

DOI: 10.7652/xjtub201512020

喷嘴长宽比和雷诺数对旋流冷却流动与传热特性的影响

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: 针对叶片前缘冷却流动与传热问题,建立了合理的旋流腔冷却结构。通过求解三维稳态 RANS 方程和标准 $k-\omega$ 湍流模型,数值分析了喷嘴长宽比和雷诺数对旋流冷却流动和传热的影响。基于数值计算结果对无量纲传热系数 Nu 、喷嘴长宽比 C_{ar} 和雷诺数 Re 进行方程拟合,得到旋流冷却的传热关联式。结果表明:冷气从喷嘴进口切向射入旋流腔并形成高速旋流,显著增强换热;随着喷嘴长宽比从 0.2 增大到 9,旋流外区面积、冷气速度和冷气湍流动能先减小后增大,冷气压力系数先增大后减小;在大喷嘴长宽比时, Nu 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 均显著增大;平均 Nu 随着雷诺数的增大而显著增大,随着喷嘴长宽比的增大先减小然后增大;传热关联式与数值计算结果的误差在 10% 以内,可以准确预测旋流冷却的换热系数。

关键词: 旋流冷却;喷嘴长宽比;雷诺数;传热关联式

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)12-0124-06

Effects of Jet Nozzle Aspect Ratio and Reynolds Number on Flow and Heat Transfer Characteristics of Vortex Cooling

DU Changhe, FAN Xiaojun, LI Liang, FENG Zhenping

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

Abstract: A proper vortex chamber structure is established in terms of blade leading edge cooling. The influence of jet nozzle aspect ratio and Reynolds number on flow field and heat transfer characteristics of vortex cooling is numerically analyzed by means of 3-D steady RANS equations coupled with standard $k-\omega$ turbulence model. Based on numerical data, the heat transfer correlations are summarized with respect to the Nusselt number, jet nozzle aspect ratio and Reynolds number. Results show that high speed rotational flow is formed by the impingement air, thus the heat transfer intensity is significantly enhanced. When jet nozzle aspect ratio increases from 0.2 to 9, the outer rotation region, air speed and turbulence kinetic energy decrease at first and then increase, while the static pressure ratio increases at first and then decreases. A larger jet nozzle aspect ratio results in more uniform Nusselt number distribution in the circumferential and axial direction. An increase in Reynolds number leads to pronounced increases in air speed, turbulence kinetic energy, static pressure ratio and wall Nusselt number. However, the flow characteristics are not sensitive to Reynolds number. The globally averaged Nusselt number increases as Reynolds number increases, but decreases at first and then increases

收稿日期: 2015-06-08。 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: 2015-09-21

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150921.1442.006.html>

as jet nozzle aspect ratio increases. The heat transfer correlation can be used to accurately predict the vortex cooling heat transfer coefficient with a deviation less than 10%.

Keywords: vortex cooling; jet nozzle aspect ratio; Reynolds number; heat transfer correlation

航空发动机叶片前缘区直接承受上游高温燃气的冲刷作用,其热负荷比较高,必须采取相应的冷却措施。旋流冷却作为一种最新发展的叶片冷却方式,具有传热强度高、热均匀性好和流动阻力小等优点^[1],已成为叶片前缘区域冷却研究的前沿课题。

研究人员对旋流冷却的原理和气动参数影响机理进行了实验和数值研究。Kreith 等发现高速旋流会产生较大的径向压力梯度和较薄的热边界层,使得换热强度显著增强^[2]。Hay 等实验测量了不同进口角度和雷诺数下的圆管旋流冷却结构的流场和努塞尔数的分布,结果表明冷气的旋流强度和努塞尔数密切相关^[3]。Ligrani 等观测到了旋流腔中的 Görtler 旋涡,并发现旋涡对传热增强有着重要的作用^[4]。Glezer 等首次将旋流冷却应用到燃机叶片冷却的研究中,得到了 3 种冷却结构的传热关联式^[5]。Helund 等实验测量了不同雷诺数和来流温比对传热系数的影响作用^[6]。Ling 等实验和数值研究了旋流腔中的流动结构和传热系数分布规律,并对比了旋流冷却和常规冲击冷却的传热特性^[7]。刘钊等针对叶片前缘旋流冷却结构数值研究了雷诺数、来流温比和喷嘴数量对冷却性能的影响^[8]。

