

DOI: 10.7652/xjtuxb201709005

蒸汽冷却厚壁通道传热性能的耦合传热研究

席雷, 徐亮, 高建民, 赵振, 王明森

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 基于厚壁带肋通道蒸汽冷却实验数据, 发展了含有内热源项的耦合传热计算方法, 研究了雷诺数、热流密度和湍流度对厚壁矩形带肋通道内蒸汽流动及传热特性的影响, 同时对比了耦合传热方法和只计算流体域方法之间的差异, 并在此基础上对努塞尔数与雷诺数、热流密度和湍流度之间进行数值拟合, 得到了厚壁带肋通道的传热关联式。研究表明: 含有内热源项的耦合传热计算模型可以准确地模拟厚壁带肋通道内蒸汽的流动与传热特性, 只计算流体域模型对传热系数的预测较耦合传热模型低10%; 热流密度对厚壁带肋通道蒸汽摩擦和传热特性的影响较小, 高热流密度使得壁面传热效果变差; 雷诺数从10 000~90 000变化时, 平均传热系数和综合传热因子分别提高了76%和63%, 而湍流度从3%~15%变化时, 平均传热系数提高了大约24%, 综合传热因子提高了19.8%。该研究可为未来重型燃机叶片冷却结构设计提供参考。

关键词: 带肋通道; 蒸汽冷却; 传热性能; 耦合传热

中图分类号: TK47 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)09-0032-07

Conjugate Calculation of Heat Transfer Performance of a Steam Cooled Thick-Wall Ribbed Channel

XI Lei, XU Liang, GAO Jianmin, ZHAO Zhen, WANG Mingsen

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the experimental data of a steam cooled thick-wall ribbed channel, a conjugate calculation model was established to investigate the influences of Re , heat flux and turbulence intensity on the flow and heat transfer performance of the thick-wall ribbed channel. The difference between the conjugate calculation model and the general iso-heat-flux model was also analyzed. Then the relationship of Nu with Re , heat flux and turbulence intensity was deduced and developed. The results indicate that the conjugate calculation model is able to accurately predict the flow and heat transfer characteristics of the thick-wall ribbed channel, and the local heat transfer coefficients predicted by the general iso-heat-flux model are about 10% lower than that of the conjugate calculation method. Heat transfer performance of the steam-cooled ribbed channel with 3D heat conduction effect decreases with the increasing wall heat flux. The heat transfer coefficients and the thermal enhancement factors of the thick-wall ribbed channel heighten by 76% and 63% respectively as Re varies from 10 000 to 90 000, and increase by 24% and 19.8% respectively as the turbulence intensity varies from 3% to 15%.

Keywords: ribbed channel; steam cooling; heat transfer performance; conjugate heat transfer

收稿日期: 2017-03-11。 作者简介: 席雷(1990—),男,博士生;徐亮(通信作者),男,副教授。 基金项目: 陕西省青年自然科学基金资助项目(2015JQ5126);国家自然科学基金资助项目(51106124)。

网络出版时间: 2017-07-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170710.1713.008.html>

现代燃气透平的进口温度已经高达 2 000 K^[1],远远超过了金属材料的耐热极限,必须对涡轮叶片施加有效的冷却措施。

肋片扰流冷却是应用最广的涡轮叶片内部冷却方式之一^[2]。Han 等通过实验研究了不同工况参数对带肋通道内空气流动和传热的影响,并得出了传热粗糙度和摩擦粗糙度的实验关联式^[3-4]。Cukurel 等实验研究指出,忽视热边界条件的依赖性及边界层的热过程,将在预测传热时产生很大的错误^[5]。Nakla 等数值研究指出,热流密度对平均努塞尔数的影响较小^[6]。

上述研究都是针对以空气为冷却工质的薄壁带肋通道冷却进行的,而针对厚壁带肋通道的实验研究非常匮乏,数值研究也很少。Agostini 等指出,当前最常用的只计算流体域、等热流密度边界的数值方法并没有考虑壁面的耦合传热效应,不能反映实际金属叶片中的传热现象^[7-8]。迟重然等指出,带肋通道具有明显的耦合传热效应^[9]。Hsieh 等指出,耦合传热方法对带肋通道壁面平均努塞尔数的预测更准确^[10]。Coletti 等研究表明,只计算流体域方法得到的壁面努塞尔数较耦合传热计算结果低 25%^[11]。

