



涉海装备用机械密封技术研究现状及发展趋势研究

赵文静 金杰 孟祥铠 彭旭东

State of the Art and Development Trend of Mechanical Seal for Marine Equipment

ZHAO Wenjing JIN Jie MENG Xiangkai PENG Xudong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018172>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于软弹流润滑模型的液压格莱圈密封性能分析

Analysis of Sealing Performance of a Hydraulic Glyd-Ring Seal Based on Soft EHL Model

摩擦学学报. 2018, 38(1): 75 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.01.010>

汽液两相流机械密封的研究进展

Research Progress on the Liquid Face Seal of Vapor-Liquid Two-Phase Flow

摩擦学学报. 2019, 39(5): 643 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018093>

表面织构化机械密封热弹流润滑性能分析

A TEHD Lubrication Analysis of Surface Textured Mechanical Seals

摩擦学学报. 2018, 38(2): 204 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.02.011>

高速涡轮泵机械密封端面温度变化规律研究

Analysis of Face Temperature in Mechanical Seal Applied in the High Speed Turbo pump

摩擦学学报. 2019, 39(3): 313 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018095>

均压槽结构形状对静压干气密封性能影响分析

Influence of the Pressure-equalizing Groove on the Seal Performance of Hydrostatic Dry Gas Seal

摩擦学学报. 2017, 37(5): 677 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.05.016>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: [10.16078/j.tribology.2018172](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018172)

涉海装备用机械密封技术研究现状及 发展趋势研究

赵文静, 金 杰, 孟祥铠, 彭旭东*

(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘 要: 随着海洋资源的不断开发和探索, 机械密封技术已成为保证涉海装备正常运行和海洋开发可靠进行的必备关键要素之一. 本文作者从摩擦学和动力学等角度综述了涉海装备用机械密封技术的研究现状, 重点从密封界面效应、多场耦合、动力学特性和密封面表面织构等几方面展开具体分析与讨论, 对机械密封相关技术进一步的研究方向和发展趋势进行了总结和探索, 指出了涉海装备用机械密封技术的发展方向及趋势, 为今后涉海装备用机械密封的设计开发及应用提供了基础, 对提高涉海装备用机械密封性能及装置运行安全性、稳定性和可靠性具有重要意义.

关键词: 机械密封; 涉海装备; 摩擦; 润滑; 密封性能

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2019)06-0792-11

State of the Art and Development Trend of Mechanical Seal for Marine Equipment

ZHAO Wenjing, JIN Jie, MENG Xiangkai, PENG Xudong*

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Zhejiang Hangzhou 310023, China)

Abstract: With the development and exploration of marine resources, mechanical seal has become one of the essential and key elements in stable operation of marine equipment and reliable ocean development. Research status on mechanical seal for marine equipment were reviewed from the views of tribology and dynamics. The sealing interface effect, multi-field coupling, dynamic characteristics, sealing surface texture were mainly focused, and the research directions and trends of mechanical seal technology were summarized and explored. The development trend of mechanical seal technology for marine equipment was presented. It provided the foundation for the design, development and application of mechanical seals for marine equipment in the future. It is of great significance to improve the sealing performances, safety, stability and reliability of mechanical seal for marine equipment in operation.

Key words: mechanical seal; marine equipment; friction; lubrication; sealing performance

随着科技和经济的飞速发展, 我国海洋装备正在向深海水域、高参数、高性能和复杂结构方向发展, 因此给涉海装备密封技术特别是艀轴动密封提出了挑战. 相比于陆地环境, 海洋环境条件比较苛刻, 特别是在深海高压、腐蚀、低温、变温和变密度等恶劣环境因

素的作用下, 对深海装备用机械密封技术的耐压性、耐磨性、密封性和润滑性等要求很高, 迫切需要提高其密封性能来保证涉海装备运行的安全性、稳定性和可靠性. 目前, 涉海装备动密封同时也引起了越来越多研究者的广泛关注, 已成为密封研究领域的一大热

Received 14 November 2018, revised 13 March 2019, accepted 21 March 2019, available online 28 November 2019.

*Corresponding author. E-mail: xdpeng@126.com, Tel: +86-13805766526.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51605436, 51775505) and National Science Foundation of Zhejiang Province, China (LQ16E050009, LY17E050018).

国家自然科学基金项目(51605436, 51775505)和浙江省自然科学基金项目(LQ16E050009, LY17E050018)资助.

点,但是国外一直对涉海装备密封技术严格保密,开展相关技术研究,研制开发出自主知识产权的各类系列涉海装备动密封,不仅具有重要的理论价值,而且具有深远的战略意义问题.本文作者综述了近近年来海洋装备用机械密封技术的研究进展,重点从密封界面效应、多场耦合、动力学特性及密封面表面织构等几方面展开分析与讨论,并对涉海装备用机械密封的发展方向进行了展望.

1 涉海机械密封界面效应及密封性能研究

1.1 静态和准稳态工况

机械密封端面的摩擦状态和摩擦工况对密封性能起着决定性的作用.根据密封结构、密封介质特性和工况条件的不同,机械密封端面的摩擦状态可分为干摩擦、流体摩擦、边界摩擦和混合摩擦四种类型.目前对边界摩擦和混合摩擦的研究还不够成熟,特别是在试验研究方面有一定的差距,端面的摩擦特性问题一直都是国内外研究者关心的热点和重点问题.Mayer的早期研究认为机械密封端面的摩擦一般属于边界摩擦,在高或低黏度介质中采用软质摩擦副具有较长使用寿命.Nau^[1]通过利用滑动轴承,认为目前在实际应用中的机械密封绝大多数都工作于流体摩擦状态,且有研究表明在一定条件下械密封端面运转处于混合摩擦状态^[2].同时,国内王汝美^[3]也提出在实际运转中的一般机械密封绝大多数是处于混合摩擦状态的结论,而高速、高黏度或轻载的机械密封工作于全膜流体摩擦状态.在机械密封端面摩擦性能的研究中,虽然许多学者对端面的接触特性进行了分析,但都是在保持压力恒定或是接触面间载荷不变的条件下进行的^[4],不符合实际涉海特别是深海装备的运行特点.对于实际深海装备的运行过程,国内学者很早就提出了深海动态密封,对水下1 km内的动态密封进行了分析^[5],且从材料选择和结构等方面报道了机械密封在水下机器人中的应用,并设计出可满足水下450 m密封要求的水下机器人用机械密封机构^[6].虽有学者对涉海装备下潜深度发生改变时端面的接触特性和摩擦特性进行了分析讨论^[7],且基于有限元方法分析了深海装备电机用机械密封性能^[5],指出了端面接触应力随着水深的增加而增加及端面内周紧密接触逐渐变为外周紧密接触的变化规律,还得到了端面接触压力与密封环参数间的作用关系,但是相关研究尚少,没有深海环境下海水压力与密封性能间影响作用的系统分析,而这正是涉海用机械密封与普通机械密封

的重要区别.

机械密封端面间的液膜非常薄,处于微米级,它与端面间的摩擦状态有着非常密切的联系.在涉海机械密封的实际工作中,端面间存在复杂的热力流固耦合作用,研究涉海机械密封的摩擦与润滑特性时必须考虑涉海密封端面的表面粗糙度、波度之间接触摩擦热及液膜的剪切摩擦热.虽有国内外学者提出了一定条件下的机械密封混合摩擦模型,在一定程度上考虑了微凸体摩擦热^[8]、表面粗糙度^[9-11]和端面锥度^[11]等因素的影响,但这类研究很复杂,目前还没有一个全面考虑各个因素的混合摩擦工况模型可供涉海装备应用.

