

# 燃气轮机轮缘密封气动技术研究进展

高杰<sup>1,2,3</sup>, 黄镜玮<sup>1</sup>, 杜玉锋<sup>1</sup>, 霍东晨<sup>1</sup>, 付维亮<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 重庆大学 博士后科研流动站, 重庆 401120;

3. 中国船舶集团有限公司 重庆江增船舶重工有限公司 博士后科研工作站, 重庆 402263)

**摘 要:** 为明确轮缘密封技术发展现状及趋势,在相关文献调研基础上,从轮缘密封燃气入侵的预测模型、轮缘密封不稳定流动机制、涡轮轮缘密封燃气入侵特性及流动机理、轮缘密封出流与涡轮主流的相互干扰、涡轮轮缘密封设计及气动性能改进等方面对燃气轮机轮缘密封气动技术的研究进展进行综述。简要总结了轮缘密封流动的常用研究方法与研究结果,并指出未来除需进一步完善多参数耦合影响下的多种封严结构燃气入侵理论预测模型,强化涡轮高参数试验及高精度数值计算方法外,还应在变工况条件下的旋转诱导入侵、轮缘密封间干扰和封严出流与主流非定常交互演化机制等方面开展更深入的细致研究,并在此基础上探索高性能轮缘密封结构设计优化技术。另外,强化气热环境下的封严出流对涡轮冷却特性的影响研究,发展考虑封严出流作用的涡轮低维度气动设计技术也是轮缘密封技术发展的重要方向。

**关 键 词:** 轮缘密封; 不稳定流动; 燃气入侵; 封严特性; 结构设计

**中图分类号:** V19

**文献标志码:** A

## Advances in rim seal aerodynamic technology for gas turbines

GAO Jie<sup>1,2,3</sup>, HUANG Jingwei<sup>1</sup>, DU Yufeng<sup>1</sup>,  
HUO Dongchen<sup>1</sup>, FU Weiliang<sup>1</sup>

(1. College of Power and Energy Engineering,  
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Center for Post-Doctoral Studies,  
Chongqing University, Chongqing 401120, China;

3. Center for Post-Doctoral Research,  
Chongqing Jiangjin Shipbuilding Industry Company Limited,  
China State Shipbuilding Corporation Limited, Chongqing 402263, China)

**Abstract:** In order to clarify the development status and trend of rim seal technology based on the research of relevant literatures, the development of the research about gas turbine rim seal aerodynamic technology was reviewed in five aspects: the prediction model of gas intrusion for rim seals, the unstable flow mechanism for rim seals, gas intrusion characteristics and flow mechanisms for turbine rim seals, the mutual interaction between the rim seal flow and the turbine mainstream, and turbine rim seal design and aerodynamic perform-

**收稿日期:** 2020-06-17

**基金项目:** 国家自然科学基金(51779051, 51979052); 航空动力基金(6141B09050392); 国家科技重大专项(2017-III-0010-0036)

**作者简介:** 高杰(1985—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事叶轮机械气动热力学研究。

**通信作者:** 付维亮(1992—),男,博士生,主要从事叶轮机械气动热力学研究。E-mail: fuweil@hrbeu.edu.cn

**引用格式:** 高杰,黄镜玮,杜玉锋,等. 燃气轮机轮缘密封气动技术研究进展[J]. 航空动力学报, 2021, 36(2): 284-299. GAO Jie, HUANG Jingwei, DU Yufeng, et al. Advances in rim seal aerodynamic technology for gas turbines[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(2): 284-299.

ance improvement. The common research methods and research results of rim seal flow were briefly summarized. The research result show that in the future, it is necessary to further improve the prediction model of gas intrusion theory of multiple seal structures under the influence of multi-parameter coupling, strengthen the turbine high parameter experiment and high-precision numerical calculation method. Besides, more in-depth and detailed research should be carried out on rotation-induced invasion under variable operating conditions, interference between rim seals, and unsteady interaction evolution mechanism between seal out-flow and mainstream, and on this basis, it's imperative to explore the design optimization technology of high-performance rim seal structure. In addition, strengthening the research on the influence of the purge flow under the air-heat environment on the cooling characteristics of the turbine, and the development of turbine low-dimensional aerodynamic design technology considering the purge flow effect is also an important direction for the development of rim seal technology.

**Key words:** unstable flow; gas intrusion; seal characteristics; structural design

轮缘密封(图 1)作为燃气轮机二次空气系统的重要部件之一,其安装在涡轮转静盘腔的顶部边缘处,通过增加高温燃气侵入盘腔的流动阻力,并结合着冷气从盘腔内向涡轮主通道喷出来抑制燃气入侵,防止由涡轮盘过热而引起的安全性问题,但是过多的冷气进入主流,对主流造成扰动,降低涡轮热功转换效率<sup>[1]</sup>。合理的轮缘密封结构设计对于减小冷气用量、提高涡轮效率水平具有十分显著的效果。因此对涡轮轮缘密封间隙处燃气入侵机理、封严特性及其作用机制和影响因素等方面的研究有着十分重要的实际意义,对于改进轮缘密封结构设计,提高涡轮效率和安全性具有重要的工程应用价值。

涡轮轮缘密封流气动问题比较复杂,且受多种参数制约。同时,由于轮缘密封间隙及转静盘腔空间狭小,工作环境也比较恶劣,很难进行高精

度试验测试与数值计算。长期以来,涡轮轮缘密封流气动问题研究一直是燃气轮机领域研究的一个热点,也同时是一个作用机理与影响机制尚未认清楚的难点问题<sup>[2-3]</sup>。迄今,国内外研究人员已采用试验测量、数值计算和理论分析等多种研究手段开展了大量的研究<sup>[4-5]</sup>。早期研究集中在没有主流的转静盘腔结构,在这种没有主流的假设条件下,发生的入侵现象主要是由转盘的泵吸效应引起,即“旋转诱导燃气入侵”。随后对燃气入侵问题的研究主要集中在有主流的情况,此时为“主流与旋转联合诱导入侵”。近年来,在对轮缘密封的封严特性和作用机理有一定认识的基础上,国内外研究人员逐步开展了轮缘密封结构设计方面的工作。

本文主要综述国内外近十多年来燃气轮机轮缘密封气动技术方面的研究情况,详细论述轮缘密封燃气入侵的预测模型、轮缘密封不稳定流动机制、涡轮轮缘密封燃气入侵特性及流动机理、轮缘密封出流与涡轮主流的相互干扰、涡轮轮缘密封设计和气动性能改进等方面的研究进展,并简要总结燃气轮机轮缘密封流的常用研究方法,力图梳理出燃气轮机轮缘密封气动技术的发展脉络,最后对未来的研究重点和发展趋势进行展望。

1 轮缘密封燃气入侵的预测模型

为了给燃气轮机轮缘密封结构的优化设计提供可靠的数据支撑,涡轮设计者们一直希望有一套系统的轮缘密封燃气入侵预测理论来支持确定涡轮部件的最小封严冷气量,其目的是使最小封

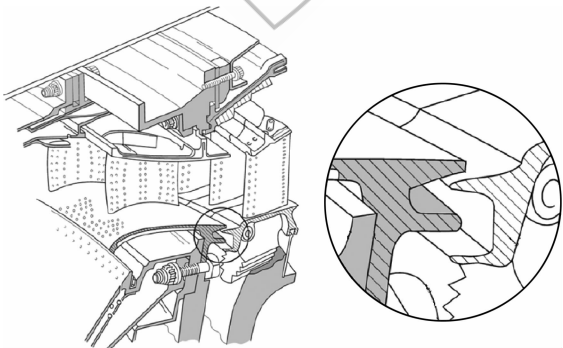


图 1 典型涡轮部件及其轮缘密封结构<sup>[2]</sup>  
Fig.1 Typical turbine components and their rim seal structure<sup>[2]</sup>



步研究完善。

2 轮缘密封不稳定流动机制

正如文中第 1 节所述,轮缘密封燃气入侵高精度预测模型的建立需要首先对燃气入侵现象的形成机理和作用机制有清晰的认识。而为了分析燃气入侵这种固有的非定常不稳定流动现象,朱莉娅等<sup>[17]</sup>基于相似理论,提出了一种研究轮缘密封间隙处流动规律的方法,并借助于全环定常数值计算模型,分析了转盘旋转、封严冷气、外环主流对不稳定流动的影响,研究发现:随着这三种因素的相对强度变化,封严间隙处呈现燃气沿静盘入侵(旋转诱导)、燃气基本不入侵(封严冷气诱导)和燃气沿动盘入侵(主流诱导)三种流动形式,因此可以推测出只有当动盘旋转、封严冷气和外环主流的作用处于相对平衡状态时,才能有效阻止燃气入侵。

对于典型的轮缘密封结构内的流动,一般认为是由转盘的泵吸效应引起,而最初的研究则是从封闭的轮缘密封腔开始。Wang 等<sup>[18]</sup>的非定常雷诺平均计算结果、Gao 等<sup>[19]</sup>的斜向轮缘密封旋转盘腔试验以及 Beard、Gao 等<sup>[20-23]</sup>的大涡模拟计算结果指出:旋转诱导轮缘密封呈现出固有不安定的流动特性,在轮缘密封间隙区域产生了一系列大尺度涡结构(图 3,图中量符号意义参见文献<sup>[22]</sup>),其沿周向以低于转子的转速传播;基于快速傅里叶变换与互相关分析方法,获得了大尺度涡结构的数量、转速与特征频率,这为深入理解轮缘密封非定常流动问题提供了机理支撑。

随后,Boudet 等<sup>[24]</sup>和 Rabs 等<sup>[25]</sup>针对有简化的均匀主流影响下的涡轮轮缘密封流问题进行了非定常计算研究后指出:上述轮缘密封间隙处的大尺度涡结构是由“类开尔文-亥姆霍兹不稳定性”所诱导,且外部主流对这些开尔文-亥姆霍兹涡的非定常性有一定的抑制作用。