本课题组针对厚壁矩形带肋通道内蒸汽流动及传热特性进行了实验和数值研究^[12-14]。本文在厚壁带肋通道蒸汽冷却实验研究的基础上,发展了含有内热源项的耦合传热计算方法,研究了雷诺数、热流密度和湍流度对厚壁矩形带肋通道内蒸汽流动及传热特性的影响,同时对比了耦合传热模型和只计算流体域模型之间的差异,并在此基础上对努塞尔数与雷诺数、热流密度和湍流度之间进行数值拟合,得到了厚壁带肋通道的传热关联式,以为未来重型燃机涡轮叶片蒸汽冷却结构的设计提供参考。

1 实验装置

1.1 实验系统

本文研究对象为模化某重型燃机第一级导叶内冷通道的单元带肋通道,结构如图 1 所示。实验段由厚度为 3 mm 的 304 不锈钢板材铣削加工后焊接而成,同时在通道宽度方向上的 2 个壁面焊接同样材质的扰流肋片,具体的结构参数如下:横截面宽乘高 $W \times H$ 为 80 mm × 40 mm,当量直径 D 为 53.33 mm,肋片高度 e 为 2.5 mm,肋间距与肋高之比 d/e 为 10,肋角度 α 为 90°。

实验系统如图 2 所示,主要包括蒸汽发生器、整流器、实验段、加热器、控制系统和数据采集系统。

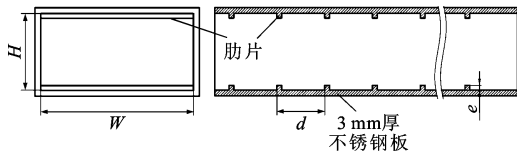


图1 实验件结构示意图

蒸汽发生器可提供温度范围为 100~200 °C、压力范围为 0.1~0.6 MPa、最大流量为 600 kg/h 的冷却蒸汽。实验段两端与短路加热器的电极直接连接,采用低电压、大电流的方式将通道加热到 200~400 °C。在实验段及其相邻管道的外面包裹厚度约为 50 mm 的硅酸铝保温层,以减少实验时的热损失。实验中的温度、压力和流量分别由精度为 ±0.5 °C 的 E 型热电偶、精度为 ±0.075% 的压力变送器和精度为 ±2% 的流量计测得。