在混合摩擦状况下,当液膜在端面间承担较大载荷时,就可提高端面润滑特性,降低端面磨损,减少端面摩擦热引起的形变,提高机械密封运行稳定性.国内外学者在机械密封端面间流体润滑效应方面的研究较少,主要考虑端面的变形和摩擦热对端面液膜和润滑特性的影响.虽然国内外学者通过分析流体静压效应,指出了流体静压效应是流体膜压形成的主要影响因素^[12],提出了液膜压力分布方程和流体静压的平均值^[13],并利用计算流体力学技术分析了机械密封端面流场分布^[14],但是这些研究均局限于理论研究,试验研究很少,很难通过试验研究准确地测量出端面间的液膜厚度,并且对接触式机械密封端面间的流体润滑机理的研究也相对较少,尤其是海水润滑研究偏少,仅有的海水润滑研究也主要局限于纯海水环境中,需要进行更多的关注和研究,以提高涉海特别是深海高参数机械密封的密封性能和密封装置运行的稳定性和可靠性.

1.2 变工况

与准静态或稳态条件相比,涉海机械密封环在变工况下运转时呈现出不同的特性,即动态特性.国内外学者对这种变工况下的动态特性开展了相关的研究和分析,例如Harp等^[15]提出了可用于分析预测变速条件下端面液膜厚度、压力分布、变形和泄漏率等参数的械密封环瞬态特性的数学模型;谢启祥^[16]针对涉海船用机械密封装置,分析了变压下密封端面比压、变形量、变形锥度和摩擦系数;单晓亮^[17]运用粘接方法对不同转速与水深时的涉海鱼雷热动力装置机械密封温度场进行了研究;刘录等^[18]讨论了变工况下机械密封的失效机理,并进行了变工况机械密封的研制与开发,对涉海变工况机械密封设计提供了依据;Xiong等^[19]建立了接触型机械密封的动态模型,分析了变工况对端面泄漏的影响;蔡晓君^[20]依据机械密封

理论, 确定了变工况条件下影响机械密封工作的主要因素, 并设计完成了具有抗变工况能力的密封装置; 吴铸新等^[21]通过开展船舶尾轴机械密封变工况性能试验研究, 得出在不同工况下转速和压力等对端面温度和泄漏率等的影响规律, 这些研究成果均为涉海装备用机械密封设计开发及应用提供了客观依据。

同时, 机械密封的变工况试验研究表明, 由变工况引起的端面液膜失稳是导致密封性能恶化和密封失效的主要原因^[18]。针对端面液膜, 在流体动压润滑效应方面, 国内外学者提出了混合摩擦工况下的机械密封数值模型, 考虑了涉海装备用机械密封端面摩擦热、流体剪切效应和液膜挤压效应等^[19, 22], 涉及端面形貌、变形、摩擦热和液膜厚度之间的影响关系^[23], 建立了考虑表面粗糙度和端面锥度的流体动压润滑模型^[11], 还考虑了端面波度和液膜黏性热^[24]、端面倾斜^[25]和相变等的影响, 并进行了试验研究^[26]。

与油润滑相比, 水润滑在涉海装备中具有其独特的优势。国外开展水润滑研究较早, 在二十世纪四十年代美国舰艇就已使用水润滑轴承, 并对研究成果进行了保密处理。八十年代末, 我国开始进行水润滑的探索研究, 主要以纯水作为润滑介质, 虽然已有对淡水和海水的关注, 但是更多围绕海水对材料摩擦磨损行为的影响, 集中于腐蚀磨损交互作用机制的研究, 在海水本身的润滑方面研究甚少, 尤其是涉海机械密封海水润滑特性研究方面, 这给涉海机械密封性能的研究带来了一定的挑战。

目前变工况机械密封技术的发展处于理论和试验相结合的阶段, 虽然理论研究已达到一定的程度, 获得了丰硕的成果, 但是主要局限于单一润滑介质, 且尚未出现考虑包含微生物的海水润滑模型, 离实际运用还存在一定的差距, 不能真实反映实际涉海运用中的润滑及密封机理。因此, 设计开发变工况机械密封以适应实际涉海工作状态, 提升机械密封抗变能力, 是提高涉海机械密封使用寿命的关键。研究并逐步完善变工况密封理论, 分析变工况下机械密封主要参数变化规律及其主要影响因素, 结合实际涉海情况研制变工况机械密封装置, 是目前涉海高参数机械密封性能得到提升的一大主要途径。

2 涉海机械密封端面耦合效应及密封性能研究

涉海机械密封在运转过程中, 摩擦副端面产生大量的摩擦热, 使端面温度升高, 产生热量损耗和热应力, 发生形变, 改变液膜厚度, 从而使得端面的接触状态发生变化, 加上端面因受到介质压力、弹簧力和液膜压力的作用, 将产生力变形, 因此, 密封端面在热力耦合作用下不仅会导致端面变形, 而且会引起液膜的汽化甚至干磨。同时, 这种端面变形反过来又影响端面间的压力分布、热量分布和温度分布等, 遭受来自海洋海水或微生物的侵蚀作用, 改变端面流体润滑效果和摩擦磨损状况, 造成端面进一步变形, 形成如图1所示的循环图。

它们之间相互影响, 相互作用, 过程十分复杂, 进

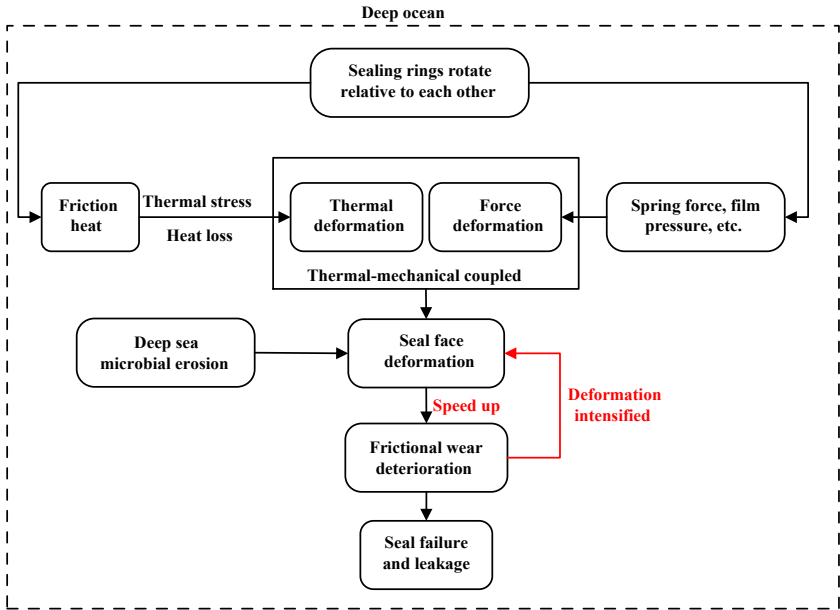


Fig. 1 Friction and wear on mechanical seal face

图 1 机械密封端面摩擦磨损过程

而影响涉海装备用机械密封装置的使用性能和安全性。这种温度场、流体场和热力场等之间的相互耦合作用对涉海装备用机械密封性能及其使用寿命的提高起着关键作用,在深海高参数极端不稳定条件下尤为明显,因此,开展对涉海特别是深海高参数机械密封多场耦合问题的研究尤为重要。然而,要准确获得涉海装备机械密封的密封性能,仅仅通过研究端面的力变形或是热变形来表征端面的密封特性是不准确的,必须综合考虑海洋环境中热、流动、变形和侵蚀等各个影响因素以及各因素间的耦合关系,才能更真实准确地反映端面的密封特性,提高密封设计的可靠性,保障机械密封安全、稳定地运行。同时,这也是目前涉海机械密封研究的主流热点和难点问题。

