

火箭涡轮泵机械密封研究综述

尹源¹, 廖传军², 王志峰³, 彭旭东⁴,
黄伟峰¹, 刘向锋¹, 刘莹¹

(1. 清华大学摩擦学国家重点实验室, 北京 100084; 2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076; 3. 北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076; 4. 浙江工业大学机械工程学院, 杭州 310032)

摘要: 机械密封作为一种适合在苛刻工况下使用的轴封形式, 在火箭各类涡轮泵中得到了广泛应用。涡轮泵的特殊性给机械密封的应用带来了一系列问题。对火箭涡轮泵机械密封方面的研究概况进行简述。首先从高速旋转轴系中的机械密封动力学方面, 介绍了高速工况下轴系与机械密封的耦合关系和机械密封主动控制的尝试; 然后对火箭涡轮泵机械密封中的摩擦磨损与润滑问题进行了介绍, 涉及高速摩擦磨损下的可靠性、热力耦合与变形问题、材料配副、流体膜形成机理与端面几何特征优化等各方面问题; 最后介绍了涡轮泵带压长期贮存的工作特点造成的静态慢渗问题。

关键词: 机械密封; 涡轮泵; 动力学; 摩擦学

中图分类号: V19

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2017) 03-0054-07

A Review of Mechanical Face Seal in Rocket Turbopump

YIN Yuan¹, LIAO Chuan-jun², WANG Zhi-feng³, PENG Xu-dong⁴,
HUANG Wei-feng¹, LIU Xiang-feng¹, LIU Ying¹

(1. State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;

3. Beijing Research Institute of Precise Mechanical and Electronic Control Equipment, Beijing 100076, China;

4. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: As a type of shaft seal suitable for harsh conditions, mechanical face seal is widely used in turbopumps. A series of problems are brought by the special features of turbopump. Firstly, concerning the dynamics of mechanical face seal in high-speed shafting, the researches on the coupling between shafting and seal are introduced, along with the development of active control on mechanical face seal. Then, the researches on friction, wear and lubrication are introduced, considering multiple problems including reliability under high-speed wear, thermal-mechanical coupling, material matching, fluid lubrication mechanism and geometric optimization. Finally the problem of leakage under static load, resulted from the long-time storage of mechanical face seal on the turbopump, is introduced.

Key words: Mechanical face seal; Turbopump; Dynamics; Tribology

收稿日期: 2017-05-23; 修订日期: 2017-07-04

基金项目: 国家科技支撑计划课题 (2015BAA08B02)

作者简介: 尹源 (1993-), 男, 博士, 主要研究方向为机械密封。E-mail: thuyinyuan@126.com

0 引言

涡轮泵是液体火箭发动机、燃气液压伺服系统等核心动力元件,其旋转轴密封的可靠性至关重要。火箭涡轮泵中常用的旋转轴密封形式主要包括迷宫密封、唇形密封、浮环密封、机械密封等基本密封形式及它们的组合^[1-2]。其中机械密封是一种在涡轮泵高参数运行工况下综合性能良好的轴端密封形式。

机械密封的基本理论在其他领域已经进行了大量研究。但在应用于涡轮泵时,机械密封需要在高压、高速、高温(或低温)、强振动等苛刻工况条件下工作^[2-3],这使得密封的工作机理和工作特性与常规机械密封存在明显的不同和特殊性。涡轮泵机械密封需要特别关注高速运转并存在强烈振动条件下的机械密封动态特性,以及苛刻工况下的密封端面摩擦磨损特性。此外,由于涡轮泵实际工作时间占比很少,长期处于带压贮存状态,机械密封的静态慢渗特性尤为重要。

本文从涡轮泵高速旋转轴系中的机械密封动力学、密封摩擦磨损与润滑和密封静态慢渗3个方面,对已有的研究成果进行综合性简述。

1 涡轮泵高速旋转轴系中的机械密封动力学

为分析机械密封的动态特性,Shapiro等^[4]分别独立求解润滑方程和运动方程,准静态地求解了一种飞机引擎轴端气体密封的动态特性。Miller等^[5]提出了一种同步求解润滑方程和动力学方程的方法。这些方法完整地求解密封在瞬态过程中的运动学状态和压强分布状态随时间的变化,消耗的计算资源非常大。更加节约计算资源的是由Miller等^[6-7]引入机械密封领域的小扰动法。小扰动法的方程组中没有时间项,可以用较少的资源消耗计算出气膜的动态刚度和阻尼,并用于与轴系动力学的耦合分析。Miller等的研究主要面向干气密封等非接触式机械密封。