1.2 数据处理

本研究中雷诺数

$$Re = \rho u_{in} D / \mu \quad (1)$$

式中: ρ 为冷气参考温度下的密度; u_{in} 为通道进口处冷气的平均速度,由流量计测得的质量流量经计算得出。

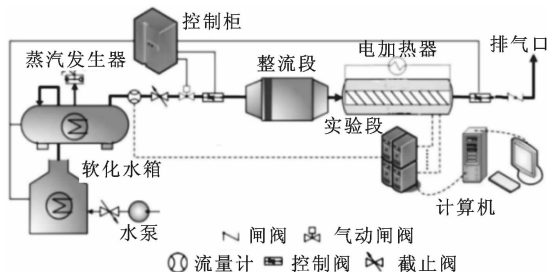


图2 带肋通道实验系统图

根据电加热器的加热功率和实验系统的热损失可计算出实验段内壁面平均热流密度

$$q = (UI - Q_{loss}) / A \quad (2)$$

式中: U 为短路电加热器电压; I 为加热器电流; A 为带肋通道内壁面总面积; Q_{loss} 为散热损失。

实验段采用的短路电加热方式,可视为均匀发热的大电阻,其单位体积发热量由下式计算得出

$$Q = (UI - Q_{loss}) / V \quad (3)$$

式中: V 为实验段总体积。

实验中直接测量得到的是通道外壁面的温度,内壁面的当地温度可以根据外壁面的温度值、通过下式计算得出近似值

$$T_w = T_{wo} - \frac{Q_0^2}{2\lambda_s} \quad (4)$$

式中: T_{wo} 为外壁面温度; Q 为内热源单位体积的发

热量; δ 为实验段壁厚; λ_s 为 304 不锈钢的导热系数。

厚壁矩形带肋通道内壁面当地努塞尔数

$$Nu = qD / [(T_w - T_f)\lambda] \quad (5)$$

式中: T_f 为根据蒸汽进出口温度经线性插值计算得到的当地温度; λ 为当地的蒸汽导热系数。

通道的摩擦系数

$$f = \Delta p D / (2\rho \Delta L u_m^2) \quad (6)$$

式中: Δp 为两测点间的压力差; ΔL 为两测点间的长度。

光滑圆管的壁面努塞尔数 Nu_0 和摩擦系数 f_0 分别为

$$Nu_0 = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (7)$$

$$f_0 = (1.58 \ln Re - 3.28)^{-2} \quad (8)$$

因此,用于评价带肋通道综合传热性能的综合传热因子

$$F = (Nu / Nu_0) / (f / f_0)^{1/3} \quad (9)$$

2 数值方法

2.1 计算模型

由于实验段采用的短路电加热方式可视为均匀发热的大电阻,所以可以此建立含有内热源项的耦合传热计算模型,计算域含有流体域和固体域,如图 3 所示。为与大部分文献所使用的计算模型进行对比,本文还建立了壁面给定等热流密度的只计算流体域模型,如图 4 所示。

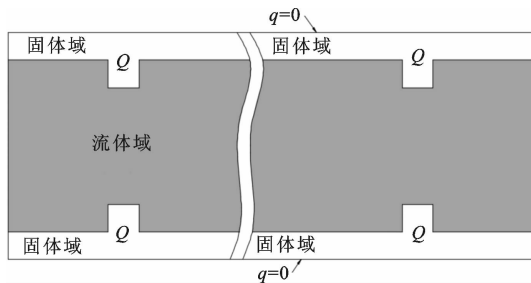


图3 耦合传热模型

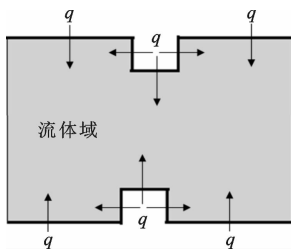


图4 只计算流体域模型

对于只计算流体域模型,采用基于有限元的有限差分法来离散控制方程,通过全隐式耦合多重网格、应用 ANSYS CFX 软件求解三维可压缩的雷诺

时均 N-S 方程,采用标准 $k-\epsilon$ 、SSG 和 SST $k-\omega$ 转捩湍流模型计算通道的流场。方程中的扩散项、源项和对流项的离散使用高精度离散格式,整体残差收敛到 10^{-6} 。流体域为蒸汽,蒸汽热物性参数采用标准 IAPWS-IF97 数据,再根据当地的蒸汽压力和温度进行插值计算。

对于耦合传热模型,其流体域的计算方法与只计算流体域模型的相同,固体域视为各向同性的均质内热源固体,只求解含有内热源项的能量方程

$$\frac{\partial(\rho_s c_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q \quad (10)$$

式中: ρ_s 、 c_p 、 λ_s 分别为 304 不锈钢的密度、比定压热容、导热系数。依据 ASTM 标准,304 不锈钢的密度为 $7\,930 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,比定压热容为 $0.502 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

考虑到温度对 304 不锈钢导热系数的影响,则导热系数

$$\lambda_s = 0.009\,471T + 14.061\,4 \quad (11)$$

2.2 网格及边界条件

计算模型的流体域和固体域均采用结构化网格,流体域近壁面附近采用网格加密技术,第一层网格至壁面的距离为 0.001 mm ,网格增长率为 1.2,这样壁面的 $y^+ < 1$ 。固体域采用与流体域相同的网格划分方式,以保证流、固交界面上的网格节点一一对应,避免网格节点不匹配带来热通量传输误差。经过网格无关性验证,得到流体域和固体域的总网格数为 230 万,计算时的带肋壁面努塞尔数的变化在 2% 以内,因此本文采用的总网格数为 230 万。图 5 为 90° 厚壁带肋通道流体域和固体域的网格示意图。

