

双层板冲击-气膜复合冷却结构冷却性能的数值分析

李月茹¹, 戴 韧¹, 王 蛟², 徐 强²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海电气电站技术发展中心, 上海 201612)

摘 要: 高压燃气涡轮叶片采用内部冲击和外部气膜冷却相结合的复合冷却结构来提高叶片的冷却效率。本研究应用流热耦合的方法计算涡轮叶片中弦区的复合冷却效果, 在不同的冲击孔与气膜孔间距 l/d_1 以及不同的冲击孔长度 h/d_1 复合冷却结构中, 得到不同冷气流量条件下的冷却传热特性和流动阻力特性, 建立了冷却效率与结构特征参数的关联式。结果表明: 在冲击孔与气膜孔间距 $l/d_1 = 12$ 的复合冷却结构中, 平板外表面气膜孔上下游的冷却效率均保持较高值; 在冲击孔长度 $l/d_1 = 1$ 的复合冷却结构中, 气膜孔上游区域的冷却效率较高。复合冷却结构中气膜孔下游的冷却效率不受冲击孔与气膜孔间距 l 与冲击孔长度 h 的影响。

关 键 词: 冲击-气膜复合冷却; 冷却效率; 关联式

中图分类号: TK124

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.04.009

引 言

先进燃气轮机涡轮叶片冷却气体来自压气机的中间级和排气的抽气。抽取冷气在减少透平高压级工质流量的同时, 导致冷气与透平高温主流掺混, 降低了透平的热效率。所以, 提高冷却效率, 减少冷气用量, 是透平冷气叶片研究的目标。

冲击冷却是增强局部换热系数最有效的方式, 经常用于高压燃气透平叶片表面热负荷较高的前缘区域及中弦区。文献[1]建立了圆形冲击射流的平均传热系数计算公式。文献[2]确定了射流到冲击靶面的距离及射流孔间距对冲击换热的影响。文献[3]发现多排冲击孔之间的横向流动降低了冲击面上的平均 Nu 数。文献[4]提出了将一排或两排冲击射流与一排气膜孔结合起来的复合冷却结构, 发现气膜冷却的抽吸作用提高了冲击腔内的冷却效果。文献[5]研究了双层腔结构, 并提出了3种不同的气膜出流方案。文献[6-8]对不同形式层板

中的流动与换热特性进行分析, 得到了流动阻力系数、靶面温度和表面传热系数的分布规律。

由于实验测量条件的限制, 许多文献获得了复合冷却结构外表面的冷却特性, 但缺乏对双层板复合冷却结构中内部流体流动形态及局部传热强化机理的研究。本研究将高压透平叶片中弦区的复合冷却结构简化为双层板复合冷却模型, 采用数值模拟方法研究冲击-气膜复合冷却结构中冷气流动形态和双层板内外流固耦合传热机制, 分析相关几何参数对双层板内外表面换热的影响, 为优化复合冷却结构提供理论依据。

1 数值模拟方法

1.1 平板复合冷却模型

图1为基于高压燃气涡轮叶片中弦区复合冷却结构简化建立的双层板冲击-气膜复合冷却模型。冲击腔左端下表面布置5个冲击孔, 冲击孔孔径 $d_1 = 1.5$ mm, 间距6 mm, 垂直冲击靶面。冲击腔室右端上表面布置6个气膜孔, 孔径为1 mm, 间距6 mm, 气膜孔出口倾斜角为30°。冲击孔和气膜孔交错排列, 气膜孔与冲击孔的总面积之比为1.06。高温气体流过平板的上表面, 冷却气体从平板下表面的冲击孔喷射进入腔内, 冷气冲击靶面后由气膜孔排流出。文献[9]将腔的高度 s/d_1 设置为2, 期望获得良好的冲击效果。本研究着重分析冲击孔与气膜孔沿 X 轴方向的相对距离 l/d_1 与相对冲击孔长度 h/d_1 对双层板内外表面传热及冷气流动的影响。表1列出了模型尺寸。

收稿日期: 2014-07-07; 修订日期: 2014-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51276116)