国内外许多学者都在涉海机械密封耦合效应方面做了一定的研究,涉及的物理场不仅包含应力场和温度场,还涉及到流体场。例如,Clark等^[27]采用计算流体力学方法建立了机械密封摩擦副热流耦合模型,并提出了端面冷却的改进措施;Ayadi等^[28]通过耦合机械密封环传热及变形模型,对水密封介质下的端面摩擦扭矩、温度和泄漏率等性能进行了预估研究;Zhou等^[29]利用ANSYS软件建立了船用艉轴球面机械密封的热固耦合模型,讨论了海水压力和艉轴转速等因素对密封性能的影响;Lai等^[30]基于管道产品应用建立了机械密封耦合模型,并对摩擦副端面的变形、温度、液膜厚度和泄漏率等参数大小进行了预估;王隽等^[31]采用整体耦合法对涉海艉轴密封摩擦副端面的温度场分布进行了稳态计算求解,获得了不同工况条件下端面接触压力、温度和热变形等情况;周剑锋等^[32]建立了机械密封摩擦副的传热模型,研究了在涉海全液润滑条件下摩擦副端面摩擦热与端面变形的耦合过程;周旭辉等^[33]建立了涉海水下航行器艉轴球面机械密封热固耦合模型,分析了不同深度和转速条件下的接触压力、温度和变形的影响规律;陈汇龙等^[34]也进行了涉海船舶艉轴机械密封的热固耦合研究,指出了热应力主要集中的位置。以上研究虽然能够处理解决一种或是几种耦合关系,但是涉海装备机械密封结构和性能涉及到洋流流动、海水密度与温度的变化、侵蚀、热变形、力变形等以及它们间的多场耦合效应,问题很复杂,尚未建立统一有效的机械密封多场耦合模型,在理论和应用技术方面发展缓慢,还无法真正用于实际工程实践,尤其在深海和变深密封领域,国内还主要依赖进口,研究也仅局限于温度场和变形特性方面。目前,现有的耦合模型多为仅考虑

固体和液膜作用的流固耦合模型、涉及密封环变形的热固耦合模型及研究温度分布的热流耦合模型,且这些模型多用于一般机械密封的稳态条件,成果大多建立在诸多假设和仅考虑单一影响因素的基础上,与实际深海高参数极端不稳定工作状态有较大的差距,在深海高参数产品设计与应用中的作用机理和影响趋势尚不明确,需要做进一步的研究与分析。另外,有关主轴与机械密封系统耦合模型的求解,问题相对复杂,研究文献更是少见^[35],且关于涉海非稳定极端条件下的机械密封流固耦合及其解耦问题的研究,在理论和设计方法方面还尤显缺乏,尚未引起密封界的充分重视,因此涉海装备工程应用问题的广泛解决需求加剧了开展相关研究的必要性和迫切性。

机械密封元件在深海高参数环境下极易遭受深海微生物侵蚀,出现侵蚀加剧的现象,深海密封这种特有的侵蚀工况,对摩擦副端面表面形貌、摩擦特性、元件性能和热力学响应等均有很大的影响,侵蚀剧烈直接降低密封性能,导致密封失效,产生泄漏问题。虽有学者已开展了深海环境下摩擦性能和密封性能的研究工作,但大多数研究都只单一分析了高压工况下密封元件和密封材料的变形性能^[36],尚未开展深海洋流环境下海水或是深海微生物侵蚀对密封结构和密封性能的影响研究。虽有考虑选材与侵蚀控制^[37]、侵蚀行为及其机理^[38]、涂层结构失效过程^[39]等,但成果均建立在诸多材料学和海洋化学等基础上,均是对单一材料或是单一化学行为进行研究,没有明确提及密封领域或是与密封结构相关的密封性能或密封摩擦学特性的研究,更没有充分考虑多个物理场间的耦合效应。因此,尽快开展深海洋流高参数机械密封多场耦合效应研究,考虑深海洋流作用下流体流动、温度变化和传热与变形等影响,考虑相关微生物侵蚀作用,分析其机械密封特性及密封性能,探究深海高参数机械密封失效机理,为设计开发高性能深海机械密封装置和提高深海装备水下作业深度及作业可靠性奠定基础。

3 涉海机械密封动力学特性研究

机械密封摩擦副的动力学特性是机械密封领域研究的重点问题,对涉海机械密封的工作状态和密封性能影响很大,密封角度偏摆或轴向振动均会使摩擦副端面磨损加剧或泄漏率增加,影响涉海机械密封运转的动力稳定性、可靠性和安全性。在高速和高压等涉海高参数极端不稳定工况下,涉海装备正面临着振

动冲击、压力大范围波动以及洋流扰动等一般机械密封设计方法所无法企及的运行工况,研究并提出涉海特别是深海高参数不稳定状态下的机械密封动力学特性及动态设计方法已迫在眉睫,是现代工业技术和海洋技术发展所必须要解决的1项重要问题和任务。

伴随着涉海装备固有振动冲击的发生,机械密封工作参数随之变化,端面间液膜的压力分布、润滑状态和相态将发生变化,严重时引起泄漏,甚至导致密封失效.开展涉海装备用机械密封振动问题的研究对提高密封性能,保证涉海密封装置运行的稳定性和可靠性起着关键作用.在机械密封动力学问题方面,国内外相关研究很少,仅少数学者进行了研究与分析^[40-42].在涉海高参数极端不稳定工况下,机械密封间隙量受密封环轴向动态振动影响较大,密封的这种非线性振动特性与机械密封机理和失效形式直接相关,由密封环和端面间的液膜特性共同决定.虽然已有不少研究者提出了直接数值求解方法对密封静态特性进行研究的思路,并对机械密封结构进行了优化设计,从最初的挤压平面流体润滑模型发展到了考虑热效应和弹性变形的耦合分析模型^[43-44],但这些研究大多数是在稳定工况下,从摩擦学角度来开展的,很少考虑密封动力学振动特性及涉海极端不稳定运行条件.然而,在实际深海高参数极端工况下,端面摩擦热效应、相变效应以及端面间空化效应所引起的端面流体膜轴向振荡、径向摆振和章动等动态特性均会对涉海密封产生极大影响.因此,基于机械密封多场耦合作用,研究多场耦合下的涉海机械密封振动特性,分析轴振的产生、传播及其影响因素,分析涉海机械密封失效机理,对提高深海环境下机械密封性能及其可靠性具有重要意义.在深海高参数不稳定状态下,机械密封不仅需要考虑各种影响因素和复杂的流固动耦合效应,而且还需要考虑特有的瞬态特性和动态密封性能,对其开展相关研究对提高密封性能,设计寿命长、可靠性好和稳定性高的深海高参数机械密封装置具有重要理论价值和应用意义。

4 涉海机械密封性能优化及表面织构研究

随着涉海机械密封装置性能参数指标要求的不断提高,机械密封性能的优化研究得到了一定的关注和发展.目前针对机械密封性能的优化研究主要涉及3个方面:第一,密封端面参数优化,主要研究密封端面开槽^[44-46]及激光加工处理^[47];第二,密封环的结构参数优化,主要研究密封环的结构尺寸^[48];第三,密封端