在以上研究的基础上,研究人员逐步开展了轮缘密封结构对不稳定流动机理及封严特性影响的研究。周昆原等<sup>[26]</sup>、Liu 等<sup>[27]</sup>和高杰等<sup>[28]</sup>的非定常数值研究指出:不同轮缘间隙区域处的流动不稳定机制是类似的(图 4),但不稳定涡结构的动力学特性,包括涡结构数、涡旋转速度以及旋涡频率是不同的,从而产生了不同的封严效率;总体上,旋转诱导斜向轮缘密封的封严效率优于轴向与径向密封。

需要注意的是,鉴于在实际发动机涡轮部件

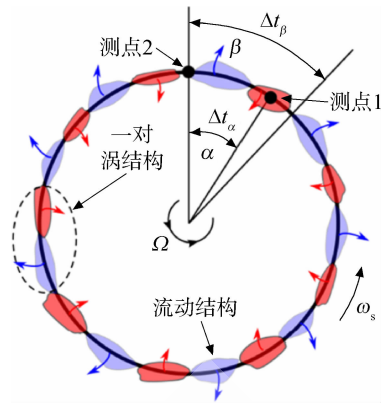


图 3 轮缘密封间隙区域流动结构示意图<sup>[22]</sup>

Fig. 3 Flow structure diagram of rim seal clearance area<sup>[22]</sup>

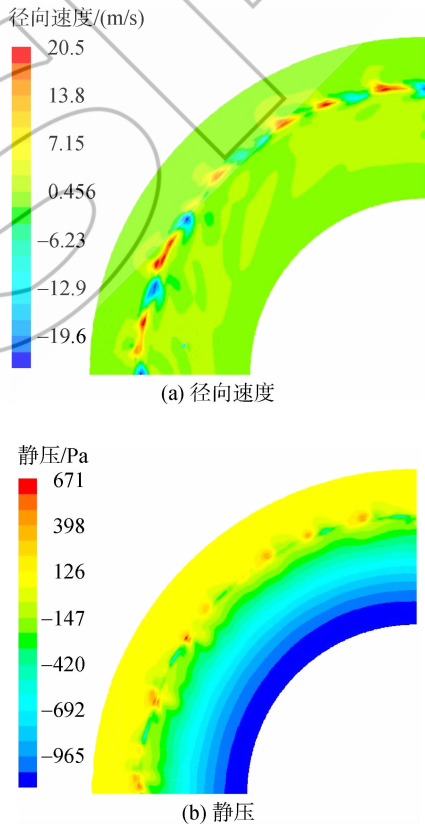


图 4 轴向轮缘密封轴向中截面径向速度及静压瞬时分布<sup>[28]</sup>

Fig. 4 Radial velocity on axial midsection of axial rim seal and instantaneous distribution of static pressure<sup>[28]</sup>

中,主流诱导燃气入侵一般占据主导地位,因而有关旋转诱导燃气入侵的研究相对较少,且比较基础。虽然对轮缘间隙区域的流动不稳定机理有清晰认识,但对旋转影响下不同封严结构的封严特性与封严效率定量预测还缺乏深入研究。

### 3 涡轮轮缘密封燃气入侵特性及流动机理

燃气轮机涡轮主流高温燃气通过静叶片后,受到静叶尾迹和动叶前缘势流的共同影响,将会在轮缘密封顶部区域形成沿周向交替分布的高低压流动分布,依赖于不同的轮缘密封结构(参见图 5 简化结构),将产生不同的燃气入侵机制和封严特性。

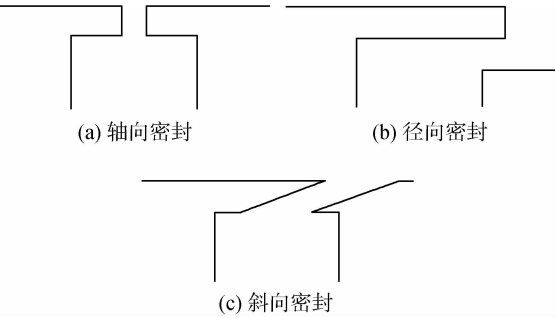


图 5 三种典型的轮缘密封简化结构  
Fig. 5 Three typical simplified rim seals

#### 3.1 轴向密封

轴向轮缘密封的结构最为简单,也常被国内外研究人员采用进行基础研究。Hills 等<sup>[29]</sup>、Cao 等<sup>[30]</sup>、Gentilhomme 等<sup>[31]</sup>、Jakoby 等<sup>[32]</sup>、吴康等<sup>[33]</sup>、张灵俊等<sup>[34]</sup>和廖高良等<sup>[35]</sup>采用非定常数值计算和涡轮动态试验等方法研究了涡轮级环境下轴向轮缘密封的燃气入侵特性及流动机制(图 6,图中  $p$  为静压,  $p_{\text{ref}}$  为参考静压,  $p_{\text{ref}}=230\text{ kPa}$ )。研究发现:与主流周向速度分量相关联的惯性效应对主流燃气入侵的程度有重要影响,对于更大的轴向间隙宽度来说燃气入侵更为严重,不过增加封严冷气量有利于减小轮缘间隙区域流动的不稳定性,即燃气入侵区域随着封严冷气量的增加而逐渐缩小。

张晶辉和马宏伟<sup>[36]</sup>、陶加银等<sup>[37]</sup>、Wang 等<sup>[38]</sup>和 Pogorelov 等<sup>[39]</sup>的精细非定常雷诺平均和大涡模拟计算研究指出:实际涡轮轮缘间隙内存在旋转的燃气入侵与出流结构,静叶尾迹和动叶前缘附近势流的瞬态干涉效应和盘腔中的非定常压力分布会强化主流燃气入侵。进一步地,Cho 等<sup>[40]</sup>还仔细检查了燃气入侵对涡轮盘的影响,并指出:燃气入侵对涡轮盘的影响滞后于其对当地流动和封严效率的影响。

另外,还有国内外研究人员探讨了轮缘密封

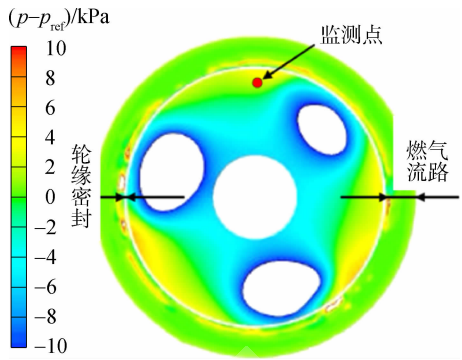


图 6 涡轮级环境下轮缘密封轴向中截面静压瞬时分布<sup>[32]</sup>

Fig. 6 Instantaneous distribution of static pressure on axial midsection of rim seals under turbine stage environment<sup>[32]</sup>

参数对燃气入侵及封严特性的具体影响。Sangan 等<sup>[41]</sup>的双重轮缘密封研究指出:燃气入侵被限制在外层密封形成的外腔内,导致内层密封处获得了更高的封严效率。孔祥林等<sup>[42]</sup>和高庆等<sup>[43]</sup>分析了动静间距和密封间隙宽度对燃气入侵和封严效率的影响,研究发现:随着动静间距的增大,燃气入侵流量降低,封严效率提高;轮缘密封越靠近静叶,燃气入侵流量越大,封严效率越低;且随着轮缘间隙宽度的增大,燃气入侵增强,封严效率降低。

上述都是针对转静盘腔(即动叶前腔)轮缘密封开展的试验与数值研究,而对于动叶下游腔室轮缘密封的研究则非常少。Zhao 和 Ma<sup>[44]</sup>对比研究了动叶前腔和后腔轮缘密封燃气入侵特性的差异,研究指出:后腔封严流与前腔类似,但后腔轮缘密封顶部区域压力因转子做功而相对偏低,这降低了主流燃气的入侵程度。Scobie 等<sup>[45]</sup>初步探讨了前腔出流重新入侵到后腔的非定常过程,着重分析了前腔出流与近端壁处主流的干扰情况。需要指出的是,封严冷气流与通道热主流掺混后重新入侵后腔方面的研究还比较基础,尚需进一步分析。

#### 3.2 径向密封

正如文中第 3.1 节所述,燃气入侵是涡轮轮缘间隙区域三维非定常流动的结果。鉴于这种特有的流场结构与封严特性之间的复杂关联机制,且为了进一步深入理解涡轮主流燃气入侵现象,国内外研究人员逐步针对封严效率优于轴向密封的径向轮缘密封结构开展基础研究<sup>[28]</sup>。

Roy 等<sup>[46]</sup>和 Soghe 等<sup>[47]</sup>试验研究了涡轮通

道主流热燃气入侵径向密封盘腔的封严特性,研究发现:轮缘间隙区域非定常流动受主流流量、封严冷气量和转子转速所支配,且在特定的封严冷气量下,转盘附近封严效率高于静盘。Roy等<sup>[48]</sup>、陶加银等<sup>[49]</sup>、Balasubramanian等<sup>[50]</sup>和Mirzamoghadam等<sup>[51]</sup>采用非定常数值计算和可视化涡轮流场试验进一步研究了燃气入侵的作用机制,研究指出:高切向速度的主流燃气与低切向速度的封严冷气在轮缘间隙区域相互干扰,从而诱导出大尺度、不稳定、非周期性、时间相关的“类开尔文-亥姆霍兹不稳定涡结构”和大尺度速度瞬时脉动。

Mirzamoghadam等<sup>[52]</sup>和Horwood等<sup>[53]</sup>研究了封严冷气量的影响,研究指出:轮缘密封腔内压力频率受转子转速所控制,且非定常压力脉动幅值随着封严冷气出流的增加而增加;大尺度涡结构圆周方向速度低于转子转速,且其存在与否及其强度强烈依赖于封严冷气量。与此同时,Zhou等<sup>[54]</sup>、高庆和李军<sup>[55]</sup>、Li等<sup>[56]</sup>和Hualca等<sup>[57]</sup>研究了密封结构参数的影响,研究指出:主流燃气入侵的程度随着密封腔宽度的增加而减弱,随着径向间隙高度的减小而升高,随着径向间隙下游轴向间隙段尺寸的增加而增加,且密封越靠近上游静叶,燃气入侵越严重。