作者简介: 李月茹(1990-), 女, 江苏徐州人, 上海理工大学硕士研究生。

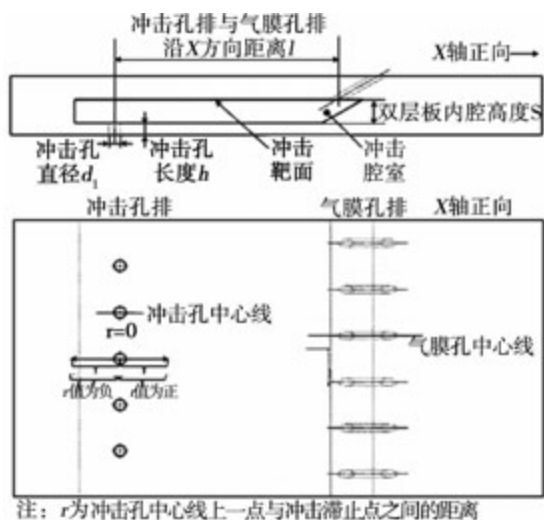


图1 平板复合结构示意图

Fig. 1 Sketch of Flat Plate Configuration

表1 平板复合结构模型参数

Tab. 1 Geometry parameters for Flat Plate Model

序号	l/d_1	h/d_1
1	18.5	1
2	12	1
3	5	1
4	5	2
5	5	3
6	5	4

1.2 计算方法与网格划分

模型计算域包括固体域和流体域两部分。固体域为双层板复合结构,流体域为叶片内部通道的低温冷却气体和外部高温气体。对冲击孔、气膜孔等复杂的小尺寸结构,采用非结构化网格,通过局部小尺度细化的三棱锥网格以及在壁面上加密。

网格数由 146 万增加至 364 万时,冲击靶面努赛尔数 Nu 变化幅度较大,达到 469 万后,努赛尔数 Nu 基本不变,如图 2 所示,获得网格无关解。此时流体域 180 万,固体域 174 万,总网格数 364 万,壁面 Y^+ 小于 3。

应用 CFX13.0 软件,采用流固耦合方法,把不同区域中的热传递通过耦合界面组合起来,整场求解,并采用 SST $k-\omega$ 湍流模型。主流和冷却气体设为具有恒定比热的理想空气,导热率和粘度符合萨德兰公式。主流进口给定总温 453 K、流量 0.09 kg/s 以及湍流度 5%。冷气温度为 300 K,冷气所占

主流流量的质量百分比以及相对应的冷气射流冲击雷诺数 Re_j 与气膜吹风比 M 如表 2 所示。

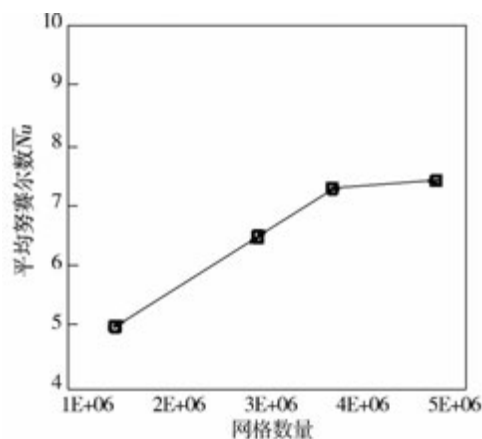


图2 网格无关性验证

Fig. 2 Grid-independent verification

表2 冷气质量流量百分比与 Re_j 和吹风比 M 对应关系

Tab. 2 Boundary Conditions of CHT Computation

冷气质量流量百分比/%	Re_j	M
0.17	1 379	0.4
0.33	2 713	0.8
0.49	4 064	1.2

$$\text{冷气质量流量百分比} = \frac{\text{冷气质量流量}}{\text{主流质量流量}} \quad (1)$$

$$Re_j = \frac{u \times d_1}{\nu} \quad (2)$$

式中: d_1 —冲击孔直径; u —冲击气流速度, m/s; ν —冷气运动粘度, m^2/s 。

气膜吹风比定义为:

$$M = \frac{\rho_c \cdot v_c}{\rho_g \cdot v_g} \quad (3)$$

式中: ρ_c —气膜孔进口冷气密度, kg/m^3 ; v_c —气膜孔进口冷气速度, m/s; ρ_g —主流进口密度, kg/m^3 ; v_g —主流进口速度, kg/m^3 。