面的冲洗冷却技术优化^[49].其中,密封端面参数优化,是除密封环结构参数外,目前最常用的一种优化策略。

在实际工程应用中,为了改善机械密封端面的润滑状况和密封性能,许多研究者采用端面开槽的技术方法来实现端面非接触、低磨损和低泄漏等,例如国外学者依据鸟类细长翼翅或宽阔翅的表面织构开发了一种端面型槽,成功应用在高速离心压缩机^[50]和反应釜^[51]上,保障了密封装置的使用寿命和稳定性,这种技术逐渐在航空、航天、制药和海洋等领域中受到了广泛的关注和重视.自然界中动植物表面这种非光滑形态特征所表现出来的优异疏水、耐磨和润滑等特性也引起了摩擦学者们的强烈兴趣.国内彭旭东团队借鉴自然界中植物表面织构所具有的优异疏水特性,开展了水润滑及表面织构润湿性机理的研究,得出了表面有微凸体织构的结构具有较好的疏水特性,并且通过合理调整微凸体和微沟槽尺寸,获得了可提高密封性能的优异疏水特性的仿生织构^[52],且对螺旋槽衍生结构、典型均压槽及经典曲线型槽进行了稳态特性及使用工况研究^[53-55],还发明了一种零泄漏疏水型机械密封结构,可在低速低压条件下降低泄漏率.依据国内外学者的研究成果^[56-58],微沟槽、微孔等具有一定仿生微纹理织构的摩擦表面均表现出优异的摩擦学特性和密封性能,并在改善和提高机械密封端面耐磨特性、润湿特性和润滑特性等方面取得了丰硕的成果,已在海洋石油平台泵送机械密封技术中应用.然而,在单纯的微观形态仿生方面,缺乏与机械密封型槽整体构型及结构的耦合效应研究,而且在改善端面耐磨性和润湿性时,总以牺牲泄漏率和流体膜刚度等密封性能为代价,难以显著提高涉海机械密封的综合密封性能.当采用海水作为润滑介质时,海水中包含有微生物,使得润滑状态变成低黏度多介质流体动压润滑形态,目前还尚未成功建立包含海水微生物的多介质润滑模型来分析润滑特性、密封性能和表面织构特性等.同时,目前机械密封性能研究未考虑由织构引起的微空化效应,仍延续了原有的空化模型,忽略了表面织构导致的微空化与原有非平行摩擦副之间的大尺度空化的耦合作用,国内外还未出现能够完整描述跨尺度空化模型的公开研究报道,对涉海机械密封空化研究提出了更高的要求。

与此同时,国际上开展的关于机械密封运行时增大瞬时开启特性,提高运行稳定性和可靠性等研究,究其本质其中不少研究是借鉴了自然界中昆虫和鸟等翼翅的提稳结构来进行分析研究的,例如Dresser-

Rand公司开发的密封端面燕尾螺旋槽,模仿雨燕叉形尾翼,在密封启停的实际应用中具有较好的高低速密封性能^[59],可在涉海变速装备上应用;Flowserve公司提出了一种类似于鹰隼翼翅的组合槽,其中深槽具有显著的流体动静压效应,可以承受高压作用,可用于深海装备机械密封设计等.这种构形仿生的理念在涉海机械密封中的应用主要体现在端面形貌织构上,也就是端面型槽的设计和开发上.彭旭东等^[60]也借鉴了飞鸟翼翅中增加升力和提高稳定性的有利结构,开发了一系列仿鸟翼型槽密封结构,研究表明这些仿生型槽相比于经典的螺旋型槽具有更好的密封性能,在基于飞鸟翼翅局部几何特征结构的端面型槽仿生设计方面取得了初步成果,但是还尚未建立比较完善的涉海环境设计理论体系,缺乏涉海装备应用方面系统性的设计指导,亟需进行深入的系统化设计理论与技术方法的指导,为涉海机械密封的仿生设计、配副选型、性能优化及实际应用提供基础.

海洋中蕴含着丰富的微生物资源,微生物的附着增加了机械密封端面的摩擦阻力和端面的微生物腐蚀问题,给涉海装备的水下运用带来了很大的危害.目前海洋微生物对密封装置的影响研究主要体现在装置表面防止微生物附着腐蚀的防护方法和流体作用下微生物的定植状态两个方面,微生物的定植是指微生物定居、附着、生长和繁殖等过程的统称.目前涂层技术是涉海装备机械密封装置表面防止微生物附着腐蚀的常用防护措施,在密封装置的防腐方面扮演着重要角色.采用改变密封装置材料物理特性或是改变表面形貌设计的方法来减少微生物的附着也是一种有效的防腐措施.虽然这些方法有效抑制了密封装置摩擦副的微生物侵蚀,在一定程度上保证了密封性能的稳定性,但是其中针对海洋微生物定植状态的影响以及抑制方法的研究甚少,需要给予进一步的关注.

海洋环境中微生物的定植会随着洋流环境的变化而变化,在洋流环境下不仅增加了摩擦副表面的粗糙度,加大了流体流动的动载荷效应,而且还改变了摩擦副端面的表面形貌以及摩擦润滑特性.为了确定微生物的定植状态,首先需要建立对应的数学模型,例如稳态模型和动态模型等^[61].Braiko^[62]建立了微生物定植模型,但是该模型仅包含一些可测量参数,例如流速、海水流量、附着物表面积和定植持续时间等.Railkin^[63]基于湍流环境也建立了数学模型,描述了湍流条件下海洋微生物在金属表面随时间变化的淤积程度,但没有考虑附着过程中海水冲刷等导致微生物

脱落以及附着到一定程度达到动态平衡等情况.目前海洋微生物的定植模型研究主要是基于开放流域,在狭小间隙、强剪切效应流域中的研究甚少,并且由于微生物的附着腐蚀使密封端面表面特性改变,表面处理技术也很快失效,需要考虑定植模型与表面处理技术的协同作用.因此,研究海洋微生物附着腐蚀下的机械密封表面织构特性和密封性能,不仅满足客观实际需求,而且为密封性能的设计优化以及密封稳定性和可靠性的提高奠定了基础.

5 涉海机械密封端面测试及可控技术研究

机械密封通常只在所设计的涉海工作条件下稳定运行,一旦涉海工作条件或外界环境发生变化,就可能产生端面高负载、严重磨损或严重泄漏等情况,或造成密封件失效.随着机械密封技术向深海高参数方向发展,这种失效损失的后果越来越严重,迫切需要设计开发一种能对外界涉海工况条件或环境变化做出快速反应,并能及时自动调节端面液膜厚度、液相占比或温升的高可靠性深海高参数机械密封装置.

目前,对涉海机械密封装置端面的测试主要集中在温度、膜厚、摩擦力矩、磨损量和膜压这几个基本参数上.

(1)端面温度测试.目前机械密封端面温度的测试方法主要有热电偶、热电阻和红外线测试法.Tournerie等^[64]采用热电偶方法对静环端面的温度进行了测试,并分析了端面温度随转速和介质压力变化的情况,同时还利用红外照相机对机械密封温度场进行了可视化测量;Salant等^[65]提出了热量传到密封端面中的份额与其各自的热阻成反比的理论,并可通过测量端面传热系数来确定端面温度分布;Ayadi等^[28]通过铺设热电偶传感器测量了摩擦端面及密封件周围的温度分布情况;王玉明等^[66]通过在静环端面铺设热敏电阻测量了螺旋槽流体动压机械密封的端面温度分布情况.通过这三种测试手段,可以获知机械密封端面的温度分布情况,但是这三种测试手法原理各不相同,各有优势,在实际的测试和应用过程中需综合各种因素选用合理恰当的测试手法进行端面温度测试.

(2)端面膜厚的测试.机械密封端面的液膜厚度表征了端面的摩擦润滑状态.目前端面膜厚的常用测试方法主要有电涡流法和电容法^[67],通过测试端面液膜厚度就可了解端面的摩擦润滑特性^[68].