基于实验数据设置边界条件:流体域进口设置总压和温度,出口给定流量。对于只计算流体域模型,流体域壁面给定等热流密度;对于耦合传热模

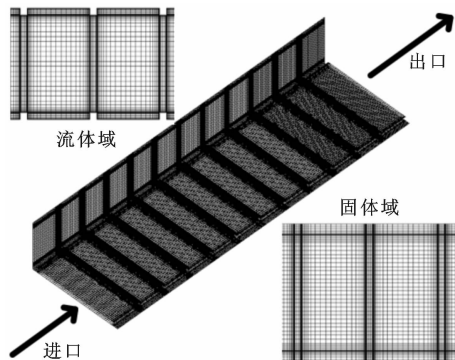


图5 90° 厚壁带肋通道流体域和固体域网格示意

型,将固体域与流体域对应壁面设置为耦合面,通道固体外壁面为绝热壁面,并在固体域内部设置等体热流密度的内热源项,计算时固体域和流体域通过该耦合面传递等量的热量。

值得注意的是,在数值计算 Nu 时, q 和 λ 分别取通道内壁面处当地热流密度和当地蒸汽导热系数, T_w 为当地内壁面温度,其他数据与实验数据处理方式相同。

3 实验与数值结果对比

3.1 外壁面温度对比

本文开展了 5 组工况(工况 1~工况 5)的厚壁带肋通道蒸汽冷却基础实验,具体测试工况见表 1,表中 p_0 为通道进口总压, T 为通道进口温度, $P=UI$ 为加热功率。

表 1 厚壁带肋通道蒸汽冷却的测试工况

工况	Re	p_0/kPa	T/K	P/W
1	10 455	296.90	442.96	288.86
2	19 157	300.21	446.66	706.19
3	29 805	299.43	448.17	1 207.49
4	40 246	299.15	448.98	1 866.48
5	49 635	298.38	451.19	2 293.32

图 6 为工况 3 在不同湍流模型下通道带肋外壁面温度耦合传热模型计算结果。由图 6 可知,受进口效应的作用,气流在进口下游存在一个附着区,附着区边界层较厚,与壁面传热能力较差,随着气流继续向下游流动,气流温度不断上升,通道外壁面温度沿流向逐渐上升。在所使用的湍流模型中, $k-\epsilon$ 、SSG 模型没有捕捉到气流的附着区,而 SST $k-\omega$ 模型能模拟出气流进口附近的附着区,即气流附着区的 $x/D=0.5$ 处外壁面温度存在一个峰值。在

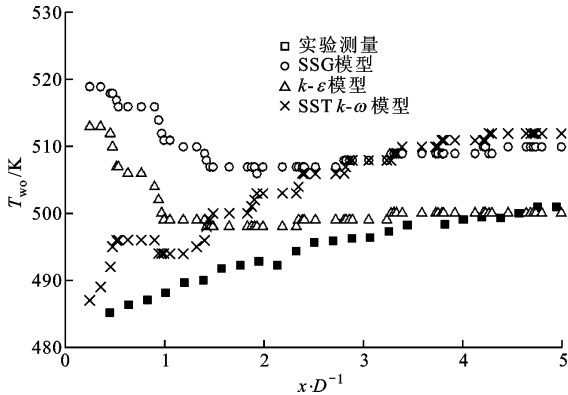


图 6 工况 3 下带肋侧外壁面温度耦合传热模型计算结果

$x/D=0.5$ 处并没有测得峰值温度,这是由于焊接时在 $0\leq x/D\leq 0.5$ 处的不锈钢法兰使得这个区域的局部高温均匀化。图 7 为其他工况下耦合传热模型计算获得的通道外壁面温度与实验测量值对比,计算时湍流模型均为 SST $k-\omega$ 模型。由图 6 和图 7 可知, SST $k-\omega$ 模型的计算结果与实验结果吻合良好,误差在 5% 以内,即采用 SST $k-\omega$ 模型可以较为准确地模拟带肋通道中的流动和传热情况。因此,本文后续内容皆采用 SST $k-\omega$ 模型进行计算。

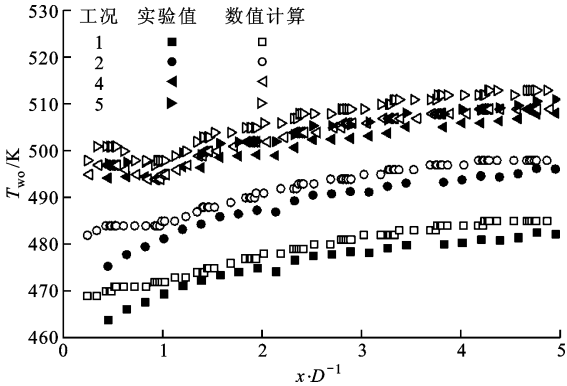


图 7 其他工况下外壁面温度实验和数值计算对比

从图 7 还可以看出,通道壁面温度沿主流方向逐渐升高。这是因为冷却蒸汽在流过通道时不断地被加热,使得温度提升、冷却性能下降。又因实验只能测量通道外壁面的温度,加之 304 不锈钢的导热系数很大,通道壁面较厚,带肋内壁面温度在传递到外壁面时已经被均匀化,使得通道带肋壁面的肋片处没有出现温度的极低值,温度沿主流流向的分布比较平缓,没有出现周期性的波动。