2 结果与讨论

2.1 冲击孔与气膜孔间距 l/d_1 对双层板表面换热的影响

图 3 为 $l/d_1 = 12$ 的复合冷却结构中,不同冲击雷诺数条件下,冲击靶面上的努赛尔数 Nu 分布。在相同的几何结构中,增加冲击射流流量,提高射流

雷诺数,冲击靶面上的 Nu 数提高。对于不同的射流雷诺数, Nu 数沿冲击孔中心线上的变化趋势是相似的。

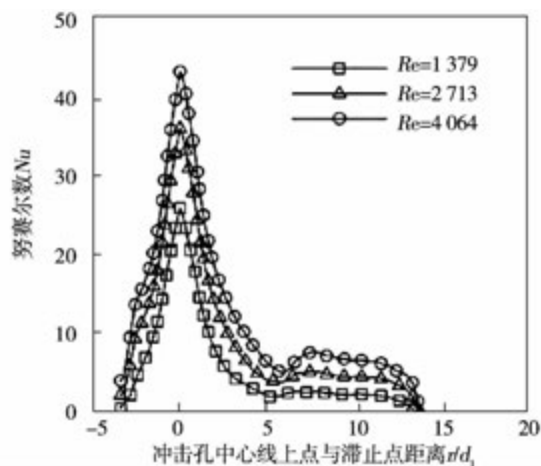


图3 冲击雷诺数对努赛尔数的影响 ($l/d_1 = 12$)

Fig. 3 Effects of Impingement Reynolds Number ($l/d_1 = 12$)

图4表示沿冲击孔中心线冲击靶面上 Nu 数分布。高速冲击射流到达冲击靶面后,速度迅速降低,在壁面上滞止,形成局部强烈的动量交换。 Nu 数的峰值与冲击射流的中心滞止点吻合。冲击射流撞击内表面后,在腔内迅速扩散,所以在滞止区以外, Nu 数值迅速衰减。经过分析,得到拟合公式:

$$\begin{cases} Nu = 1.183 Re^{0.47} \cdot \frac{1}{|r/d_1|^{1.279} + 1.2} & -3 < r/d_1 \leq 5 \\ Nu = 0.95 Re^{0.4} \cdot (r/d_1)^{-0.7} & r/d_1 > 5 \end{cases}$$

图5为 $Re = 4064$ 时,外表面气膜孔中心线上游冷却效率。相同冲击射流雷诺数条件下,随着 l/d_1 的增加,平板外表面气膜孔上游冷却效率增大, $l/d_1 = 5$ 时,冷却效率峰值为 37%,而当 $l/d_1 = 18.5$ 时,冷却效率峰值可达 40% 以上。说明较大的 l/d_1 使得外表面气膜孔上游的冷却效率升高。对于 l/d_1 较小的复合结构,气膜孔下游的固体区域温度较高,会向平板的上游区域导热,造成冷却效率的降低;然而对于不同的 l/d_1 结构,均可以发现冷却效率在冲击点位置达到最高值后,沿 X 轴正向逐渐降低。图6表示 $Re = 4064$ 时,外表面气膜孔中心线下游冷却效率分布,发现不同的 l/d_1 对气膜孔下游的冷却效率影响甚微。

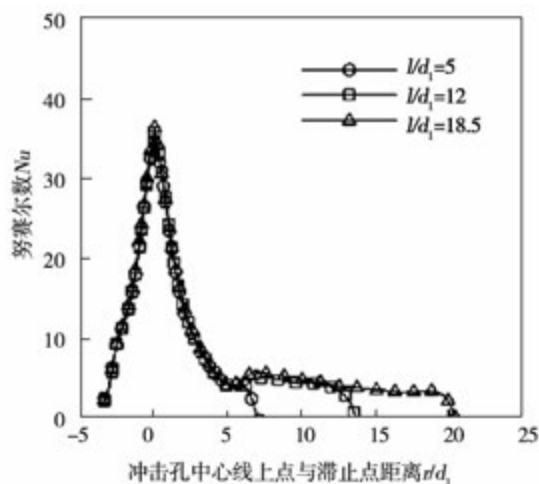


图4 冲击靶面努赛尔数 Nu 分布 ($Re = 2713$)

