

# C3X涡轮叶片综合冷却效率数值研究

孙国庆

上海理工大学, 能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2022年2月25日; 录用日期: 2022年3月14日; 发布日期: 2022年3月23日

## 摘要

燃气轮机叶片综合冷却效率实验中, 实验工况与实际运行工况不一致, 使应用实验结果的叶片设计出现偏差, 从而达不到预期冷却效果。根据一维公式提出的理论选取对综合冷却效率造成影响的参数。通过研究不同参数下C3X叶片综合冷却效率的变化情况, 量化选取的参数对综合冷却效率的影响, 得到了毕渥数、粗糙度对叶片综合冷却效率的影响规律。研究表明: 随着叶片外表面毕渥数增加, 综合冷却效率分布均匀性增加。当 $Bi$ 由0.023227增加至0.023252,  $Bi$ 增加幅度0.11%时, 平均综合冷却效率由0.324增加至0.357, 综合冷却效率增加幅度为10.2%。在实验工况范围内, 当 $K_s$ 由0.8 mm增加至3.0 mm, 平均综合冷却效率由0.34增加至0.37, 综合冷却效率增加幅度为8.82%。

## 关键词

综合冷却效率, 共轭传热, 毕渥数, 表面粗糙度

# Numerical Study on Overall Cooling Effectiveness of C3X Turbine Blade

Guoqing Sun

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 25<sup>th</sup>, 2022; accepted: Mar. 14<sup>th</sup>, 2022; published: Mar. 23<sup>rd</sup>, 2022

## Abstract

In the overall cooling effectiveness experiment of gas turbine blades, the experimental conditions are different from the actual operating conditions. This leads to deviation in the blade which applied experimental results, and thus fails to achieve the expected cooling effectiveness. According to the theory of one-dimensional formula, the parameters affecting the overall cooling effectiveness are selected. By studying the changes of overall cooling effectiveness of C3x blades under different parameters and quantifying the influence of selected parameters on overall cooling effectiveness, the influence laws of Biot number and roughness on overall cooling effectiveness of blades are obtained.

The results show that the distribution uniformity of overall cooling effectiveness increases with the increase of the Biot number on the outer surface of the blade. When it increases from 0.023227 to 0.023252 by 0.11%, the average overall cooling effectiveness increases from 0.324 to 0.357, and the overall cooling effectiveness increases by 10.2%. In the range of experimental conditions, when  $K_s$  increases from 0.8 mm to 3.0 mm, the average overall cooling effectiveness increases from 0.34 to 0.37, and the increased range of overall cooling effectiveness is 8.82%.

## Keywords

Overall Cooling Effectiveness, Conjugate Heat Transfer, Biot Number, Surface Roughness

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

提高燃气轮机热效率最有效的方式之一是合理提高涡前进口温度，但日益增加的进口温度，对叶片材料以及冷却设计方案提出了更高要求。受限于湍流模型的能力，验证涡轮叶片冷却结构设计合理性主要采取实验的方式。燃气轮机叶片综合冷效实验中，实验工况与实际运行工况不一致，使应用实验结果的实际叶片设计出现偏差，从而达不到预期冷却效果。通过研究不同工况下 C3X 叶片综合冷效的变化情况，量化不同参数对综合冷却效率的影响，得到了毕渥数、粗糙度对叶中综合冷却效率和平均综合冷却效率的影响规律。对实验结果与实际工况之间的偏差估计提供了一定的依据。

York [1]和 Facchini 等[2]分别采用 Fluent5 和 STAR-CD 计算流体力学求解器对 C3X 叶片进行了共轭传热数值计算。结果显示 *realizable*  $k-\omega$  和 *standard*  $k-\omega$  模型预测结果与实验结果基本一致，综合冷效的最大误差为 10%。Luo 等[3]比较了不同湍流模型预测结果与实验数据的差异情况，选取了低雷诺数  $k-\omega$  模型、非线性二次  $k-\omega$  模型、V2F 湍流模型三种模型。计算结果显示三种模型对流动情况的预测与实验值吻合较高，并且 V2F 模型对叶片外表面和内冷通道壁面换热系数的预测与实验值最为接近。Takahashi 等[4]在共轭传热的情况下对燃气轮机动叶进行了数值计算，预测得到的叶片冷效较低位置同实际工作叶片高温烧蚀位置相同。

