

DOI: 10.7652/xjtuxb201510012

叶片前缘旋流蒸汽冷却流动和传热的数值研究

杜长河, 李森, 李亮, 丰镇平
(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 通过求解三维 Reynolds-Averaged Navier-Stokes 方程和标准 $k-\omega$ 湍流模型,数值研究了旋流蒸汽冷却的基本原理,分析了冷气雷诺数和来流温比对流动和传热特性的影响,旨在阐明旋流蒸汽冷却的原理,总结其流动传热的变化规律。在此基础上对无量纲换热系数 Nu 、雷诺数 Re 和来流温比 φ 进行数值拟合,得到旋流蒸汽冷却的传热关联式。研究表明:冷气在旋流腔内的高速转动引起强烈的径向对流运动,使得换热增强;增大雷诺数能够增大冷气的涡量,有效提高旋流腔的换热系数,同时降低阻力系数;增大来流温比使得冷气的涡量增大密度减小,旋流腔的换热系数略有减小,阻力系数显著降低;综合换热因子随着雷诺数的增大而增大,随着来流温比的增大而减小;拟合的传热关联式与数值计算结果吻合良好,可以准确地预测蒸汽旋流冷却的换热系数。

关键词: 旋流蒸汽冷却;流动换热;阻力系数;传热关联式;数值模拟

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)10-0072-07

Numerical Study on Characteristics of Flow and Heat Transfer of Steam Vortex Cooling for Blade Leading Edges

DU Changhe, LI Sen, LI Liang, FENG Zhenping
(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The fundamental principle of steam vortex cooling is numerically investigated by means of 3-D Reynolds-averaged Navier-Stokes equations coupled with the standard $k-\omega$ turbulent model. Effects of Reynolds number and inlet to wall temperature ratio on the flow and heat transfer characteristics are analyzed to clarify the mechanism of steam vortex cooling and to summarize properties of the flow and heat transfer. The heat transfer correlation of steam vortex cooling is obtained based on numerical data. The results show that violent convective motion is caused by the high speed rotational flow of steam in the vortex chamber, and results in an enhanced heat transfer performance. When the Reynolds number is increased, the heat transfer coefficient increases while the friction factor significantly decreases because of an increase in steam vorticity. An increase in inlet to wall temperature ratio results in a slight decrease in heat transfer coefficient, an increase in steam vorticity a decrease in density, and a clear decrease in friction factor of vortex chamber. The thermal performance factor increases as the Reynolds number is increased, and decreases as the temperature ratio is increased. The heat transfer correlation can be applied to predict the heat transfer coefficient of steam vortex cooling.

Keywords: steam vortex cooling; flow and heat transfer; friction factor; heat transfer correlation; numerical simulation

随着燃气进口温度的提高,燃气透平的效率和输出功率不断提高,现代燃气透平的进口温度已经高达 $2\,000\text{ K}^{[1]}$,远远超过了金属材料的耐热极限,必须对透平叶片施加有效的冷却措施。旋流冷却是一种最新发展的叶片内冷技术,冷气通过切向入流进入旋流腔室并产生高速涡旋运动,使得热边界层减薄,冷气与叶片的换热增强。旋流蒸汽冷却已经成为叶片冷却方面的前沿课题。

科研人员针对旋流冷却的原理和影响因素进行了一系列的实验测量与数值模拟研究,旨在探索旋流冷却的流动和换热规律。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局部换热系数的分布,并得到了换热系数和旋流强度的实验关联式^[2]。Glezer 等首次提出了适用于燃气透平叶片的旋流冷却结构^[3]。Hedlund 等采用红外探测仪测量了旋流腔壁面的换热系数,研究了冷气温比和雷诺数对旋流冷却性能的影响特性^[4]。Ling 等应用热线风速仪和液态晶体测温技术实验研究了具有两个切向进口的旋流冷却腔内的流动和换热特性^[5]。Piralishvili 等研究了包含多个旋流冷却通道和前缘气膜孔的蒸汽冷却叶片的换热效果^[6]。刘高文等采用数值模拟的方法对叶片前缘旋流和常规冲击冷却的流动、换热和热均匀性进行了对比^[7]。刘钊等针对叶片前缘旋流冷却结构数值研究了雷诺数、温比和旋流腔进口高度对冷却性能的影响^[8]。徐虹艳等针对叶片尾缘设计了不同形式的旋流冷却结构并对它们的流动与换热特性进行了对比^[9]。