Fig. 4 Nusselt Number on the Impingement Surface

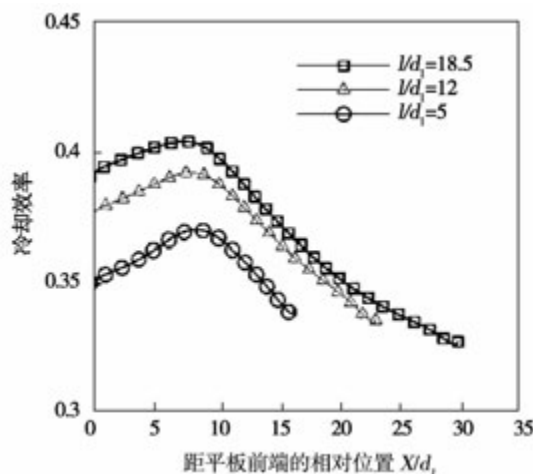


图5 气膜孔上游冷却效率

Fig. 5 Cooling Effectiveness Upstream

综合图5、图6可以看出 $l/d_1 = 12$ 时,可以同时保证气膜孔上下游区域都有较高的冷却效率。可以设想,如果以气膜孔起始点冷却效率为基准,以气膜孔上游的冲击对流冷却效率不低于气膜冷却效率为判断,选择气膜孔与冲击孔的间距 l/d_1 ,在给定冷气流量的条件下,可以减少气膜孔数量,增加冲击气流速度,提高冲击冷却效率,获得整个冷却面的最佳冷却效果。

图7表示 l/d_1 与压力损失系数 C_p 之间的关系。

$$C_p = (p_1^* - p_2^*) / \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (4)$$