涡轮泵轴系具有较高的运行速度,已有的研究表明,当机械密封安装在高速甚至超高速旋转的轴上时,其工作会受到轴系动力学特性的影响^[8-10]。反过来,机械密封也作为轴系中的一个转子影响着整个轴系的动力学特性^[11-13]。

对机械密封工作受轴系动力学特性影响这一问题的研究最早在1994年由Lee等^[8]开展。他们

利用转子动力学中常用的传递矩阵方法,研究了将轴、流体膜、副密封等诸多因素耦合考虑的完整动力学系统。以动环浮动型机械密封为分析对象,针对追随性(以幅值减少比率和相位差作为考察参数)将耦合分析结果与已有的针对机械密封独立分析的结果进行了对比,发现在某些工况下耦合分析结果和独立分析结果存在很大差别。

1996年,Wileman等^[9]研究了机械密封偏心对转子动力学特性的影响。他们研究了一种双浮动动环密封,从理论上推导了它们所受的力和力矩与径向位移的线性化关系,得到了偏摆和径向两种动力学模式存在耦合现象的结论。2004年,Wileman^[10]研究了轴同步涡动对机械密封的影响,研究对象仍是双浮动动环密封。其对多种特殊情形(包括动环与涡动轴刚性连接且静环浮动、动环浮动且静环偏心等)进行了讨论。结果表明,轴的同步涡动会对双浮动环密封的稳态性能产生显著的影响;对于动环与轴刚性连接且静环浮动的情形,密封对轴的涡动更加敏感。

徐华等^[11]研究了机械密封对转子轴承系统动力学特性的影响,在研究中他们将机械密封视为具有线性刚度和阻尼特性的元件。他们的结论是,机械密封限制了转子轴承系统横向振动的转角变化,从而导致临界转速提高且不平衡响应降低。

张楠等^[12]对涡轮泵轮子-石墨密封系统的振动特性进行了研究,建立了涡轮泵转子-密封系统的耦合动力学方程,并求解了系统的不平衡力响应。他们的研究表明:一方面密封的摩擦作用会减小转子的振动幅值;另一方面会强化转子的弯扭耦合作用,使振动频率特征复杂化并带来失稳危险。

董卫红等^[13]建立了高速涡轮泵转子系统动力学集成模型,这一模型描述了密封装置、轴承、轴向平衡装置等多种摩擦学元件相耦合的动力学特性,见图1^[13]。郭军刚等^[14]针对超高速涡轮泵机械密封的工作状况和失效机理研究了其动力学稳定性和密封端面磨损换热特性,并对特定的机械密封形式和参数进行了分析,从而得到其工作性能参数,并得出了若干失效因素的针对性设计方案。

除通过设计密封本身的动力学性能来维持其稳定工作外,学者们还通过在机械密封中设计主动控制装置来引入对密封状态的主动调节,以保持密封处于良好的工作状态下。

Wolff等^[15]开发了一种用于液氧涡轮泵上的具

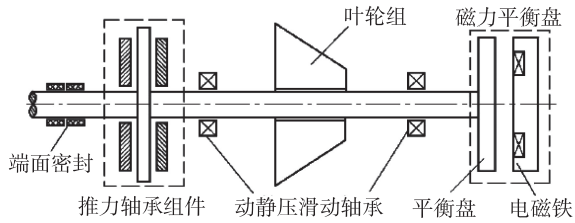


图1 复杂高速涡轮泵转子系统示意图

Fig. 1 A complex high-speed turbopump rotor system

有主动控制功能的机械密封。将一个密封环安装在压电晶体上，调整施加在压电晶体上的电压来改变锥角，实现对密封静压效应的改变，从而起到明显的调节效果。其以热电偶测得的温度作为反馈量，形成了闭环控制系统，实验表明这一控制系统可以赋予密封良好的抵御扰动能力。

Green^[16]对机械密封的故障诊断及在其基础上开展的主动控制做了非常详细的阐述。在故障诊断上提出了“三种表征”——波形、功率谱和角位移轨道，并在此基础上通过控制浮动环背部压力的方法对机械密封进行主动调节。其实验结果示意图如图2^[16]所示。