安柏涛等人[5] [6]对照 Mark II 和 C3X 叶片的实验数据，测试了 CFX 求解器的气热耦合数值计算能力，研究了湍流度与湍流模型对计算结果的影响，发现边界层内的流体运动状态对叶片表面换热有很大影响。Bohn 等[7]研究了共轭换热条件下内部带有对流换热冷却通道的燃气轮机叶片，并与实验数据对比，同时也研究了肋结构对冷气流动状态和内表面换热情况的影响。

陈毅[8]在耦合实验条件下的平板气膜冷却效率实验中，通过采用不同材质的实验件的方法，研究了吹风比和毕渥数对综合冷却效率的影响。提出随着吹风比的增加，平均综合冷却效率在实验件下游变化比上游小。导热系数较低的 PTFE 材料实验件外表面综合冷效受冲击冷却的影响很小。

Chavez [9]通过更换不同材质叶片的方式，使得模型试验中叶片主流侧毕渥数和燃气轮机实际工况毕渥数相匹配，研究了不同参数对绝热冷却效率和综合冷却效率的影响。Williams [10]实验研究了吹风比对综合冷却效率和绝热冷却效率的影响，结果在高吹风比下由于气膜脱离壁面现象的出现，绝热冷却效率反而下降。得益于耦合换热条件下内冷通道壁面对流换热对叶片外表面冷效的贡献作用，综合冷效是有所增加的。同时还使用一维公式的预测值与实验结果进行了对比，结果显示在预测数量上有所偏差，但是冷效趋势与实验值是相同的。

Albert [11]对带有气膜冷却情况下的一维综合冷效公式进行了修正,并提出模型实验还需要保证气膜绝热冷却效率相等。李明飞[12]根据一维换热理论,进一步构造了带有热障涂层叶片的综合冷却效率表达式,并对冷气温升系数、金属毕渥数、热障涂层毕渥数、内部换热系数等局部冷却参数对综合冷却效率的影响进行了定量分析。

李广超[13]研究了叶片不同位置综合冷却效率随流量比的变化情况,前缘和压力面受流量比的影响作用明显大于吸力面,文中实验测量得到了最佳流量比,工作在最佳流量比时提高叶片综合冷却效率的同时,也有利于减小发动机热效率损失。钟博[14]采用红外测量与热电偶测量相结合的方式,实验研究了流量比、冷热气流温度比、落压比对叶片综合冷却效率的影响,结果表明流量比可以明显影响综合冷却效率,温度比对冷效影响不明显。

本文根据从一维传热条件出发由壁面热流关系推导出的综合冷却效率定义表达式,选择对叶片综合冷却效率造成影响的参数,研究毕渥数和粗糙度对 C3X 叶片冷效分布以及平均冷却效率的影响。