式中: p_1^* —冲击孔进口总压, Pa; p_2^* —气膜孔出口总压, Pa; v —冷气出口速度, m/s。在同一吹风比

下, l/d_1 增加对压力损失系数的影响并不明显: 在同一 l/d_1 结构中, 增大吹风比, 腔室内流体流速增大, 流出腔室的时间缩短, 压力损失系数降低。

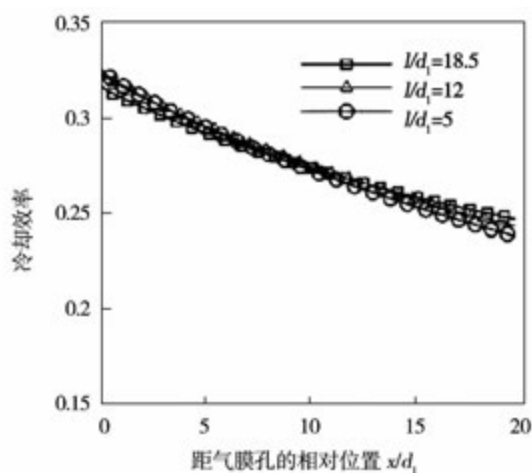


图 6 气膜孔下游冷却效率

Fig. 6 Cooling Effectiveness Downstream

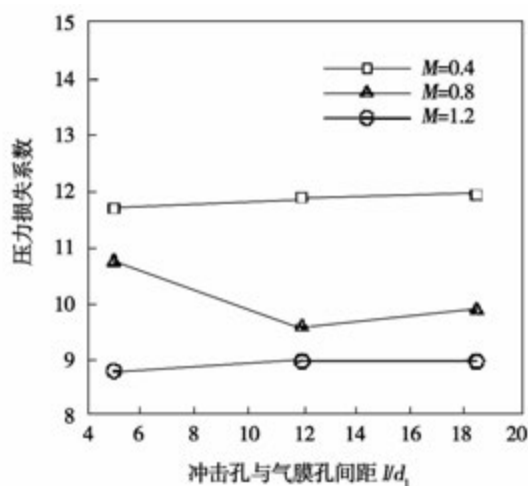


图 7 冲击孔与气膜孔间距 l/d_1 对压力损失系数 C_p 的影响

Fig. 7 Pressure Loss Coefficient at Different l/d_1

2.2 冲击孔长度 h/d_1 对流动换热的影响

图 8 比较了 $l/d_1 = 5$ 时不同射流雷诺数条件下, 冲击孔相对长度 h/d_1 对冲击靶面努赛尔数 Nu 的影响。 $h/d_1 = 1$ 时冲击孔出口速度分布未完全发展, 射流中心速度偏高, Nu 峰值明显高于其它孔长度。 $h/d_1 > 2$ 后, 冲击孔内出口流动分布达到完全发展, 是一致的, 努赛尔数 Nu 几乎是相同的。

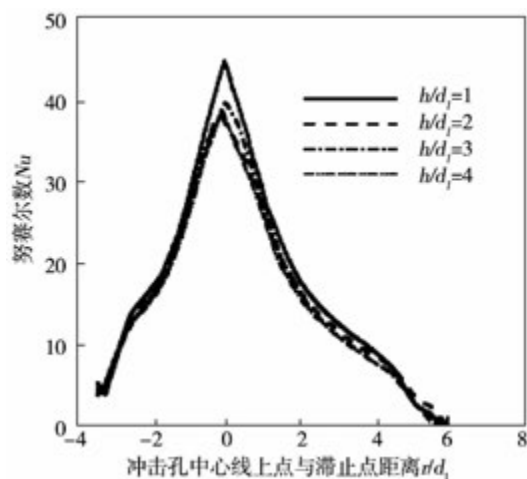


图 8 冲击孔长度对努赛尔数 Nu 分布的影响 ($Re = 4\ 064$)

Fig. 8 Effects of Impingement hole length on Nusselt distribution ($Re = 4\ 064$)

图 9、图 10 为当冷却空气流量为 0.49% 时, 平板外表面气膜孔中心线的上、下游冷却效率。由图 9 可知, 随着 h/d_1 的增加, 气膜孔上游外表面的冷却效率降低。而由图 10 发现, 气膜孔下游冷却效率几乎不受 h/d_1 影响。经过拟合得到公式:

$$\eta = 0.03315 \cdot (Re \times 10^{-3})^{0.39} \cdot (0.001(x/d_1)^2 - 0.08(x/d_1) + 5.13) \quad (5)$$