另外,与轴向密封研究类似,研究人员在上述研究基础上逐步开展了动叶下游腔室径向轮缘密封方面的研究。Patinios等<sup>[58]</sup>、Scobie等<sup>[59]</sup>和程舒炯和李军<sup>[60]</sup>的试验与计算研究指出:在入侵燃气进入盘腔之后,在轮缘间隙区域的入侵与出流的掺混几乎立即完成;前腔封严冷气出流并没有显著改变涡轮主流流体动力学特性,而是仅与下游密封附近的主流进行部分掺混,即入侵燃气从动叶通道端壁边界层向下游输送(图7,图中量符号含义参见文献<sup>[59]</sup>);总体上,与轴向密封相似,后腔密封的封严效率要高于前腔。同样地,这方面的工作目前还比较有限,尚需进一步研究。

### 3.3 斜向密封

近些年来,国内外研究人员逐渐针对实际燃气轮机中封严效率优于轴向和径向密封<sup>[28]</sup>的斜向密封结构开展轮缘间隙区域不稳定流动机理及封严特性研究。

Mirzamoghadam等<sup>[61]</sup>、Bunker等<sup>[62]</sup>、Julien等<sup>[63]</sup>、Wang等<sup>[64]</sup>和Camci等<sup>[65]</sup>分别采用高精度数值计算和旋转涡轮试验研究了斜向密封下的轮缘间隙区域复杂流动特性及作用机制,研究发

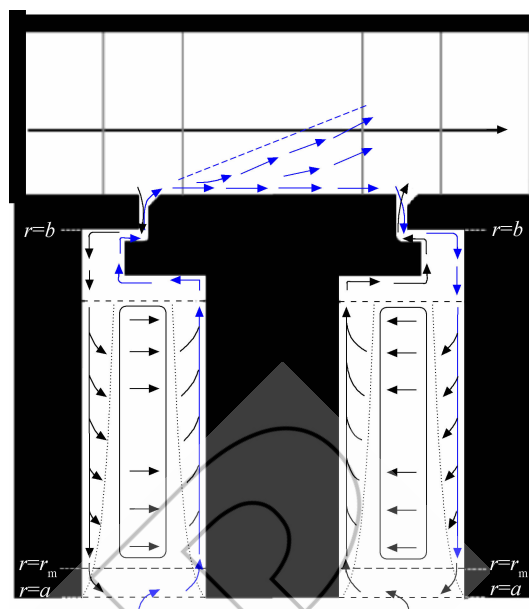


图7 封严冷气与主流掺混后再次入侵盘腔的流动图谱<sup>[59]</sup>  
Fig. 7 Flow pattern of purge flow and main flow mixed with invading the disc cavity again<sup>[59]</sup>

现:轮缘间隙区域的大尺度不稳定涡结构个数与动/静叶片数没有关联,这些不稳定旋涡结构导致在转盘盘腔内出现明显的压力扰动(大约5%的压力波动),这使得燃气可以入侵到盘腔内更深的区域,而非定常动静强干扰仅引起较浅的入侵。Horwood等<sup>[66]</sup>的轮缘间隙精细流动机制研究发现:斜向密封间隙区域呈现出很强的剪切梯度,这会影响到下游动叶前沿的压力分布和二次流场,从而在轮缘间隙附近的高剪切力促使大尺度涡结构的产生。

鉴于在实际环境中,动静干扰引起燃气入侵占据主导地位,一些研究人员采用模拟上/下游叶片干扰的静态叶栅试验开展了燃气入侵封严特性及流动机制精细测试研究。Palermo等<sup>[67]</sup>、Monge-Concepcion等<sup>[68]</sup>和Gibson等<sup>[69-70]</sup>的研究工作进一步指出:上游静叶尾缘流场对轮缘密封性能影响很大,但静叶改变仅导致微弱的轮缘密封性能改变,而在上游静叶的影响基础上增加下游动叶,却会严重干扰轮缘间隙区域流动,从而导致封严性能变差,这可能是静叶尾缘流场与动叶上游势流的不合理匹配所致。

近年来,Boudet等<sup>[71]</sup>、Eastwood等<sup>[72]</sup>和Robak等<sup>[73]</sup>研究了封严流的再入侵过程,着重分析了盘腔内有冷气喷射情况下的燃气入侵特性,研究结果与轴向和径向密封下的情形类似,在此不再赘述。不过,总体上看,鉴于斜向密封结构是实际工程上常用的结构之一,而实际的斜向密封

结构比较复杂,这方面的研究工作还比较少,斜向密封的封严特性优于轴向和径向密封的机制还尚未可知。

3.4 变工况影响

在燃气轮机实际运行工况中,由于外界负荷、进气参数等因素改变时,发动机会处在变工况条件下运行,此时,涡轮工况的改变会影响到主流的流动条件与流动状态,进而影响到轮缘密封的封严特性及不稳定流动机制。

Boutet-Blais 等<sup>[74]</sup>和 Patinios 等<sup>[75]</sup>的 1.5 级涡轮气动计算指出:影响燃气入侵的轮缘间隙区域的不稳定涡结构对工况条件比较敏感。Scobie 等<sup>[76]</sup>的单级涡轮试验研究指出:在变工况条件下,由于涡轮动叶片进口大冲角流动改变了轮缘密封区域的流动特性,从而使得封严流动参数的测量值显著偏离经验预测值。高庆等<sup>[77]</sup>和董伟林等<sup>[78]</sup>的有关涡轮转速和压比改变对轮缘密封封严特性的研究证实了上述结果,并进一步指出:增加涡轮转速和增加主流流量都会降低轮缘密封的封严效率。

在对变工况下轮缘密封封严特性认识的基础上,Soghe 等<sup>[79]</sup>通过理论分析提出了一种适用于变工况条件下轮缘密封封严特性预测的经验模型,这可为轮缘密封的早期设计提供工具支撑。不过截至目前,有关变工况条件下轮缘密封封严特性及其经验模型建立方面的研究还较为少见。

4 轮缘密封出流与涡轮主流的相互干扰

轮缘密封冷气可以阻止燃气主流入侵,但是过量的封严冷气通过轮缘密封间隙进入涡轮主流流道,虽然具有良好的封严效果,但因与主流掺混,影响涡轮气动性能。因此,对于轮缘密封流的研究,除了要关注其封严特性之外,还要研究其对涡轮主流流动及气动性能的影响。国内外研究人员对此开展了大量的试验测量、数值模拟和理论分析工作,以期阐明真实涡轮气动性能及其影响机制。

在轮缘密封出流方面,研究工作主要在叶栅环境和涡轮级环境中展开,且最初的研究以定常研究为主。周杨等<sup>[80]</sup>、Jia 和 Liu<sup>[81]</sup>、贾惟和刘火星<sup>[82]</sup>和陶文灿等<sup>[83]</sup>的稳态研究指出:封严出流进入主流后通过与主流的剪切作用形成了诱导涡,诱导涡随后发展成为通道涡,并占据了涡轮端区

二次流的主导地位,从而对涡轮流场和气动性能产生了明显的不利影响,导致涡轮作功能力下降,效率降低,特别是对动叶根部的影响最为明显。

封严冷气与主流的相互作用实际上是非定常的,通过定常研究并不能完全揭示轮缘密封出流对涡轮主流的真实影响效果和作用机制。Schuepbach 等<sup>[84]</sup>和 Schrewe 等<sup>[85]</sup>的涡轮级瞬态试验指出:封严冷气出流导致动叶出口出现与常规动叶不同且非定常特性更为明显的流场,总体上改变了动叶进口冲角,增强了端区二次流,使得涡轮效率降低了大约 0.6%,且随着封严冷气量的增加,效率下降更为明显。然而,要深入研究封严冷气出流对涡轮通道主流的非定常影响,应首先深入揭示轮缘间隙附近入侵流与密封出流干扰的非定常特性,这是封严冷气出流与涡轮端区主流非定常干涉的重要来源。Chilla 等<sup>[86]</sup>、杨帆等<sup>[87]</sup>和 Fiore 等<sup>[88]</sup>指出(图 8,图中量符号含义参见文献<sup>[86]</sup>):在轮缘间隙处的流动干涉显著受到封严出流相对于主流的速度亏损和动叶片施加的周向非均匀压力场的影响,从而表现出固有的非定常特性,且轮缘密封出流以周期性旋涡脱落的形式进入涡轮主流通道。

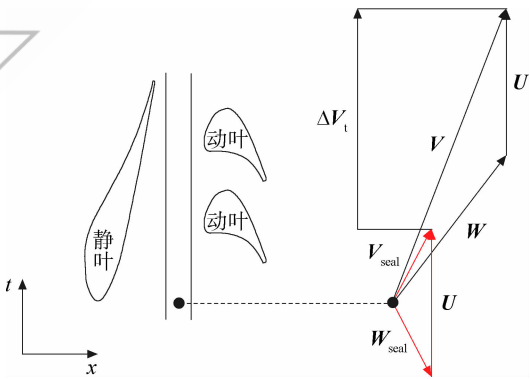


图 8 轮缘间隙处主流与封严冷气出口流的速度三角形示意图<sup>[86]</sup>

Fig. 8 Diagram of velocity triangle of main flow and purge flow at rim clearance<sup>[86]</sup>

在对轮缘间隙处流动干涉研究的基础上,研究人员逐步开展了轮缘密封出流与涡轮主流的相互作用研究。雷云涛和袁新<sup>[89]</sup>、Jenny 等<sup>[90]</sup>和 Zhang 和 Ma<sup>[91]</sup>的非定常计算与试验研究发现:轮缘密封出流改变了动叶片进口的气流角度,拉伸了端壁附近的马蹄涡,更加增加了动叶片出口流动的不均匀性,总体上,每增加单位轮缘密封出流导致动叶流动非定常性增加 30%,轮毂通道涡