## 2. 计算模型和计算方法

### 2.1. C3X 叶片计算模型

图 1 是本文数值计算的计算域,由于在共轭传热情况下,研究不同参数对叶片综合冷却效率的影响,所以计算域包括主流气体和冷却气体两个流体域以及叶片一个固体域。

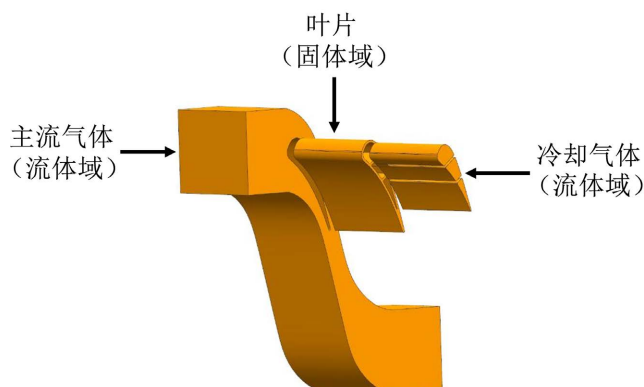


Figure 1. C3X blade calculation domain

图 1. C3X 叶片计算域

图 2 是叶片内部冷却通道的结构示意图,叶片前部分包含一个 U 型冷却通道,用以冷却叶片前缘,叶片后方有一个径向冷却通道,冷却叶片中部以及尾缘部分。

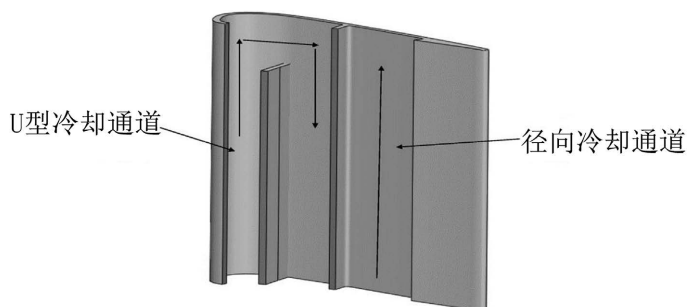


Figure 2. Schematic diagram of blade internal cooling channel

图 2. 叶片内冷通道示意图

表 1 是 C3X 叶片的几何参数，本文选取的是 Dees [15] 放大 2.7 倍的叶片，同时与其实验数据进行对照，验证计算方法的正确性。

**Table 1.** Geometric parameters of blade  
**表 1.** 叶片几何参数

参数	数值
弦长/mm	562
叶高/mm	549
栅距/mm	457
U 型通道水力直径/mm	98
径向通道水力直径/mm	46
壁厚/mm	12.7

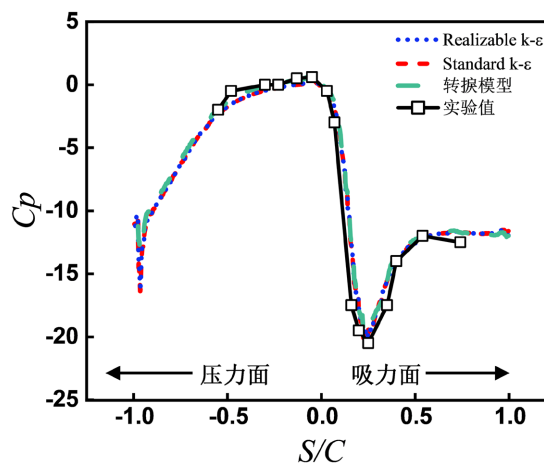
表 2 是数值计算的边界条件设置情况。边界条件设置为速度进口，压力出口，其相对压力值设为 0，叶栅通道设置为周期性边界条件。其中主流气体温度为 300 K，冷却气流温度设定为 250 K，冷气和主流气体的湍流度设置为 1%。

**Table 2.** Boundary conditions  
**表 2.** 边界条件

参数	主流通道	U 型通道	径向通道
进口速度/ $m \cdot s^{-1}$	5.8	4.64	4.96
进口温度/K	300	250	250
湍流度/%	1.0	1.0	1.0
出口压力/bar	1.0	1.0	1.0

## 2.2. 计算方法

为了验证计算方法的正确性，选择 50% 叶高位置的压力系数和综合冷却效率与实验值进行对比。图 3



**Figure 3.** Pressure coefficients of different turbulence models  
**图 3.** 不同湍流模型的压力系数

为不同湍流模型模拟计算所得的压力系数与实验值的比较,从图中可以看出,几种湍流模型计算所得的压力系数与实验结果吻合很好,尤其在叶片压力面。吸力面部分,数值计算所得的压力系数相比实验值略高,其他位置预测结果较为准确。

图4是采用不同湍流模型计算得到的综合冷却效率。由上述讨论可知,几种湍流模型都能够准确的预测叶栅内部的流动状态。对于传热情况的预测,几种湍流模型计算结果与实验值分布趋势相同。在压力面,采用几种不同湍流模型的数值计算结果均高于实验值。但是在吸力面,带有转捩的 SST 模型的计算结果最接近实验值,因此后续计算采用带有转捩的 SST 模型。

