

# 燃气轮机透平叶片旋转内部冷却通道研究现状与发展趋势

任静, 李雪英

(清华大学能源与动力工程系, 北京市海淀区 100084)

## Research Status and Development Trend of Rotating Internal Cooling Channel in Gas Turbine Blade

REN Jing, LI Xueying

(Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

**摘要:**【目的】透平叶片高效内部冷却技术对提高燃气轮机热效率至关重要, 高温透平动叶作为燃气轮机的重要部件, 对其冷却性能的把握显得尤为重要。由于科里奥利力(科氏力)、浮升力和通道结构对高温透平动叶内部通道冷却性能影响显著, 因此, 基于这些影响, 总结归纳高温透平动叶内部冷却通道的研究现状与发展趋势。【方法】介绍了旋转内部冷却通道的新型结构设计, 提出了一种适用于双层壁叶片构型的新型旋转内部冷却通道结构。【结论】双侧强化U形通道可以利用科氏力的强化换热作用, 导致其冷却性能优于传统旋转U形通道, 燃机透平动叶内部冷却有着广阔的提升空间。

**关键词:** 燃气轮机; 透平动叶; 内部冷却; 旋转; 科氏力

**ABSTRACT:** [Objectives] The high-efficiency internal cooling technology of turbine blade is crucial for improving the thermal efficiency of gas turbine. As an important component of the gas turbine, it is essential to conduct research on the cooling performance of rotor blade. Due to significant effect of Coriolis force, buoyancy force, and channel structure on the cooling performance of rotating internal channel of turbine blade, this paper summarized the research status and development trends of rotating internal cooling channel based on these effect factors. [Methods] A new structural design of rotating internal cooling channels was introduced, and a new rotating internal cooling channel structure suitable for double-walled blade configurations was proposed. [Conclusions] Double-sided enhanced U-shaped channels can utilize the enhanced heat transfer effect of Coriolis force, resulting in

better cooling performance than traditional rotating U-shaped channels. There is a broad room for improvement in the internal cooling of gas turbine rotor blades.

**KEY WORDS:** gas turbine; turbine blade; internal cooling; rotating; Coriolis force

## 0 引言

燃气轮机具有输出功率大、体积小、启动快、使用寿命长等优点, 因此在生产和生活中得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>, 应用范围包括航空燃气轮机、重型燃气轮机、工业和船用燃气轮机以及微型燃气轮机等。提升燃气轮机的热效率和输出功率对提高燃气轮机性能具有关键性作用, 燃机高温透平的进口温度和压气机压比是评估燃机热效率的2个主要参数。目前, F级重型燃气轮机发动机在1 400℃左右的温度下运行, G/H/J级重型燃气涡轮发动机在1 500~1 600℃温度范围工作<sup>[1]</sup>。未来, 先进的燃气轮机高温透平设计在1 700℃的进口温度下运行, 以提高燃气轮机的热效率和功率输出<sup>[3]</sup>。由于透平进口温度远高于透平叶片金属允许的最高温度(约1 000℃), 因此必须对透平叶片进行外部和内部冷却, 以降低金属温度, 并保证叶片寿命<sup>[4-6]</sup>。

目前, 已有很多研究人员对透平叶片冷却技术进行了分析, 以帮助更多的工程师和学者更好地学习和研究。Iacovides<sup>[7]</sup>综述了采用计算流体力学对燃气轮机叶片冷却开展研究的进展情况。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51706116)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51706116).

Je-Chin 等人<sup>[8]</sup>总结了透平叶片内部冷却通道的研究发展, 包括不同形状的肋片、通道  $180^\circ$  弯头和组合冷却在静止工况下对传热的影响, 以及旋转对光滑和带肋通道的影响, 结果发现, 相比于带肋通道, 旋转对光滑通道的影响更显著。Ligrani<sup>[9]</sup>综述了 2013 年之前的肋片、柱肋、凹坑、突起以及组合冷却的性能发展, 发现目前这些结构的热性能与 2003 年之前相比并无明显变化, 但是对于传统冷却通道的传热性能研究更加详细深入, 关于边界层和加热条件对传热性能的影响研究更多, 变工况包括不同雷诺数  $Re$ 、旋转数  $R_o$  和浮升力数的研究越来越多。Jason<sup>[10]</sup>对透平叶片的冷却设计进行了总结。Wright 等人<sup>[11]</sup>综述了透平叶片内部冷却通道的强化换热方法, 并总结了旋转效应对冷却性能的影响。Bunker<sup>[12]</sup>归纳了透平冷却技术过去 50 年的发展, 并提出透平冷却技术的发展犹如动物的进化, 是一个从简单到复杂的过程。Ekkad 等人<sup>[13]</sup>总结了冷却结构的测量方法和试验台, 并对多种试验结果进行了总结, 为后续透平冷却技术的研究提供基础。Du 等人<sup>[14]</sup>总结了尾缘内部通道的传热研究, 发现柱肋、凹坑、突起、格栅常用于尾缘通道冷却。