目前,对于旋流冷却换热特性的研究主要以空气为介质。随着燃气透平进口温度的提高,传统的空冷方法需要采用更多的气膜冷却,产生过多的气动与热力损失。同时,进入燃烧室的压缩空气减少,导致效率降低。采用热物性更好的蒸汽可以较好地克服上述问题,蒸汽的导热率和比热容大、黏性系数小,有着更优异的导热、载热与气动特性。研究指出,达到相同的冷却效果需要的蒸汽量只是空气的 $48.2\%^{[10]}$ 。目前针对蒸汽冷却的研究多集中在肋片扰流冷却^[11]、柱肋冷却^[12]和冲击冷却^[13],而对旋流冷却的关注则比较少。由于其优异的冷却效能,旋流蒸汽冷却可以应用于新一代舰船动力系统中。探索旋流蒸汽冷却的流动传热特性具有重要意义。

本文以 Ling 等实验所用的旋流腔^[5]作为简化的叶片前缘结构,采用数值模拟方法研究雷诺数和来流温比对旋流蒸汽冷却流动和传热的影响,并在

此基础上总结旋流蒸汽冷却的传热关联式,旨在阐明旋流蒸汽冷却的传热原理,总结其流动传热的变化规律,并为叶片冷却的优化设计提供参考。

1 计算模型和数值方法

图 1 给出了旋流腔结构的几何示意图。如图所示,冷气从两个进口切向进入冷却腔并在腔体内形成旋流,最后从出口流出。

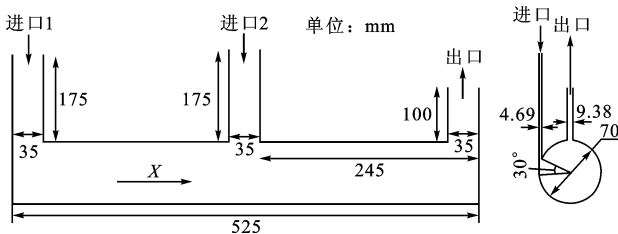


图 1 旋流腔几何模型^[5]

利用 ICEM 软件对旋流腔进行六面体网格划分,图 2 给出了旋流腔结构的计算网格。如图所示,网格主体采用 H 型网格剖分。为了提高网格质量,部分区域进行了 O 型和 Y 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 $y^+ < 1$ 。本文进行了网格无关性验证研究,最终确定的计算网格数是 326 万。研究采用蒸汽作为冷气工质,蒸汽的热力学性质采用 IAPWS-IF97 标准进行描述。计算边界条件为进口给定流量和来流总温,保证需要的雷诺数和温比,进口湍流强度为 2% ;出口给定平均静压,压力为 1 MPa ;旋流腔壁面温度为 600 K ,其他壁面为绝热边界,所有壁面均保持速度无滑移。

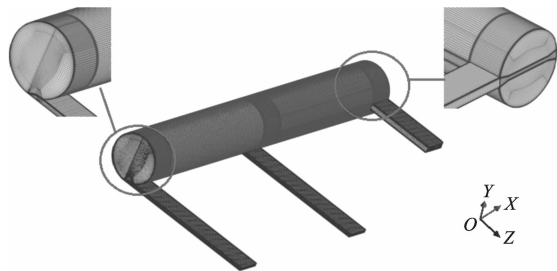
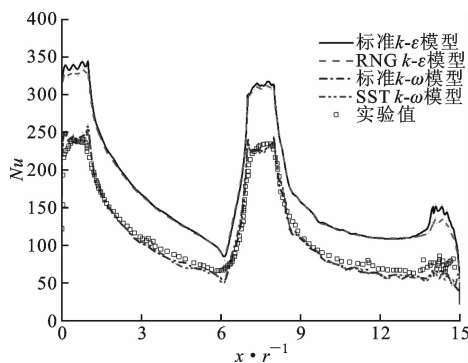


图 2 旋流腔计算网格

利用商业 CFD 软件 ANSYS CFX 求解全三维 RANS 方程和两方程湍流模型进行数值计算,计算精度为二阶。为了验证数值方法的正确性,对 Ling 等雷诺数 Re 为 $10\,000$ 的实验进行了数值计算^[5],冷却工质为空气,计算边界条件与 Ling 等的实验保持一致。图 3 给出了数值计算和实验测量的周向平