张国渊等^[17-18]研究了通过磁力加载进行主动调控的高速涡轮泵轴端机械密封，提出了系统的机械密封主动控制设计方法，并在密封实验系统上开展了主动控制实验。实验表明其控制手段具有良好的效果，且控制理论与实验结果可以较好地吻合。

现有的涡轮泵机械密封动力学研究成果中，主要集中在机械密封单独的一般动力学方面，机械密封与轴系动力学的相互影响已开始得到研究，并已经形成了一些通过线性模型实现耦合的方法。此外，已有多种采用主动控制影响涡轮泵机械密封动力学特性的研究报道，这无疑是一种值得关注的技术手段，但其实际的调控能力以及在机械密封结构中加装调控设备的影响尚不明确。

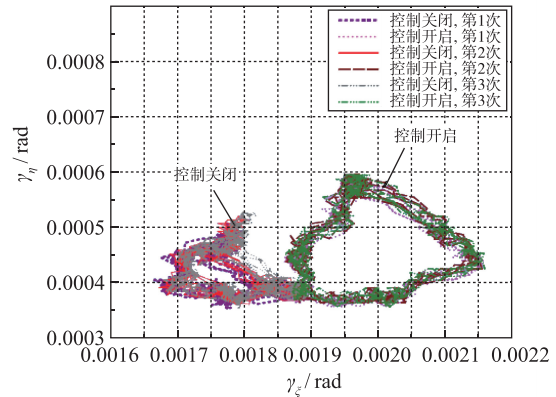
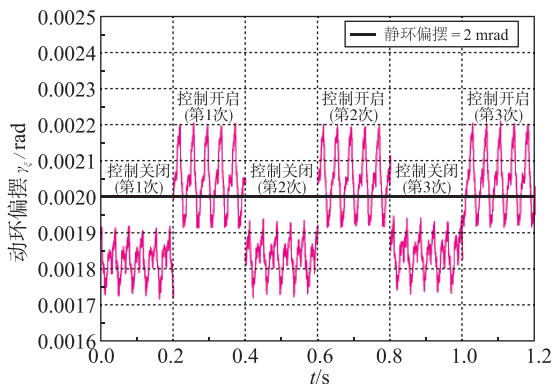


图2 Green I的主动控制实验结果示意图，
图上部为动环偏摆随时间的变化，下部为角位移轨道

Fig. 2 Results of active control experiment of Green I.

The upper part shows rotor misalignment changing with time, and the under part shows the angular orbit

2 涡轮泵机械密封端面润滑与摩擦磨损

机械密封的工作性能和可靠性与其端面润滑状态和摩擦磨损相关。涡轮泵运行工况条件苛刻，机械密封端面的润滑与摩擦磨损会表现出一定的特殊性。由于极高的摩擦线速度、极高（或极低）的介质温度（影响变形、相变、材料性能等）等因素，涡轮泵机械密封中的摩擦作用非常复杂，若设计、制造、维护和使用不当，可能导致机械密封迅速耗损，可靠性下降。野坂正隆等^[19]在液体火箭发动机涡轮泵中，采用了超低温下不发生变形的密封结构形式，并在密封上安装了防止静环振动的氟塑料防振器，从而获得稳定的密封性能，并进行了预负荷对密封性能的影响和密封耐久性试验。野坂正隆等^[20]进一步研究了涡轮泵机械密封的启动转矩和静态泄漏特性，并根据由密封面的磨损形状测得的倾斜量来阐明转矩和静态密封性能的稳定条件，同时测量机械密封高速运转时的摩擦损失功耗，研究密封面的推力，阐明运转时动态密封性能的稳定条件。铃木峰男等^[21]开展了液氧涡轮泵轴密封的密封性能与耐久性的实验研究，实验表明密封系统中机械端面密封在16500r/min的高转速下工作7000s的磨损深度不到10 μ m，满足使用要求。

张淑敏等^[22]采用有限元方法分析了超高速燃气涡轮泵机械密封（见图3^[22]），并进行了实验验证。他们将密封环最高温度和最大应力作为校核的准则，计算结果表明即使转速高达100000r/min密封仍能正常工作，并在其实验设备上进行了实