蛇形通道结构广泛应用于透平叶片内部冷却, 从压气机中抽取的较低温冷却空气在蛇形通道中流动换热并降低叶片温度。在透平一级叶片中, 一级动叶需要在高温环境下进行高速旋转, 因此其不但要承受高温燃气带来的高温热负荷, 还要承受因旋转带来的各种应力, 因此对一级动叶的冷却设计提出了更高要求。相比于冲击冷却和柱肋冷却结构<sup>[15-17]</sup>, 在蛇形通道内的冷却气体通常受到旋转的影响更为显著, 因此, 在旋转蛇形通道内冷却气体的流动和换热特性也因旋转作用, 与静止工况下蛇形通道内冷却气体明显不同。因此, 研究旋转内部冷却通道的流动与换热特性对未来更进一步提升动叶内部冷却结构换热能力至关重要。

在旋转条件下, 科里奥利力(科氏力)、浮升力、冷却通道结构等因素都会影响内部通道的冷却性能, 基于此, 本文总结归纳了高温透平动叶内部冷却通道的研究现状与发展趋势。在此基础

上, 提出了一种适用于双层壁叶片构型的新型旋转内部冷却通道结构, 该双侧强化 U 形通道能够在两侧充分利用科氏力, 这指明了内部冷却结构发展的一个方向。

## 1 科氏力的影响

目前, 国内外对透平叶片内部冷却技术的研究已经开展了几十年, 在 20 世纪 80 年代末到 90 年代初, 旋转效应对内部冷却通道传热的影响逐渐被认识<sup>[18]</sup>。

与静止内部通道相比, 由于旋转引起的科氏力的影响, 旋转内部通道的流场和传热更为复杂。在 20 世纪 70 年代, 有学者<sup>[19-23]</sup>在没有加热的情况下对旋转的圆形或矩形通道进行了研究, 以揭示科氏力的影响, 结果表明, 在通道中存在着由科氏力引起的强烈二次流。图 1 是矩形光滑 U 通道中二次流和径向速度分布的概念图<sup>[24]</sup>。根据图 1, 在径向外流通道(第一通道)中, 因科氏力从通道的前缘面指向尾缘面, 形成因科氏力诱导的二次流。因此, 由于该二次流作用, 尾缘面附近的径向速度和传热均高于前缘面附近的径向速度和传热。而在径向内流通道(第二通道)中, 因科氏力从尾缘面指向前缘面, 导致二次流的方向相反。因此, 第二通道中前缘面附近的径向速度和传热均高于尾缘面附近的径向速度和传热。

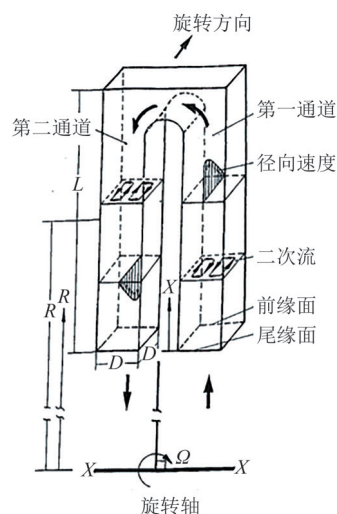


图1 矩形光滑 U 通道中二次流和径向速度分布的概念图  
Fig. 1 Conceptual diagram of secondary flow and radial flow profile in a rotating rectangular smooth U channel

Kukreja 等人<sup>[25]</sup>采用蔡升华技术分析光滑方形U通道前缘面和尾缘面上的传质分布,结果表明,科氏力提高了径向外流通道尾缘面的传热,但降低了径向内流通道前缘壁面的传质;然而,在径向内流通道中,传质趋势相反。Al-Qahtani 等人<sup>[26]</sup>采用雷诺平均方法对光滑矩形U通道中的流动和传热进行了数值分析,结论表明,科氏力诱导产生了通道内的二次流;科氏力在径向外流通道中推动流体从前缘面流向尾缘面,但在径向内流通道中将流体从尾缘面推向前缘面。Wagner 等人<sup>[27]</sup>、Hwang 等人<sup>[28]</sup>和 Yang 等人<sup>[29]</sup>得出了类似的结论,即旋转强化了径向外流通道尾缘面和径向内流通道前缘面的传热。Deng 等人<sup>[30]</sup>在前缘面上发现了临界旋转数,他们对于一个光滑方形U通道开展了实验研究并通过热电偶测量壁温,实验旋转数 $R_o$ 达2.08。结果表明,临界旋转数与无量纲位置参数 $X/D$ 有关,即临界旋转数与相应的 $X/D$ 的乘积等于常数。图2为不同旋转数下方形光滑U通道内速度分布图<sup>[30]</sup>。如图2所示,在第一通道中,当旋转数增加至临界旋转数时,前缘面附近开始流动分离;当旋转数高于临界旋转数时,前缘面附近发生流动分离,导致前缘面附近的传热得到强化。Qiu 等人<sup>[31]</sup>设计了一个旋转压力测量系统,以研究高旋转数下旋转光滑方形U通道的压降和传热。Mayo 等人<sup>[32]</sup>实验研究了不同的 $R_o$ 和雷