损失增加4%。

不过,这些研究主要集中在轮缘密封出流与下游动叶片的非定常相互作用,缺乏关注密封出流与上游静叶的非定常相互影响,而上游静叶出口尾迹和二次流不仅会与封严冷气出流发生相互作用,而且会在向下游动叶片通道中继续输运,并与动叶片发生相互作用。贾惟等<sup>[92]</sup>和杨帆等<sup>[93-94]</sup>的非定常计算研究指出:轮缘密封出流对上游静叶的堵塞作用减弱了其轮毂端区二次流强度,并挤压静叶轮毂端区二次流使其径向位置向轮毂处下移,且所占据区域减少;而上游静叶二次流同样抑制了轮缘密封出流作用和动叶轮毂通道的径向扩张,但总体上增加了动叶轮毂端区二次流损失。

另外,有些研究人员也开展了涡轮轮缘密封流对涡轮下游过渡段气动性能的影响。Zerobin等<sup>[95-96]</sup>、Sterzinger等<sup>[97]</sup>和Gao等<sup>[98]</sup>的试验与计算研究获得了与轮缘密封流对涡轮性能影响类似的结果,并且研究指出:当寻求降低封严冷气量的措施时,涡轮与过渡段间的流动干扰需着重考虑。

近来,研究人员逐步开展了变工况对轮缘密封出流与涡轮主流相互干扰的影响研究。Regina等<sup>[99]</sup>和Dahlquist等<sup>[100]</sup>的涡轮级试验研究指出:每增加单位轮缘密封出流导致涡轮效率下降0.8%,且效率降低主要受轮毂区域增加的级流量系数所支配,而不是动叶进口增加的负冲角。另外,变工况条件下轮缘密封出流对涡轮的影响范围为15%~70%。不过变工况条件下的研究特别少。

## 5 涡轮轮缘密封设计及气动性能改进

涡轮轮缘密封结构直接影响其封严特性,进而影响到封严冷气用量以及封严冷气出流与涡轮主流的掺混。优良的轮缘密封结构不仅具有好的封严特性,还应使得封严出流导致的气动损失尽可能的小。近些年来,对于轮缘密封封严的研究主要集中在提高轮缘密封封严效率和减小封严出流与主流相互作用造成的损失等上。

### 5.1 轮缘密封结构设计

国内外研究人员在掌握涡轮轮缘密封的封严特性及作用机制的基础上,开展了轮缘密封结构的设计优化工作,旨在提高轮缘密封的封严效率,以期用最少的封严冷气用量来阻止高温燃气入侵。

对于轴向密封,Zhang和Ma<sup>[101]</sup>提出把轴向间隙左侧轮廓改为波浪状,形成了周向非均匀的轮缘间隙形态,其中与主通道流动对应的位置间隙较大,而在与尾迹相对应的位置间隙减小,计算结果证实新设计的轮缘密封效率有较大改进。吴康等<sup>[102]</sup>提出将轴向密封改为径向密封可有效增加燃气入侵的沿程阻力,提高轮缘密封的封严效率。

对于径向密封,Sangan等<sup>[103]</sup>和Chen等<sup>[104]</sup>提出翅片状轮缘密封结构及其改进型结构(图9),其有效降低了密封出流与主流之间的速度亏损,减小了轮缘间隙区域压力的周向不对称性,从而提高了轮缘密封的封严效率。Li、高庆等<sup>[105-106]</sup>提出在径向密封的内齿上端面上向内镶嵌蜂窝面结构,将径向密封的轴向光滑面间隙密封改为蜂窝间隙密封,从而进一步提高了径向密封的封严效率。

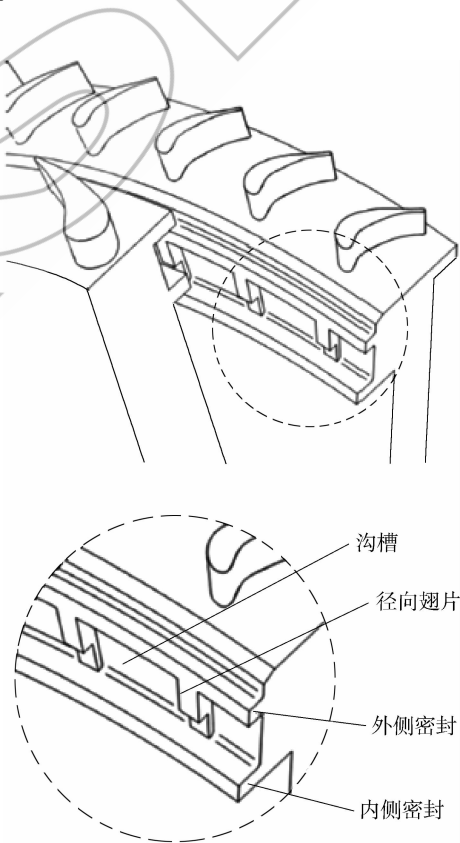


图9 翅片状轮缘密封结构<sup>[103]</sup>

Fig. 9 Fin-like rim seal structure<sup>[103]</sup>

对于斜向密封,高庆和李军<sup>[107]</sup>借鉴的叶顶非均匀间隙形态可改进叶顶端区气动性能的设计思想<sup>[108]</sup>,提出非均匀斜向密封间隙形态,研究结果在证实斜向密封的封严特性优于轴向和径向密封的基础上,进一步指出:在倾斜间隙基础上将间

隙改为渐扩型,虽然封严效率并未有改进,但其可以更为有效地减少封严密封出流造成的涡轮气动损失。

另外,罗翔等<sup>[109]</sup>通过试验研究指出:多齿轮缘密封结构可以获得更佳的封严效果,这已经在工程实际中得到应用。进一步地,Scobie 等<sup>[110]</sup>和 Chilla 等<sup>[111]</sup>针对实际的涡轮流动环境,有针对性地对复杂的斜向密封结构的型线进行改进(图 10),获得了较好的对燃气入侵的阻止效果。

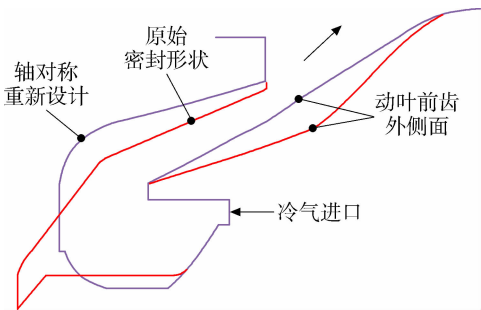


图 10 轴对称重新设计的轮缘密封结构<sup>[111]</sup>

Fig. 10 Axisymmetric redesigned of rim seal structure<sup>[111]</sup>

5.2 考虑密封出流的端壁造型

鉴于轮缘密封出流会对涡轮端区流动带来恶劣影响,而端壁造型技术早已被证实可有效降低端区二次流损失,但在涡轮精细化设计的大环境下<sup>[112-113]</sup>,已有的端壁造型研究并没有考虑到轮缘密封出流与主流的相互作用,因此端壁造型在考虑轮缘密封出流影响下的应用效果尚未可知,目前的研究很少,且主要以定常雷诺平均数值计算结合 shear stress transfer (SST) 湍流模型为主。

高庆等<sup>[114]</sup>和张伟昊等<sup>[115]</sup>通过考虑封严流的涡轮端壁修型数值研究指出:对动叶进口轮毂缘板进行圆角修型,可降低封严出流对通道主流的径向影响范围,从而降低涡轮端区气动损失。程舒娴等<sup>[116]</sup>通过动叶前缘端壁三维修型研究指出:动叶前缘凹壁面端壁造型降低了局部压力和主流的周向压力波动,使得最小封严冷气量降低 14% 以上,但使得动叶端区通道涡有所扩大。

在以上研究基础上,Schreiner 等<sup>[117]</sup>提出了一种基于结构特征的封严流影响下的涡轮端壁三维造型方法,其可有效组织封严出流与主流的相互作用,使得涡轮级效率提高了 0.4%。另外,Shahpar 等<sup>[118]</sup>提出了一种考虑封严出流影响的

涡轮非对称端壁参数化优化设计方法,以期缩短涡轮设计周期,并提高涡轮气动效率。

此外,除了上述的轮缘密封结构设计和考虑密封出流的端壁造型之外,研究人员也提出了一些其他涡轮端区性能的改进方法,比如吴康等<sup>[119]</sup>的涡轮轮毂端壁侧向出流的优化,康文武等<sup>[120]</sup>的高低位进气方式的优化,以及 Clark 等<sup>[121]</sup>的转静盘腔冷气孔的个数及位置优化等。不过,这些研究工作虽然关键,但还比较零散且基础。

6 轮缘密封流的常用研究方法

6.1 试验方法

涡轮轮缘密封封严试验研究大都是为了获得封严效率以及进行最小封严冷气量的预测,近来也逐渐关注封严流动细节的测量。在试验中主要采用气动探针、压力传感器、浓度分析仪等常规测量手段进行某些特定点的压力、浓度等参数的测量,并基于示踪气体浓度法、压力测量法等<sup>[122-123]</sup>获得工程上比较关心的封严效率、封严流量等参数。

在试验对象上,早期以带有简化密封结构的静态涡轮叶栅为主对真实的涡轮流动进行简化<sup>[124]</sup>,而随着试验技术的进步,逐渐针对无叶片的旋转盘腔试验台<sup>[20]</sup>,甚至单级或 1.5 级涡轮试验台(图 11)<sup>[125-126]</sup>来进行封严流动特性、封严流