3.2 内壁面温度对比

图 8 为工况 3 下厚壁通道带肋内壁面中心线上温度沿流向的分布。从图 8 可以看出,耦合传热模型准确地预测到了内壁面温度沿流向的变化,且预

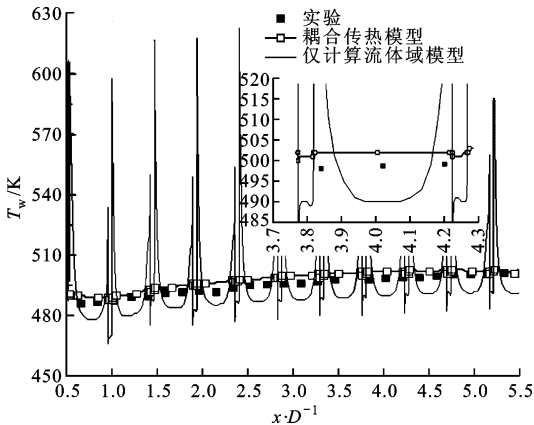


图 8 工况 3 下内壁面温度沿流向的分布

测值与实验结果很吻合。只计算流体域模型预测所得通道内壁面温度沿流向呈凹形周期分布,预测值在实验值上下浮动,即肋片之间区域以及肋片靠近来流侧的预测值较实验值偏低,而肋片靠近出口侧的温度预测值较实验值偏高。这是因为耦合传热模型中固体域导热系数较大,肋片及肋片之间的高温和低温区温度被均匀化的缘故。

3.3 努塞尔数对比

图 9 为工况 3 下耦合传热模型计算获得的通道内壁面 2 个肋片之间热流密度的分布。从图 9 可以看出,通道内壁面上热流密度呈周期性拱形分布,并不是一个恒定的值。这表明通过只计算流体域且外壁面采用等热流密度的方式,来模拟具有三维导热效应的厚壁带肋通道并不合理,也说明了通过平均热流密度计算获得的通道壁面努塞尔数不够准确。

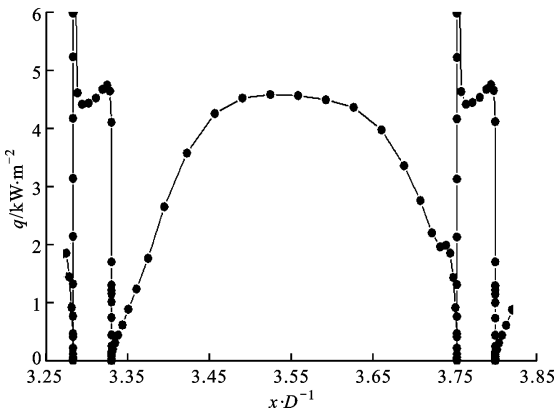


图 9 工况 3 下内壁面 2 个肋片之间热流密度的分布

图 10 对比了工况 3 下内壁面 Nu 的实验值和计算值。由图 10 可知,受带肋通道的进口效应和蒸汽在肋片间的分离和再附着的影响,2 种计算模型预测的内壁面 Nu 沿流向均呈现出周期性拱形分布,只计算流体域模型的预测结果较耦合传热模型