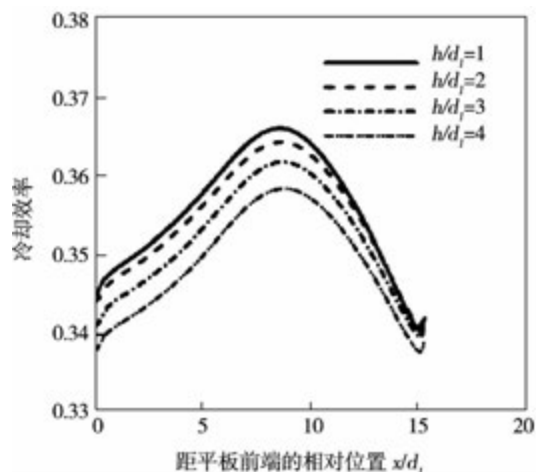


图 9 气膜孔上游冷却效率

Fig. 9 Cooling Effectiveness Upstream

由图 11 冲击孔出口截面气流温度发现, 在流固耦合导热的作用下, 较长的冲击孔使得冷却气体在

冲击孔壁吸收过多的热量,使得冲击孔出口处的气体温度有明显的升高,导致冲击靶面上的换热效果变差。

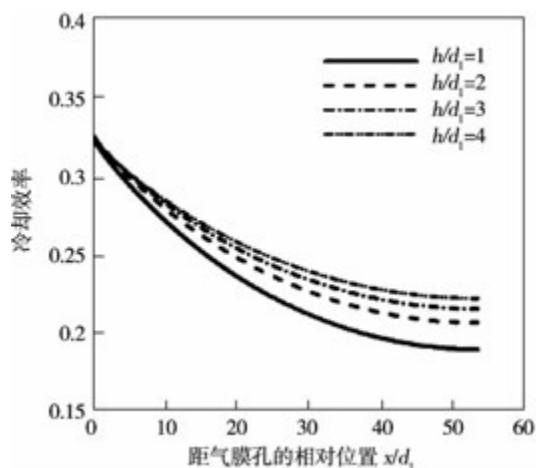


图10 气膜孔下游冷却效率

Fig. 10 Cooling Effectiveness Downstream

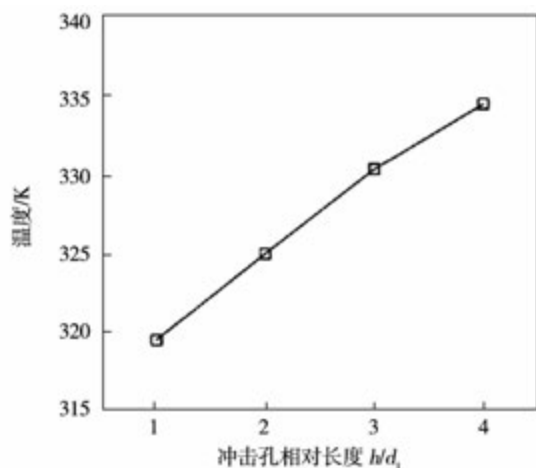


图11 冲击孔出口截面气流温度

Fig. 11 Local Temperature at the Impinge Hole Outlet

图12表示 h/d_1 与压力损失系数 C_p 的关系。在相同的吹风比下,随 h/d_1 的增加,相对压力损失系数 C_p 略微增加,受冲击孔的长度影响不大;冲击孔长度相同的结构中,吹风比越大,压力损失系数越小。

由图7和图12可以发现,压力损失系数受几何参数 l 和 h 的影响很小,主要影响因素是吹风比 M 。图13表示了吹风比 M 和压力损失系数之间的关系。可以发现压力损失系数与吹风比基本呈线性关系。流量越大,冲击腔室内部流体速度越快,温度越

低,黏性越小,流动阻力降低,压力损失系数减小。

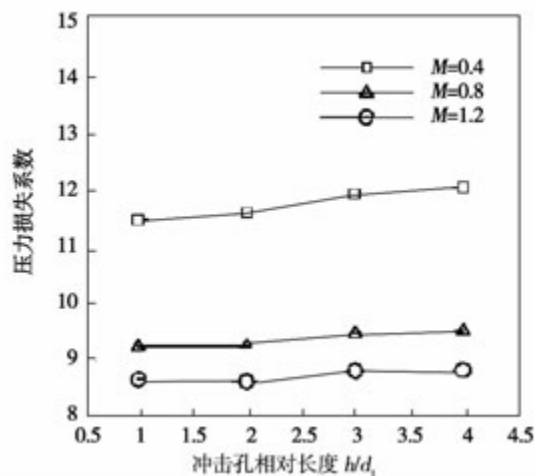


图12 冲击孔长度 h/d_1 对压力损失系数的影响

Fig. 12 Pressure Loss Coefficient at Different h/d_1

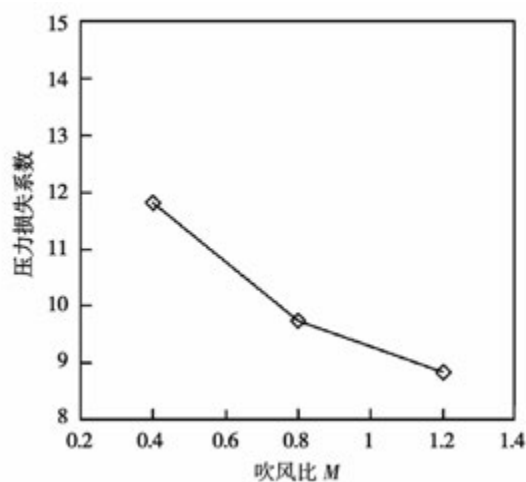


图13 吹风比对压力损失系数的影响

Fig. 13 Pressure Loss Coefficient at Different M

3 结论

应用流固耦合计算,分析双层板冲击-气膜复合冷却结构的传热过程。通过比较外部冷却效率和内部冲击的换热系数,解析流动结构与传热能力的对应关系,评估复合结构参数和流动参数对冷却能力的影响,得出以下结论:

(1) 冷气流量是复合结构冷却效果的决定性因素,增加冷气流量是提高冷却效果最直接有效的方法。

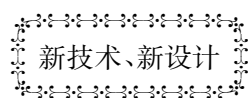
(2) 在冲击孔与气膜孔间距 $l/d_1 = 12$ 的复合冷却结构中, 双层板外表面气膜孔上、下游的冷却效率均保持较高的水平。

(3) 冲击孔长度中 $h/d_1 = 1$ 的结构中, 射流速度未完全发展, 气流中心速度高, 温度低, 冲击靶面上换热增强, 努赛尔数 Nu 较大, 所以外表面气膜孔上游冷却效率也较高。

参考文献:

- [1] Goldstein R J, Behbahani A I, Heppelmann K K. Streamwise distribution of the recovery factor and the local heat transfer coefficient to an impinging circular air jet [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1986, 29: 1227 - 1235.
- [2] Goldstein R J, Seol W S. Heat transfer of a row of impinging circular air jets including the effects of Entrainment [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1991, 34: 2133 - 2147.
- [3] Florschuetz L W, Su C C. Effects of cross flow temperature on heat transfer with an array of impinging jets [J]. ASME Journal of heat Transfer, 1987, 109: 74 - 82.
- [4] Gillespie D R H, Wang Z, Ireland P T. Full surface local heat transfer with an array of impinging jets [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1998, 109, 74 - 82.
- [5] Ekkad S V, Huang Y, Han J C. Impingement heat transfer on a target plate with film holes [J]. AIAA Journal of Thermodynamics and Heat Transfer, 1999, 13(9 - 10) , 522 - 528.
- [6] 谭晓茗, 李业芳, 张靖周. 致密多孔层板冷却结构研究 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(12) : 144 - 149.
TAN Xiao-ming, LI Ye-fang, ZHANG Jing-zhou. Numerical investigation on structures of lamilloy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(12) : 144 - 149.
- [7] 丁水汀, 崔 亮, 孙纪宁, 等. 内部冲击和外部气膜的组合特性研究 [J]. 航空动力学, 2007, 22(2) : 187 - 192.
DING Shui-ting, CUI Liang, SUN Ji-ning, et al. Combined features of the inner impingement and outer film cooling holes of a vane [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(2) : 187 - 192.
- [8] 胡娅萍, 卢元丽, 吉洪湖, 等. 层板冷却涡轮叶片前缘内部流动与传热特性实验 [J]. 航空动力学报, 2014, 29(2) 241 - 249.
HU Ya-ping, LU Yuan-li, JI Hong-hu, et al. Experiment on flow and heat transfer characteristics inside leading edge of lamilloy cooling turbine blade [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(2) : 241 - 249.
- [9] Jambunathan K, Lai E, Moss M A, et al. A review of heat transfer data for single circular jet impingement [J]. Heat and Fluid Flow, 1992, 13(2) : 106 - 115.

(丛 敏 编辑)



Trent 60 DLE 将用于液化天然气全套装置

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.04.010

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2014 年 12 月刊报道, Rolls-Royce 公司将供应 12 台 Trent 60 DLE 燃气轮机, 用于提议的在美国路易斯安那州莱克查尔斯的 LNG(液化天然气) 出口项目。

由 Trent 航空涡轮风扇发动机改型得到的 Trent 60 DLE 干式低排放燃气轮机是 Rolls-Royce 于 1996 年推出的一型大功率(航改机中最大功率)、高效率航改型工业燃气轮机, 其技术规范和额定性能列出如下:

推出 年份	ISO 基本负荷额 定输出功率/kW	热耗率 kJ/kWh	效率 %	压比	流量 kg/s	涡轮转速 r/min	排气温度 ℃	大约的尺寸 $L \times W \times H$ (长×宽×高) /m	说明
1996	51 504	8 145	42. 1	33. 0	151. 7	3 000	444	26. 5 × 4. 6 × 183. 9	干式低排放