目前,关于旋流腔几何参数对旋流冷却流动与换热特性影响的研究较为匮乏。同时,上述研究大多基于简单的圆管模型,与实际叶片前缘冷却结构的形状和尺寸相差较大。针对以上问题,本文建立了合理的叶片前缘旋流腔结构,采用数值模拟方法研究了喷嘴长宽比和雷诺数对旋流冷却流动和传热的影响规律,并在此基础上拟合了无量纲的传热关联式,以期对叶片冷却的优化设计提供参考。

1 计算模型和数值方法

旋流腔的几何示意图如图 1 所示。冷气从 9 个矩形喷嘴切向进入腔体形成高速旋流,最后从出口流出。为了适应冷气的流动方向,出口通道设计成光滑的样条曲线形状。参考 Jiang 等对 Mark II 叶片的前缘旋流冷却结构设计^[9],冷气进口喷嘴宽度和出口通道厚度相同。表 1 给出具体的旋流腔几何参数。本文保持喷嘴的进口面积不变,通过变化 b 和 c 获得合适的喷嘴长宽比。喷嘴长宽比 C_{ar} 定义为

$$C_{ar} = b/c \tag{1}$$

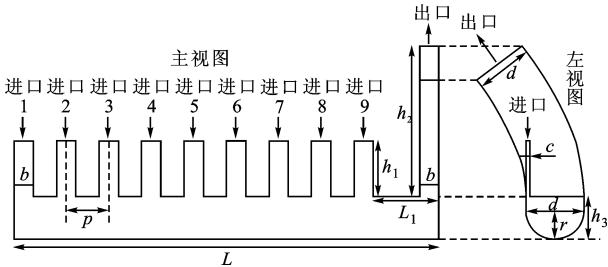


图 1 旋流腔几何模型

表 1 旋流腔几何参数 mm

参数	d	h_1	h_2	h_3	L	L_1	p	r
数值	15.0	15.0	40.6	11.5	110.0	17.0	11.0	7.5

采用 ICEM CFD 软件对旋流腔结构进行六面体结构化网格划分,图 2 给出了旋流腔结构的计算模型和网格图。网格主体采用 H 型网格剖分,叶顶和叶根区域进行 C 型网格剖分。对壁面处网格进行加密,采用标准 $k-\epsilon$ 和 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型时保证 $11 < y^+ < 30$,采用标准 $k-\omega$ 和 SST $k-\omega$ 湍流模型时保证 $y^+ < 1$ 。加密网格为 15 层,网格增长率为 1.3。本文进行了网格独立性分析,最终确定的网格节点数是 539 万。利用 ANSYS CFX 求解全三维 RANS 方程和两方程湍流模型进行数值计算,计算总体精度为二阶。计算工质采用 Ideal gas,计算边界条件如下:9 个进口给定相同速度,保证所需雷诺数,进口总温为 350 K,进口湍流强度为 5%;出口给定平均静压为 0.11 MPa;传热靶面温度为 500 K,其他壁面为绝热边界,所有壁面均保持速度无滑移。因为喷嘴进口参数能体现冷气的旋流强度,采用旋流腔喷嘴进口速度 V_j 和喷嘴进口水力直径 D_{H1} 定义雷诺数