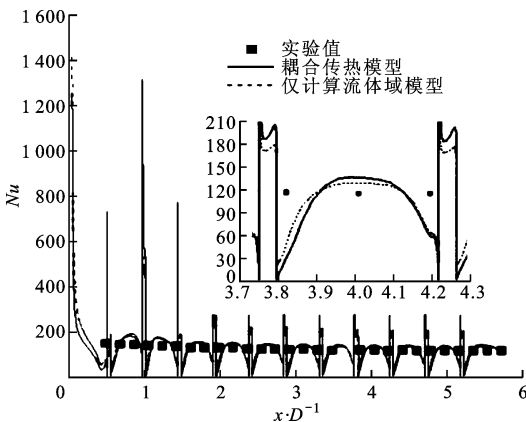


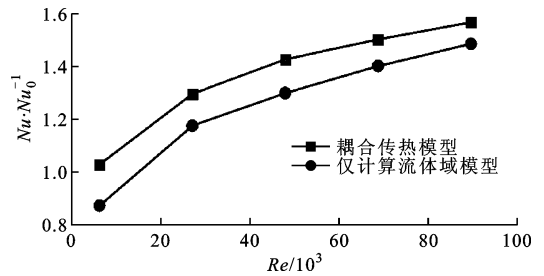
图 10 工况 3 下内壁面努塞尔数沿流向的分布

偏低。 Nu 实验值沿流向的变化趋势比较平缓,没有体现出拱形分布。这可能是热电偶布置不足,以及实验数据处理时通道内壁面当地温度和当地热通量无法准确获得造成的。从图 10 还可以看出,通道壁面中心线上 Nu 沿流动方向缓慢减小。这是蒸汽在带肋通道内逐渐被加热,其温度有所升高、 Pr 稍有减小,进而冷却效果减弱造成的。

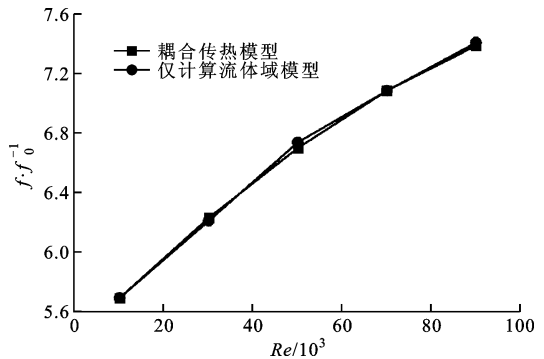
4 数值结果分析

4.1 雷诺数的影响

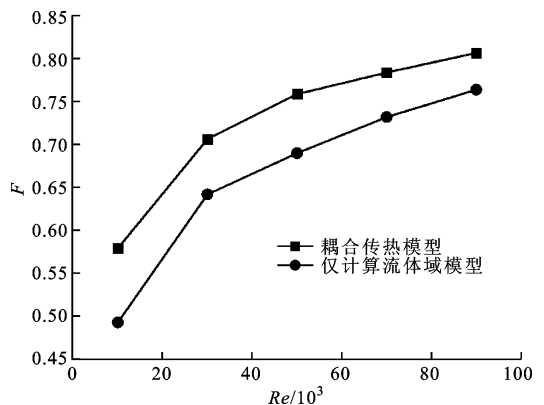
图 11 为雷诺数为 10 000~90 000 时通道摩擦系数比、壁面平均努塞尔数比以及综合传热因子的变化。计算中蒸汽进口压力为 299.43 kPa,进口温



(a) 平均努塞尔数比



(b) 摩擦系数比



(c) 综合传热因子

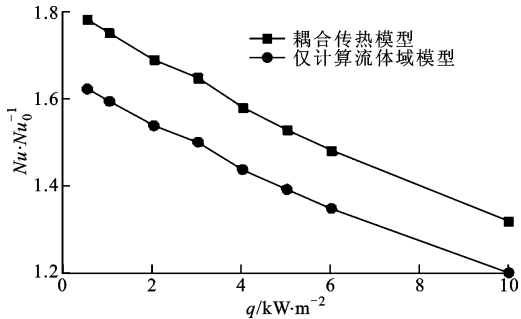
图 11 雷诺数对通道内蒸汽流动和传热性能的影响

度为 448.17 K,进口湍流度为 5%,通道的加热功率为 1 207.49 W。从图 11 可以看出:2 种计算模型所预测的通道壁面平均努塞尔数比随雷诺数的变化趋势基本相同,只计算流体域的预测结果偏小,而通道壁面传热系数随雷诺数的增大而增大,但传热增强效果在减弱,这是随着雷诺数的增大,通道结构参数等增强传热的比例增大所致;2 种计算模型所预测的通道摩擦系数比随雷诺数的变化趋势基本一致,且随着雷诺数的增大而增大;雷诺数较小时,蒸汽综合传热因子提升迅速,随着雷诺数的增大,提升速度放缓。

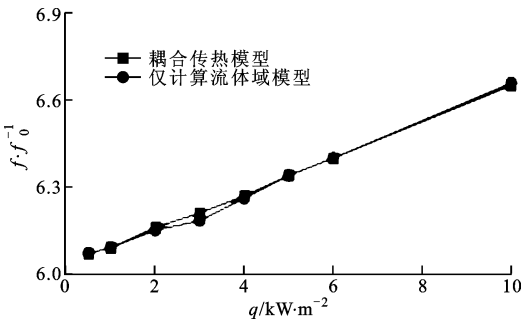
经计算,雷诺数从 10 000~90 000 变化时,平均传热系数和综合传热因子分别提高了 76%和 63%,通道摩擦系数比也增大了 29.8%,只计算流体域的预测结果比耦合传热模型的计算结果低了 10.14%。