验证。

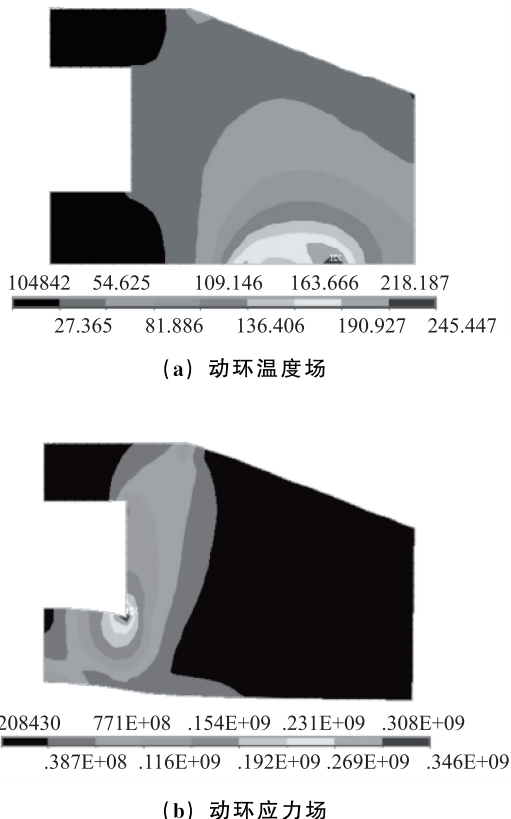


图 3 超高速燃气涡轮泵机械密封数值模拟部分结果
 Fig.3 Part of results from numerical simulation for ultra-high-speed gas turbopump mechanical face seal

张嘉禾等^[23]针对受限空间下需要密封两种介质的超高速密封工况提出了一种新的机械密封形式。他们设计的机械密封装置由两个独立的机械密封组成，两者之间充满冷却水。数值模拟结果表明，在转速为 50000r/min 的超高速下，以 10L/min 的冷却水流量可将密封装置的最高温度降到 107℃，并且与冷却水接触的界面上温度均在 100℃ 以下，不会发生冷却水的汽化。张树强等^[24]建立了涡轮泵用机械密封的二维稳态传热数值模型。利用该模型对密封端面的温度分布等一系列热系统问题进行了参数研究，并发现在高参数工况下密封端面极容易发生液膜汽化，而采用高导热系数的摩擦副材料可以有效避免这一问题产生。

江志斌等^[25]就已有的高速高压机械密封的摩擦副材料选择方法进行了小结。在高速高压下，摩擦面局部瞬间温度有时可达几百摄氏度，从而对摩擦副材料提出了导热性、热硬性和自润滑性的要求，并且需要从材料选择和结构设计上避免热变形。

为适应密封向高速化方向发展的需求，减低密封的摩擦磨损，非接触式的机械密封逐渐被广泛应用于涡轮泵。美国等研发出了专用于液氢液氧涡轮泵上的非接触式机械密封^[26]。

Dirusso^[27]研究了一种用于涡轮泵的螺旋槽干气密封。分析表明，通过在有限的空间范围内对螺旋槽的设计进行优化，可以使密封工作在非接触状况下，得到优化设计后的膜厚和承载能力。如图 4，Glienicke 等^[28]对高压、高速下的多种端面槽形（螺旋槽、T 形槽、V 形槽等）的表现进行了数值模拟和实验研究，表明了 在高压、高速下在端面形成稳定的全膜润滑以消除接触是可行的。Zheng 等^[29]在上述研究的基础上提出了一种大直径并且流体膜具有高角向刚度的涡轮泵机械密封（见图 5^[29]）。其动环采用如图 5 所示的双螺旋槽，静环则开出通槽并设置小孔。他们对该密封的泄漏和动态特性进行了数值模拟，验证了其性能达到设计目标。

