

几种带冷却结构的双层管换热及流动对比

李鹏刚,张灵俊,王文璇,杨双

(中国航发四川燃气涡轮研究院,四川成都610500)

摘要:对相同质量流量下的光管、双层光管、带冷却结构(肋、扰流柱、凹坑、螺旋通道)的双层管等不同结构的管流动进行了流固耦合三维数值模拟,获取了固体壁温的分布特征;对各结构下,外层壁冷热侧温差、冷气温升、流动特性及综合换热效率进行了研究分析。研究表明:相同质量流量下,带螺旋通道双层管的外层壁冷热侧温差最小、综合换热效率最高;凹坑结构双层管与双层光管的流动及换热特性相似,流阻较小但换热效果也较差;扰流柱和肋结构双层管的流动换热特性相近,其温度分布均匀性、换热量介于双层光管和螺旋通道双层管之间,其流阻大且综合换热效率低。

关键词:双层管;螺旋管;流固耦合;传热效率

中图分类号:V231.1 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.04.012

[引用本文格式]李鹏刚,张灵俊,王文璇,等.几种带冷却结构的双层管换热及流动对比[J].热能动力工程,2023,38(4):89-94.
LI Peng-gang, ZHANG Ling-jun, WANG Wen-xuan, et al. Comparison of heat transfer and flow characteristics of several double-wall tubes with cooling structures[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(4): 89-94.

Comparison of Heat Transfer and Flow Characteristics of Several Double-wall Tubes with Cooling Structures

LI Peng-gang, ZHANG Ling-jun, WANG Wen-xuan, YANG Shuang

(AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu, China, Post Code: 610500)

Abstract: A 3-D numerical simulation of fluid-solid coupling was carried out under the same mass flow for the flow in tubes with different structures, such as general tube, general double-wall tube, double-wall tube with cooling structures of ribs, pin fins, pits and spiral channel. The distribution characteristics of solid wall temperature of tube were obtained, and the temperature difference between the hot and cold sides of the outer wall, cold air temperature rise, flow characteristics and comprehensive heat transfer efficiency are analyzed under each structure. The research results show that the temperature difference between the hot and cold sides of the outer wall of the double-wall tube with spiral channel is the smallest, and the comprehensive heat transfer efficiency is the highest under the same mass flow; the flow and heat transfer characteristics of the double-wall tube with pits structure are similar to those of the general double-wall tube, which flow resistances are smaller but heat transfer effects are worse; the flow and heat transfer characteristics of the double-wall tube with pin fins structure are similar to those of the double-wall tube with ribs structure, which temperature distribution uniformity and heat transfer amount are in the range between those of general double-wall tube and double-wall tube with spiral channel, flow resistances are larger and comprehensive heat transfer efficiencies are lower.

Key words: double-wall tube, spiral tube, fluid-solid coupling, heat transfer efficiency

收稿日期:2022-03-08; 修订日期:2022-04-09

基金项目:国家科技重大专项(2017-III-0001-0025)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project (2017-III-0001-0025)