诺数 $Re$ 下带肋矩形通道的传热分布,采用稳态液晶测量壁温分布, $Re$ 在1 500~4 000,最大 $R_o$ 达0.12。结果表明,旋转效应对平均传热和面传热分布特征都有影响。Li 等人<sup>[33]</sup>揭示了在旋转工况下,尾缘面的传热是前缘面的4.3倍。Fabio 等人<sup>[34-35]</sup>利用瞬态液晶测量了近真机工况下, $Re$ 为21 000和 $R_o$ 为0.074时,尾缘面和前缘面的传热系数。Li 等人<sup>[36]</sup>的研究结果表明,旋转会抑制通道弯头处的传热。You 等人<sup>[37]</sup>采用粒子图像测速仪(particle image velocimetry, PIV)研究了科氏力对旋转带肋矩形通道中流场的影响,发现科氏力增大了前缘面附近的涡系,但抑制了尾缘面附近的涡系。

基于上述研究可知,科氏力强化径向外流通道尾缘面和径向内流通道前缘面的传热。此外,在高旋转数条件下,径向外流通道前缘面存在临界旋转数,其与相应位置的乘积为常数,而临界旋转数的存在可能是科氏力与通道内流体的法向压力梯度间的相互作用结果。除此之外,面传热测量技术也发展出从热电偶到瞬态液晶的测量方法,且PIV也逐渐成为测量旋转通道内流场特征的先进手段。

## 2 浮升力的影响

由于燃机透平动叶在高温条件下运行,因此研究旋转内部冷却通道时应考虑因加热带来的流动与传热影响。当旋转通道被加热时,通道内流体因温度分布不均匀而产生浮升力,导致通道内流场发生改变。早在20世纪五六十年代,一些学者<sup>[38-40]</sup>对浮升力的影响进行了实验研究,发现浮升力的影响主要取决于通道内流体流动方向,且浮升力会显著改变通道的传热。图3是旋转无加热条件下,科氏力和浮升力对径向速度分布影响的概念图<sup>[24]</sup>。根据图3,在浮升力的作用下,第二通道中的速度分布更均匀,但增大了第一流通道尾缘面附近的流体流速。在20世纪80年代出现了关于科氏力与浮升力间相互作用的研究<sup>[41-44]</sup>,但各研究结果间的一致性不强。

Parsons 等人<sup>[45]</sup>研究了旋转方形U通道尾缘面和前缘面的传热系数,结果表明,随着浮力数的

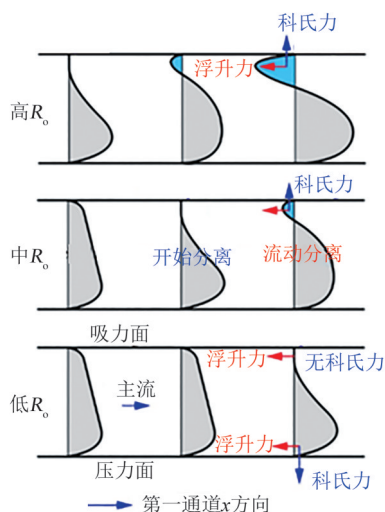


图2 不同旋转数下方形光滑U通道内速度分布

Fig. 2 Flow profiles in a square smooth U channel under different rotation numbers



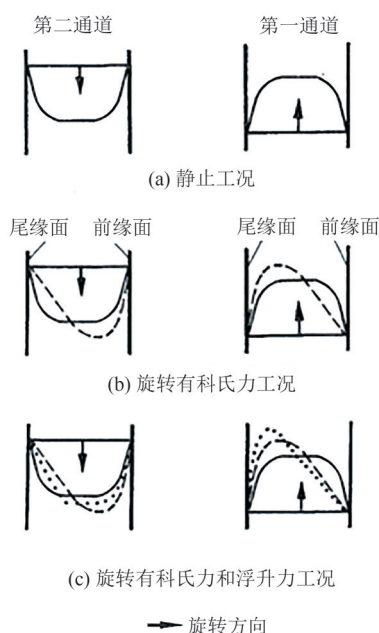


图3 旋转无加热条件下, 科氏力和浮升力对径向速度分布影响的概念图

Fig. 3 Conceptual diagram about the influence of Coriolis force and buoyancy on radial flow profile under non-heated rotating condition