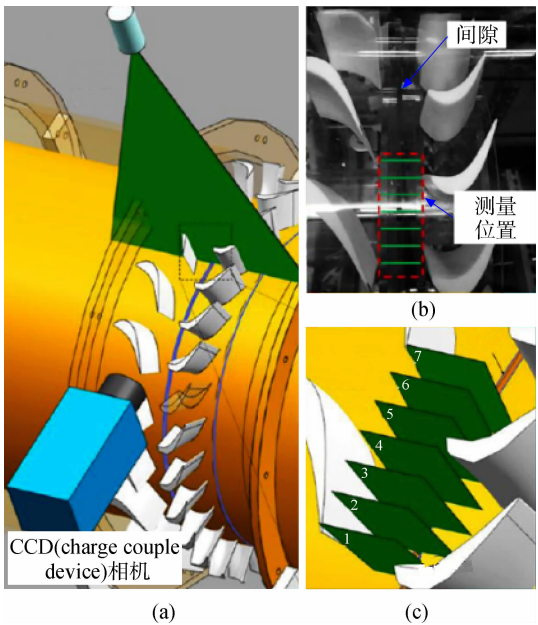


图 11 涡轮轮缘密封流的可视化测量示意图<sup>[125]</sup>

Fig. 11 Visual measurement diagram of turbine rim seal flow<sup>[125]</sup>

与涡轮主流交互作用以及轮缘密封设计优化等<sup>[127]</sup>的试验研究。需要指出的是,美国GE公司搭建的1.5级旋转涡轮试验台<sup>[128]</sup>是目前为止公开发表的参数水平和结构复杂度最高的机理试验台,其导叶与动叶分别为48片和96片,导叶出口雷诺数高达 $1.0 \times 10^7$ ,旋转雷诺数大约为 $6.0 \times 10^6$ ,涡轮转速为7600 r/min,膨胀比为3.0,涡轮进口温度为204.4℃。

考虑到燃气轮机有变工况工作的需要,因此过渡态下轮缘密封的封严特性也是需要进行评估的一个关键方面,研究人员针对上述的旋转涡轮试验台初步开展了这方面的研究<sup>[128-130]</sup>。

在测量手段上,随着测量技术的进步,逐渐过渡到采用激光多普勒测速仪、粒子成像测速仪等先进的测量手段<sup>[125-131]</sup>测试转静腔内部以及轮缘密封间隙区域的速度场和压力场,力求通过精细试验来揭示燃气入侵的物理机制。并通过理论分析方法探讨把低马赫数、低雷诺数模型涡轮试验台上获得的封严效率数据扩展到实际发动机工况条件下<sup>[132]</sup>,以期工程设计提供关键数据支撑。

## 6.2 数值方法

涡轮轮缘密封试验研究因需要建立复杂的旋转涡轮试验台,代价昂贵,且由于封严腔空间狭小,轮缘间隙区域的流场异常复杂,试验数据往往局限于特定的、零散的测量点与面,难以获得具体的流动细节;而这恰好可以通过数值方法来弥补完善。

早期涡轮轮缘密封研究主要采用定常计算针对简化的轮缘密封扇段模型开展研究。但随着对涡轮轮缘密封区域非定常、不稳定流动特征的认识,国内外大多数研究人员逐渐采用非定常雷诺平均数值计算方法,针对单级或多级涡轮扇形模型开展研究<sup>[133]</sup>,这也是目前研究现有发动机涡轮轮缘密封流气动问题最为主流的数值方法。研究指出:扇段周向夹角需至少完整包括一个完整的不稳定大尺度涡结构;动静交界面位于轮缘密封上游,且采用封严结构与主流一致性匹配网格,可获得与涡轮试验比较符合的结果<sup>[134-135]</sup>。

随着数值计算技术的进步,近年来,研究人员逐渐采用全通道涡轮轮缘密封计算模型开展非定常雷诺平均研究<sup>[64]</sup>。但鉴于现有湍流模型存在的不足,尤其是对旋转诱导低频不稳定流动预测的不足,研究人员逐步针对简化的轮缘密封结构开展大涡模拟高精度计算研究<sup>[136]</sup>。

## 7 结论与展望

高封严效率轮缘密封结构可有效减小封严冷气用量,从而提高涡轮效率,但轮缘密封流是一种固有的非定常、三维、不稳定流动,其封严特性及其作用机制异常复杂,严重限制了高封严效率轮缘密封气动设计技术的发展。

经过多年研究,国内外研究人员通过高精度数值计算方法等对旋转诱导燃气入侵引起的不稳定流动机制已有基本认识,对涡轮级环境下主流诱导燃气入侵特性及流动机制等通过非定常雷诺平均方法和涡轮级试验已有基本了解。

高切向速度的主流燃气与低切向速度的封严冷气在实际涡轮轮缘间隙区域相互干扰,从而诱导出大尺度、不稳定、非周期性、时间相关的“类开尔文-亥姆霍兹不稳定涡结构”和大尺度速度瞬时脉动。而后腔封严流与前腔类似,但后腔轮缘密封顶部区域压力因涡轮转子做功而相对偏低,这降低了主流燃气的入侵程度。此外,封严冷气出流导致动叶出口出现与常规动叶不同的且非定常特性更为明显的流场,总体上改变了动叶进口冲角,增强了端区二次流,使得涡轮效率降低了大约0.6%,且每增加单位轮缘密封出流导致涡轮动叶流动的非定常性增加30%,轮毂通道涡气动损失增加4%。

不过受旋转试验测试与数值计算水平及能力的限制,在真实涡轮级运行环境中,真实轮缘密封结构的主流与旋转联合诱导入侵特性,以及上下游轮缘密封间流动干扰特性还尚未得到较为清楚的认识,对于涡轮轮缘密封出流与涡轮主流的非定常交互作用机制和真实端区的二次流旋涡结构及其发展演化特性还缺乏深入的细致研究。

有关轮缘密封结构设计的研究,目前主要是单参数对于封严效果的影响规律研究和现有轮缘密封结构的改进研究,研究指出多齿轮缘密封结构可以获得更佳的封严效果,且考虑密封出流的端壁造型可以进一步提高涡轮总体气动性能。不过,目前还缺乏多参数耦合影响下的封严规律、不同封严结构的封严机制差异甚至新型轮缘密封结构研发等的研究,这也限制了现有燃气入侵理论预测模型的精度。对于变工况条件下的涡轮轮缘密封燃气入侵特性及高效率设计优化等方面的研究还鲜见报道。

因此,燃气轮机轮缘密封气动技术依然需要进一步的研究。除了上述的不同工况下真实涡轮

环境下的燃气入侵特性及轮缘密封结构设计优化之外,还应强化气热环境下轮缘密封流对涡轮冷却特性的影响研究,这是轮缘密封技术发展的另一个重要方向。并且,探讨将涡轮轮缘密封结构对涡轮主流的影响纳入到涡轮低维度气动设计之中,以期兼顾设计周期与计算精度,实现涡轮快速高精度气动设计的目的。此外,还需强化涡轮高参数试验及高精度数值计算方法的研究,为高封严效率涡轮轮缘密封气热技术发展提供可靠工具支撑。

## 参考文献:

- [1] CHEW J W, HILLS N J. Computational fluid dynamics for turbomachinery internal air systems[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2007, 365(1859): 2587-2611.
- [2] SCOBIE J A, SANGAN C M, OWEN J M, et al. Review of ingress in gas turbines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(12): 120801. 1-120801. 16.
- [3] 李军, 陈阳, 宋立明, 等. 考虑轮缘密封射流与主流相互作用的透平级气热性能研究进展[J]. 燃气轮机技术, 2017, 30(3): 18-26, 31.  
LI Jun, CHEN Yang, SONG Liming, et al. Research-progress in turbine stage gas-thermal performance considering the interaction between rim sealing jet and mainstream[J]. Gas Turbine Technology, 2017, 30(3): 18-26, 31. (in Chinese)
- [4] 李军, 程舒娴, 高庆, 等. 轮缘密封封严效率及结构设计研究进展[J]. 热力透平, 2018, 47(1): 6-15.  
LI Jun, CHENG Shuxian, GAO Qing, et al. Research progress on sealing efficiency and structural design of rim seals[J]. Thermal Turbine, 2018, 47(1): 6-15. (in Chinese)
- [5] CHEW J W, GAO F, PALERMO D M. Flow mechanisms in axial turbine rim sealing[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(23/24): 7637-7657.
- [6] SANGAN C M, LAIWANI Y, OWEN J M, et al. Fluid dynamics of a gas turbine wheel-space with ingestion[J]. Journal of Power and Energy, 2014, 228(5): 508-524.
- [7] OWEN J M. Prediction of ingestion through turbine rim seals; Part I rotationally induced ingress[J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(3): 031005. 1-031005. 9.
- [8] OWEN J M. Prediction of ingestion through turbine rim seals; Part II externally induced and combined ingress[J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(3): 031006. 1-031006. 9.
- [9] OWEN J M. Theoretical modelling of hot gas ingestion through turbine rim seals[J]. Propulsion and Power Research, 2012, 1(1): 1-11.
- [10] ZHOU K Y, WOODS N, OWEN J M. Statistical and theoretical models of ingestion through turbine rim seals[J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(2): 021014. 1-021014. 8.
- [11] MEAR L I, OWEN J M, LOCK G D. Theoretical model to determine effect of ingress on turbine discs[R]. ASME Paper GT2015-42326, 2015.
- [12] LIU D D, TAO Z, LUO X. Development of a new factor for hot gas ingestion through rim seal[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(7): 072501. 1-072501. 10.
- [13] JOHNSON B V, JAKOBY R, BOHN D E, et al. A method for estimating the influence of time-dependent vane and blade pressure fields on turbine rim seal ingestion[R]. ASME Paper GT2006-90853, 2006.
- [14] HUÑING M. Parametric single gap turbine rim seal model with boundary generation for asymmetric external flow[R]. ASME Paper GT2010-22434, 2010.
- [15] SAVOV S S, ATKINS N R. A rim seal ingress model based on turbulent transport[R]. ASME Paper GT2017-63531, 2017.
- [16] PARDESHI I, LIU J, SHIH T I P. A reduced order model for predicting hot-gas ingestion into the wheelspace of gas turbines[R]. ASME Paper GT2018-75802, 2018.
- [17] 朱莉娅, 罗翔, 徐国强, 等. 涡轮级燃气入侵的理论分析及数值模拟[J]. 推进技术, 2014, 35(11): 1511-1516.  
ZHU Liya, LUO Xiang, XU Guoqiang, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of turbine stage gas intrusion[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(11): 1511-1516. (in Chinese)
- [18] WANG C Z, JOHNSON B V. Rim seal ingestion characteristics for axial gap rim seals in a closely-spaced turbine stage from a numerical simulation[R]. ASME Paper GT2006-90965, 2006.
- [19] GAO F, CHEW J W, BEARD P F, et al. Numerical studies of turbine rim sealing flows on a chute seal configuration[R]. Stockholm, Sweden: 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, 2017.
- [20] BEARD P F, GAO F, CHANA K S, et al. Unsteady flow phenomena in turbine rim seals[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2017, 139(3): 032501. 1-032501. 10.
- [21] GAO F, CHEW J W, BEARD P F, et al. Large-eddy simulation of unsteady turbine rim sealing flows[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2018, 70: 160-170.
- [22] GAO F, POIJOL N, CHEW J W, et al. Advanced numerical simulation of turbine rim seal flows and consideration for RANS turbulence modelling[R]. ASME Paper GT2018-75116, 2018.
- [23] GAO F, CHEW J W, MARXEN O. Inertial waves in turbine rim seal flows[J]. Physical Review Fluids, 2020, 5(2): 024802. 1-024802. 18.
- [24] BOUDET J, AUTEF V N D, CHEW J W, et al. Numerical simulation of rim seal flows in axial turbines[J]. Aeronautical Journal, 2005, 109(1098): 373-383.
- [25] RABS M, BENRA F K, DOHMEN H J, et al. Investigation