作者简介:李鹏刚(1992-),男,中国航发四川燃气涡轮研究院工程师。

引 言

近些年来,燃气涡轮发动机对于性能和推力的极限追求使得涡轮进口温度不断提高,进而涌现出了各种冷却技术。李慧君等人^[1]对不同形状微型肋进行了换热特性研究并进行了综合换热性能评价。涂立^[2]研究了涡轮叶片带肋结构的角度、肋高间距比、截面形状等参数对通道换热及流动特性的影响。白琰^[3]对带有扰流柱阵列通道的流动及换热特性进行了研究,结果显示,扰流柱排数增加、换热效果增强、流阻系数也增大,插排的换热效果优于顺排。吴伟龙等人^[4]研究了涡轮叶片尾缘通道中扰流柱的排布方式以及设置间距对通道的换热及流阻的影响情况。季魁玉等人^[5]对带圆柱形扰流柱的楔形通道换热及流动机理进行了研究,结果显示,扰流柱表面及通道表面的平均努塞尔数随雷诺数增大而增大,且扰流柱叉排的综合换热效果要好于顺排。季钧等人^[6]研究了层板冷却中多种扰流柱构型的综合换热结果。结果表明,圆柱形扰流柱与射流冲击匹配更好,综合换热效率最高。Bunker等人^[7]研究了带有圆形凹坑的圆管流动及换热,结果显示,圆管内壁面有凹坑结构可以增强流动换热效果。金星等人^[8]研究了扁管中带错排凹坑的蛇形翅片的换热及流动情况,结果显示,带凹坑的蛇形翅片换热性能强于平直翅片,且凹坑错排的综合换热效果优于顺排。闫顺林等人^[9]分析了凹坑高径比对麻面管的流动及传热特性影响,结果显示,不同高径比凹坑对麻面管换热性能影响不同,且存在最优的高径比;冯璐璐等人^[10]对螺旋弯管内水的流动与换热进行数值分析,结果表明,随着进口来流雷诺数的增大,螺旋弯管内的二次流迪恩涡核心向弯管壁扩张,因而相比常规管流的边界层更薄,换热性能更强。朱辉等人^[11]对不同尺寸的螺旋弯管进行了传热试验研究,给出了影响螺旋管对流换热的主要影响因素。胡正祥^[12]通过传热和流动理论基础研究,分析了螺旋管内速度场和温度场的分布,从理论上探究了曲率和螺距对螺旋管的换热及流动影响。徐启等人^[13]对异形截面螺旋管进行了研究,结果显示,异形截面的螺旋管换热性能要优于常规圆形截面。

目前,在涡轮导叶前缘位置采用冲击、冲击加气膜的冷却方式较多,但在非一级高压涡轮导向叶片上由于分配到的冷气量较少或者冷气压力相对偏低,因此不适用冲击或者气膜的冷却方式。在叶片前缘采用对流冷却仍旧具有应用和研究前景。对流换热与换热表面的形状、大小、相对位置和粗糙度均相关,通常表面大小和相对流动位置难以改变,而粗糙度又与制造工艺相关,因此文献^[14]通过形状优化获得更强的湍流效果、增大换热面积来增强换热效果。本文将涡轮导叶前腔简化为圆管通道,采用ANSYS CFX 软件,通过数值仿真对比了几种经典的对流换热方式以及流阻结果,分析结果可为后续研究者提供参考。

1 计算模型

由涡轮导向叶片得到的简化光管模型如图1所示^[15]。计算模型尺寸如图2所示,其中管内腔为流体域,管壁为固体域。如图3所示。图3依次为光管、双层光管、扰流柱管、凹坑管、肋管和螺旋管。

光管为常规单层圆管结构;双层光管有内、外两层管壁且均为光管。其他4种均为双层光管,扰流柱管的内、外管壁之间设有4个叉排扰流柱,4个扰流柱直径为2 mm,周向均布,流向间距4 mm;凹坑管的双层光管的外层管内壁上设有8个叉排球面凹坑,球面直径2 mm、凹坑深度0.5 mm,周向均布,流向间距5 mm;肋管的外层管内壁上设有4个叉排长方形肋,肋宽1 mm、肋高0.5 mm、肋长3.5 mm,周向均布,流向间距3 mm;螺旋管的双层光管之间为长方形截面的螺旋形通道,长方形长1.3 mm、宽1 mm,螺距为10 mm。

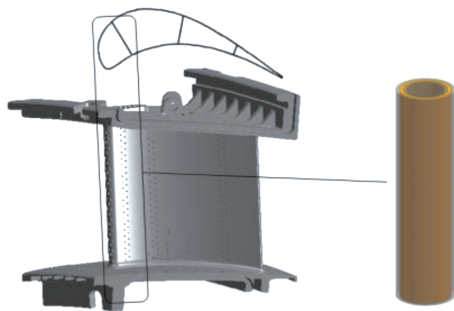


图1 简化光管模型

Fig.1 Simplified model of general tube

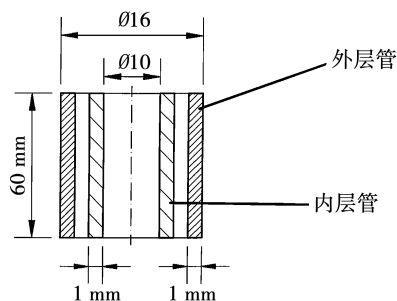


图 2 计算模型尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculation model size