均 Nu 沿轴向分布的对比曲线。由图可见,标准 $k-\omega$ 湍流模型对于模拟旋流冷却问题的可靠性最高,本文后面的计算均采用标准 $k-\omega$ 湍流模型。



r 为旋流腔横截面半径

图3 周向平均 Nu 沿轴向分布

2 参数定义

涡量用来表征流体涡旋强弱和方向,定义沿 x 方向的涡量为 $\omega_x = \partial\omega/\partial y - \partial v/\partial z$ 。

来流温比定义为 $\varphi = T_{in}/T_w$,其中 T_{in} 为冷气进口总温, T_w 为壁面温度。

雷诺数定义为 $Re = \rho u_{in} d_1 / \mu$,其中 ρ 为平均密度, u_{in} 为冷气进口速度, d_1 为旋流腔进口水力直径, μ 为冷气的平均动力黏性系数。

努赛尔数定义为 $Nu = qD/\lambda(T_w - T_{in})$,其中 q 为热流密度, D 为旋流腔直径, λ 为冷气导热系数。

范宁摩擦系数为 $f = (P_{in} - P_{out})D/2\rho Lu_{in}^2$,其中 P_{in} 和 P_{out} 分别为进出口静压, L 为旋流腔长度。

利用光滑圆管充分发展流动的 D-B 传热关联式和 Blasius 阻力系数方程分别作为参考

$$Nu_0 = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (1)$$

$$f_0 = 0.0791Re^{-0.25} \quad (2)$$

利用综合换热因子衡量传热和阻力的综合效应,定义为 $\eta = (Nu/Nu_0)/(f/f_0)^{1/3}$ 。

3 结果分析

3.1 雷诺数的影响

本节研究了雷诺数分别为 10 000、30 000、50 000 和 70 000 时旋流冷却的流动和传热特性,来流温比保持 0.76 不变。图 4 给出了不同雷诺数下沿旋流腔轴向不同位置横截面处的涡量云图和速度矢量图。由图可见,冷气在腔体内围绕着某一中心点高速转动,形成大尺度的流动涡。从旋流中心到壁面方向,涡量呈现出先增大后减小的变化趋势。

随着轴向位置的变化,涡量和旋流中心同时在发生变化。冷气从进口射入旋流腔时速度较高,在向下游流动的过程中,冷气的速度和涡量不断衰减。雷诺数增大时,冷气在旋流腔内的流动结构并不发生改变,但是涡量显著增大。这是因为雷诺数增大引起冷气进口速度增大,冷气的旋流强度也随之变大。图 5 给出不同雷诺数下旋流腔 XY 截面的流线图,冷气形成排布规则的对涡,且对涡的尺度沿着流动方向逐渐变大。雷诺数变大时冷气整体涡系结构不变,但会压制靠近进口 1 的小涡直至其消失。