- of flow instabilities near the rim cavity of a 1.5 stage gas turbine[R]. ASME Paper GT2009-59965, 2009.
- [26] 周昆原, 罗翔, 徐国强. 旋转诱导燃气入侵的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12): 2704-2709.
- ZHOU Kunyuan, LUO Xiang, XU Guoqiang. Numerical simulation of gas intrusion induced by rotation[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(12): 2704-2709. (in Chinese)
- [27] LIU Z X, MA J, HU J P, et al. Analysis of the influence of geometric structure on the rotationally induced ingress [R]. ASME Paper GT2017-63512, 2017.
- [28] 高杰, 曹福堃, 褚召丰, 等. 旋转诱导轮缘密封不稳定流动特性及结构优化[J]. 中国科学(技术科学), 2019, 49(7): 753-766.
- GAO Jie, CAO Fukun, CHU Zhaofeng, et al. Rotationally-induced unstable flow characteristics and structural optimization of rim seals[J]. Science in China (Technical Science), 2019, 49(7): 753-766. (in Chinese)
- [29] HILLS N J, CHEW J W, TURNER A B. Computational and mathematical modeling of turbine rim seal ingestion [J]. Journal of Turbomachinery, 2002, 124(2): 306-315.
- [30] CAO C, CHEW J W, MILLINGTON P R, et al. Interaction of rim seal and annulus flows in an axial flow turbine [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(4): 786-793.
- [31] GENTILHOMME O, HILLS N J, TURNER A B, et al. Measurement and analysis of ingestion through a turbine rim seal [J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125(3): 505-512.
- [32] JAKOBY R, ZIERER T, LINDBLAD K, et al. Numerical simulation of the unsteady flow field in an axial gas turbine rim seal configuration[R]. ASME Paper GT2004-53829, 2004.
- [33] 吴康, 任静, 蒋洪德, 等. 整级透平中转静轮缘密封问题研究: Part I. 封严与入侵[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(5): 873-877.
- WU Kang, REN Jing, JIANG Hongde, et al. Research on sealing problem of stator rim in turbine stage: Part I sealing and intrusion[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(5): 873-877. (in Chinese)
- [34] 张灵俊, 罗翔, 余鸿鹏, 等. 1.5级涡轮实验台前腔燃气入侵实验[J]. 航空动力学报, 2013, 28(12): 2746-2751.
- ZHANG Lingjun, LUO Xiang, YU Hongpeng, et al. Gas intrusion experiment in front chamber of a 1.5-stage turbine experimental bench[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(12): 2746-2751. (in Chinese)
- [35] 廖高良, 高庆, 周刚, 等. 燃气轮机轮缘密封稳态与瞬态流动特性数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7237-7246, 7438.
- LIAO Gaoliang, GAO Qing, ZHOU Gang, et al. Numerical study on steady and transient flow characteristics of gas turbine rim seals[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7237-7246, 7438. (in Chinese)
- [36] 张晶辉, 马宏伟. 涡轮盘腔轴向封严流动的数值研究[J]. 航空动力学报, 2014, 29(4): 927-934.
- ZHANG Jinghui, MA Hongwei. Numerical study on axial sealed flow in turbine disc cavity[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(4): 927-934. (in Chinese)
- [37] 陶加银, 高庆, 宋立明, 等. 基于附加示踪变量法的涡轮轮缘密封非定常封严特性研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(11): 2154-2158.
- TAO Jiayin, GAO Qing, SONG Liming, et al. Research on unsteady seal characteristics of turbine rim seals based on additional tracer variable method[J]. Chinese Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(11): 2154-2158. (in Chinese)
- [38] WANG X J, LIAO G L, ZHANG F, et al. Numerical investigation on the steady and unsteady flow characteristics of rim seal for the first stage in gas turbine[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 99: 11-22.
- [39] POGORELOV A, MEINKE M, SCHRODER W. Large-eddy simulation of turbine rim seal flow[R]. ASME Paper GT2018-75022, 2018.
- [40] CHO G, SANGAN C M, OWEN J M, et al. Effect of ingress on turbine disks[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(4): 042502. 1-042502. 10.
- [41] SANGAN C M, POUNTNEY O J, SCOBIE J A, et al. Experimental measurements of ingestion through turbine rim seals: Part III single and double seals[J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(5): 051011. 1-051011. 11.
- [42] 孔祥林, 陶加银, 冯增国, 等. 结构参数对轮缘密封封严特性影响的数值研究[J]. 动力工程学报, 2014, 34(4): 280-291.
- KONG Xianglin, TAO Jiayin, FENG Zengguo, et al. Numerical study on the influence of structural parameters on the sealing characteristics of flange seals[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2014, 34(4): 280-291. (in Chinese)
- [43] 高庆, 陶加银, 宋立明, 等. 涡轮轮缘密封封严效率的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(5): 12-17.
- GAO Qing, TAO Jiayin, SONG Liming, et al. Numerical study on sealing efficiency of turbine rim seals[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(5): 12-17. (in Chinese)
- [44] ZHAO L P, MA H W. Numerical investigation on unsteady flow in the upstream and downstream sealing system of a 1.5-stage gas turbine[R]. ASME Paper GT2019-90441, 2019.
- [45] SCOBIE J A, HUALCA F P, SANGAN C M, et al. Egress interaction through turbine rim seals[R]. ASME Paper GT2017-64632, 2017.
- [46] ROY R P, FENG J, NARZARY D, et al. Experiment on gas ingestion through axial-flow turbine rim seals[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(3): 573-582.
- [47] SOGHE R D, BIANCHINI C, SANGAN C M, et al. Nu-