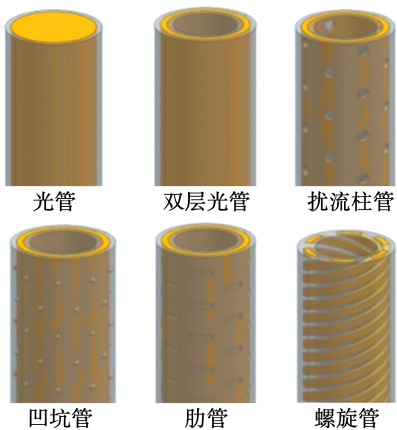


图 3 各冷却方式计算域模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of computational domain model under various cooling methods

2 网格及边界条件

2.1 网格划分

计算域网格采用 ANSYS ICEM CFD 四面体网格进行划分,如图 4 所示。在扰流柱、凹坑、肋以及螺旋通道等特殊位置进行了局部加密,为了满足 SST 湍流模型对第 1 层网格高度 y^+ 的要求,流、固交界面流体侧所有壁面均设置有 15 层边界层网格,第 1 层网格高度为 0.001 5 mm,增长率为 1.12。

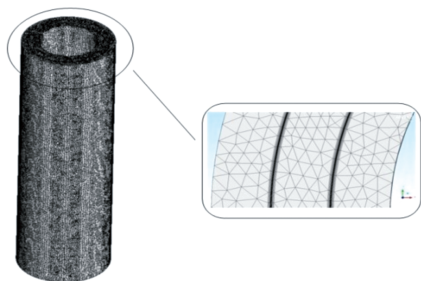


图 4 计算域网格划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of meshing of computational domain

图 5 为网格无关性检查结果,当网格大于 700 万时,网格数量对计算结果的影响小于 0.5%,属于可接受的误差范围,因此本文中均采用 700 万网格进行计算。

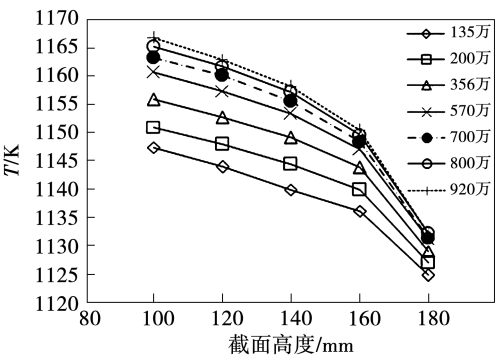


图 5 网格无关性检查

Fig. 5 Mesh independence verification

2.2 边界条件

计算域及边界划分如图 6 所示。计算中选用实际工程中叶片材料的导热率 25 W/(m·K)。为了模拟叶片前腔的内外环境,在左半侧圆柱面施加外换热边界:换热系数为 6 000 W/(m²·K),温度为 1 600 K;在右半侧圆柱面施加内换热边界:换热系数为 1 100 W/(m²·K),温度为 727 K;冷气为理想空气,进口采用质量流量入口,0.018 kg/s,出口采用压力出口,压力为 570 kPa。

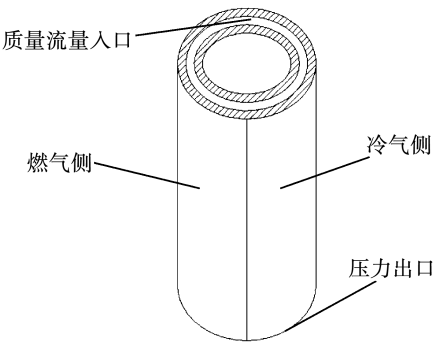


图 6 计算边界示意图

Fig. 6 Schematic diagram of computational domain and boundary division

2.3 计算设置

计算采用 ANSYS CFX 计算软件,王定标等人^[16]结合实验对湍流模型进行了准确性验证,结果显示基于 $k-\omega$ 的 SST 模型对于 Nu 计算结果与实验结果的最小偏差在 1.5% 左右;付阳春等人^[17]在