增加, 第二通道尾缘面的传热系数增加, 而前缘面的传热系数降低。Abdel-Wahab 等人<sup>[46]</sup>采用大涡模拟研究了浮升力对旋转带肋通道流场和传热的影响, 研究发现, 浮升力能加速尾缘面附近的湍流, 实现强化传热, 但对前缘面换热影响较小。Wang 等人<sup>[47]</sup>对旋转单侧布肋通道的传热和流场进行了数值研究, 结果发现, 在静止和非常低浮力的情况下, 传热和流场受浮升力的影响较小, 而在高浮升力的情况下, 该通道传热和流场受浮升力影响显著。You 等人<sup>[48]</sup>利用 PIV 对通道四面都加热的旋转通道, 分析了其速度分布和雷诺剪切应力, 首次捕捉到了前缘面上的流动分离, 并认为浮升力是导致该流动分离的原因。Tao 等人<sup>[49]</sup>也观察到了临界旋转数, 并认为临界旋转数是由科氏力与流体的法向压力梯度间相互作用产生的。Andrea<sup>[50]</sup>实验研究了壁面加热条件对旋转带肋通道传热性能的影响, 发现在静止条件下, 加热条件对传热分布没有影响, 而在旋转条件下, 由于浮升力效应, 不同加热条件下的传热分布有所不同。

综上所述, 浮升力在旋转条件下对旋转通道

流动传热有显著影响, 而在静止条件下影响较小。此外, 旋转条件下, 由于浮升力作用, 不同的加热条件会对旋转通道壁面传热分布有不同的影响。

### 3 冷却通道结构的影响

科氏力和浮升力是影响叶片内部旋转冷却通道流场分布和传热性能的主要原因, 同时, 冷却通道的结构对通道的性能也起到至关重要的作用。

在旋转通道的研究早期, 许多研究者对圆形截面冷却通道进行了研究, 以揭示冷却通道的传热性能<sup>[51]</sup>。动叶中传统蛇形内冷通道的截面概念示意图<sup>[27]</sup>如图4所示。图中数值为宽高比(aspect ratio, AR), 可以看出, 靠近前缘和尾缘的冷却通道的横截面可以建模为矩形, 中间部分的通道可以简化为正方形, 因此, 越来越多的学者更加关注矩形和正方形截面的光滑通道性能。

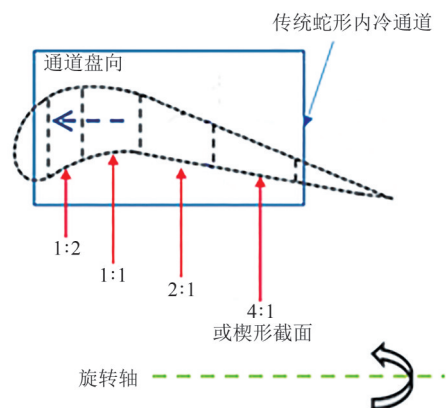


图4 动叶中传统蛇形内冷通道的截面概念示意图

Fig. 4 Schematic cross-section diagram of conventional serpentine internal channel in a blade

Chen 等人<sup>[52]</sup>和 Soong 等人<sup>[53]</sup>实验研究了 AR 为 1:2、1:1、2:1 和 5:1 的旋转矩形截面通道, 结果表明, 具有不同 AR 的旋转通道传热性能不同, AR 为 1:1 的通道具有最佳的传热性能。Su 等人<sup>[54]</sup>研究了 AR 为 1:1、1:2 和 1:4 的 U 形旋转光滑通道的流场和传热特性, 发现对于 3 种不同宽高比的通道, 随着雷诺数的增加, 传热强化性能均会下降。

Liu 等人<sup>[55]</sup>实验研究了一种带肋楔形截面旋转通道, 该通道结构同时布置有侧向出流, 适用于动叶尾缘冷却。结果表明, 尽管肋片强化了通道传

热,但侧向出流对通道传热分布起更主要作用。Tao等人<sup>[56]</sup>实验研究了光滑楔形截面旋转通道的流动传热特性,发现通道方向对楔形截面旋转通道影响显著,这是由于科氏力的分量对通道内流场分布影响显著。Li等人<sup>[36,57]</sup>提出了一种具有2个入口的楔形截面旋转通道,与传统的单入口楔形截面旋转通道相比,他们在传热低的位置设计了一个额外的通道入口以强化通道的传热。结果表明,通道高半径位置的传热得到了增强,补偿了旋转引起的传热恶化。Deng等人<sup>[58]</sup>研究了一种具有冲击冷却结构的旋转通道,发现该通道可以强化尾缘面的传热,但弱化了前缘面的传热。