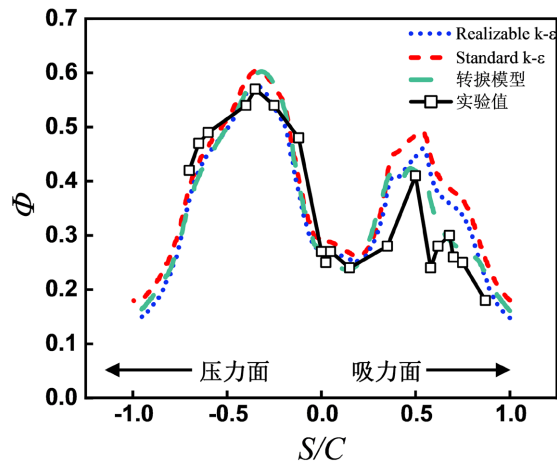


Figure 4. Overall cooling effectiveness of different turbulence models

图4. 不同湍流模型的综合冷效

### 3. 综合冷却效率影响因素分析

Sweeney 和 Rhodes [16]在气热耦合的气膜冷却实验中,在一维传热条件下,提出了叶片表面热流表达式:

$$q = h_e (T_\infty - T_w) = \frac{T_\infty - T_c}{\frac{1}{h_e} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_i}} \quad (1)$$

整理式(1),得到综合冷却效率定义:

$$\phi = \frac{T_\infty - T_w}{T_\infty - T_c} = \frac{1}{1 + \frac{h_e \delta}{\lambda} + \frac{h_e}{h_i}} = \frac{1}{1 + Bi + \frac{h_e}{h_i}} \quad (2)$$

其中,  $\delta$  为叶片壁厚,  $\lambda$  为叶片材质的导热系数,  $h_e$  是叶片外表面的对流换热系数,  $h_i$  是叶片内部冷却通道壁面的对流换热系数。  $T_\infty$  是主流气体温度,  $T_c$  是冷却气体的温度,  $T_w$  是叶片外壁面温度。

由公式(2)可知,影响叶片综合冷却效率的影响因素有毕渥数  $Bi$  以及叶片内外壁面对流换热系数  $h_e$  和  $h_i$ 。在叶片综合冷却效率实验中,毕渥数为一个无量纲数,由表达式  $Bi = h_e \delta / \lambda$  可知,叶片尺寸和导热系数会对该无量纲数造成影响。  $h_e / h_i$  为对流换热系数之比,影响内外对流换热系数的参数有等效砂粒粗糙度  $K_S$ 。

根据公式(2)分析出 C3X 叶片综合冷却效率的影响因素,本文选择毕渥数和粗糙度这两个参数,研究其对叶中冷效分布与平均综合冷效的影响。

## 4. 计算结果

### 4.1. 毕渥数的影响

图 5 是不同毕渥数叶片在 50% 叶高位置的综合冷却效率，通过改变叶片导热系数的方式，改变叶片外表面的毕渥数。三种叶片材质的导热系数由低到高，分别为 5 W/(m·k)、17 W/(m·k)、50 W/(m·k)。从图片中可以看出， $Bi$  对叶片综合冷却效率分布影响显著。随着  $Bi$  的增加叶片中部的冷却效率分布变得更加均匀。对于局部位置的冷效变化，随着毕渥数增加，压力面和前缘位置的综合冷却效率下降，吸力面综合冷却效率上升。