叶片流固耦合研究计算中按照 Hylton 等人^[18]的实验参数验证了 SST 湍流模型。

以文献[19]的试验数据为依据,采用 CFX 软件对稳态雷诺时均 $N-S$ 方程中的 5 种湍流模型进行验证,如图 7 所示。可以看到,SST 湍流模型的计算结果在较宽的 Re 范围内与试验结果均符合较好。因此,数值研究均采用 SST 湍流模型。

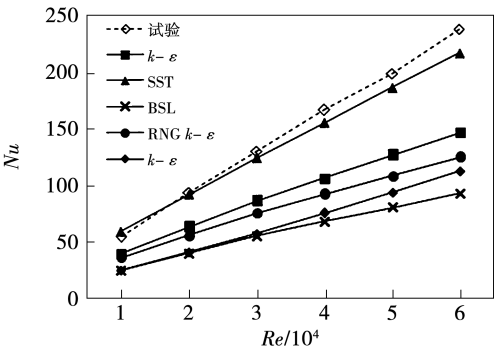


图 7 湍流模型验证结果

Fig. 7 Verification result of turbulence model

3 结果分析

3.1 温差分析

图 8 为管子中截面温度场云图。可以看到,光管的壁温最高,双层管和凹坑管温度分布相近,肋管和扰流柱管温度较低,螺旋管壁温最低且温度场分布最均匀。

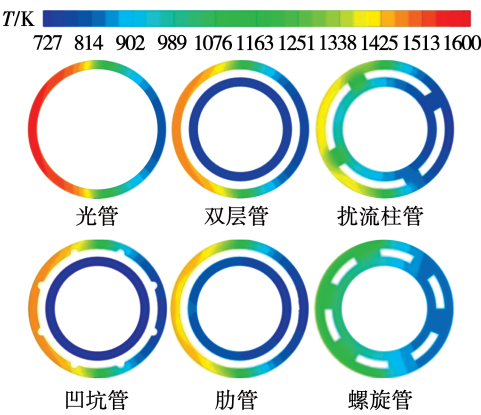


图 8 中截面温度场

Fig. 8 Mid-section temperature field

对比内、外层管壁的温差可以发现,双层管、凹坑管和肋管由于其内层管完全处于冷气环境中,内、外层管壁之间没有导热作用,所以其温度整体接近于冷气温度,因而这 3 种结构的管内、外层壁温的温差均较大;扰流柱管和螺旋管由于结构上内、外层管

壁存在连接部位,因而在导热作用下内、外层管壁之间温差较小。

从外层管壁的燃气侧和冷气侧温差来看,螺旋管的冷热两侧温差最小,肋管和扰流柱管次之,凹坑管和双层管略高于肋管和扰流柱管,光管最高。除螺旋管外,其他结构的管均依靠对流换热作用降低燃气侧壁温来减小外层壁冷热侧温差,因而对流换热效果越强则温差越小。螺旋管内冷气自上而下进行周向流动,冷气气流依次且重复与燃气侧管壁和冷气侧管壁进行对流换热,结果显示,燃气侧壁温降低,同时冷气侧壁温升高,因此,燃气侧与冷气侧壁温温差显著减小。

图 9 为 6 种冷却结构管的外层壁冷热侧温差百分比对比结果。从图中可以看出,螺旋管的外层壁冷热侧温差百分比则接近 30%;其他几种冷却结构管的外层壁冷热侧温差百分比接近 50%。尽管扰流柱管内外层壁之间有扰流柱的导热作用,但冷热侧温差百分比相比双层管没有明显降低,说明仅靠内、外层壁之间的导热作用来平衡管壁冷热侧温差的效果并不明显;螺旋管虽然也属于内、外层壁之间连接结构,但其冷热侧温差平衡效果明显优于扰流柱管。