- merical characterization of hot-gas ingestion through turbine rim seals[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2017, 139(3): 032602. 1-032602. 9.
- [48] ROY R P, ZHOU D W, GANESAN S, et al. The flow field and main gas ingestion in a rotor-stator cavity[R]. ASME Paper GT2007-27671, 2007.
- [49] 陶加银, 高庆, 宋立明, 等. 涡轮轮缘密封非定常主流入侵特性的数值研究[J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(1): 53-59.
- TAO Jiayin, GAO Qing, SONG Liming, et al. Numerical study on the intrusion characteristics of unsteady main flow in turbine rim seals[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(1): 53-59. (in Chinese)
- [50] BALASUBRAMANIAN J, PATHAK P S, THIAGARAJAN J K, et al. Experimental study of ingestion in the rotor-stator disk cavity of a subscale axial turbine stage[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2015, 137(9): 091010. 1-091010. 10.
- [51] MIRZAMOGHADAM A V, KANJIYANI S, RIAHI A, et al. Unsteady 360 computational fluid dynamics validation of a turbine stage mainstream/disk cavity interaction[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2015, 137(1): 011008. 1-011008. 9.
- [52] MIRZAMOGHADAM A V, BALASUBRAMANIAN J, MICHAEL M, et al. Unsteady pressure characteristics in the mainstream/disc cavity of a turbine-stage[R]. ASME Paper GT2017-63844, 2017.
- [53] HORWOOD J T M, HUALCA F P, WILSON M, et al. Unsteady computation of ingress through turbine rim seals[R]. ASME Paper GT2018-75321, 2018.
- [54] ZHOU D W, ROY R P, WANG C Z, et al. Main gas ingestion in a turbine stage for three rim cavity configurations[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2010, 132(3): 031023. 1-031023. 12.
- [55] 高庆, 李军. 径向轮缘密封非定常效率的数值研究[J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(9): 55-61.
- GAO Qing, LI Jun. Numerical study on sealing efficiency of radial rim seals[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(9): 55-61. (in Chinese)
- [56] LI Z G, LI J, SONG L M, et al. Effect of outer fin axial gap on the sealing effectiveness and fluid dynamics of radial rim seal[R]. ASME Paper GT2017-63505, 2017.
- [57] HUALCA F P, HORWOOD J T M, SANGAN C M, et al. The effect of vanes and blades on ingress in gas turbines[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2020, 142(2): 021020. 1-021020. 12.
- [58] PATINIOS M, SCOBIE J A, SANGAM C M, et al. Measurements and modelling of ingress in a new 1.5-stage turbine research facility[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2017, 139(1): 012603. 1-012603. 12.
- [59] SCOBIE J A, HUALCA F P, PATINIOS M, et al. Re-ingestion of upstream egress in a 1.5-stage gas turbine rig[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2018, 140(7): 072507. 1-072507. 10.
- [60] 程舒娟, 李军. 1.5 级涡轮轮缘密封燃气入侵特性的数值研究[J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(5): 12-20, 115.
- CHENG Shuxian, LI Jun. Numerical study on gas intrusion characteristics of rim seals of a 1.5-stage turbine[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(5): 12-20, 115. (in Chinese)
- [61] MIRZAMOGHADAM A V, HEITLAND G, MORRIS M C, et al. 3D CFD ingestion evaluation of a high pressure turbine rim seal disk cavity[R]. ASME Paper GT2008-50531, 2008.
- [62] BUNKER R S, LASKOWSKI G M, BAILEY J C, et al. An investigation of turbine wheelspace cooling flow interactions with a transonic hot gas path: Part 1 experimental measurements[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2011, 133(2): 021015. 1-021015. 8.
- [63] JULIEN S, LEFRANCOIS J, DUMAS G, et al. Simulations of flow ingestion and related structures in a turbine disk cavity[R]. ASME Paper GT2010-22729, 2010.
- [64] WANG C Z, MATHIYALAGAN S P, JOHNSON B V, et al. Rim seal ingestion in a turbine stage from 360 degree time-dependent numerical simulations[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2014, 136(3): 031007. 1-031007. 12.
- [65] CAMCI C, AVERBACH M, TOWN J. Unsteady flow structures within a turbine rim seal cavity in the presence of purge flow: an experimental and computational unsteady aerodynamics investigation[J]. *Aerospace*, 2019, 6(5): 1-17.
- [66] HORWOOD J T M, HUALCA F P, WILSON M, et al. Flow instabilities in gas turbine chute seals[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2020, 142(2): 021019. 1-021019. 12.
- [67] PALERMO D M, GAO F, CHEW J W, et al. Effect of annulus flow conditions on turbine rim seal ingestion[R]. ASME Paper GT2019-90489, 2019.
- [68] MONGE-CONCEPCION I, BERDANIER R A, BARRINGER M D, et al. Evaluating the effect of vane trailing edge flow on turbine rim sealing[R]. ASME Paper GT2019-91576, 2019.
- [69] GIBSON J, THOLE K, CHRISTOPHEL J, et al. Effects of the main gas path pressure field on rim seal flows in a stationary linear cascade[R]. ASME Paper GT2015-43517, 2015.
- [70] GIBSON J, THOLE K, CHRISTOPHEL J, et al. Pressure distortion effects on rim seal performance in a linear cascade[R]. ASME Paper GT2016-58098, 2016.
- [71] BOUDET J, HILLS N J, CHEW J W. Numerical simulation of the flow interaction between turbine main annulus and disc cavities[R]. ASME Paper GT2006-90307, 2006.
- [72] EASTWOOD D, COREN D D, LONG C A, et al. Experimental investigation of turbine stator well rim seal, re-ingestion and interstage seal flows using gas concentration techniques and displacement measurements[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2012, 134(8): 082501. 1-082501. 9.
- [73] ROBAK C W, FAGHRI A, THOLE K A. Analysis of gas turbine rim cavity ingestion with axial purge flow injection

- [R]. ASME Paper GT2019-91807, 2019.
- [74] BOUTET-BLAIS G, LEFRANCOIS J, DUMAS G, et al. Passive tracer validity for cooling effectiveness through flow computation in a turbine rim seal environment[R]. ASME Paper GT2011-45654, 2011.
- [75] PATINIOS M, ONG I L, SCOBIE J A, et al. Influence of leakage flows on hot gas ingress[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141(2): 021010. 1-021010. 10.
- [76] SCOBIE J A, SANGAN C M, TEUBER R, et al. Experimental measurements of ingestion through turbine rim seals: Part 4 off-design conditions[R]. ASME Paper GT2013-94147, 2013.
- [77] 高庆, 廖高良, 张永海, 等. 透平级气动及运行参数对轮缘密封封严性能影响的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(7): 62-72.
- GAO Qing, LIAO Gaoliang, ZHANG Yonghai, et al. Numerical study on the influence of turbine stage aerodynamic and operating parameters on flange sealing performance[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(7): 62-72. (in Chinese)
- [78] 董伟林, 王锁芳, 夏子龙. 典型参数对盘缘封严性能综合影响机制[J]. 推进技术, 2019, 40(6): 1293-1299.
- DONG Weilin, WANG Suofang, XIA Zilong. Mechanism of comprehensive influence of typical parameters on disc edge sealing performance[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(6): 1293-1299. (in Chinese)
- [79] SOGHE R D, BIANCHINI C, MICIO M, et al. Effect of rim seal configuration on gas turbine cavity sealing in both design and off-design conditions[R]. ASME Paper GT2018-75712, 2018.
- [80] 周杨, 牛为民, 邹正平, 等. 轮毂封严气体对高压涡轮二次流动的影响[J]. 推进技术, 2006, 27(6): 515-520.
- ZHOU Yang, NIU Weimin, ZOU Zhengping, et al. Effects of hub-seal gas on secondary flows in high-pressure turbines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(6): 515-520. (in Chinese)
- [81] JIA W, LIU H X. Numerical investigation of the effect of rim seal on turbine aerodynamic design parameters and end wall flows in low-aspect ratio turbine[J]. Computers and Fluids, 2013, 74: 114-125.
- [82] 贾惟, 刘火星. 封严腔几何特征对涡轮性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(3): 492-495.
- JIA Wei, LIU Huoxing. Effect of sealing chamber geometry on turbine performance[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(3): 492-495. (in Chinese)
- [83] 陶文灿, 张子卿, 宋宇宽, 等. 高压涡轮封严流与主流相互作用的机理研究[J]. 推进技术, 2019, 40(11): 2473-2481.
- TAO Wencan, ZHANG Ziqing, SONG Yukuan, et al. Research on the interaction mechanism between the sealing severe flow and the main flow in high-pressure turbines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(11): 2473-2481. (in Chinese)
- [84] SCHUEPBACH P, ABHARI R S, ROSE M G, et al. Effects of suction and injection purge-flow on the secondary flow structures of a high-work turbine[J]. Journal of Turbomachinery, 2010, 132(2): 021021. 1-021021. 8
- [85] SCHREWE S, WERSCHNIK H, SCHIFFER H P. Experimental analysis of the interaction between rim seal and main annulus flow in a low pressure two stage axial turbine[J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(5): 051003. 1-051003. 9.
- [86] CHILLA M, HODSON H, NEWMAN D. Unsteady interaction between annulus and turbine rim seal flows[J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(5): 051024. 1-051024. 10.
- [87] 杨帆, 周莉, 王占学. 封严腔体出口流场的非定常数值研究[J]. 推进技术, 2018, 39(8): 1728-1736.
- YANG Fan, ZHOU Li, WANG Zhanxue. Unsteady numerical study of flow field at the outlet of sealed Cavity[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(8): 1728-1736. (in Chinese)
- [88] FIORE M, GOURDAIN N, BOUSSUGE J F, et al. Numerical study of a linear cascade with upstream cavity using various rim-seal geometries and purge rates[R]. ASME Paper GT2018-76615, 2018.
- [89] 雷云涛, 袁新. 透平机械空穴漏气非定常流动的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2009, 24(9): 2115-2121.
- LEI Yuntao, YUAN Xin. Numerical simulation of unsteady flow in turbomachinery[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(9): 2115-2121. (in Chinese)
- [90] JENNY P, ABHARI R S, ROSE M G, et al. Unsteady rotor hub passage vortex behavior in the presence of purge flow in an axial low pressure turbine[J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(5): 051022. 1-051022. 9.
- [91] ZHANG J H, MA H W. Unsteady numerical investigation for effects of rim sealing flow on performance of a turbine rotor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(4): 470-478.
- [92] 贾惟, 鞠鹏飞. 轮毂封严与高负荷涡轮端区流动的非定常相互作用[J]. 推进技术, 2017, 38(12): 2674-2685.
- JIA Wei, JÜ Pengfei. Unsteady interaction between hub seals and flows in end-zone of high-load turbines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(12): 2674-2685. (in Chinese)
- [93] 杨帆, 周莉, 王占学. 轮毂封严气流与上游导向器非定常干涉数值研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(12): 129-136.
- YANG Fan, ZHOU Li, WANG Zhanxue. Numerical study of unsteady interference between rim seal airflow and upstream vane[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(12): 129-136. (in Chinese)
- [94] 杨帆, 周莉, 王占学. 轮缘封严气流与主流涡系交互作用的非定常数值研究[J]. 推进技术, 2019, 40(2): 315-323.
- YANG Fan, ZHOU Li, WANG Zhanxue. An unsteady numerical study of the interaction between a rim-sealed airflow and a mainstream vortex system[J]. Journal of Pro-