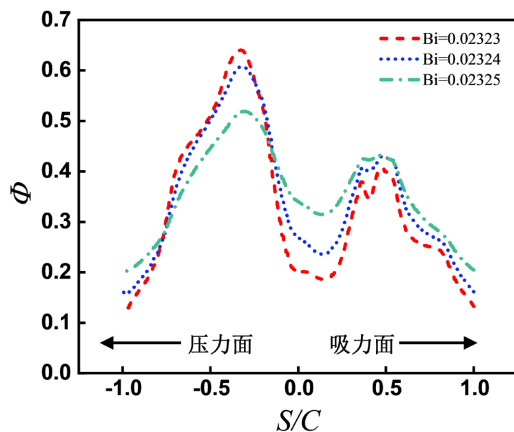


Figure 5. Overall cooling effectiveness at 50% height of blades with different Biot numbers  
图 5. 不同毕渥数叶片的 50% 叶高位置的综合冷效

图 6 是毕渥数对叶片平均综合冷效的影响，从图中可以看出随着毕渥数的增加，叶片平均综合冷却效率逐渐增加。当  $Bi$  由 0.023227 增加至 0.023252， $Bi$  增加幅度为 0.11% 时，平均综合冷却效率由 0.324 增加至 0.357，综合冷却效率增加幅度为 10.2%。

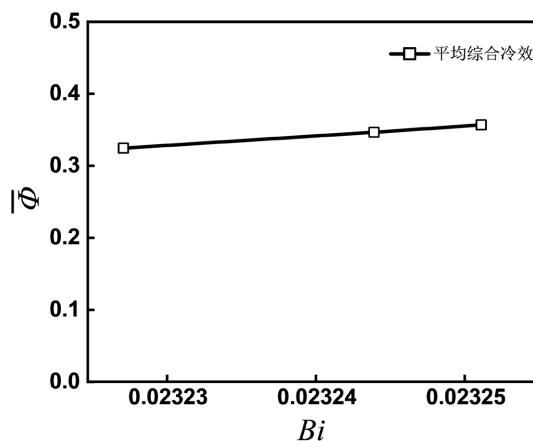
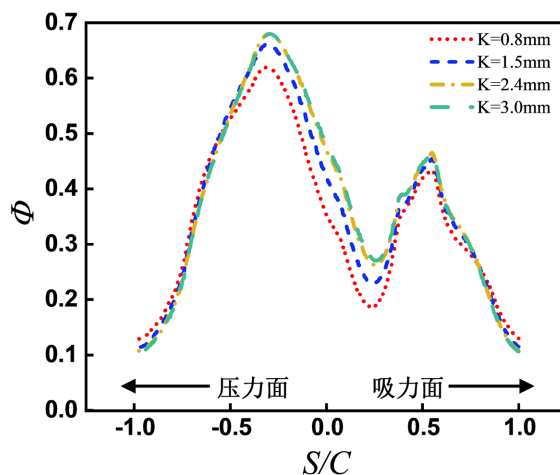


Figure 6. Effect of Biot numbers on average overall cooling effectiveness of blades  
图 6. 毕渥数对叶片平均综合冷效的影响

### 4.2. 粗糙度的影响

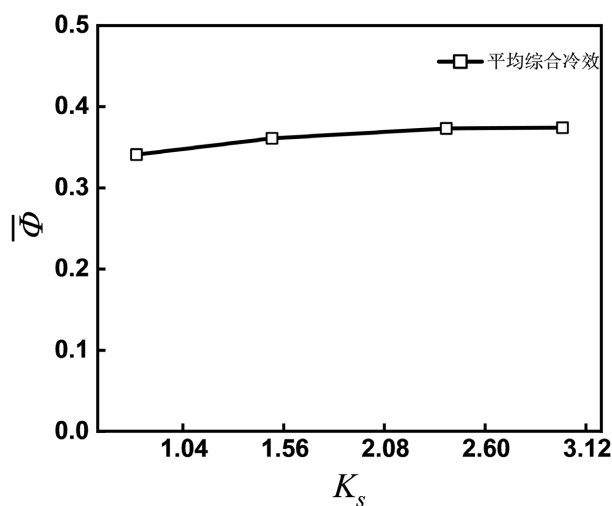
图 7 是不同粗糙度叶片在 50% 叶高位置的综合冷却效率，仅在叶片外表面设置粗糙度，内表面为