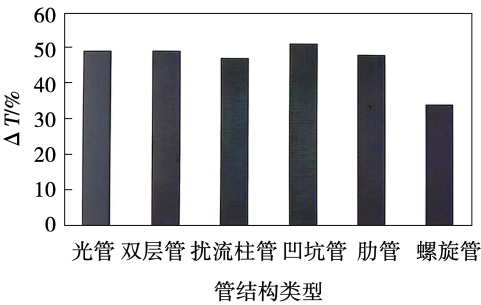


图 9 外层壁冷热侧温差百分比

Fig. 9 Comparison of temperature difference percentages on cold and hot sides of outer wall

图 10 为 6 种冷却结构管流中冷气进出口温度对比结果。从图中可以看到,光管的冷气温升最小,螺旋管的冷气温升最大,其他 4 种结构管流的冷气温升介于两者之间。其中,双层管、凹坑管、肋管的冷气温升相近,均略低于扰流柱管。冷气温升可以直观反映出冷气在管内流动换热的结果,相同质量流量下冷气温升越高,则换热量越大,换热效果越好。

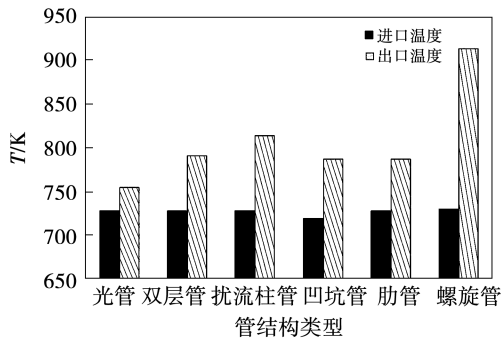


图 10 冷气进出口温度对比图

Fig. 10 Comparison of air-conditioning inlet and outlet temperatures

3.2 流动分析

流体力学中描述动量传递的欧拉数 $Eu^{[15]}$ 是无量纲特征数,它反映了流场压降与动压之间的相对关系。

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho v^2} \tag{1}$$

式中: Δp — 压差, Pa; ρ — 流体密度, kg/m^3 ; v — 特征速度, m/s 。

图 11 为各结构管流的 Eu 对比图。可以看到,扰流柱和肋两种结构管流的 Eu 明显大于其他结构管流,这表明扰流柱和肋结构在冷气流动中的阻挡作用最为显著,增大了气流的动量损失;凹坑结构由于其结构较小且没有在流动方向形成明显的阻碍,因而其造成的流动损失很小,其流动损失与双层管基本相当;螺旋管流的流动距离是 6 种管流中最长的,但其 Eu 与双层管和凹坑管相近,这表明螺旋管中冷气与壁面进行充分了对流换热,但动量损失却很小,其流阻相对于换热量是最小的。

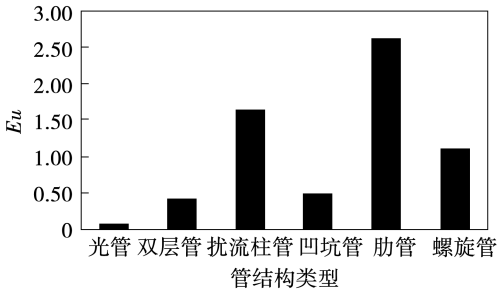


图 11 各结构管流 Eu 对比图

Fig. 11 Eu comparison of flow in tubes with various structures

3.3 综合换热效率分析

文献[17]定义了管内传热强化综合性能的评价方法。

在相同流体介质动能损失及换热面积的条件下,假定流体物性参数保持不变,将综合换热效率指标 η 定义为带冷却结构管与光滑管的换热系数之比为:

$$\eta = \frac{Nu/Nu_0}{(\xi/\xi_0)^{\frac{1}{3}}} \tag{2}$$

式中: Nu — 带冷却结构管的平均努塞尔数; Nu_0 — 光滑管的平均努塞尔数; ξ — 带冷却结构管的阻力系数; ξ_0 — 光滑管的阻力系数。

以双层光管为基准,图 12 为各结构管综合换热效率 η 对比结果。从图中可以看出,凹坑管的综合换热效率接近双层管,说明凹坑结构对提高换热效果作用不明显;扰流柱管和肋管综合换热效率约为双层管的 70% 和 60%,是典型的用高流阻换取高换热效率的强化换热措施;螺旋管的综合换热效率约为双层管的 1.4 倍,即在较小的流阻下可获得较高的换热效率。

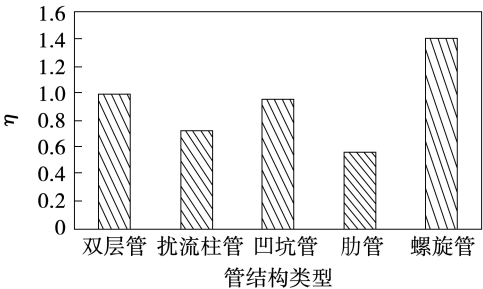


图 12 各结构管换热特性对比图

Fig. 12 Comparison of heat transfer characteristics in tubes with various structures

4 结 论

本文运用数值计算的方法,基于某涡轮导向叶片前腔的简化模型,对几种典型对流换热冷却方法进行了数值模拟,并对其壁温均匀性、换热能力、流阻以及综合换热特性进行了对比分析,研究结果表明:

- (1) 凹坑管由于其冷却结构对冷气扰动作用不显著,且换热面积增加较小,因此其流阻较小且换热能力也较低,综合换热效果与常规双层管相当。
- (2) 相比于双层管和凹坑管,扰流柱管和肋管的内外管壁的温差更小,换热能力更强。由于扰流柱管和肋管的流阻更大,因此,二者的综合换热效率实际上低于凹坑管和双层管。

(3) 螺旋管由于结构特殊,增大了换热面积,冷气的回转流动使冷热侧壁面同时进行热交换,且每条通道间的隔板起到了导热作用,因而其管壁温差均最小,温度场分布最均匀,换热综合效果为几种结构中最优。

参考文献:

- [1] 李慧君,李 东,张久意,等.不同形状微肋阵换热特性数值分析[J].华北电力大学学报(自然科学版):1-9[2022-03-20].
LI Hui-jun, LI Dong, ZHANG Jiu-yi, et al. Numerical analysis of heat transfer characteristics of mini fin arrays with different shapes [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition): 1-9[2022-03-20].
- [2] 涂 立. 涡轮叶片内置扰流肋片结构强化换热的数值研究[D]. 厦门:厦门大学,2019.
TU Li. Numerical study on heat transfer enhancement of turbine blade with internal fin structure[D]. Xiamen: Xiamen University, 2019.
- [3] 白 琰. 典型涡轮叶片尾缘内通道流动与换热特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
BAI Yan. Investigation on flow and heat transfer characteristics in typical turbine trailing edge internal channel[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [4] 吴伟龙,徐华昭,王建华. 涡轮叶片带扰流柱尾缘通道冷气流动的数值分析[J]. 推进技术, 2021, 42(1): 163-172.
WU Wei-long, XU Hua-zhao, WANG Jian-hua. Numerical investigation of pin-fin influences on cooling air flow characteristics in turbine blade trailing edge region[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(1): 163-172.
- [5] 季魁玉,费昕阳,周子杰,等. 带扰流圆柱肋楔形通道的流动与换热数值研究[J]. 燃气轮机技术, 2016, 29(1): 36-40, 53.
JI Kui-yu, FEI Xin-yang, ZHOU Zi-jie, et al. Numerical study on heat transfer and pressure loss in wedge-shaped ducts with cylindrical pin-fins [J]. Gas Turbine Technology, 2016, 29(1): 36-40, 53.
- [6] 季 钧,唐祖定,贾新旺. 扰流柱构型对层板冷却特性的研究[J]. 能源研究与利用, 2021(2): 36-40.
JI Jun, TANG Zu-ding, JIA Xin-wang. Study on cooling characteristics of laminates by spoiler column configuration[J]. Energy Research & Utilization, 2021(2): 36-40.
- [7] BUNKER R S, DONNELLAN K F. Heat transfer and friction factors for flows inside circular tubes with concavity surfaces [J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125(4): 21-29.
- [8] 金 星,魏秀琴,李 宇,等. 扁管带错排凹坑蛇形翅片换热器传热性能研究[J]. 机械工程与自动化, 2020(5): 26-28.
JIN Xing, WEI Xiu-qin, LI Yu, et al. Study on heat transfer performance of flat tube serpentine fin heat exchanger with staggered pits [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2020(5): 26-28.
- [9] 闫顺林,张 莎,何 仑. 凹坑结构对麻面管流动与传热特性的影响分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(1): 196-201.
YAN Shun-lin, ZHANG Sha, HE Lun. Influence of pit structure on flow and heat transfer of pitted tube[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(1): 196-201.
- [10] 冯璐璐,徐让书,冯建宇. 螺旋弯管内流动与传热特性的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(7): 697-701.
FENG Lu-lu, XU Rang-shu, FENG Jian-yu. Numerical simulation of flow and heat transfer characteristics in helical pipe[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(7): 697-701.
- [11] 朱 辉,王汉青,刘志强. 螺旋管内迪恩涡强化传热的试验研究[J]. 热能动力工程, 2014, 29(6): 645-650.
ZHU Hui, WANG Han-qing, LIU Zhi-qiang. Experimental study of the dean vortex-enhanced heat transfer inside a spiral tube[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2014, 29(6): 645-650.
- [12] 胡正祥. 螺旋管内传热与流动性能的场协同研究[J]. 化学工程与装备, 2021(3): 14-15.
HU Zheng-xiang. Analysis of field synergy of heat transfer and flow performance within helically-coiled tube[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2021(3): 14-15.
- [13] 徐 启,骆迅迅,荆嘉芯. 新型螺旋缠绕管强化传热数值模拟[J]. 化学工程与装备, 2020(12): 14-16.
XU Qi, LUO Xun-xun, XING Jia-xin. Numerical simulation of heat transfer enhancement of a new type of spiral wound tube[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2020(12): 14-16.
- [14] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2006.
TAO Wen-quan. Numerical heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2006.
- [15] VICTORIA K, ALEXANDER L, NICOLAY S, et al. Experimental and numerical analysis of high temperature gas turbine nozzle vane convective and film cooling effectiveness [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2011. GT2011-45294.
- [16] 王定标,王光辉,彭 旭,等. 双向扭曲管传热与流阻特性及其多目标优化[J]. 热科学与技术, 2018, 17(5): 7.
WANG Ding-biao, WANG Guang-hui, PENG Xu, et al. Heat transfer and flow resistance characteristics of bidirectional twisted tube and multi-objective optimization[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2018, 17(5): 7.
- [17] 符阳春,李健武,廖贵鄂,等. 湿燃气透平叶片热流固耦合换热特性的数值研究[J]. 动力工程学报, 2021, 41(10): 849-858.
FU Yang-chun, LI Jian-wu, LIAO Gui-e, et al. Numerical study on thermo-fluid-solid coupling heat transfer performance of moist gas turbine blades[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(10): 849-858.
- [18] HYLTON L D, MINHELIC M S, TURNER E R, et al. Analytical and experimental evaluation of the heat transfer distribution over the surfaces of turbine vanes[R]. Detroit, USA: Final Report Detroit Diesel Allison, 1983.
- [19] 王德强,饶 宇,张 鹏,等. 涡轮叶片内冷通道高性能肋流动与传热[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(1): 7.
WANG De-qiang, RAO Yu, ZHANG Peng, et al. Experimental study of flow and heat transfer of high-performance ribs for internal cooling of gas turbine blades[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(1): 7.