$$Re = \rho V_j D_{H1} / \mu \tag{2}$$

式中: ρ 、 μ 为平均冷气密度和动力黏性系数。

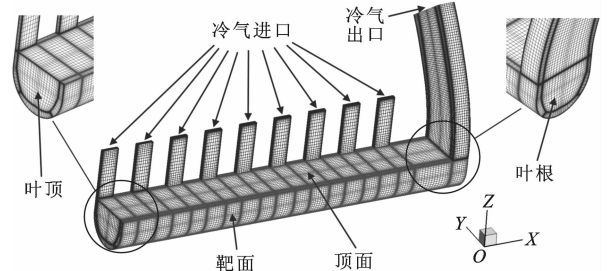


图 2 旋流腔计算模型和网格

本文采用努塞尔数 Nu 表征换热强度

$$Nu = q_w D_{12} / (T_j - T_w) \lambda \tag{3}$$

式中: q_w 为热流密度; D_{12} 为旋流腔 YZ 截面等效水力直径; T_j 为进口总温; T_w 为靶面温度; λ 为导热系数。

利用无量纲压力系数 C_{ps} 来描述冷气的静压

$$C_{ps} = \frac{P - P_{so}}{P_{tj} - P_{so}} \tag{4}$$

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

为了校核数值方法的正确性,对 Ling 等雷诺数为 7 500、10 000、12 500 的实验进行了数值计算^[7]。图 3 给出了数值计算和实验测量的平均努塞尔数随雷诺数的变化曲线。由图可见,标准 $k-\omega$ 湍流模型对于模拟旋流冷却问题具有最佳的可靠性,本文后面的研究均采用标准 $k-\omega$ 湍流模型进行计算。

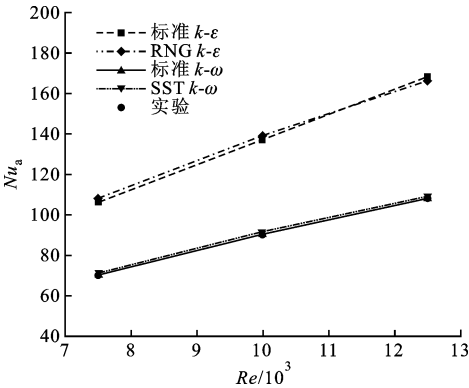


图 3 数值计算结果与实验数据对比

2 结果分析

2.1 喷嘴长宽比的影响

本节选取 0.2、0.33、1、3、5、7、9 共 7 种喷嘴长宽比来研究旋流冷却的流动和传热特性,保持雷诺数 $Re=5\ 000$ 。图 4 给出了 $C_{ar}=5$ 时 9 个喷嘴同时入射旋流腔的三维流线。为了分析方便,图 4 只给出典型的进口 1、进口 4、进口 7 入射的冷气流线。冷气以较高速度从喷嘴进口射入旋流腔中形成高速旋流。随着冷气在腔体内旋转向下游流动,旋流腔中冷气流量增大,导致周向运动逐渐衰减,轴向运动逐渐增强。进口 1 的冷气不断受到下游冷气的冲击,在运动到进口 6 附近时,周向运动衰减十分明显。进口 4 和进口 7 入射的冷气因为靠近出口,周向衰减效果较弱。喷嘴位置越靠近出口,入射冷气的流线在轴向上拉长越明显,这是由于冷气流量增大、旋流腔中冷气的轴向速度不断增大引起的。

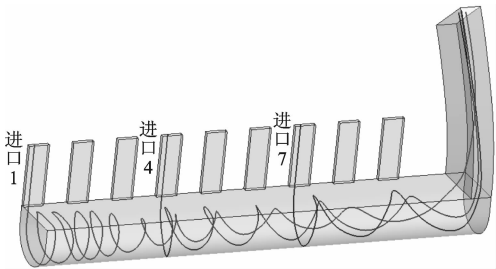


图 4 旋流腔内三维流线

图 5 给出了不同喷嘴长宽比下沿旋流腔轴向不同横截面处的流线和速度云图,4 个横截面的位置分别对应进口 1、进口 4、进口 7 和进口 9。可以看出,高速冷气从喷嘴进入腔体后速度减小,并形成大尺度漩涡。当冷气流动到不同横截面处时,旋流中心位置也在发生变化。根据气流速度的径向分量,可以将横截面流动区域分成两部分:靠近壁面处的冷气流速较高,且具有径向朝里的速度分量,称为旋流外区;靠近旋流中心的冷气流速较低,具有径向朝外的速度分量,称为旋流内区。显然,沿着冷气轴向