光滑壁面。从图中可以看出，粗糙度对叶片综合冷却效率影响明显。在本文设置的粗糙度范围内，随着外表面粗糙度的增加，综合冷却效率逐渐增加。且随着粗糙度的增加，综合冷却效率的增加速率逐渐下降。



**Figure 7.** Overall cooling effectiveness at 50% height of blades with different roughness  
**图 7.** 不同粗糙度叶片的 50% 叶高位置的综合冷效

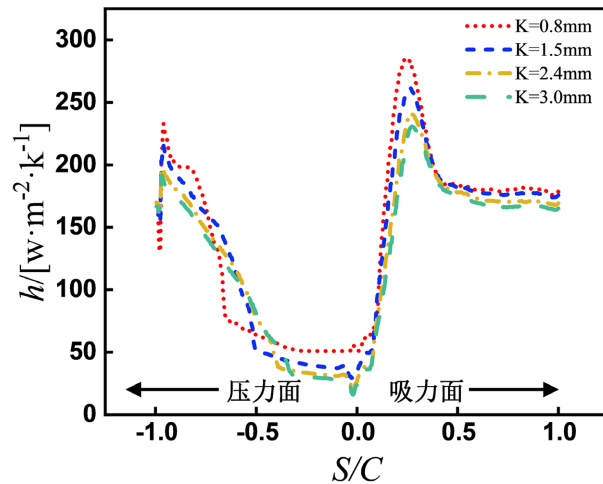
图 8 是在实验工况范围内，粗糙度对叶片平均综合冷效的影响，从图中可以看出随着粗糙度的增加，叶片平均综合冷却效率逐渐增加。当  $K_s$  由 0.8 mm 增加至 3.0 mm，平均综合冷却效率由 0.34 增加至 0.37，综合冷却效率增加幅度为 8.82%。



**Figure 8.** Effect of roughness on average overall cooling effectiveness of blade  
**图 8.** 粗糙度对叶片平均综合冷效的影响

图 9 为在 50% 叶高位置粗糙度对叶片外表面换热系数的影响情况。由于叶片与主流之间的换热方式主要是对流换热，且换热物体表面粗糙度会影响对流换热的强度大小，对流换热强度的变化可以体现在换热系数的变化上，因此查看粗糙对外表面对流换热系数的影响情况。从图中可以看出，在本文研究的粗糙度范围内，随着粗糙度的增加，外表面换热系数  $h_e$  是逐渐下降的。由于叶片内表面为光滑壁面， $h_i$  不发生变化，因此  $h_e/h_i$  是下降的，叶片综合冷却效率是上升的。





**Figure 9.** Effect of roughness on blade heat transfer coefficient  
**图 9.** 粗糙度对叶片换热系数的影响

## 5. 结论

本文根据一维传热条件公式推导出影响叶片综合冷却效率的参数，通过实验数据验证了湍流模型和计算方法的正确性，并研究了毕渥数和粗糙度对叶片综合冷却效率的影响。主要结论如下：

在共轭传热的条件下，毕渥数可以显著影响叶片平均综合冷却效率，叶片外表面毕渥数增加 0.11% 的情况下，叶片平均综合冷却效率增加幅度为 10.2%。毕渥数增加使得 50% 叶高位置的综合冷却效率分布更加均匀。

粗糙度通过影响叶片外表面对流换热系数的方式改变叶片综合冷却效率。在数值仿真选取的粗糙度范围内，随着粗糙度的增加，外表面对流换热系数逐渐下降，造成  $h_e/h_i$  是下降的，根据综合冷却效率的一维推导公式可知，叶片综合冷却效率上升。