Ajay<sup>[59]</sup>数值研究了一种四通道蛇形通道,该通道截面形状设计基于真实叶片的曲率。结果表明,该通道旋转和静止条件下的传热能力相似,且旋转工况下科氏力的影响不显著。Bharath等人<sup>[60]</sup>分析了肋片排布对冷却通道传热和流动特性的影响,发现V形肋片显著强化了直通道的传热。Willet等人<sup>[61]</sup>研究了具有柱肋结构的旋转冷却通道性能,结果表明,柱肋降低了旋转对通道的影响。Chen等人<sup>[62]</sup>实验研究了具有交错离散V形肋片的旋转U形通道,该通道的进口通道截面宽高比为4:1,出口通道的宽高比为2:1,并发现,交错离散V形肋片的U形通道传热性能优于传统V形肋片U形通道。Izzet等人<sup>[63]</sup>研究了旋转条件下渐缩通道的压损和传热性能。结果表明,该通道强化了前缘面和尾缘面的传热性能。

综上所述,对旋转内部冷却通道结构的研究主要集中在具有不同宽高比的矩形和楔形的通道横截面上,其主要原因是具有这些截面结构的通道可很好地适应燃气轮机叶片的形状。

#### 4 燃气轮机高温透平动叶内部冷却通道的发展趋势

尽管目前传统旋转U形通道在透平叶片中得到了广泛应用,但旋转引起的科氏力依旧导致传统旋转U形通道的径向外流通道前缘面和径向内流通道尾缘面上的传热恶化。为获得更高的透平进口温度,并在旋转通道的前缘面和尾缘面上实现更好的传热性能,许多学者<sup>[64-66]</sup>提出了“双层

壁”叶片概念,即一种比传统叶片壁面更薄的叶片结构。由于双层壁叶片的壁面厚度更薄,因此热阻较低,从而提高叶片内冷气和叶片外主流高温燃气之间的传热效率,有利于高温透平叶片冷却。因此,构造了适用于双层壁叶片的内部冷却旋转通道构型,如图5(b)和(c)所示,并与传统U形通道的传热性能进行相同旋转数条件下的数值模拟对比研究。图5是3种旋转通道在动叶内布置的几何概念图。在图5中,蓝色箭头表示通道内冷却空气的流动方向。

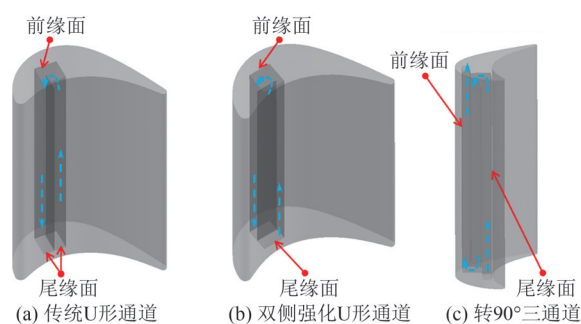


图5 3种旋转通道在动叶内布置的几何概念图

Fig. 5 Geometric conceptual diagram of three rotating cooling channels arranged inside blades

图6是传统U形通道和双侧强化U形通道与转90°三通道的前缘面和尾缘面平均努塞尔数比的对比曲线图。

根据图6(a),双侧强化U形通道前缘面的传热优于传统U形通道和转90°三通道,原因是双侧强化U形通道中科氏力的方向指向前缘面,增强了前缘面附近的湍动能和传热性能。基于图6(b),双侧强化U形通道和转90°三通道在尾缘面的传热性能相似。当 $X/D$ 低于7时,双侧强化U形通道和转90°三通道的传热能力均高于传统U形通道;当 $X/D$ 在7~8.5时,传统U形通道的传热性能高于双侧强化U形通道和转90°三通道,原因在于后2个通道在此处发生流动分离。尽管双侧强化U形通道在通道顶端弯头区域的 $Nu/Nu_0$ 值低于传统U形通道,但通道顶端弯头区的低传热面积明显小于直通部分面积。因此,与传统U形通道相比,双侧强化U形通道的尾缘面和前缘面的整体传热能力得到了提高。此外,双侧强化U形通道是一种概念新颖的动叶内部冷却结构设计,尽管它尚