(3)摩擦力矩测试.目前端面摩擦力矩的测试方法主要有支反力法和传递法.Mayer^[69]研究者采用支

反力法已成功对端面的摩擦力矩进行了测试. Ayadi 等^[28]通过力传感器测量了密封件的摩擦扭矩. 孙见君等^[70-71]则采用转矩传感器测试了端面的摩擦力矩. 吴宗祥等^[72]通过试验研究得出支反力法和传递法测试出的摩擦系数与试验较为接近, 并说明了传递测试法的简捷性.

(4) 端面磨损量的测试. 机械密封端面的摩擦磨损关系到密封性能的好坏和密封装置的整个使用寿命. 精确测试端面磨损量是监测机械密封装置稳定运行的重要手段之一. 已有研究者通过采用电阻磨损测试法、因子隐马尔可夫模型(FHMM)^[73]和摩擦磨损试验机^[74]等对机械密封摩擦副端面磨损量及磨损状态进行了试验测试研究.

(5) 端面液膜压力的测试. 机械密封端面的液膜压力不仅可以表征端面液膜的承载能力, 还决定了端面的润滑特性和密封性能. 端面液膜压力的测量方法有很多, 已有学者通过采用微型传感器成功测试了机械密封端面的液膜压力, 预估了液膜承载能力的大小^[10].

涉海机械密封的可控性研究不仅可以提高密封装置的密封性能和运行稳定性, 还可以提高整个装备在深海运行的稳定性和可靠性. 国内外学者在机械密封的可控性方面已做了一些研究, 为今后机械密封性能的提高奠定了一定的基础. Salant 等^[75]提出的可控机械密封装置, 由动环、静环(附带温度传感器)和静环后设置的促动器组成, 利用端面温度信号作为控制系统的反馈信号来达到自动调节的目的, 以提高装置运行的稳定性. Ayadi 等^[28]基于水密封介质开展了大尺度速度和压力条件下的机械密封端面摩擦扭矩、温度和泄漏率等性能试验研究. 国内彭旭东等^[76]也提出了一些可控机械密封装置的设计思想, 指出了由研究泄漏的无源控制转向以限制泄漏为目的的有源控制的新概念, 对涉海机械密封装置的可控性研究提供了一定的基础. 孙见君等从理论和试验角度方面分析了可控机械密封工程应用的可行性^[71, 77], 对涉海装备机械密封应用提供了依据. 吴铸新等^[21]设计研制了船舶尾轴可控式机械密封试验台架, 得出在不同工况下转速、压力等对端面温度、泄漏率等的影响规律. 许杨^[78]提出了船舶艉轴机械密封端面变形的控制方法, 并进行了试验验证. 赫晓光等^[79]研制了可用于探讨机械密封工作机制的船舶艉轴机械密封试验装置, 可模拟各种工况下的密封工作情况. 综上所述, 虽然已经开展了针对不同应用需求的涉海机械密封可控技术及试

验测试研究, 取得了一些重要的成果^[19, 43, 79], 但试验测试研究不能严格按照相似理论来模拟实际工作状况, 尤其对深海密封及摩擦润滑的试验研究成果仍非常有限, 获取可靠的动态数据亟待解决, 且深海高参数系统对密封性能匹配试验测试研究的需求越来越大, 有效并可靠的高参数试验模拟及测试技术对验证理论模型的正确性、合理性以及提高密封性能水平具有重要意义和价值. 从深海装备用机械密封装置的运行原理和密封失效的因素出发, 采用相关的自动控制技术, 不仅可以使密封装置能够自主适应外界涉海工况条件的变化, 还可以提高涉海密封装置运行的稳定性和可靠性, 在一定范围内保证涉海机械密封装置的密封性能.

6 总结

随着海洋资源的不断探索和开发, 海洋装备的自动化、智能化和集成化水平不断提高, 且趋于极端参数化、规模化发展, 诸多设备的旋转摩擦副遭受深水流动冲击、侵蚀、高低温变化、压力大范围波动、轴系振动和轴系应变弯曲等影响, 处于高参数极端不稳定工作状态, 泄漏问题时常发生, 直接影响涉海装备的航行安全问题, 这样就给涉海装备机械密封的密封性能和使用寿命提出了更高的要求, 尤其在一些深海的海洋军事、抢险救生和石油管线铺设与检修等特殊应用场合. 深海极端环境及任务需求的特殊性和复杂性加大了涉海装备机械密封装置性能的要求, 必须保证其具备一定的可靠性、稳定性和安全性, 但传统的设计方法已无法达到理想的使用效果, 迫切需要高性能、长寿命的高参数机械密封装置来提高深海装备运行的可靠性和稳定性, 开展深海环境下机械密封问题的研究具有重要的直接现实价值和意义. 我国在涉海高参数机械密封装置技术方面与世界先进水平差距很大, 对适用于深海高参数极端不稳定条件下的机械密封关键技术的系统性研究还比较落后, 关键部件的材料还主要依赖进口, 研究并提出深海高参数不稳定状态下的长寿命机械密封动态设计方法已迫在眉睫, 成为现代涉海装备工业技术发展和海洋探索研究必须要解决的一项重大任务, 对提高深海装备的作业深度、连续作业时间及运行安全性和可靠性具有重要应用价值.

海洋环境恶劣, 并具有其自身的特殊性和复杂性, 在研究涉海装备用机械密封装置时会面临很多难点问题, 例如深海环境下热流固力等多场耦合问题、

微生物附着侵蚀问题、海水润滑和多尺度空化等。目前微生物附着侵蚀特性的研究与机械密封小间隙流场环境差别较大, 建立微生物在机械密封端面流场中的定植模型已成为海水润滑机械密封必须克服的难题。涉海装备用机械密封问题的研究不仅需要对海洋极端环境下机械密封问题有较深的了解, 还涉及到化学、物理和信息技术等多学科的交叉, 需要综合考虑各个方面的因素以及它们间的耦合作用, 来保证涉海装备机械密封装置的稳定性和可靠性。

