的每个进口的冷气速度大致相同,在喷嘴进口处的传热强度大致相同,随着 n 的增多,冷气沿周向多个喷嘴高速射入,从不同角度冲刷热边界层,在喷嘴处高传热区沿周向衰减变慢,高传热区沿圆周分布更加均匀。因此,随着 n 的增多,高传热区面积在 $n=2$ 时最大,而当 $n>2$ 时,高传热区面积略有减小。此外,在喷嘴进口段附近,靶面的传热强度高且更加均匀,从而可以对实际叶片前缘高温停滞区实施更为有效的冷却。



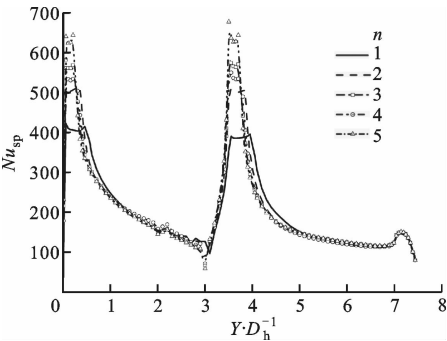
(a) 保持喷嘴几何尺寸不变 (b) 保持喷嘴进口总面积不变

图9 改变周向喷嘴数 n 时靶面 Nu 云图

图10给出了改变周向喷嘴数 n 时展向平均 Nu 沿 $Y \cdot D_b^{-1}$ 的变化曲线。由图10可知,展向平均 Nu 分布规律沿轴向大致相同,在喷嘴处出现波峰,这和图9现象相对应。由图10a可知,随着 n 的增多,展向平均 Nu 逐渐减小,在喷嘴附近 Nu 变化最大,在其他区域变化很小,展向平均 Nu 数随 n 的增多沿轴向分布逐渐均匀,这对实际叶片前缘换热具有显著意义。由图10b可知,随着 n 的增多,展向平均 Nu 在喷嘴位置的波峰的幅值增大明显,并且在喷嘴进口2下游处,展向平均 Nu 略有增加,说明下游冷气抗轴向横流作用加强。



(a)保持喷嘴几何尺寸不变



(b)保持喷嘴进口总面积不变

图 10 改变周向喷嘴数 n 时展向平均 Nu 沿 $Y \cdot D_h^{-1}$ 的变化

表 3 给出了改变周向喷嘴数 n 时总压损失系数和靶面平均 Nu 。由表 3 可知,当保持喷嘴几何尺寸不变时,随着 n 的增多,总压损失系数逐渐减小。由于实际叶片前缘有气膜孔的存在,如果总压损失过大,冷却气体将无法从气膜孔流出,说明较小的总压损失对实际叶片前缘冷却具有显著意义。此外,靶面平均 Nu 随 n 的增多逐渐减小,而当保持喷嘴进口总面积不变时,随着 n 的增多,总压损失系数逐渐增加,但是增幅不大。对于靶面平均 Nu 数,在 $n=2$ 时最大,这是由于在 $n=2$ 时高热传区面积最大,而当喷嘴数 $n>2$ 时,靶面平均 Nu 相差不大。

表 3 改变 n 时总压损失系数和靶面平均 Nu

保持喷嘴几何尺寸不变			保持喷嘴进口总面积不变		
n	靶面平均 Nu	总压损失系数	n	靶面平均 Nu	总压损失系数
1	218.214	0.0232	1	218.214	0.0232
2	182.174	0.01246	2	224.892	0.02582
3	160.973	0.00969	3	222.098	0.02748
4	145.116	0.0083	4	221.768	0.02916
5	135.171	0.00748	5	223.207	0.0304

3 结 论

本文建立了在周向布置多个喷嘴数的叶片前缘旋流冷却模型。在相同质量流量和喷嘴长宽比条件下,采用数值计算方法研究了两种情况下改变周向喷嘴数的旋流冷却机理,并对比分析了流动传热特性,得到如下主要结论。

(1)周向喷嘴数对旋流冷却流动特性产生显著影响。保持喷嘴几何尺寸不变时,随着周向喷嘴数 n 增加,喷嘴进口冷气流速降低,冷气流速分布更加均匀。冷气湍流强度降低,冷气总压损失逐渐减小,下游冷气受轴向横流冲击影响较大;当保持喷嘴进口总面积不变时,随着周向喷嘴数 n 增加,喷嘴进口冷气流速大致相同,冷气在旋流腔壁面保持高速流动,下游冷气受轴向横流冲击影响较小。由于相邻进口高速冷气间的冲击作用,冷气的总压损失逐渐增加。