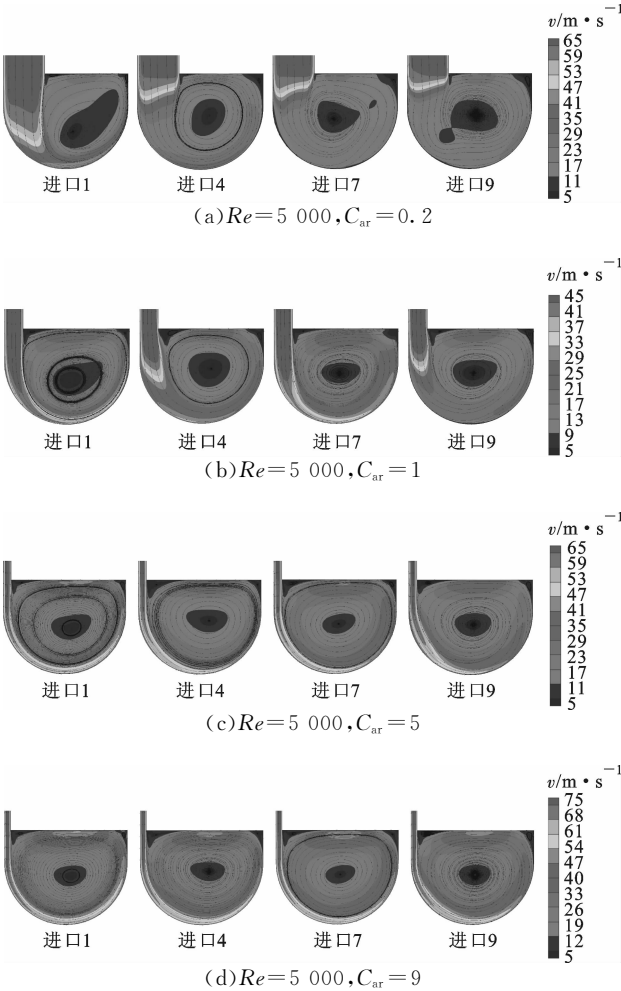


图 5 不同喷嘴长宽比的 YZ 截面流线和速度云图

流动的方向,旋流外区面积逐渐扩大,但速度量级逐渐减小,而旋流内区面积逐渐缩小。这是由于在旋流腔靠近出口的下游区域气流受到较为强烈的上游冷气横向冲击所致。随着上游冷气从多个进口进入旋流腔,轴向速度逐渐增大,对下游冷气旋流运动的冲击作用逐渐加强。

另一方面,当喷嘴长宽比 C_{ar} 从 0.2 增大到 9 时,对应横截面处的旋流外区面积和冷气速度都经历先减小后增大的变化历程。当 $C_{ar}=1$ 时,旋流外区面积和冷气速度达到最大。从喷嘴射出的高速冷气衰减距离随着喷嘴长宽比增大逐渐变长,这说明大喷嘴长宽比下冷气可以在高速状态下运动较长的距离。

图 6 给出了不同喷嘴长宽比时 XZ 平面的流线和湍流动能 k 云图。冷气在进口 1 和进口 2 附近形成一个大旋涡,在相邻两个进口对应的旋流腔底部形成小旋涡。当喷嘴长宽比 C_{ar} 增大时,旋涡尺寸逐渐减小甚至部分旋涡消失。同时,冷气湍流动能随着喷嘴长宽比 C_{ar} 的增大表现出先减小后增大的特性。