参考文献

- [1] Nau B S. Observations and analysis of mechanical seal film characteristics[J]. Transaction of the ASME Journal of Lubrication Technology, 1980, 102(3): 341–347. doi: [10.1115/1.3251534](https://doi.org/10.1115/1.3251534).
- [2] Chen Zhen. Advance in tribological study of mechanical seals[J]. Fluid Machinery, 1989, 17(5): 30–34 (in Chinese) [陈震. 机械密封技术研究进展—摩擦学[J]. 流体工程, 1989, 17(5): 30–34].
- [3] Wang Rumei. Question and answer of practical mechanical seal technology[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 1995: 118–122(in Chinese) [王汝美. 实用机械密封技术问答[M]. 北京: 中国石化出版社, 1995: 118–122].
- [4] Zhu Xueming. Research on numerical analysis and optimization of mechanical sealing performance[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005(in Chinese) [朱学明. 机械密封性能的数值分析及优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005].
- [5] Zou Bo. Study on the rotating shaft seal of deep-sea motor[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008(in Chinese) [邹波. 深海电机旋转轴密封性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008].
- [6] Liu Zijun, Cui Jiefan. Research on the deepwater seal for underwater motor of underwater robot[J]. Robot, 1997, 19(1): 61–64 (in Chinese) [刘子俊, 崔皆凡. 海洋机器人水下电机的深水密封研究[J]. 机器人, 1997, 19(1): 61–64].
- [7] Zhu Hanhua, Liu Zhenglin, Yan Xinping, et al. Influence of the variation of diving-depth on the deformation of marine mechanical face seals[J]. Lunrication Engineering, 2008, 33(4): 27–29 (in Chinese) [朱汉华, 刘正林, 严新平, 等. 水深变化对船用机械密封端面变形的影响[J]. 润滑与密封, 2008, 33(4): 27–29]. doi: [10.3969/j.issn.0254-0150.2008.04.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2008.04.008).
- [8] Lebeck A O. A Mixed friction hydrostatic face seal model with phase change[J]. ASME Journal of Lubrication Technology, 1980, 23(4): 357–387.
- [9] Wei Long, Zhang Penggao, Liu Qihe, et al. Influencing factors analysis and experiments of friction coefficient between the end faces for contact mechanical seals[J]. Tribology, 2016, 36(3): 354–361 (in Chinese) [魏龙, 张鹏高, 刘其和, 等. 接触式机械密封端面摩擦系数影响因素分析与试验[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(3): 354–361]. doi: [10.16078/j.tribology.2016.03.013](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2016.03.013).
- [10] Wei Long, Zhang Penggao, Liu Qihe, et al. Leakage fractal model of mechanical seals based on average film thickness and pressure flow rate factor[J]. Tribology, 2018, 38(6): 692–699 (in Chinese) [魏龙, 张鹏高, 刘其和, 等. 基于平均膜厚和压力流量因子的机械密封泄漏分形模型[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(6): 692–699]. doi: [10.16078/j.tribology.2018015](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018015).
- [11] Ge Peiqi, Chen Lihai, Cheng Jianhui, et al. The mixed-friction calculation model of mechanical face seals considering surface roughness and radial taper[J]. Lubrication Engineering, 2001, 5: 14–16 (in Chinese) [葛培琪, 陈立海, 程建辉, 等. 考虑表面粗糙度和径向锥度的机械密封混合摩擦计算模型[J]. 润滑与密封, 2001, 5: 14–16]. doi: [10.3969/j.issn.0254-0150.2001.02.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2001.02.005).
- [12] Lebeck A O. A study of contacting mechanical face sealing performance by mixed friction model[C]. In: Proceeing of the 12th International Conference on Fluid Sealing, BHRA, Cannes, 1991.
- [13] Doust T G. An Experimental and theoretical study of pressure and thermal distortion in a mechanical seal[J]. ASLE Transactions, 1996, 29(2): 151–159.
- [14] Jiang Xiaowen, Gu Boqin. Numerical simulation of flow in convergent wedgelike gap[J]. Lubrication Engineering, 2004, 3: 47–49 (in Chinese) [蒋小文, 顾伯勤. 收敛楔形间隙中流体流动的数值模拟[J]. 润滑与密封, 2004, 3: 47–49]. doi: [10.3969/j.issn.0254-0150.2004.06.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2004.06.017).
- [15] Harp S R, Salant R F. Analysis of mechanical seal behavior during transient operation[J]. Journal of Tribology, 1998, 120(2): 191–197. doi: [10.1115/1.2834409](https://doi.org/10.1115/1.2834409).
- [16] Xie Qixiang. Research on variable pressure mechanical seal of marine device[J]. Ship Science and Technology, 1994, 6: 19–24, 50 (in Chinese) [谢启祥. 船用变压力机械密封装置的研究[J]. 舰船科学技术, 1994, 6: 19–24, 50].
- [17] Shan Xiaoliang. Research on temperature field of mechanical seals in the torpedo thermal power ststem[D]. Xian: Northwestern Polytechnical University, 2007(in Chinese) [单晓亮. 鱼雷热动力装置机械密封温度场研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007].
- [18] Liu Lu, Shen Qiying, Shao Yugong. The discussion on face stableness of mechanical face seal with vapor-liquid phase in changing operating conditions[J]. Lubrication Engineering, 2002, 3: 15–18 (in Chinese) [刘录, 沈齐英, 邵予工. 变工况条件下汽液两相机械密封端面稳定性探讨[J]. 润滑与密封, 2002, 3: 15–18]. doi: [10.3969/j.issn.0254-0150.2002.01.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2002.01.006).
- [19] Xiong S, Salant R F. A dynamic model of a contacting mechanical seal for down-hole tools[J]. ASME Journal of Tribology, 2003, 125(7): 469–479.
- [20] Cai Xiaojun. Design of mechanical seal experimental platform and building of test system in the variational working condition[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005(in Chinese) [蔡晓君. 变工况机械密封实验台的设计及测试系统的建立[D]. 沈阳: 东北大学, 2005].
- [21] Wu Zhuxin, Liu Zhenglin, Tian Xiangyu. Experimental study on performance of controllable stern shaft mechanical seal under