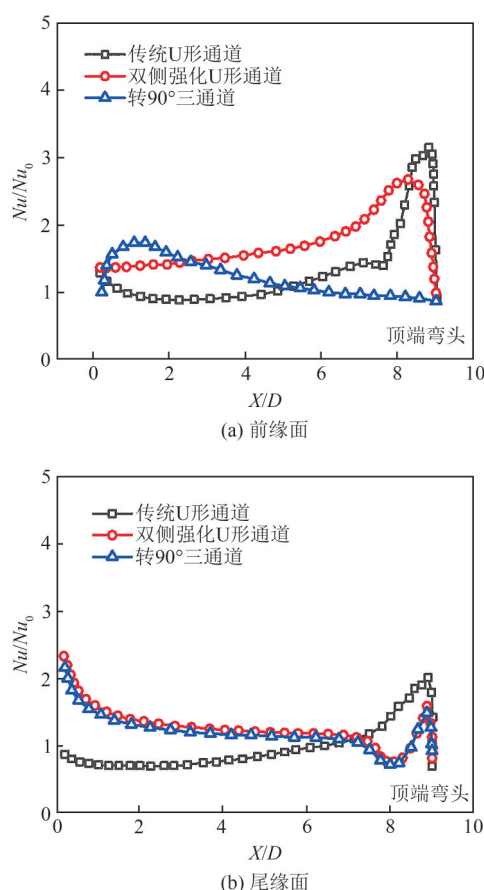


图6 传统U形通道、双侧强化U形通道和转90°三通道的  
前缘面和尾缘面平均努塞尔数比的对比曲线图

Fig. 6 Comparison curves of average Nusselt number ratio on the leading and trailing walls of conventional U channel, bifacial-enhanced U channel, and 90° three-channel channel

未应用于现有叶片，但具有良好的强化传热能力，且在未来新型叶片的内部冷却应用中具有广阔的应用前景和良好的发展趋势。

## 5 结论

通过综述透平叶片旋转内部冷却通道的研究现状，阐述了科氏力、浮升力、通道结构对旋转内部冷却通道流动与传热的影响。介绍了旋转内部冷却通道的新型结构设计，并对提出的双侧强化U形通道和转90°三通道与传统U形通道开展了数值模拟传热对比研究。主要结论如下：

1) 浮升力使径向内流通道中的流场分布更均匀，且浮升力增强了径向外流通道尾缘面附近的流动。此外，浮升力在旋转条件下对通道有显著

影响，但在静止条件下作用较小。

2) 根据叶片的形状，可以将内部冷却通道的截面形状简化为矩形、方形和楔形。主要原因是具有这些横截面的内部冷却通道更适用于燃机高温透平叶片形状。

3) 提出了“双侧强化U形通道”和转90°三通道的结构，结果表明，双侧强化U形通道在前缘面和尾缘面上都表现出比传统U形通道更好的传热性能。因此，双侧强化U形通道在未来高温透平动叶内部冷却通道应用中具有广阔的前景。

## 参考文献

- [1] 杨旸, 李耀强, 张金琦. 基于数值方法的燃气轮机贫预混旋流燃烧室单头部结构设计[J]. 发电技术, 2023, 44(5): 712-721.  
YANG Y, LI Y Q, ZHANG J Q, et al. Design of dome structure for a lean premixed swirled combustor of gas turbine based on the numerical method[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5): 712-721.
- [2] 崔则阳, 孔祥玲, 付经伦, 等. 一种基于图像的燃气轮机叶型参数测量方法[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 106-112.  
CUI Z Y, KONG X L, FU J L, et al. An image-based turbine blade parameter inspection method[J]. Power Generation Technology. 2024, 45(1): 106-112.
- [3] JIANG H D, REN J, LI X Y, et al. Status and development trend of the heavy duty gas turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5096-5102.
- [4] HAN J C, DUTTA S, EKKAD S. Gas turbine heat transfer and cooling technology[M]. Florida, US: CRC Press: 156-158.
- [5] HAN J C. Fundamental gas turbine heat transfer[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2013, 5(2): 021007.
- [6] GLADDEN H J, SIMONEAU R J. Review and assessment of the database and numerical modeling for turbine[C]//33rd ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. Amsterdam: National Aeronautics and Space Administration, 1988, 2: 39-55.
- [7] IACOVIDES H. Computational fluid dynamics applied to internal gas-turbine blade cooling: a review[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 1995, 16(6): 454-470.