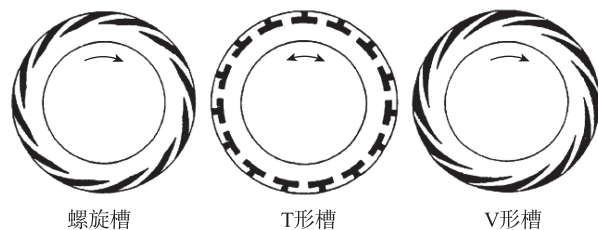


图 4 Glienicke 研究的 3 种不同端面槽形
 Fig.4 Three shapes of grooves studied by Glienicke

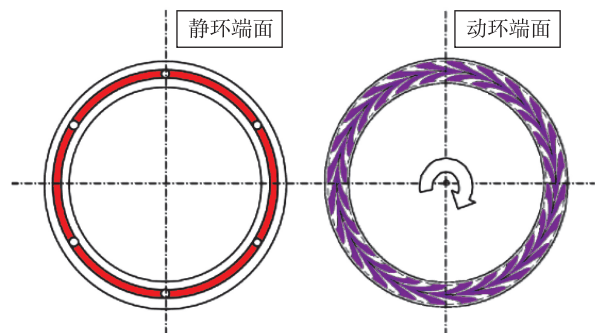


图 5 Zheng 研究的端面槽形
 Fig.5 The shapes of grooves studied by Zheng

Young 等^[30]分析了采用激光加工出端面波度的碳化硅密封环在高速（转速最高达 5550r/min）高压（压力最高达 20.9MPa）下的表现，研究表明该密封性能优秀。尽管其并非用于涡轮泵，但由于有类似的工况，仍对涡轮泵机械密封设计具有参考价值。Berard 等^[31]对大直径自适应双向

旋转螺旋槽进行了分析和改进,在密封环下方安装耐高温永磁体以避免启动和停车过程中的接触。

刘忠等^[32]针对不同黏度的低温工作介质对双螺旋槽密封进行了参数优化。结果表明,介质黏度不同时,最优设计有明显的差异。低温工作介质是涡轮泵密封中常遇到的情况(液氧、液氢等),因而这一工作具有借鉴意义。陈杰等^[33]对用于液氧/煤油发动机的非接触式螺旋槽密封的性能进行了数值分析,并以最大化气膜刚度为目标对密封的几何参数进行了优化。理论研究结果得到了实验验证。

赵伟刚等^[34]对用于液氧泵的动静压混合式密封的关键技术——进行了详细的介绍,包括介质选择和端面几何参数优化,并提出了较优的参数范围。

总体而言,已有很多研究人员开展了涡轮泵机械密封润滑机理和摩擦磨损问题的研究,在密封的传热、变形、材料匹配、端面槽形等方面获得较为丰富的研究成果。为进一步研究涡轮泵机械密封的性能演化和可靠性等重要内容,尚需在密封混合润滑和边界润滑、密封端面磨损规律及其与密封表面形貌之间的关联等方面继续开展研究。

3 涡轮泵机械密封的静态慢渗

与常见的泵用机械密封相比,涡轮泵机械密封工作特点之一是经常处于带压长期贮存状态,在此过程中,密封常发生随贮存时间增长而泄漏异常的状况,在某些场合下可能带来严重的安全隐患。

Lebeck^[35-36]考虑机械密封端面的波度、锥度和粗糙度,建立了机械密封泄漏模型。孙见君等^[37]基于分形理论建立了泄漏通道模型。这些泄漏模型对于一般的机械密封提出,尚不足以准确描述涡轮泵机械密封长时间静压贮存的慢渗现象。包超英^[2]将多孔介质模型应用于密封环,从而建立起了渗漏模型,这个模型中并未考虑长期贮存的时间效应。

针对涡轮泵机械密封特有的长时间贮存问题,吴勋等考察了作为静压慢渗失效主要因素的密封环变形问题,对安装在静环座上的石墨静环在多种工况下的变形进行了实验研究。研究表明长期静压贮存会导致石墨环端面产生较大的波度和锥度,

从而使泄漏量增大^[38]。随后进一步开展了有限元仿真研究,并进行了可靠性分析,得到了不同贮存时间之后密封组件应力-应变和石墨环变形结果^[39-40]。

白东安等^[41]研究了涡轮泵机械密封的泄漏量超标对发动机可靠性的影响。在模拟计算和实验验证的基础上,得出试车过程可以减小密封组件变形,从而减少泄漏量的结论。

上述研究对涡轮泵机械密封发生静态慢渗的机理及其主要影响因素进行了初步分析。但总体而言,相关研究还非常少,慢渗机理还远未研究清楚,亟须开展深入研究。

4 总结与展望

1) 机械密封动力学方面的现有研究成果尽管尚不丰富,但基本揭示了高速轴系中机械密封动力学的关键问题所在,即轴系动力学与机械密封动力学发生耦合。一些在一般机械密封动力学中无需考虑的问题(如径向位移等)需要被纳入耦合系统中加以考虑。现有的模型通过线性化处理,以简化的方式初步实现了耦合。未来有望采用非线性方法进行耦合以建立更准确的耦合模型,并为研究多种非线性现象(例如裂纹、轴承游隙、密封气膜刚度等)提供可能。此外,通过在机械密封原本的动力学系统上附加额外的主动控制,人或智能控制系统介入机械密封的动力学行为将成为可能。但从目前情况来看,控制系统的性能,包括存在对密封原有性能的牺牲仍待评估。