(吉桂明 摘译)

cycle with double ejectors (DAEORC) is proposed and analyzed. The results show that the two adjustable ejectors designed at condensation temperature of 20 °C and 30 °C respectively can realize the regulation of the DAEORC within the condensation temperature of 20 – 40 °C. And the net output power of DAEORC is higher than ORC. **Key words:** adjustable ejector, Organic Rankine cycle with ejector, Organic Rankine cycle with adjustable ejector, thermodynamic analysis

矩形小翼纵向涡发生器流动换热研究 = **A Study of the Flow and Heat Exchange in a Longitudinal Vortex Generator with Rectangular Winglet** [刊, 汉] ZENG Zhuo-xiong(College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 200090) , WANG Zhang-jun, ZHANG Long, XU Yi-hua (School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, China , Post Code: 330063) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2015, 30(4) . – 527 – 534

H-type fin heat exchange mechanism equipped with small rectangular winglet of the longitudinal vortex generator is researched adopting the numerical simulation method. The results show that with the increase of flow velocity, the temperature in the reflow zone is gradually raised. With the same Reynolds number value, the temperature difference between import and export, pressure loss, Nusselt number, Euler number and heat exchange factor are all increased with the increase of angle of attack. But the comprehensive performance increases at first, then decreases. With the increase of Reynolds number, the pressure drop and Nusselt number increase, however the temperature difference between import and export, Euler number, heat exchange factor and comprehensive performance are all decreased. **Key words:** H-type fin, longitudinal vortex generator, convective heat transfer flow characteristics, rectangular winglet

双层板冲击 – 气膜复合冷却结构冷却性能的数值分析 = **Numerical Analysis on Cooling Performance of Combined Impingement and Film Cooling on Double-layered Plate** [刊, 汉] LI Yue-ru, DAI Ren(College of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) , WANG Jiao, XU Qiang(Technology Development Center of Shanghai Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 201612) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2015, 30(4) . – 535 – 540

Internal impingement and external film cooling of high pressure turbine blades are combined together to enhance the cooling effectiveness. This study applies the method of Flow-heat Coupling to compute and simulate the combined

cooling effect of turbine blade mid-chord. Cooling heat-transfer and flow resistance characteristics are obtained under various cooling flow rate in combined cooling structure of different spacing between impingement holes and film holes l/d_1 , the length of impingement hole h/d_1 . Meanwhile, the correlation is set up on cooling effect and structural feature parameter. The results show that in the structure of $l/d_1 = 12$, the cooling effectiveness outside surface of the film cooling holes both upstream and downstream is higher; and in the structure of $h/d_1 = 1$, the heat transfer coefficient on target surface increases. The cooling effectiveness outside surface of film cooling holes downstream is not affected by l and h . **Key words:** combined impingement-film cooling, cooling effectiveness, correlation

基于 Easy5 的燃气轮机发电系统建模与仿真 = **Modeling and Simulation of the Gas Turbine Power Generation System Based on Easy5** [刊, 汉] MEI Jiao-jiao, CHEN Jin-wei, ZHANG Hui-sheng, SU Ming (Gas Turbine Research Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(4) . - 541 - 546

With the modular modeling theory, a third-order synchronous generator module was established on a basis of the traditional nonlinear mathematical model of gas turbines. Based on the mathematical model, a complete model of single shaft gas turbine power generation system was built on Easy5 simulation platform. The variable load process of the entire gas turbine power generation system was simulated dynamically, which reflected the dynamic process of the gas turbine and generator well. Results agree well with the actual circumstances and the model has high versatility. **Key words:** modular modeling, gas turbine, generator, Easy5 simulation platform

低叶尖马赫数开式叶轮气动声源数值研究 = **Numerical Study on Aerodynamic Sound Sources of Low Tip Mach Number Open Impeller** [刊, 汉] WAN Jian-feng (School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(4) . - 547 - 550

In order to find reasonable noise reduction measures, this paper, using Large Eddy Simulation and FW-H hybrid method, conducts a full-scale simulation on flow and aerodynamic noise of low tip Mach open impeller and researches the aerodynamic sound sources performance. The study on SPL distribution in space and frequency domain shows: noise sources of the open impeller include monopole sound source, dipole sound source from blades rotation, and quadruple sound source generated by blade trailing vortex. There is not basically vortex-blade interference