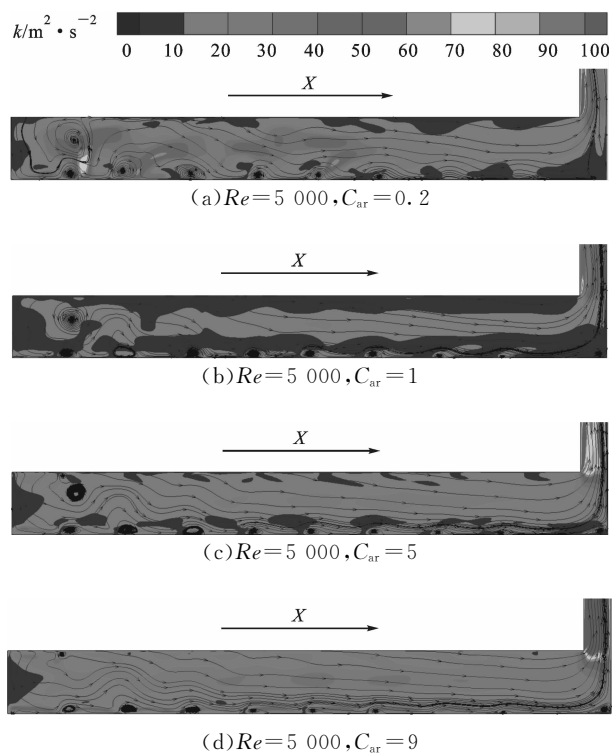


图 6 不同喷嘴长宽比的 XZ 截面流线和湍流动能云图

图 7 给出了不同喷嘴长宽比下压力系数沿轴向变化曲线。压力系数 C_{ps} 沿轴向逐渐减小,在每个进口附近压力系数出现峰值,这是由冷气从进口高速射流所致。在靠近旋流腔出口处,因为冷气出现大

角度的转折,压力系数突然降低。当喷嘴长宽比 C_{ar} 增大时,压力系数先增大后减小,在 $C_{ar}=1$ 时压力系数最大。当 $C_{ar}=0.2$ 时,进口 1 处压力系数突降。

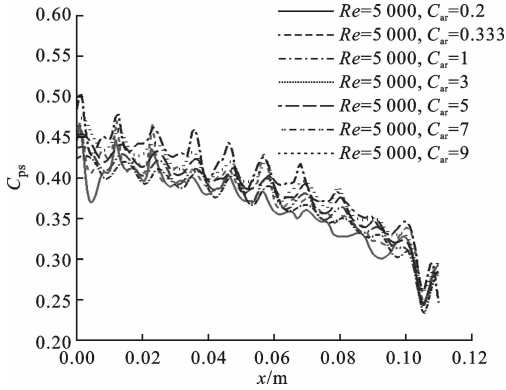


图 7 不同喷嘴长宽比的压力系数沿轴向变化曲线

不同喷嘴长宽比下的壁面 Nu 分布如图 8 所示。在靠近喷嘴进口的位置,由于冷气高速运动导致此处热边界层减薄,换热增强,出现高 Nu 区域,而当冷气运动至喷嘴进口下游,热边界层变厚导致换热强度减弱,出现喷嘴进口之间的低 Nu 区域。在喷嘴长宽比较大时, Nu 沿旋流腔周向和轴向的分布较为均匀,而在喷嘴长宽比较小时, Nu 分布的均匀性变差,但是高 Nu 区域的峰值变大。燃气透平叶片在不均匀冷却条件下容易引起明显的热应力使得叶片强度降低,因此喷嘴长宽比较大的旋流腔结构较为适用于叶片前缘冷却的设计。