2) 在涡轮泵机械密封的润滑和摩擦磨损方面,已有较多研究,在密封的传热、变形、材料匹配、端面槽形等方面获得了较为丰富的研究成果。后续研究一方面有望在密封混合润滑和边界润滑问题上取得进一步的成果,这将对机械密封在极小膜厚运行的工况给出更准确的解释;另一方面密封端面磨损规律与密封表面形貌之间有望建立关联,这将为机械密封的可靠性评估提供坚实的理论依据。

3) 静态慢渗问题是涡轮泵机械密封的特有问题,但对涡轮泵机械密封的实际使用性能影响巨大。现有的研究成果对其发生机理和影响因素进行了一定分析,但目前研究成果还非常少,且其机理还远未研究清楚,亟须开展深入研究。

参考文献

- [1] 章本立. 高速涡轮泵的若干问题 [J]. 宇航学报, 1983 (4): 81-90.
- [2] 包超英. 基于渗流原理的机械密封静压渗漏特性分析 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [3] 张树强, 陈杰, 赵伟刚, 等. 液体火箭发动机涡轮泵用非接触式密封研究现状及展望 [C]. 中国航天第三专业信息网第三十七届技术交流会暨第一届航天动力联合会议, 2016.
- [4] Shapiro W, Colsher R. Steady-state and dynamic analysis of a jet engine, gas lubricated shaft seal [J]. ASLE Transactions, 1974, 17 (3): 190-200.
- [5] Miller B A, Green I. Numerical formulation for the dynamic analysis of spiral-grooved gas face seals [J]. Transactions-American Society of Mechanical Engineers Journal of Tribology, 2001, 123 (2): 395-403.
- [6] Miller B A, Green I. Numerical techniques for computing rotordynamic properties of mechanical gas face seals [J]. Journal of Tribology, 2002, 124 (4): 755-761.
- [7] Miller B A, Green I. Semi-analytical dynamic analysis of spiral-grooved mechanical gas face seals [J]. Journal of Tribology, 2003, 125 (2): 403-413.
- [8] Lee A S, Green I. Rotordynamics of a mechanical face seal riding on a flexible shaft [J]. Journal of Tribology, 1994, 116 (2): 345-351.
- [9] Wileman J, Green I. The rotor dynamic coefficients of eccentric mechanical face seals [J]. ASME Journal of Tribology, 1996, 118 (1): 215-224.
- [10] Wileman J. Dynamic response of eccentric face seals to synchronous shaft whirl [J]. ASME Journal of Tribology, 2004, 126 (2): 301-309.
- [11] 徐华, 朱均. 机械密封对转子轴承系统动力学性能的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38 (7): 665-669.
- [12] 张楠, 钱大帅, 刘占生, 等. 涡轮泵转子-石墨密封系统的振动特性 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2010, 40 (3): 512-516.
- [13] 董卫红, 伊建辉, 张帆, 等. 高速涡轮泵转子系统动力学集成建模及应用 [J]. 机械科学与技术, 2013 (9): 1254-1258.
- [14] 郭军刚, 温力, 郑华义, 等. 超高速涡轮泵机械密封工作特性分析 [J]. 导弹与航天运载技术, 2016 (4): 22-24.
- [15] Wolff P J, Salant R F. Electronically controlled mechanical seal for aerospace applications-part II: Transient tests [J]. Tribology Transactions, 1995, 38 (1): 51-56.
- [16] Green I. Robustness of modeling of out-of-service gas mechanical face seal [R]. 2006 NASA Seal/Secondary Air System Workshop, 2016: 289-323.
- [17] Zhang G, Zhao W. Design and experimental study on the controllable high-speed spiral groove face seals [J]. Tribology Letters, 2014, 53 (2): 497-509.
- [18] 张国渊, 赵伟刚, 陈焱, 等. 非接触动静结合型机械密封的主动可控性及其脱开机理 [J]. 航空动力学报, 2014, 29 (10): 2515-2522.
- [19] 野坂正隆, 王晋桦. 液氢涡轮泵用密封件的试制研究 [J]. 国外导弹技术, 1982 (11): 29-36.
- [20] 野坂正隆, 吴杰. 液氢用高速接触式机械密封的密封特性研究 [J]. 国外导弹技术, 1985 (2): 68-90.
- [21] 铃木峰男, 吴杰. 液氧涡轮泵轴密封的密封性能和耐久性 [J]. 国外导弹技术, 1984 (3): 41-62.
- [22] 张淑敏, 胡丽国, 孟祥铠. 超高速燃气涡轮泵机械密封的分析与研究 [J]. 流体机械, 2012, 40 (10): 23-27.
- [23] 张嘉禾, 杨赅石, 彭博, 等. 超高速下机械密封的结构及温度场研究 [J]. 船海工程, 2014, 43 (2): 162-164, 172.
- [24] 张树强, 王良, 赵伟刚. 液体火箭发动机涡轮泵用机械密封温度场及热载变形研究 [J]. 火箭推进, 2014, 40 (5): 92-98.
- [25] 江志斌, 马强. 高速高压机械密封的材料研究 [J]. 现代制造工程, 2007, 17 (11): 62-64.
- [26] Chupp R E, Hendricks R C, Lattime S B, et al. Sealing in turbo-machinery [J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22 (2): 313-349.
- [27] Dirusso E. Design analysis of a self-acting spiral-groove ring seal for counter-rotating shafts [R]. New York: AIAA 1983-1134, 1983.
- [28] Glienicke J, Launert A, Schlums H, et al. Non-contacting gas lubricated face seals for high p x v-values [R]. NASA. Lewis Research Center, Seals Flow Code Development, 1993: 367-378.
- [29] Zheng X, Gardner J, Berard G. Adaptive divert double-spiral groove face seals for high speed, high temperature applications [R]. New York: AIAA 2000-3373, 2000.
- [30] Young L A, Key B, Philipps R, et al. Mechanical seals with laser machined wavy SiC faces for high duty boiler circulation and feedwater applications [J]. Lubrication Engineering, 2003, 59 (4): 30-39.
- [31] Berard G, Zheng X. Analysis and design of a double-divert spiral groove seal [R]. New York: AIAA