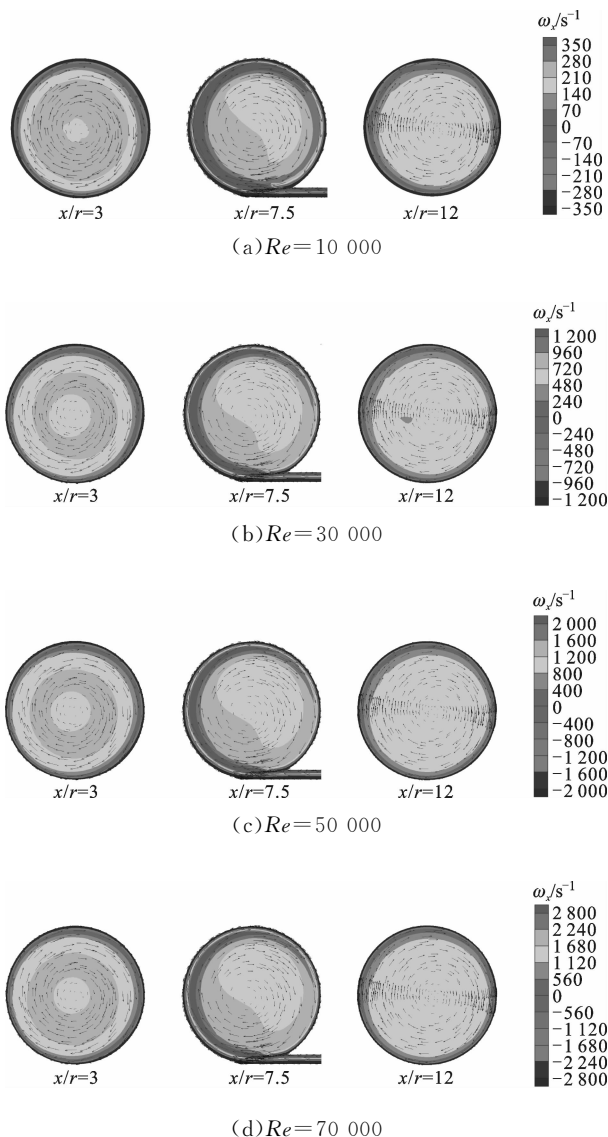


图4 不同雷诺数时的涡量云图和速度矢量图

不同雷诺数下的旋流腔壁面 Nu 分布如图 5 所示。结合图 4 可以看出, Nu 分布与冷气的涡量分布关系较为紧密。冷气从两个进口进入旋流腔时涡量较高,旋流腔壁面受到冷气强烈的冲刷作用,所以此处 Nu 呈现出两个峰值区域。冷气沿轴向继续流

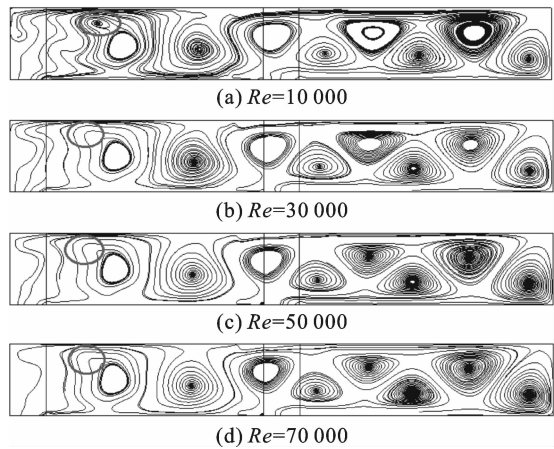


图 5 不同雷诺数时的 XY 截面流线图

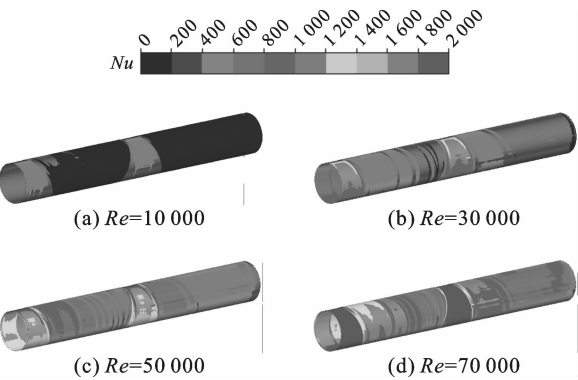


图 6 不同雷诺数时的 Nu 云图

动,速度衰减涡量减小,冷气对壁面的冲刷作用减弱,导致 Nu 沿轴向逐渐减小。雷诺数对 Nu 的影响较为明显,当雷诺数增大时,旋流腔中的涡量增大,进而导致 Nu 明显增大。

图 7 给出了对数坐标系下壁面平均 Nu 随雷诺数的变化曲线。为了方便对比,图中同时给出光滑圆管充分发展流动的 D-B 传热关联式和 Helund 等根据旋流空气冷却实验总结的传热关联式^[4]。可以看出,与光滑圆管流动相比,旋流冷却的传热效果提升显著,同时旋流蒸汽冷却的传热效果优于旋流空气冷却。这可以用冷却工质的 Pr 来解释, Pr 表示

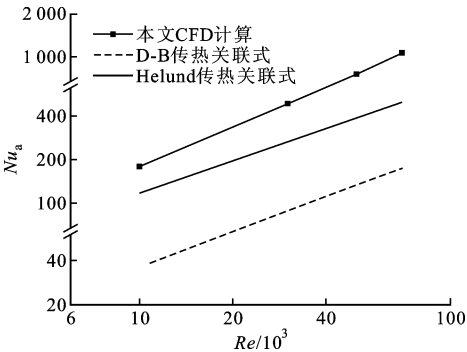


图 7 平均 Nu 随 Re 变化曲线

流动边界层和热边界层的比值。在相同的 Re 下,蒸汽的 Pr 比空气高,所以蒸汽的热边界层较薄,换热性能较好。

图 8 给出了不同来流温比下阻力系数 f 随雷诺数的变化曲线。随着冷气雷诺数的增大,阻力系数逐渐减小,但是降幅也越来越小。当雷诺数增大到 5 000 时,阻力系数已基本保持稳定,这说明随着冷气雷诺数的增大,流动逐渐进入自模化区。