(2)周向喷嘴数对旋流冷却传热特性产生显著影响。保持喷嘴几何尺寸不变时,随着周向喷嘴数 n 增加,靶面平均传热强度逐渐减小,但传热均匀性随之变好。保持喷嘴进口总面积不变时,当 $n=2$ 时,靶面平均传热强度最高;当 $n>2$ 时,靶面平均传热强度几乎不变,相比于 $n=2$ 时略有降低,相比于 $n=1$ 时有所增加。此外,在整个喷嘴进口圆周附近,靶面的传热强度高且分布更加均匀。

(3)当保持喷嘴几何尺寸不变时,随着周向喷嘴数 n 的增加,靶面平均 Nu 和总压损失系数都逐渐减小;增加周向喷嘴数在减小冷气流动损失的同时,会降低冷却效果;相比于 $n=1,2$ 时靶面平均 Nu 降低 16.51%,总压损失系数降低了 46.29%。保持喷嘴进口总面积不变时,随着周向喷嘴数 n 的增加,靶面平均 Nu 变化较小,总压损失系数则逐渐增大;增加周向喷嘴数对提高冷却效果影响较小,同时会增大冷气流动损失;相比于 $n=1,2$ 时靶面平均 Nu 提高了 3.1%,但总压损失系数升高了 11.29%。

综上所述,周向喷嘴数 $n=2$ 时,旋流冷却结构具有优良的流动和传热性能。

参考文献:

[1] 翁史烈,王永泓,宋华芬,等. 现代燃气轮机装置 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2015: 1-10.

[2] LIGRANI P M, OLIVEIRA M M, BLASKOVICH T. Comparison of heat transfer augmentation techniques [J]. AIAA Journal, 2003, 41(3): 337-362.

- [3] KREITH F, MARGOLIS D. Heat transfer and friction in turbulent vortex flow [J]. *Applied Scientific Research: Section A*, 1959, 8(1): 457-473.
- [4] 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.
- [5] LIGRANI P M, HEDLUND C R, THAMBU R, et al. Flow phenomena in swirl chambers [J]. *Experiments in Fluids*, 1998, 24(3): 254-264.
- [6] KHALATOV A A, BORISOV I I, SEVERIN S D, et al. Heat transfer hydrodynamics and pressure drop in the model of a blade leading edge cyclone cooling [C]// *Proceedings of ASME Turbo Expo 2011*. New York, USA: ASME, 2011: 1057-1065.
- [7] 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.
- [8] DU Change, 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.
- [9] 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.
- [10] MOUSAVI S M, GHADIMI B, KOWSARY F. Numerical study on the effects of multiple inlet slot configurations on swirl cooling of a gas turbine blade leading edge [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2018, 90: 34-43.
- [11] LING J P C W, IRELAND P T, HARVEY N W. Measurement of heat transfer coefficient distributions and flow field in a model of a turbine blade cooling passage with tangential injection [C]// *ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air*. New York, USA: ASME, 2006: 325-340.
- [12] 杜长河, 李森, 李亮, 等. 叶片前缘旋流蒸汽冷却流动和传热的数值研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(10): 72-78.
- DU Changhe, LI Sen, LI Liang, et al. Numerical study on characteristics of flow and heat transfer of steam vortex cooling for blade leading edges [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(10): 72-78.

(编辑 赵炜)

(上接第79页)

- [11] 郑东, 钟北京. 异辛烷/正庚烷/乙醇三组分燃料着火的化学动力学模型 [J]. *物理化学学报*, 2012, 28(9): 2029-2036.
- ZHENG Dong, ZHONG Beijing. Chemical kinetics model of the ignition of isooctane/n-heptane/ethanol tri-component fuel [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2012, 28(9): 2029-2036.
- [12] ANDRAE J C G. Development of a detailed kinetic model for gasoline surrogate fuels [J]. *Fuel*, 2008, 87(10/11): 2013-2022.
- [13] DAGAUT P, TOGB C. Oxidation kinetics of mixtures of iso-octane with ethanol or butanol in a jet-stirred reactor: experimental and modeling study [J]. *Combustion Science & Technology*, 2012, 184(7/8): 1025-1038.
- [14] KELLEY A P, LAW C K. Nonlinear effects in the extraction of laminar flame speeds from expanding spherical flames [J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(9): 1844-1851.
- [15] CHEN Z. On the extraction of laminar flame speed and Markstein length from outwardly propagating spherical flames [J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(2): 291-300.
- [16] FRASSOLDATI A, CUOCI A, FARAVELLI T, et al. Kinetic modeling of the oxidation of ethanol and gasoline surrogate mixtures [J]. *Combustion Science and Technology*, 2010, 182(4/5/6): 653-667.
- [17] LI Q, ZHANG W, JIN W, et al. Laminar flame characteristics and kinetic modeling study of methanol-isooctane blends at elevated temperatures [J]. *Fuel*, 2016, 184: 836-845.

(编辑 赵炜)