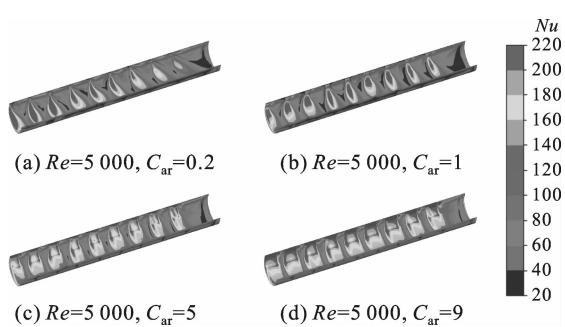


图 8 不同喷嘴长宽比时的 Nu 云图

2.2 雷诺数的影响

本节研究了雷诺数分别为 5 000、10 000、15 000、20 000 这 4 种气动工况下的旋流冷却流动和传热特性,保持喷嘴长宽比 $C_{ar}=5$ 。图 9 给出了不同雷诺数时沿轴向不同横截面处的流线和速度云图。雷诺数增大时,冷气在旋流腔横截面的流动结构、旋流外区和旋流内区的面积并不发生改变,速度量级逐渐增大。

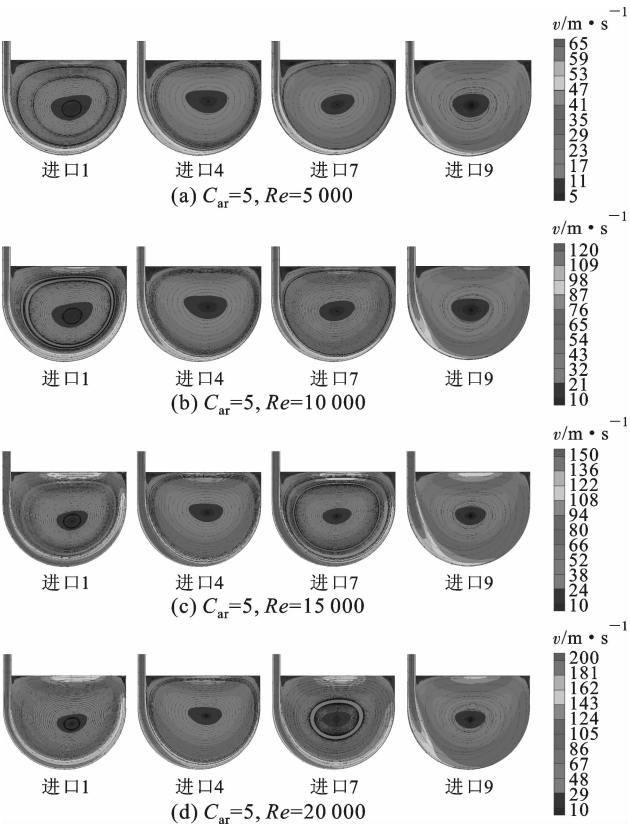


图 9 不同雷诺数的 YZ 截面流线和速度云图

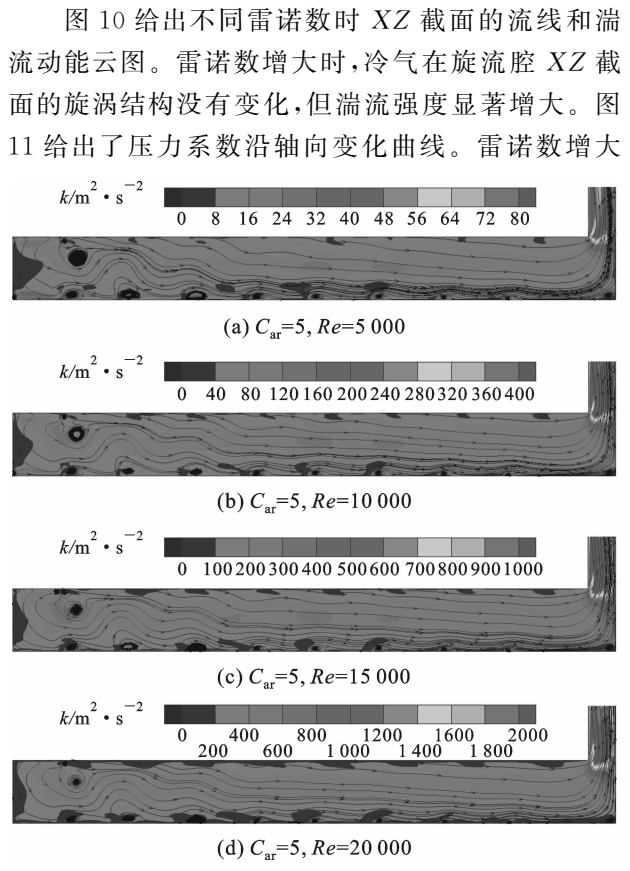


图 10 不同雷诺数的 XZ 截面流线和湍流动能云图

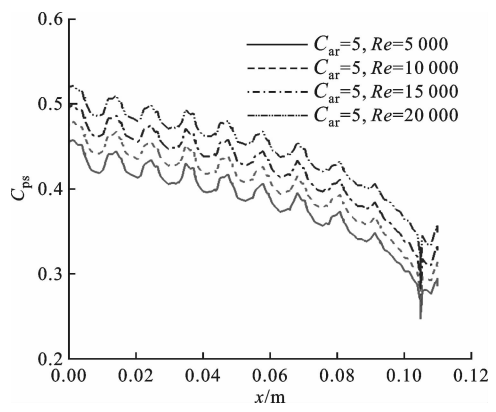


图 11 不同雷诺数的 XY 截面流线图

时,压力系数沿轴向分布规律保持一致,但数值明显增大。