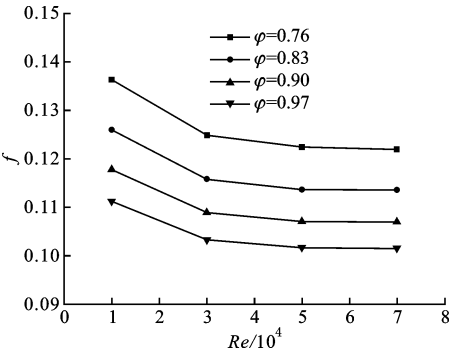


图 8 阻力系数 f 随 Re 变化曲线

3.2 来流温比的影响

本节研究来流温比分别为 0.76、0.83、0.90 和 0.97 时旋流冷却的流动和传热特性,雷诺数保持 10 000 不变。不同来流温比下沿旋流腔轴向不同位置横截面处的涡量云图和速度矢量图如图 9 所示。可以看到,当来流温比增加时,冷气在旋流腔内的流动结构基本不变,但涡量略有增加。结合图 4 可知,雷诺数对涡量的影响程度比来流温比更强。图 10 为不同来流温比时下旋流腔 XY 平面的流线图,可以看到来流温比对 XY 平面的涡系结构影响较小。

图 11 给出了不同来流温比下的旋流腔壁面 Nu 分布云图。由图可见,随着来流温比的增加,旋流腔壁面的 Nu 略有减小,这是由冷气的密度和涡量共同引起的。为了说明问题,图 12 给出旋流冷却的原理示意图和旋流腔横截面流线及温度云图。如图所示,冷气在旋流腔内高速转动并产生离心力。由于旋流腔壁面的加热作用,靠近壁面的冷气温度较高,密度较小,而远离壁面的冷气温度相对较低,密度较大,离心力在密度不均的流场中衍生出类似于自然对流现象中浮升力的离心浮升力。观察图 12b 流线方向知,对于密度大的冷流体而言,离心力的作用强于离心浮升力,因此冷流体向壁面处流动并被加热。相反,密度小的热流体向中心方向流动,这样在旋流腔内形成了强烈的对流运动,换热效果增强。另一方面,密度大的冷流体向壁面运动同时导致靠近壁面的径向压力梯度增大,热边界层减薄,