## 参考文献

- [1] York, W.D. and Leylek, J.H. (2003) Three-Dimensional Conjugate Heat Transfer Simulation of an Internally-Cooled Gas Turbine Vane. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. ASME Paper No: GT2003-38551, 351-360. <https://doi.org/10.1115/GT2003-38551>
- [2] Facchini, B., Magi, A. and Scotti Del Greco, A. (2004) Conjugate Heat Transfer Simulation of a Radially Cooled Gas Turbine Vane. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. ASME Paper No: GT2004-54213, 951-961. <https://doi.org/10.1115/GT2004-54213>
- [3] Luo, J. and Razinsky, E.H. (2007) Conjugate Heat Transfer Analysis of a Cooled Turbine Vane Using the V2F Turbulence Model. *Journal of Turbomachinery*, **129**, 773-781. <https://doi.org/10.1115/1.2720483>
- [4] Takahashi, T., Watanabe, K. and Sakai, T. (2005) Conjugate Heat Transfer Analysis of a Rotor Blade with Rib-Roughened Internal Cooling Passages. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. ASME Paper No: GT2005-68227, 275-284. <https://doi.org/10.1115/GT2005-68227>
- [5] An, B.T., Liu, J.J. and Jiang, H.D. (2008) Numerical Investigation on Unsteady Effects of Hot Streak on Flow and Heat Transfer in a Turbine Stage. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. ASME Paper No: GT2008-50415, 1735-1746. <https://doi.org/10.1115/GT2008-50415>
- [6] An, B.T., Liu, J.J. and Jiang, H.D. (2009) Combined Unsteady Effects of Hot Streak and Trailing Edge Coolant Ejection in a Turbine Stage. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. ASME Paper No: GT2009-59473, 433-444. <https://doi.org/10.1115/GT2009-59473>
- [7] Bohn, D.E., Becker, V.J., Kusterer, K.A., et al. (1999) 3-D Internal Flow and Conjugate Calculations of a Convective Cooled Turbine Blade with Serpentine-Shaped and Ribbed Channels. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. ASME Paper No: 99-GT-220, V003T01A062. <https://doi.org/10.1115/99-GT-220>



- 
- [8] 陈毅, 韦宏, 祖迎庆, 等. 气冷涡轮叶片元件级气热耦合实验研究[J]. 复旦学报(自然科学版), 2019, 58(4): 506-514.
- [9] Chavez, K., Slavens, T.N. and Bogard, D. (2017) Experimentally Measured Effects of Incidence Angle on the Adiabatic and Overall Effectiveness of a Fully Cooled Turbine Airfoil with Shaped Showerhead Holes. *Journal of Turbomachinery*, **139**, Article ID: 091007. <https://doi.org/10.1115/1.4036200>
- [10] Williams, R.P., Dyson, T.E., Bogard, D.G., *et al.* (2014) Sensitivity of the Overall Effectiveness to Film Cooling and Internal Cooling on a Turbine Vane Suction Side. *Journal of Turbomachinery*, **136**, Article ID: 031006. <https://doi.org/10.1115/1.4024681>
- [11] Albert, J.E. and Bogard, D.G. (2013) Measurements of Adiabatic Film and Overall Cooling Effectiveness on a Turbine Vane Pressure Side with a Trench. *Journal of Turbomachinery*, **135**, Article ID: 051007. <https://doi.org/10.1115/1.4007820>
- [12] 李明飞, 李雪英, 任静, 蒋洪德. 综合冷却效率多参数影响分析[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(12): 2720-2724.
- [13] 李广超, 莫唯书, 张魏, 赵长宇, 黄福幸. 涡轮导向叶片综合冷却特性实验研究[J]. 推进技术, 2018, 39(12): 2772-2778.
- [14] 钟博, 郭昊雁, 魏景涛, 杨卫华. 涡轮叶片综合冷却效率实验研究[J]. 推进技术, 2021, 42(2): 335-343.
- [15] Dees, J.E., Bogard, D.G., Ledezma, G.A., *et al.* (2012) Experimental Measurements and Computational Predictions for an Internally Cooled Simulated Turbine Vane. *Journal of Turbomachinery*, **134**, Article ID: 061003. <https://doi.org/10.1115/1.4006280>
- [16] Sweeney, P.C. and Rhodes, J.F. (2000) An Infrared Technique for Evaluating Turbine Airfoil Cooling Designs. *Journal of Turbomachinery*, **122**, 170-177. <https://doi.org/10.1115/1.555438>