- varying condition[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation science & Engineering), 2009, 33(4): 655–658 (in Chinese) [吴铸新, 刘正林, 田相玉. 船舶尾轴可控式机械密封变工况性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2009, 33(4): 655–658]. doi: [10.3963/j.issn.1006-2823.2009.04.012](https://doi.org/10.3963/j.issn.1006-2823.2009.04.012).
- [22] Salant R F, Cao B. Unsteady analysis of a mechanical seal using duhamel's method[J]. ASME Journal of Tribology, 2005, 127(7): 623–631.
- [23] Ruan Bo. A mixed lubrication model of liquid/gas mechanical face seal[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1995.
- [24] Kim Chung-Kyun. An analytical investigation of leakage and thermoelastic problems in roating seals[D]. Raleigh: North Carolina State University, 1987.
- [25] Liu Lu, Shen Qiyang, Shao Yugong. Study on dynamic effect of mechanical seal end face[J]. Modern Machinery, 2002, 3: 33–36, 11 (in Chinese) [刘录, 沈齐英, 邵予工. 机械密封端面的动压效应研究[J]. 现代机械, 2002, 3: 33–36, 11]. doi: [10.3969/j.issn.1002-6886.2002.01.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6886.2002.01.030).
- [26] Sun Jianjun, Wei Long, Gu Boqin. Development course and research trend on the mechanical seal[J]. Lubrication Engineering, 2004, 4: 128–131, 134 (in Chinese) [孙见君, 魏龙, 顾伯勤. 机械密封的发展历史与研究动向[J]. 润滑与密封, 2004, 4: 128–131, 134]. doi: [10.3969/j.issn.0254-0150.2004.04.050](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2004.04.050).
- [27] Clark R Azibert H, Oshinowo L. Computer simulation of mechanical seal leads to design change that improves coolant circulation[J]. Materials and Design, 2002, 23(1): 113–117. doi: [10.1016/S0261-3069\(01\)00048-6](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(01)00048-6).
- [28] Ayadi K, Brunetière N, Tournier B, et al. Experimental and numerical study of the lubrication regimes of a liquid mechanical seal[J]. Tribology International, 2015, 92: 96–108. doi: [10.1016/j.triboint.2015.05.022](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.05.022).
- [29] Zhou X H, ZOU L. Simulation analysis of spherical mechanical seal property of marine stern shaft[J]. MATEC Web of Conferences, 2016, 63: 02025. doi: [10.1051/mateconf/20166302025](https://doi.org/10.1051/mateconf/20166302025).
- [30] Lai T, Gabriel R, Mayer-Yep L. Improved performance seals for pipeline applications[J]. Lubrication Engineering, 2003, 59(4): 18–29.
- [31] Wang Jun, Wang Juan, Zhou Xuhui, et al. The investigation of temperature distribution of friction pair in the shipping stern shaft sealing[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(7): 122–124, 139 (in Chinese) [王隽, 王娟, 周旭辉, 等. 船舶艉轴密封装置端面密封摩擦副温度场稳态分析[J]. 润滑与密封, 2007, 32(7): 122–124, 139]. doi: [10.3969/j.issn.0254-0150.2007.07.032](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2007.07.032).
- [32] Zhou Jianfeng, Gu Boqin. Coupling analysis of frictional heat of fluid film and thermal deformation of mechanical seal end faces[J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(2): 77–81 (in Chinese) [周剑峰, 顾伯勤. 机械密封端面摩擦热与热变形的耦合分析[J]. 核动力工程, 2007, 28(2): 77–81]. doi: [10.3969/j.issn.0258-0926.2007.02.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0926.2007.02.018).
- [33] Zhou Xuhui, Liu Zhenglin. Thermal-structure coupling analysis of and spherical mechanical seal of stem shaft in underwater vehicle[J]. Ship & Ocean Engineering, 2016, 45(3): 63–69 (in Chinese) [周旭辉, 刘正林. 水下航行器艉轴球面机械密封热-结构耦合分析[J]. 船舶工程, 2016, 45(3): 63–69]. doi: [10.3963/j.issn.1671-7953.2016.03.015](https://doi.org/10.3963/j.issn.1671-7953.2016.03.015).
- [34] Chen Huilong, Lin Qinglong, Peng Zhengdong, et al. Coupling analysis of heat-thermal stress on stern-shaft mechanical seal[J]. Ship Engineering, 2011, 33(6): 41–44 (in Chinese) [陈汇龙, 林清龙, 彭正东, 等. 船舶艉轴机械密封的热-热应力耦合研究[J]. 船舶工程, 2011, 33(6): 41–44]. doi: [10.3969/j.issn.1000-6982.2011.06.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6982.2011.06.011).
- [35] Xu H, Zhu J. Influence of the mechanical seals on the dynamic performance of robot-bearing systems[J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2006, 1(1): 96–100. doi: [10.1007/s11465-005-0008-5](https://doi.org/10.1007/s11465-005-0008-5).
- [36] Zhou Bo, Chen Jiawang, Gu Linyi. Analysis on self-compressibility of sealing materials under high pressure in deep-sea[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(12): 1481–1484 (in Chinese) [周博, 陈家旺, 顾临怡. 深海高压环境下的密封材料变形特性分析[J]. 中国机械工程, 2010, 21(12): 1481–1484].
- [37] Li Hui, Shi Lei, Zhang Lei, et al. Materials selection and corrosion control for subsea production equipment[J]. Corrosion and Protection, 2015, 36(10): 963–967 (in Chinese) [李辉, 石磊, 张雷, 等. 深海水下生产设施选材与腐蚀控制[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(10): 963–967]. doi: [10.11973/fsyfh-201510013](https://doi.org/10.11973/fsyfh-201510013).
- [38] Yin Bin. The research of MIC and protection of copper-nickel alloy in the marine environment[D]. Shandong: Ocean University of China, 2012(in Chinese) [尹兵. 海洋环境下铜镍合金的微生物附着腐蚀与防护研究[D]. 山东: 中国海洋大学, 2012].
- [39] Liu Jie. Study on the deterioration processes of organic coating/low alloy steel systems in simulated deep-sea environment[D]. Shandong: Ocean University of China, 2011(in Chinese) [刘杰. 模拟深海环境下有机涂层/低合金钢体系失效过程的研究[D]. 山东: 中国海洋大学, 2011].
- [40] Zhang H, Miller B A, Landers R G. Nonlinear modeling of mechanical gas face seal systems using proper orthogonal decomposition[J]. Journal of Tribology, 2006, 128(4): 817–827. doi: [10.1115/1.2345405](https://doi.org/10.1115/1.2345405).
- [41] Green I, Barnsby R M. A simultaneous numerical solution for the lubrication and dynamic stability of noncontacting gas face seals[J]. Transactions of the ASME, 2001, 123(4): 388–394.
- [42] Xie Jing, Bai Shaoxian. The effect of high speed airflow lubrication on hydrodynamic properties of inclined-dimples face seals[J]. Tribology, 2017, 37(6): 806–813 (in Chinese) [谢静, 白少先. 高速气流阻塞效应对倾斜微孔端面密封动压特性的影响[J]. 摩擦学报, 2017, 37(6): 806–813]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.06.012](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.06.012).
- [43] Xiao N, Khonsari M M. Thermal performance of mechanical seals with textured side-wall[J]. Tribology International, 2012, 45(1): 1–7.

- doi: [10.1016/j.triboint.2011.09.002](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.09.002).
- [44] Yang Xiao, Meng Xiangkai, Peng Xudong, et al. A TEHD lubrication analysis of surface textured mechanical seals[J]. Tribology, 2018, 38(2): 204–212 (in Chinese) [杨笑, 孟祥铠, 彭旭东, 等. 表面织构化机械密封热弹流润滑性能分析[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(2): 204–212]. doi: [10.16078/j.tribology.2018.02.011](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.02.011).
- [45] Ma Xuezhong, Meng Xiangkai, Wang Yuming, et al. Mechanism and performance of end face seal of rayleigh steps and annular grooves[J]. Tribology, 2016, 36(5): 585–591 (in Chinese) [马学忠, 孟祥铠, 王玉明, 等. 雷列台阶-环槽端面密封机理与性能研究[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(5): 585–591]. doi: [10.16078/j.tribology.2016.05.008](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2016.05.008).
- [46] Zhang Ke, Ji Hua, Li Yanlin, et al. Relationship between geometric convergent point and leakage rate of mechanical seal with elliptical dimples[J]. Tribology, 2017, 37(5): 602–609 (in Chinese) [张科, 吉华, 李岩霖, 等. 椭圆微孔端面机械密封泄漏率与几何收敛点的关系[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(5): 602–609]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.05.006](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.05.006).
- [47] Young L, Roosch E, Hill R. Enhanced mechanical face seal performance using modified face surface topography[C]. In: 17th International Conference on Fluid Sealing, York, UK, 2003.
- [48] Inoue H, Satou E. Improvement of seal performance and addition of seal functions to mechanical seals under high-speed conditions[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, 1997, 63(608): 1324–1329. doi: [10.1299/kikaic.63.1324](https://doi.org/10.1299/kikaic.63.1324).
- [49] Houte J A M. Research in high parameters mechanical seal[C]. In: Eleventh International Conference on Fluid sealing, BHRA, Cannes, 1987.
- [50] Saxena M N. Dry gas seals and support systems: benefits and options[J]. Hydrocarbon Processing, 2003, 82(11): 37–41.
- [51] Pecht G G, Netzel J P. Design and application of non-contacting gas lubricated seals for slow speed services[J]. Lubrication Engineering, 1999, 55(7): 20–25.
- [52] Ma Chunhong, Bai Shaoxian, Peng Xudong, et al. Transient spreading of water droplet on laser micro-structured SiC surfaces[J]. Applied Surface Science, 2014, 311: 789–792. doi: [10.1016/j.apsusc.2014.05.168](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.168).
- [53] Jiang Jinbo, Chen Yuan, Xu Qichao, et al. Evolution rule and working applicability of typical derived structures of spiral groove dry gas seal[J]. Tribology, 2018, 38(3): 264–273 (in Chinese) [江锦波, 陈源, 徐奇超, 等. 干气密封螺旋槽衍生结构演变规律与工况适用性[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(3): 264–273]. doi: [10.16078/j.tribology.2018.03.003](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.03.003).
- [54] Zhao Yanfeng, Peng Xudong, Jiang Jinbo, et al. Influence of the pressure-equalizing groove on the seal performance of hydrostatic dry gas seal[J]. Tribology, 2017, 37(5): 677–685 (in Chinese) [赵艳凤, 彭旭东, 江锦波, 等. 均压槽结构形状对静压干气密封性能影响分析[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(5): 677–685]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.05.016](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.05.016).
- [55] Xu Qichao, Jiang Jinbo, Chen Yuan, et al. Numerical analysis of steady-state and dynamic characteristics of typical molded line groove dry gas seals[J]. Tribology, 2018, 38(5): 584–594 (in Chinese) [徐奇超, 江锦波, 陈源, 等. 经典曲线型槽干气密封动态密封特性数值分析[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(5): 584–594]. doi: [10.16078/j.tribology.2018.05.012](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.05.012).
- [56] Etsion I. Modeling of surface texturing in hydrodynamic lubrication[J]. Friction, 2013, 1(3): 195–209. doi: [10.1007/s40544-013-0018-y](https://doi.org/10.1007/s40544-013-0018-y).
- [57] Bathe R, Krishna V, Nikumb S K, et al. Laser surface texturing of gray cast iron for improving tribological behavior[J]. Applied Physics A, 2014, 117(1): 117–123. doi: [10.1007/s00339-014-8281-y](https://doi.org/10.1007/s00339-014-8281-y).
- [58] Wang Yan, Sun Jianjun, Hu Qiong, et al. Numerical analysis of dry gas seal flow orderliness based on microstructure modeling[J]. Tribology, 2018, 38(6): 673–683 (in Chinese) [王衍, 孙见君, 胡琼, 等. 基于微尺度造型的干气密封流动有序性数值分析[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(6): 673–683]. doi: [10.16078/j.tribology.2018098](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018098).
- [59] John S S. Design, operation and maintenance considerations for improved dry gas seal reliability in centrifugal compressors[J]. Proceedings of the 30th Turbomachinery symposium, 2001: 203–208.
- [60] Jiang Jinbo, Peng Xudong, Bai Shaoxian, et al. Performance analysis and selection of a bionic bird wing multi-array spiral groove dry gas seal[J]. Tribology, 2015, 35(3): 274–281 (in Chinese) [江锦波, 彭旭东, 白少先, 等. 仿鸟翼微列螺旋槽干气密封性能分析与选型[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(3): 274–281]. doi: [10.16078/j.tribology.2015.03.005](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2015.03.005).
- [61] Characklis W G. Biofilm development: a process analysis[J]. Biotechnology & Bioengineering, 2009, 102(2): 310–347.
- [62] Braiko V D. Obrazovanie i chernom more (fouling in the black sea)[J]. Nauk. Dumka, Kiev, 1985: 124–147.
- [63] Railkin A I. Marine biofouling: colonization processes and defenses[M]. CRC Press: Boca Raton, 2004.
- [64] Tournier B, Reungoat D, Frene J. Temperature measurements by infrared thermography in the interface of a radial face seal[J]. ASME Journal of Tribology, 1999, 113(3): 571–576.
- [65] Salant R F, Key W E. Development of an analytical model for use in mechanical seal design[C]. In: Proc. of 10th ICFS, BHRA, Cannes, 1984.
- [66] Wang Yuming, Wang Qiang, Zhao Chen. Test technology of mechanical seal[J]. Fluid Engineering, 1990, 10: 19–22 (in Chinese) [王玉明, 王强, 赵晨. 机械密封的试验技术(一)[J]. 流体工程, 1990, 10: 19–22].
- [67] Zou M, Green I. Clearance control of a mechanical face seal[J]. Tribology Transactions, 1999, 42(3): 535–540. doi: [10.1080/10402009908982252](https://doi.org/10.1080/10402009908982252).
- [68] Li Zhentao, Wang Zanlei, Hao Muming, et al. Cavitation experiment and performance analysis of downstream pumping spiral groove seals[J]. Tribology, 2017, 37(6): 743–755 (in Chinese) [李振涛, 王