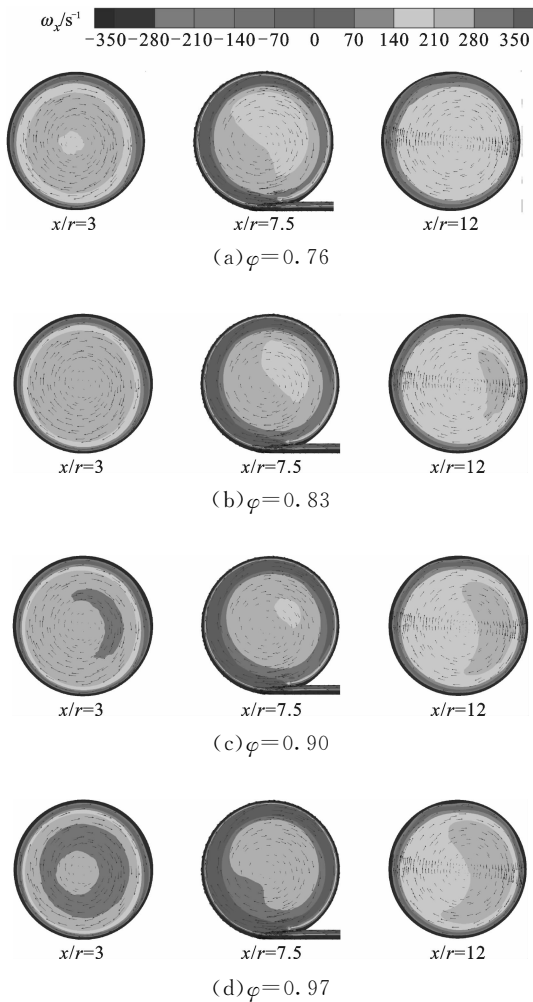


图 9 不同来流温比时的涡量云图和速度矢量图

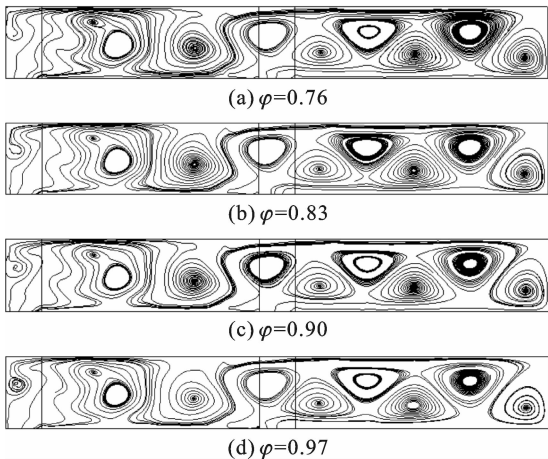


图 10 不同来流温比时的 XY 截面流线图

同样使得换热增强。因此,决定旋流冷却的关键因素是旋流腔内冷热流体的对流作用。当来流温比增大时,冷气的涡量增大、密度变小。前者使离心力增大,后者则使之减小,本文研究中它们的综合作用是离心力变小,旋流腔内冷热流体的对流作用变弱,所以来流温比增大使得旋流冷却换热效果减弱。

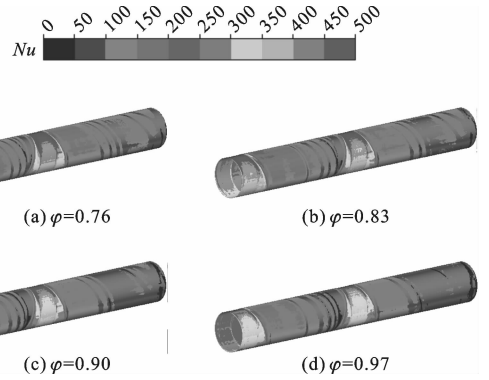


图 11 不同来流温比时的 Nu 云图

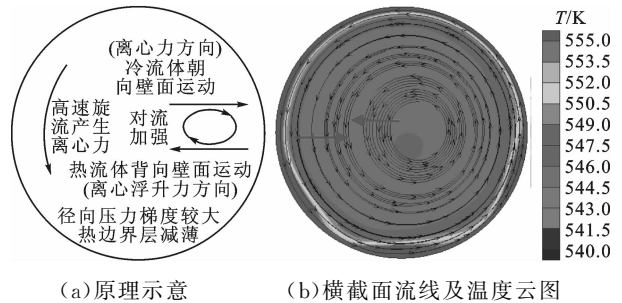


图 12 旋流冷却原理图

图 13 给出了不同雷诺数下阻力系数 f 随来流温比的变化曲线,可以看到随着来流温比的增大,阻力系数逐渐减小,且降幅逐渐平缓。与计算结果相比,Blasius 等经典阻力系数方程中阻力系数只涉及雷诺数,这说明经典的阻力系数方程对阻力系数的估计准确度欠佳。

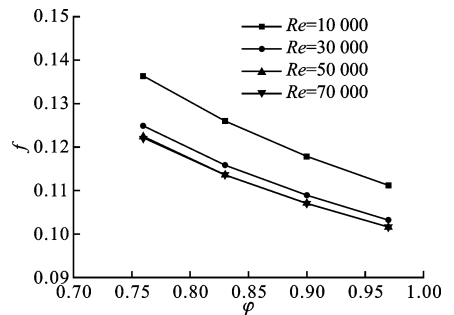


图 13 摩擦系数 f 随来流温比 φ 变化曲线

3.3 综合换热因子和旋流冷却传热关联式

图 14 给出不同来流温比下综合换热因子随雷诺数的变化曲线。如图所示,综合换热因子随雷诺数的增大而增大,随来流温比的增大而减小。本文研究工况范围内, $Re=70\,000$ 和 $\varphi=0.76$ 工况点的综合换热因子最高。