4.2 壁面热通量的影响

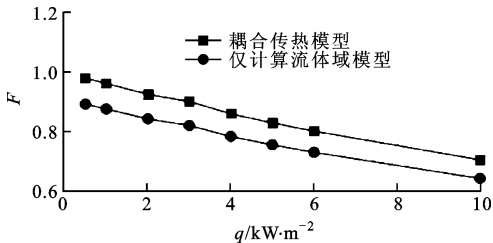
图 12 为厚壁带肋通道内蒸汽流动和传热性能



(a) 平均努塞尔数比



(b) 摩擦系数比



(c) 综合传热因子

图 12 热流密度对通道内蒸汽流动和传热性能的影响

随壁面热流密度 $q(0.5\sim10\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2})$ 的变化。计算中蒸汽进口压力为 299.43 kPa,进口温度为 448.17 K,进口湍流度为 5%,出口质量流量为 0.026 9 kg/s。从图 12 可以看出:壁面平均努塞尔数比和综合传热因子随热流密度的增大而减小,而通道摩擦系数比随着热流密度的增大而增大;相同热流密度下,2 种模型计算结果的趋势相同,只计算流体域模型所预测的壁面平均努塞尔数比和综合传热因子分别比耦合传热模型的计算结果低 9.66%和 9.87%;2 种模型对通道摩擦系数比的计算结果基本一致。

通道内蒸汽的综合传热因子随着壁面热流密度的增大而减小,这是因为热流密度增大,使得通道内蒸汽的温度相对提高,普朗特数相应降低,而普朗特数对冷却气体的传热性能影响很大,因此传热效果变差,同时温度的升高也使得流体流动相对更快,从而增大了蒸汽的流动阻力,使得蒸汽的综合传热因子降低。

4.3 湍流度的影响

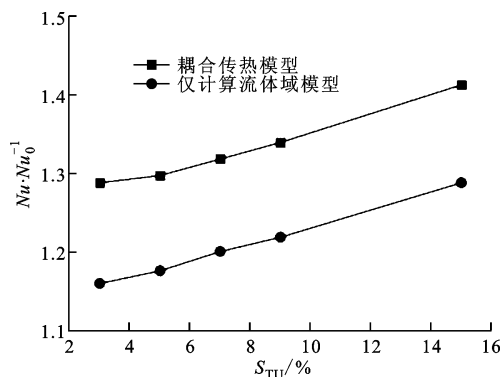
图 13 为湍流度 S_{Tu} 为 3%~15%时通道摩擦系数比、通道壁面平均努塞尔数比以及综合传热因子的变化。计算中蒸汽进口压力为 299.43 kPa,进口温度为 448.17 K,出口质量流量为 0.026 9 kg/s,通道的加热功率为 1 207.49 W。从图 13 可以看出,2 种模型对摩擦系数比的计算结果基本一致,只计算流体域模型对平均努塞尔数比的预测结果较耦合传热模型偏低。

对于只计算流体域模型的预测结果,通道壁面平均努塞尔数比随着湍流度的增大而增大,几乎呈线性分布;对于耦合传热模型的预测结果,湍流度在 3%到 5%之间时,壁面平均努塞尔数比增加缓慢,湍流度大于 5%时,壁面平均努塞尔数比增幅逐渐增大。通道摩擦系数比在湍流度小于 7%时迅速增大,之后增速放缓。蒸汽综合传热因子随着湍流度的增大而增大,在耦合传热模型预测的结果中,湍流度为 3%和 5%时,蒸汽综合传热因子基本相等,说明较小的湍流度对蒸汽综合传热因子影响很小。

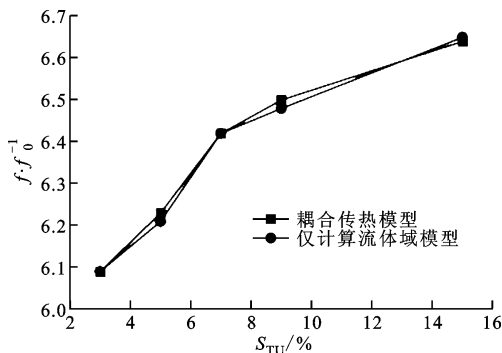
总的来看,湍流度从 3%~15%变化时,平均传热系数提高了大约 24%,综合传热因子提高了 19.8%,只计算流体域预测结果较耦合传热模型低 9.79%。