图 12 给出不同雷诺数下的壁面 Nu 云图。从图中可以看到,随着雷诺数的增大, Nu 的分布规律没有变化,而数值显著增大。这是因为大雷诺数对应着大的冷气湍流动能,使得冷气的湍流程度加强,显著增强冷气的换热强度。

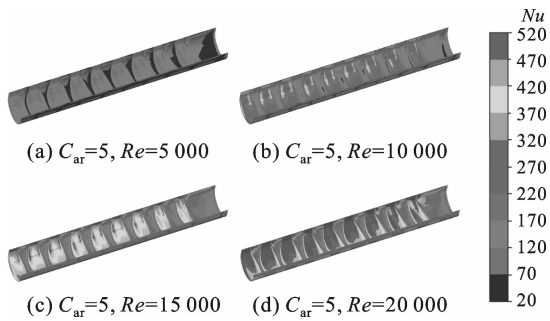


图 12 不同雷诺数的 Nu 云图

图 13 给出不同雷诺数下壁面平均 Nu 随喷嘴长宽比的变化曲线。可以看到:平均 Nu 随着雷诺数增大而显著增大;喷嘴长宽比增大时,平均 Nu 先减小然后增大;在小雷诺数下,平均 Nu 随着喷嘴长宽比的变化不明显。

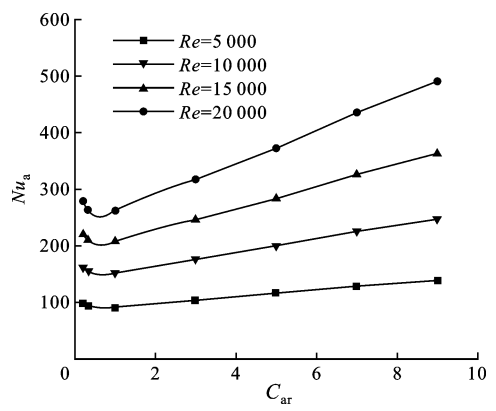


图 13 不同喷嘴长宽比和雷诺数的平均 Nu

2.3 旋流冷却传热关联式

旋流冷却传热关联式对于指导叶片冷却结构的优化设计具有重要意义。根据前文分析,平均努塞耳数 Nu_a 是喷嘴长宽比 C_{ar} 和雷诺数 Re 的函数关系式。因为 Nu_a 和 C_{ar} 不是单调变化关系,本文假设