旋流蒸汽冷却的传热关联式对于指导叶片冷却设计具有重要意义。根据前文分析,平均努赛尔数 Nu_n 是雷诺数 Re 和来流温比 φ 的函数,本文假设

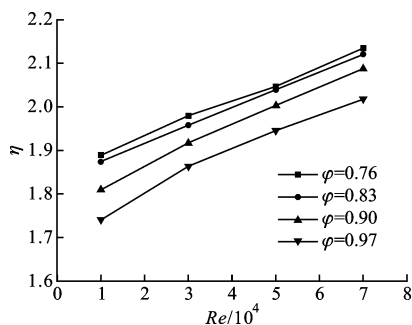


图 14 综合换热因子随雷诺数和来流温比变化曲线

$$Nu_a = aRe^b\varphi^c \quad (3)$$

对 16 个数据点进行拟合,得到的传热关联式为

$$Nu_a = 0.03032Re^{0.91622}\varphi^{-0.86085} \quad (4)$$

适用范围为 $10^4 \leq Re \leq 9 \times 10^4$, $0.76 \leq \varphi \leq 0.97$ 。

图 15 给出了对数坐标系下本文数值计算结果和拟合传热关联式结果对比图。由图可见,传热关联式曲线与数值计算点吻合良好,利用得到的传热关联式可以可靠地预测旋流蒸汽冷却的换热系数。

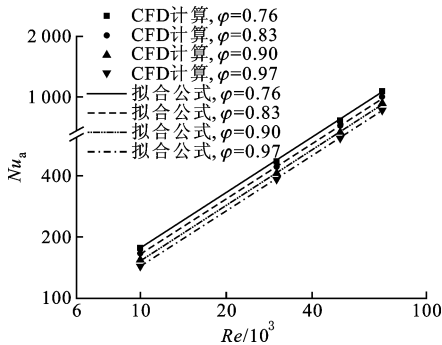


图 15 本文数值计算结果和传热关联式对比

4 结 论

本文采用求解三维 RANS 方程和标准 $k-\omega$ 湍流模型的方法,数值研究了旋流蒸汽冷却的基本原理,分析了冷气雷诺数和来流温比对旋流蒸汽冷却流动换热和阻力特性的影响,在所研究的雷诺数和来流温比范围内可以得到以下结论:

(1)冷气在旋流腔中高速转动引起离心力作用,形成大尺度旋涡,导致冷气产生强烈的径向对流运动,使得换热增强。随着冷气沿轴向朝下游运动,因为速度和涡量的衰减, Nu 逐渐减小。

(2)随着雷诺数的增大,冷气在旋流腔内的流动结构不发生改变,涡量随之增大,导致 Nu 显著增大,同时旋流腔的阻力系数随着雷诺数的增大而减小,当雷诺数增大到一定程度后,流动进入自模化区。这说明,在合理的流量范围内,增大冷气的雷诺

数对强化换热和减小阻力特性都是有利的。

(3)随着来流温比的增大,冷气在旋流腔内的流动结构基本不发生改变,冷气的涡量增大,密度减小。涡量和密度的综合影响使得冷气的对流作用减弱, Nu 略有降低。旋流腔的阻力系数随着雷诺数的增大而减小,降幅略有减小。

(4)综合换热因子随着雷诺数的增大而增大,随着来流温比的增大而减小。这说明,综合考虑旋流冷却的换热和阻力性能,增大雷诺数和减小来流温比都能实现对综合性能的提升。

(5)对旋流蒸汽冷却的传热关联式进行拟合并与数值计算结果进行对比,结果表明拟合的传热关联式和数值计算结果吻合良好,可以可靠地预测旋流蒸汽冷却的换热系数。

参考文献:

- [1] LIAO Gaoliang, WANG Xinjun, LI Jun, et al. A numerical comparison of thermal performance of in-line pin-fins in a wedge duct with three kinds of coolant [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 77: 1033-1042.
- [2] HAY N, WEST P D. Heat transfer in free swirling flow in a pipe [J]. Journal of Heat Transfer, 1975, 97 (3): 411-416.
- [3] GLEZER B, MOON H K, O'CONNELL T. A novel technique for the internal blade cooling [C]//Proceedings of the ASME 1996 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. New York, USA: ASME, 2013; V004T09A015.
- [4] 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.
- [5] 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 the ASME 2006 Turbine Technical Conference on Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2006: 325-340.
- [6] PIRALISHVILI S A, VERETENNIKOV S V, KHASANOV S M, et al. Development of a cyclone-vortex nozzle vane and design efficiency of its convective-film cooling by steam [J]. Thermal Engineering, 2010, 57(5): 433-440.
- [7] 刘高文, 薛彪, 彭力, 等. 叶片前缘旋流和常规冲击