- 2006-4753, 2006.
- [32] 刘忠, 刘莹, 刘向锋. 低温介质粘度对端面双螺旋槽动密封槽数优化的影响 [J]. 润滑与密封, 2006 (10): 79-80, 83.
- [33] 陈杰, 李建克, 王少鹏. 低温非接触式端面密封参数优化与试验验证 [J]. 火箭推进, 2013, 39 (4): 56-61.
- [34] 赵伟刚, 张树强, 陈杰, 等. 液氧泵用动静压混合式密封关键技术研究 [J]. 润滑与密封, 2017, 42 (1): 111-115, 136.
- [35] Lebeck A O. Hydrodynamic lubrication in wavy contacting face seals—a two dimensional model [J]. Journal of Lubrication Technology, 1981, 103 (4): 578-586.
- [36] Lebeck A O. Contacting mechanical seal design using a simplified hydrostatic model [J]. Tribology International, 1988, 21 (1): 2-14.
- [37] 孙见君, 顾伯勤, 魏龙. 基于分形理论的接触式机械密封泄漏模型 [J]. 化工学报, 2006, 57 (7): 1626-1631.
- [38] 吴勋, 解红雨, 陈广南, 等. 液体发动机涡轮泵端面密封长期贮存变形研究 [J]. 宇航材料工艺, 2008 (5): 29-32.
- [39] 吴勋, 刘纪涛, 张为华, 等. 涡轮泵端面密封有限元仿真及贮存可靠性分析 [J]. 润滑与密封, 2009 (10): 54-57.
- [40] 吴勋, 刘纪涛, 肖飞, 等. 涡轮泵端面密封贮存仿真及可靠性分析 [J]. 空军工程大学学报 (自然科学版), 2009, 10 (4): 15-19.
- [41] 白东安, 段增斌, 张翠儒. 涡轮泵端面密封性能与漏气量影响研究 [J]. 火箭推进, 2010, 36 (1): 38-42.