$$Nu_a = aC_{ar}^b Re^c (C_{ar} \leq 1) \tag{5}$$

$$Nu_a = dC_{ar}^e Re^f (C_{ar} > 1) \tag{6}$$

对本文 28 个数据点进行拟合,确定的传热关联式为

$$Nu_a = 0.147\,7C_{ar}^{-0.035\,6} Re^{0.753\,6} (C_{ar} \leq 1) \tag{7}$$

$$Nu_a = 0.047\,5C_{ar}^{0.331\,6} Re^{0.852\,6} (C_{ar} > 1) \tag{8}$$

适用范围为 $0.2 \leq C_{ar} \leq 9$ 和 $5\,000 \leq Re \leq 20\,000$ 。

数值计算结果与传热关联式对比如图 14 所示。图中横坐标为数值计算结果,纵坐标为传热关联式计算结果。由图可见,传热关联式的计算误差在 10% 以内,可以准确地预测旋流冷却的传热系数。

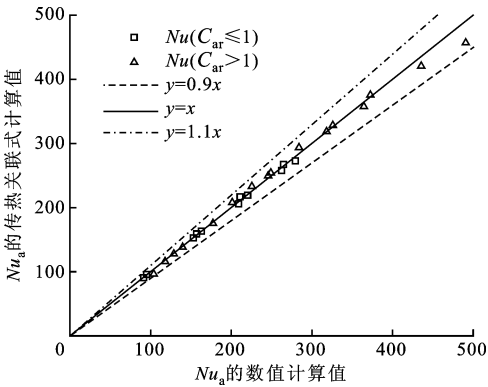


图 14 数值计算结果和传热关联式对比

3 结 论

本文建立了合理的叶片前缘旋流冷却模型,在验证网格独立性和湍流模型适用性的基础上,数值分析了喷嘴长宽比和雷诺数对旋流冷却流动和换热的影响作用,得到的主要结论如下。

(1)冷气从喷嘴进口切向射入旋流腔,形成高速旋流。根据冷气的径向速度方向,旋流腔横截面分为旋流外区和旋流内区。随着冷气沿轴向朝下游运动,周向运动衰减、轴向运动加强,旋流外区面积扩大、旋流内区面积缩减。

(2)冷气压力系数沿轴向逐渐减小,在每个进口附近出现峰值,在靠近旋流腔出口处突然降低。靠近喷嘴进口的壁面区域由于受到冷气强烈的冲刷作用,热边界层减薄, Nu 较高。在喷嘴进口之间的壁面区域,由于热边界层变厚, Nu 较低。

(3)随着喷嘴长宽比从 0.2 增大到 9,旋流外区面积、冷气速度量级和冷气湍流动能先减小后增大,而冷气压力系数则先增大后减小。喷嘴长宽比为 1 时,上述各变量达到极值。

(4)在大喷嘴长宽比时, Nu 沿旋流腔周向和轴向的分布较为均匀,而在小喷嘴长宽比时, Nu 分布的均匀性变差,高 Nu 区域的峰值变大。

(5)随着雷诺数的增大,冷气在旋流腔中的流动结构、旋流外区和旋流内区面积不变,而冷气速度量级、湍流动能和压力系数均显著增大

(6)雷诺数增大时,旋流腔壁面的 Nu 分布规律没有变化,而数值明显增大。

(7)平均 Nu 随着雷诺数的增大而显著增大,随着喷嘴长宽比的增大先减小然后增大。

(8)针对喷嘴长宽比和雷诺数,进行了旋流冷却传热关联式的拟合。与数值计算结果对比,传热关联式的计算误差在 10% 以内,能够可靠地预测旋流冷却的传热系数。

参考文献:

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

[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] HAY N, WEST P D. Heat transfer in free swirling flow in a pipe [J]. Journal of Heat Transfer, 1975, 97 (3): 411-416.

[4] LIGRANI P M, HEDLUND C R, THAMBU R, et al. Flow phenomena in swirl chambers [J]. Experiments in Fluids, 1998, 24(3): 254-264.

[5] GLEZER B, MOON H K, O'CONNELL T. A novel technique for the internal blade cooling [C]//Proceedings of the 1996 ASME Turbo Expo. New York, USA: ASME, 1996: V004T09A015.

[6] 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.

[7] 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]//Proceedings of

(下转第 143 页)