- [8] JE-CHIN H, DUTTA S. Recent developments in turbine blade internal cooling[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2001, 934(1): 162-178.
- [9] LIGRANI P. Heat transfer augmentation technologies for internal cooling of turbine components of gas turbine engines[J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2013(3): 1-32.
- [10] JASON T, DOUGLAS S, JAMES B, et al. State-of-the-art cooling technology for a turbine rotor blade[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2018, 140(7): 071007.
- [11] WRIGHT L, HAN J C. Heat transfer enhancement for turbine blade internal cooling[J]. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2013, 21(2/3): 111-140.
- [12] BUNKER R. Evolution of turbine cooling[C]//ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Charlotte, USA: ASME, 2017: 189-201.
- [13] EKKAD S V, SINGH P. Detailed heat transfer measurements for rotating turbulent flows in gas turbine systems[J]. *Energies*, 2020, 14(1): 39-52.
- [14] DU W, LUO L, JIAO Y, et al. Heat transfer in the trailing region of gas turbines: a state-of-the-art review [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 199: 117614.
- [15] SAFI A, HAMDAN M O, ELNAJJAR E. Numerical investigation on the effect of rotation on impingement cooling of the gas turbine leading edge[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, 59(5): 3781-3797.
- [16] MATTERN C, HENNECKE D K. The influence of rotation on impingement cooling[C]//ASME 1996 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. Birmingham, US: ASME, 1996: 96-101.
- [17] SAHIN I, CHEN I, WRIGHT L M, et al. Heat transfer in rotating, trailing-edge, converging channels with smooth walls and pin-fins[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2021, 143(7): 1-36.
- [18] HAN J C. Turbine blade cooling studies at Texas A&M university: 1980-2004[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2014, 20(2): 161-187.
- [19] JOHN E H. Instability and secondary motion in a rotating channel flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1971, 45(2): 341-351.
- [20] JOHNSTON J P, HALLEENT R M, LEZIUS D K. Effects of spanwise rotation on the structure of two-dimensional fully developed turbulent channel flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1973, 56(3): 156-167.
- [21] MOORE J. Effects of Coriolis on turbulent flow in rotating rectangular channels[D]. Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1967.
- [22] ROTHE P H, JOHNSTON J P. Free shear layer behavior in rotating systems[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1979, 101(1): 117-126.
- [23] WAGNER R E, VELKOFF H Ret al. Measurements of secondary flows in a rotating duct[J]. *Journal of Engineering for Power*, 1972, 94(4): 261-270.
- [24] HAN J C, ZHANG Y M, KALKUEHLER K, et al. Uneven wall temperature effect on local heat transfer in a rotating two-pass square channel with smooth walls[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1993, 115(4): 912-920.
- [25] KUKREJA R T, PARK C W, LAU S C. Heat (mass) transfer in a rotating two-pass square channel-part II: local transfer coefficient, smooth channel[J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 1998, 4(1): 1-15.
- [26] AL-QAHTANI M, JANG Y J, CHEN H C, et al. Flow and heat transfer in rotating two-pass rectangular channels (AR=2) by Reynolds stress turbulence model [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2002, 45(9): 1823-1838.
- [27] WAGNER J H, JOHNSON BV, HAJEK T J. Heat transfer in rotating passages with smooth walls and radial outward flow[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1991, 113(1): 2927736.
- [28] HWANG G J, CHEN R K. Experimental studies and correlations of convective heat transfer in a radially rotating serpentine passage[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1997, 119(3): 460.
- [29] YANG S F, WU H W, HAN J C, et al. Heat transfer in a smooth rotating multi-passage channel with hub turning vane and trailing-edge slot ejection[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2017, 109: 1-15.
- [30] DENG H W, QIU L, TAO Z, et al. Heat transfer study in rotating smooth square U-duct at high rotation numbers[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2013, 66: 733-744.
- [31] QIU L, DENG H, SUN J, et al. Pressure drop and heat transfer in rotating smooth square U-duct under high rotation numbers[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2013, 66: 543-552.
- [32] MAYO I, ARTS T, EL-HABIB A, et al. Two-dimensional heat transfer distribution of a rotating ribbed channel at different reynolds numbers[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2014, 137(3): 031002.
- [33] LI H, YOU R, DENG H, et al. Heat transfer