- pulsion Technology, 2019, 40(2): 315-323. (in Chinese)
- [95] ZEROBIN S, PETERS A, BAUINGER S, et al. Aerodynamic performance of turbine center frames with purge flows; Part I the influence of turbine purge flow rates [J]. Journal of Turbomachinery, 2018, 140(6): 061009. 1-061009. 11.
- [96] ZEROBIN S, ALDRIAN C, PETERS A, et al. Aerodynamic performance of turbine center frames with purge flows; Part II the influence of individual hub and tip purge flows [J]. Journal of Turbomachinery, 2018, 140(6): 061010. 1-061010. 8.
- [97] STERZINGER P Z, ZEROBIN S, MERLI F, et al. Impact of varying high-and low-pressure turbine purge flows on a turbine center frame and low-pressure turbine system[R]. ASME Paper GT2019-90795, 2019.
- [98] GAO J, LIU X Z, ZHAO X D, et al. Steady and unsteady numerical investigation of flow interaction between low-pressure turbine blade, intermediate turbine duct and power turbine vane[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2018, 232(23): 4312-4331.
- [99] REGINA K, KALFAS A I, ABHARI R S. Experimental investigation of purge flow effects on a high pressure turbine stage[J]. Journal of Turbomachinery, 2015, 137(4): 041006. 1-041006. 8.
- [100] DAHLQUIST J, FRIDH J. Experimental investigation of turbine stage flow field and performance at varying cavity purge rates and operating speeds[J]. Journal of Turbomachinery, 2018, 140(3): 031001. 1-031001. 10.
- [101] ZHANG J H, MA H W. Numerical investigation of improving turbine sealing effectiveness through slot width modification of the rim seal[R]. ASME Paper GT2013-95570, 2013.
- [102] 吴康, 任静, 蒋洪德. 整级透平中转静轮缘密封问题研究: Part II 不同密封结构的特性[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(3): 496-500.
- WU Kang, REN Jing, JIANG Hongde. Study on flange sealing in integral turbine transition: Part II characteristics of different sealing structures[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(3): 496-500. (in Chinese)
- [103] SANGAN C M, SCOBIE J A, OWEN J M, et al. Performance of a finned turbine rim seal[J]. Journal of Turbomachinery, 2014, 136(11): 111008. 1-111008. 10.
- [104] CHEN S X, LI Z G, LI J, et al. Numerical investigations on the sealing effectiveness of turbine groove radial rim seal[R]. ASME Paper GT2019-90205, 2019.
- [105] LI J, GAO Q, LI Z G, et al. Numerical investigations on the sealing effectiveness of turbine honeycomb radial rim seal[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(10): 102601. 1-102601. 16.
- [106] 高庆, 李军. 涡轮蜂窝面径向轮缘密封封严性能的数值研究[J]. 推进技术, 2016, 37(5): 937-944.
- GAO Qing, LI Jun. Numerical study on sealing performance of radial flange seals on turbine honeycomb surface [J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(5): 937-944. (in Chinese)
- [107] 高庆, 李军. 间隙结构对轮缘密封封严性能及透平级气动性能影响的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(3): 25-31.
- GAO Qing, LI Jun. Numerical study on the Influence of gap structure on the sealing performance of flange seal and the aerodynamic performance of turbine stage[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(3): 25-31. (in Chinese)
- [108] GAO J, ZHENG Q, LI Y J, et al. Effect of axially non-uniform rotor tip clearance on aerodynamic performance of an unshrouded axial turbine[J]. Journal of Power and Energy, 2011, 226(2): 231-244.
- [109] 罗翔, 康文武, 全永凯, 等. 多齿轮缘密封特性的实验[J]. 航空动力学报, 2017, 32(1): 8-13.
- LUO Xiang, KANG Wenwu, QUAN Yongkai, et al. Experiment of sealing characteristic of multigear edge[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(1): 8-13. (in Chinese)
- [110] SCOBIE J A, TEUBER R, LI Y S, et al. Design of an improved turbine rim-seal[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(2): 022503. 1-022503. 10.
- [111] CHILLA M, HODSON H P, PULLAN G, et al. High-pressure turbine rim seal design for increased efficiency [R]. ASME Paper GT2016-57495, 2016.
- [112] GAO J, ZHENG Q. Comparative investigation of unsteady flow interactions in endwall regions of shrouded and unshrouded turbines[J]. Computers and Fluids, 2014, 105: 204-217.
- [113] 高杰, 郑群. 燃气轮机带冠叶片气热技术研究进展[J]. 中国科学(技术科学), 2015, 45(11): 1130-1148.
- GAO Jie, ZHENG Qun. Research progress in gas-thermal technology of gas turbine shrouded blades[J]. Science in China (Technical Science), 2015, 45(11): 1130-1148. (in Chinese)
- [114] 高庆, 屈杰, 马汀山, 等. 轴向轮缘密封导流段几何结构对涡轮级气动冷却特性影响的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(9): 26-33.
- GAO Qing, QU Jie, MA Tingshan, et al. Numerical study on the influence of geometric structure of axial flange seal on aerodynamic cooling characteristics of turbine stage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(9): 26-33. (in Chinese)
- [115] 张伟昊, 周颖, 邹正平, 等. 轮毂缘板进口圆角对涡轮气动性能的影响[J]. 热能动力工程, 2011, 26(2): 140-146.
- ZHANG Weihao, ZHOU Ying, ZOU Zhengping, et al. Influence of inlet fillet on turbine aerodynamic performance [J]. Journal of Thermal Energy and Power Engineering, 2011, 26(2): 140-146. (in Chinese)
- [116] 程舒娟, 李志刚, 李军. 端壁造型对轮缘密封流场和封严效率的影响[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(3): 20-27.

- CHENG Shuxian, LI Zhigang, LI Jun. Effect of endwall modeling on flow field and sealing efficiency of rims[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(3): 20-27. (in Chinese)
- [117] SCHREINER B D J, WILSON M, LI Y S, et al. Design of contoured turbine endwalls in the presence of purge flow: a feature-based approach[R]. ASME Paper GT2019-90443, 2019.
- [118] SHAHPAR S, CALONI S, PRIEELLE L. Automatic design optimization of profiled endwalls including real geometrical effects to minimize turbine secondary flows[J]. Journal of Turbomachinery, 2017, 139(7): 071010. 1-071010. 11.
- [119] 吴康, 林立, 任静, 等. 端壁侧向流出对透平轮缘密封的影响及优化[J]. 推进技术, 2014, 35(6): 758-765.
- WU Kang, LIN Li, REN Jing, et al. Effect of endwall lateral flow on turbine rim sealing and optimization[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(6): 758-765. (in Chinese)
- [120] 康文武, 罗翔, 刘冬冬, 等. 高低位进气方式对轮缘密封特性影响研究[J]. 推进技术, 2016, 37(10): 1958-1963.
- KANG Wenwu, LUO Xiang, LIU Dongdong, et al. Research on the influence of high and low intake modes on rim sealing characteristics[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(10): 1958-1963. (in Chinese)
- [121] CLARK K, BARRINGER M, JOHNSON D, et al. Effects of purge flow configuration on sealing effectiveness in a rotor-stator cavity[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2018, 140(11): 112502. 1-112502. 11.
- [122] 孙纪宁, 罗翔, 刘金楠, 等. 体积分数法测量几种转静系中的最小封严流量[J]. 航空动力学报, 2012, 27(5): 981-985.
- SUN Jining, LUO Xiang, LIU Jinnan, et al. Measurement of minimum seal flow in several statics by volume fraction method[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(5): 981-985. (in Chinese)
- [123] OWEN J M, WU K, SCOBIE J A, et al. Use of pressure measurements to determine effectiveness of turbine rim seals[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137(3): 032510. 1-032510. 10.
- [124] WANG L X, MA H W, ZHANG J H. Experimental investigation of effect of rim sealing flow on the flow field in a turbine cascade passage with different rim seal configurations[R]. ASME Paper GT2016-56848, 2016.
- [125] ZHANG Z Y, MA H W. An experimental study of ingress and egress flow structures in an axial research turbine stage[R]. ASME Paper GT2019-90827, 2019.
- [126] BERDANIER R A, MONGE-CONCEPCION I, KNISELY B F, et al. Scaling sealing effectiveness in a stator-rotor cavity for different blade spans[J]. Journal of Turbomachinery, 2019, 141(5): 051007. 1-051007. 10.
- [127] JONES R R, POUNTNEY O J, CLETON B L, et al. An advanced single-stage turbine facility for investigating nonaxisymmetric contoured endwalls in the presence of purge flow[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141(12): 121008. 1-121008. 14.
- [128] PALAFOX P, DING Z M, BAILEY J, et al. A new 1.5-stage turbine wheelspace hot gas ingestion rig (HGIR): Part I experimental test vehicle, measurement capability and baseline results[R]. ASME Paper GT2013-96020, 2013.
- [129] MAY D, CHEW J W. Response of a disk cavity flow to gas turbine engine transients[R]. ASME Paper GT2010-22824, 2010.
- [130] BERDANIER R A, DESHONG E T, THOLE K A. Evaluating the effects of transient purge flow on stator-rotor seal performance[R]. ASME Paper GT2019-91654, 2019.
- [131] 马宏伟, BOHN D E, DECKER A, 等. 涡轮级轮缘密封内非定常流场的准三维 LDV 测量[J]. 航空动力学报, 2004, 19(4): 455-458.
- MA Hongwei, BOHN D E, DECKER A, et al. Quasi-three-dimensional LDV measurement of unsteady flow field in turbine stage flange seals[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(4): 455-458. (in Chinese)
- [132] TEUBER R, LI Y S, MALTSON J, et al. Computational extrapolation of turbine sealing effectiveness from test rig to engine conditions[J]. Journal of Power and Energy, 2013, 227(2): 167-178.
- [133] LASKOWSKI G M, BUNKER R S, BAILEY J C, et al. An investigation of turbine wheelspace cooling flow interactions with a transonic hot gas path: Part 2 CFD simulations[J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(4): 041020. 1-041020. 12.
- [134] 于霄, 周晓菲, 康晓恩, 等. 涡轮燃气主流/盘腔二次流的分区耦合仿真: I 算法及平台实现[J]. 航空制造技术, 2015(12): 94-99.
- YU Xiao, ZHOU Xiaofei, KANG Xiaoen, et al. Zonal coupling simulation of turbine gas mainstream/disc cavity secondary flow: I algorithm and platform Implementation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(12): 94-99. (in Chinese)
- [135] 张晶辉, 白涛. 轮缘封严面网格匹配性对封严数值结果的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(6): 158-162.
- ZHANG Jinghui, BAI Tao. Effect of mesh matching on seal numerical results[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(6): 158-162. (in Chinese)
- [136] O'MAHONEY T, HILLS N, J CHEW. Sensitivity of LES results from turbine rim seals to changes in grid resolution and sector size[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2012, 52: 48-55.