- 赧磊, 郝木明, 等. 下游泵送螺旋槽密封空化试验及性能分析[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(6): 743–755]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.06.005](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.06.005).
- [69] Mayer E. Mechanical seal (6th Edition, translated by Yao Zhaosheng)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1981(in Chinese) [Mayer E. 机械密封(第六版, 姚兆生译)[M]. 北京: 化学工业出版社, 1981].
- [70] Sun Jianjun, Wei Long, Zhu Hongsheng. A new test device for mechanical seal[J]. China Petroleum Machinery, 2002, 30(2): 25–28 (in Chinese) [孙见君, 魏龙, 朱洪生. 弹簧比压可控振动可测型机械密封试验装置[J]. 石油机械, 2002, 30(2): 25–28]. doi: [10.3969/j.issn.1001-4578.2002.02.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4578.2002.02.009).
- [71] Ji Zhengbo, Sun Jianjun, Lu Jianhua, et al. Predicting method for static leakage of contacting mechanical seals interface based on percolation theory[J]. Tribology, 2017, 37(6): 734–742 (in Chinese) [嵇正波, 孙见君, 陆建花, 等. 基于逾渗理论的机械密封界面静态泄漏预测方法[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(6): 734–742]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.06.004](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.06.004).
- [72] Wu Zongxiang, Zhang Shugui, Liu Zhirong, et al. Determination of friction coefficient of single face mechanical seals[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1990, 14(1): 36–41 (in Chinese) [吴宗祥, 张书贵, 柳志荣, 等. 单端面机械密封摩擦系数的测定[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1990, 14(1): 36–41].
- [73] Li Kesi, Zhang Erqing, Fu Pan, et al. Condition assessment on mechanical seal face wear based on incomplete prior knowledge[J]. Tribology, 2016, 36(6): 717–725 (in Chinese) [李克斯, 张尔卿, 傅攀, 等. 不完备先验知识下的机械密封端面磨损状态评估研究[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(6): 717–725]. doi: [10.16078/j.tribology.2016.06.008](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2016.06.008).
- [74] Ding Xuexing, Wang Pingxi, Wei Long, et al. Experimental study on friction characteristics of end face of dry gas seal rings with different spiral angle[J]. Tribology, 2017, 37(3): 290–296 (in Chinese) [丁雪兴, 王平西, 魏龙, 等. 两种螺旋角干气密封环端面摩擦特性试验研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(3): 290–296]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.03.002](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.03.002).
- [75] Salant R F, Wolff P, Navon S. Electroically controlled mechanical seal for aerospace application-part I: design, analysis, and steady state test[J]. Tribology Transaction, 1994, 37(1): 189–195. doi: [10.1080/10402009408983283](https://doi.org/10.1080/10402009408983283).
- [76] Peng Xudong, Gu Yongquan. New idea of mechanical seal-controllable mechanical seal[J]. Lubrication Engineering, 1995, 4: 6–9 (in Chinese) [彭旭东, 顾永泉. 机械密封的新思想-可控机械密封[J]. 润滑与密封, 1995, 4: 6–9].
- [77] Sun Jianjun, Gu Boqin, Wei Long. Discussion on controllability of mechanical seal and its engineering application[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(2): 15–19 (in Chinese) [孙见君, 顾伯勤, 魏龙. 机械密封可控性研究及其工程应用问题的探讨[J]. 机械工程学报, 2005, 41(2): 15–19]. doi: [10.3321/j.issn:0577-6686.2005.02.003](https://doi.org/10.3321/j.issn:0577-6686.2005.02.003).
- [78] Xu Yang. Deformation control technology and test study on ship stern-shaft seal[D]. Shandong: Qingdao Technology University, 2015(in Chinese) [许杨. 船舶艉轴密封变形控制技术与试验研究[D]. 山东: 青岛理工大学, 2015].
- [79] He Xiaoguang, Wang Jun, Yang Jun, et al. The design of mechanical seal testing device of marine stern shaft and the sealing tests[J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(2): 93–97 (in Chinese) [赫晓光, 王隽, 杨俊, 等. 船舶艉轴机械密封试验装置的设计及密封试验[J]. 润滑与密封, 2010, 35(2): 93–97].