- 对比数值研究 [J]. 推进技术, 2011, 32(4): 576-580.
- LIU Gaowen, XUE Biao, PENG Li, et al. Numerical investigation of difference between blade leading edge vortex and normal impingement cooling [J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(4): 576-580.
- [8] LIU Zhao, LI Jun, FENG Zhenping. 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] // Proceedings of the ASME 2013 Turbine Technical Conference and Exposition on Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2013: V03AT12A029.
- [9] 徐虹艳, 张靖周, 谭晓茗. 涡轮叶片尾缘内冷通道旋流冷却特性 [J]. 航空动力学报, 2014, 29(1): 59-66.
- XU Hongyan, ZHANG Jingzhou, TAN Xiaoming. Vortex cooling performance in internal cooling channel of turbine blade trailing edge [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(1): 59-66.
- [10] XU Liang, WANG Wei, GAO Tieyu, et al. Experimental study on cooling performance of a steam-cooled turbine blade with five internal cooling smooth channels [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 58: 180-187.
- [11] SHUI Linqi, GAO Jianmin, XU Liang, et al. Numerical investigation of heat transfer and flow characteristics in a steam-cooled square ribbed duct [C] // Proceeding of the 2010 ASME Turbine Technical Conference and Exposition on Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2010: 163-171.
- [12] LIAO Gaoliang, WANG Xinjun, LI Jun, et al. A numerical comparison of thermal performance of in-line pin-fins in a wedge duct with three kinds of coolant [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 77: 1033-1042.
- [13] WANG Ting, GADDIS J L, LI Xianchang. Mist/steam heat transfer of multiple rows of impinging jets [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(25/26): 5179-5191.

(编辑 武红江 苗凌)

(上接第 71 页)

- [5] LI Chao, SHANG Anna. Research on second-order RC circuit model of Ni-MH battery for EV [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2011, 35(2): 195-197.
- [6] FANG Yuanqi, CHENG Ximing, YIN Yilin. SOC estimation of lithium-ion battery packs based on Thevenin model [J]. Mechanical Engineering, Industrial Electronics and Informatization, 2013, 299: 211-215.
- [7] GAO Wengen, JIANG Ming, HOU Youming. Research on PNGV model parameter identification of LiFePO_4 Li-ion battery based on FMRLS [C] // Proceedings of the 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 2294-2297.
- [8] 林成涛, 仇斌, 陈全世. 电动汽车电池非线性等效电路模型的研究 [J]. 汽车工程, 2006, 28(1): 38-42.
- LIN Chengtao, QIU Bin, CHEN Quanshi. A study on nonlinear equivalent circuit model for battery of electric vehicle [J]. Automotive Engineering, 2006, 28(1): 38-42.
- [9] 王军平, 曹秉刚, 陈全世. 基于自适应滤波的电动汽车动力电池荷电状态估计方法 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 76-79.
- WANG Junping, CAO Binggang, CHEN Quanshi. Self-adaptive filtering based state of charge estimation method for electric vehicle battery [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(5): 76-79.
- [10] PLETT G L. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: part 3 state and parameter estimation [J]. Journal of Power Sources, 2004, 134(2): 277-292.
- [11] 戴海峰, 魏学哲, 孙泽昌. 基于等效电路的内阻自适应锂离子电池模型 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(1): 98-102.
- DAI Haifeng, WEI Xuezhe, SUN Zechang. An inner resistance adaptive model based on equivalent circuit of lithium-ion batteries [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2010, 38(1): 98-102.
- [12] KIM I S. A technique for estimating the state of health of lithium batteries through a dual sliding mode observer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(4): 1013-1022.
- [13] XU Jun, MIC C, CAO Binggang, et al. A new method to estimate the state of charge of lithium-ion batteries based on the battery impedance model [J]. Journal of Power Sources, 2013, 233(4): 277-284.
- [14] CHIANG Y H, SEAN W Y, KE J C. Online estimation of internal resistance and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 3921-3932.

(编辑 武红江)