4.4 传热关联式

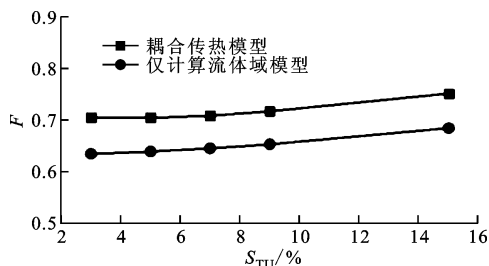
厚壁带肋通道蒸汽冷却的传热关联式对于指导未来重型燃机涡轮叶片蒸汽冷却结构的设计具有重要意义。根据前文分析,当地努塞尔数随着雷诺数



(a) 平均努塞尔数比



(b) 摩擦系数比



(c) 综合传热因子

图13 湍流度对通道内蒸汽流动和传热性能的影响

和湍流度单调上升,随着壁面热流密度单调下降,所以设

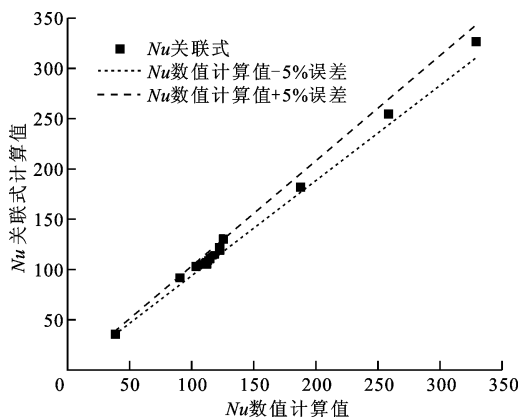
$$Nu = aRe^b q^c S_{Tu}^d \quad (12)$$

基于研究的数据点,采用多元线性回归方法拟合出反映雷诺数、壁面热流密度和湍流度对厚壁带肋通道影响的传热特性关联式

$$Nu = 0.007323Re^{0.9978} q^{0.0979} S_{Tu}^{0.07796} \quad (13)$$

其适用范围为: $10\,000 \leq Re \leq 90\,000$, $500 \text{ W/m}^2 \leq q \leq 10\,000 \text{ W/m}^2$, $3\% \leq S_{Tu} \leq 15\%$ 。

图14为 Nu 关联式计算值与数值模拟结果的对比。由图14可见,传热关联式计算得到的 Nu 大部分都在数值计算值的 $\pm 5\%$ 误差范围内,最大误差为 6.62% 。因此,本文拟合的传热关联式可以准确地预测蒸汽冷却厚壁带肋通道壁面的传热系数。

图14 Nu 的关联式计算值与数值计算值对比

5 结 论

本文基于带肋通道蒸汽冷却实验,建立了耦合传热计算模型,研究了雷诺数、热流密度和湍流度对厚壁矩形带肋通道内蒸汽流动及传热特性的影响。研究结果如下。

(1)含有内热源项的耦合传热计算模型可以较准确地模拟厚壁带肋通道内蒸汽的流动与传热特性,只计算流体域模型对传热系数的预测较耦合传热模型低了 10% 。

(2)热流密度对厚壁带肋通道摩擦和传热特性影响较小,高热流密度使得壁面传热效果变差。

(3)雷诺数从 $10\,000 \sim 90\,000$ 变化时,平均传热系数和综合传热因子分别提高了 76% 和 63% ;湍流度从 $3\% \sim 15\%$ 变化时,平均传热系数和综合传热因子分别提高了大约 24% 和 19.8% 。

(4)拟合的传热关联式可以应用于未来重型燃机叶片内部通道蒸汽冷却设计。

参考文献:

- [1] LIAO G, WANG X, LI J, 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 & Mass Transfer, 2014, 77 (3): 1033-1042.
- [2] HAN J C, DUTTA S, EKKAD S. Gas turbine heat transfer and cooling technology [M]. London, UK: Taylor & Francis Inc., 2012: 363-366.
- [3] HAN J C, ZHANG P. Pressure loss distribution in three-pass rectangular channels with rib turbulators [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1989, 111: 515-521.

(下转第62页)