- investigation in a rotating U-turn smooth channel with irregular cross-section[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 96: 267-277.
- [34] FABIO P, LUCA F, ALESSANDRO A, et al. Rotating heat transfer measurement on a multi-pass internal cooling channel-I rig development[C]//ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Seoul, South Korea: ASME, 2016: 1116-1124.
- [35] FABIO P, LUCA F, ALESSANDRO A, et al. Rotating heat transfer measurement on a multi-pass internal cooling channel-II experimental tests[C]//ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Seoul, South Korea: ASME, 2016: 1124-1135.
- [36] LI Y, DENG H W, TAO Z, et al. Heat transfer characteristics in a rotating trailing edge internal cooling channel with two coolant inlets[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 105: 220-229.
- [37] YOU H L, LI H W, YOU R Q, et al. Experimental investigations of turbulent flow in a rotating ribbed channel in terms of the effect of coriolis force[C]//ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Phoenix, US: ASME, 2019: 90757.
- [38] ECKERT E R G, DIAGUILA A J, CURREN A N, et al. Experiments on Mixed-free and forced-convective heat transfer connected with turbulent flow through a short tube[J]. *Technical Report Archive & Image Library*, 1953, 12: 006123.
- [39] METAIS B, ECKERT E R G. Forced, mixed, and free convection regimes[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1964, 86(2): 295-304.
- [40] BRUNDRETT E, BURROUGHS P R. The temperature inner-law and heat transfer for turbulent air flow in a vertical square duct[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 1967, 10(9): 1133-1142.
- [41] GUIDEZ J. Study of the convective heat transfer in a rotating coolant channel[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1989, 111(1): 43-51.
- [42] CLIFFORD R J. Rotating heat transfer investigations on a multipass cooling geometry[J]. *Heat Transfer and Cooling in Gas Turbines*, 1985, 12: 21-28.
- [43] MORRIS W D, AYHAN T. Observations on the influence of rotation on heat transfer in the coolant channels of gas turbine rotor blades[J]. *ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1979, 193: 303-311.
- [44] MORRIS W D. Heat transfer and fluid flow in rotating coolant channels[M]. New York: Wiley, 1981.
- [45] PARSONS J A, JE-CHIN H, YUMING Z. Wall heating effect on local heat transfer in a rotating two-pass square channel with 90° rib turbulators[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1994, 37: 1411-1420.
- [46] ABDEL-WAHAB S, TAFTI D K. Large eddy simulation of flow and heat transfer in a 90 deg ribbed duct with rotation: effect of coriolis and centrifugal buoyancy forces[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2004, 126(4): 627-636.
- [47] WANG Z, CORRAL R. Effect of uneven wall heating conditions under different buoyancy numbers for a one side rib-roughened rotating channel[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2017, 139(11): 1-10.
- [48] YOU R Q, LI H, TAO Z, et al. PIV measurements of turbulent flows in a smooth channel with the heated boundary under rotation conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 123: 1021-1033.
- [49] TAO Z, LI H W, WU H J, et al. Interaction between the primary flow fields and the secondary flow fields under rotating condition[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 84: 217-230.
- [50] ANDREA L. Heat transfer characterization inside a rotating rib roughed cooling channel with multiple heated wall[C]//ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. London, United Kingdom: ASME, 2020: 15129.
- [51] METZGER D E, STAN R L. Entry region heat transfer in rotating radial tubes[J]. *Journal of Energy*, 1977, 1(5): 297-300.
- [52] CHEN R K, HWANG G J. Aspect ratio effect on convective heat transfer of radially outward flow in rotating rectangular ducts[J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 1994, 1(1): 1-18.
- [53] SOONG C Y, LIN S T, HWANG G J, et al. An experimental study of convective heat transfer in radially rotating rectangular ducts[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1991, 113(3): 604-613.
- [54] SU G G, CHEN H C, HAN J C, et al. Computation of flow and heat transfer in rotating two-pass rectangular channels (AR=1:1, 1:2, and 1:4) with smooth walls by a Reynolds stress turbulence model[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(26): 5665-5683.
- [55] LIU Y H, HUB M, HAN J C. High rotation number effect on heat transfer in a trailing edge channel with



- tapered ribs[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2012, 33(1): 182-192.
- [56] TAO Z, DENG H. Heat transfer in a rotating smooth wedge-shaped channel with lateral fluid extraction[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 87: 198-205.
- [57] LI Y, XU G Q, DENG H W, et al. Effects of coolant mass flow rate ratio on heat transfer in a two-inlet rotating wedge-shaped channel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 96: 353-361.
- [58] DENG H W, WANG Z, WANG J, et al. Flow and heat transfer in a rotating channel with impingement cooling and film extraction[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 180: 121751.
- [59] AJAY S. Effect of blade profile on four-passage serpentine configuration designed to negate coriolis effect on heat and fluid flow[C]//ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Phoenix, U S: ASME, 2019: 91718.
- [60] BHARATH V R, PRASHANT S, SRINATH V E. Numerical investigation of turbulent flow and heat transfer in two-ribbed channels[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 112: 31-43.
- [61] WILLET F T, BERGLES A E. Heat transfer in rotating narrow rectangular pin-fin ducts[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 25(7): 573-582.
- [62] CHEN I L, SAHIN I. Heat transfer in a rotating, two-pass, variable aspect ratio cooling channel with profiled C-shaped ribs[C]//ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. London, United Kingdom: ASME, 2020: 16216.
- [63] IZZET S, CHEN I L, WRIGHT L M, et al. Heat transfer in rotating, trailing edge, converging channels with smooth walls and pin-fins[C]//ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. London, United Kingdom: ASME, 2020: 14440.
- [64] MURRAY A V, IRELAND P T, ROMERO E, et al. Experimental and computational methods for the evaluation of double-wall, effusion cooling systems[J]. Journal of Turbomachinery, 2020, 142(11): 1-16.
- [65] SERGIY R, ARTUSHENKO A, KRAVCHENKO I, et al. Experimental investigation of two competitive pressure turbine blade cooling systems[C]//ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Charlotte, USA: ASME, 2017: 64915.
- [66] JASON T, STRAUB D, BLACK J, et al. State of the art cooling technology for a turbine rotor blade[C]//ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Charlotte, USA: ASME, 2017: 64728.
- 
- 收稿日期: 2024-07-15。  
修回日期: 2024-09-20。  
作者简介:
- 
- 任静
- 任静(1970), 女, 博士, 教授, 研究方向为燃气轮机冷却机制和优化方法, 燃气轮机空气系统流热耦合特性, renj@tsinghua.edu.cn;
- 
- 李雪英
- 李雪英(1985), 女, 博士, 副研究员, 研究方向为燃气轮机和航空发动机涡轮冷却, li\_xy@tsinghua.edu.cn。
- (责任编辑 辛培裕)