

# 非接触式端面密封流体动压效应的研究进展

薛婷<sup>1,2</sup>, 王瑜<sup>1,2</sup>, 张凯<sup>1,2</sup>, 孔令榕<sup>1,2</sup>, 张伟<sup>1,2</sup>, 刘宝林<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**非接触式端面密封运行稳定, 端面之间无直接摩擦, 能使密封寿命大大延长, 作为各种旋转机械的轴端密封有着广泛的应用前景, 对于深井、超深井钻探钻具的运行和钻井效率有着重要意义。非接触式端面密封以在端面进行构型设计的方式产生动压效应, 提高密封的承载能力。本文阐述端面表面沟槽形状、端面变形、温粘效应和空化效应对端面密封的流体动压效应产生的影响, 归纳总结流体动压效应理论、实验和应用的研究现状, 并展望未来非接触式端面密封的发展方向。

**关键词:**非接触式; 端面密封; 流体动压; 钻具; 旋转机械

**中图分类号:**P634.4<sup>+</sup>2; TE921<sup>+</sup>2 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0038-06

## Research on progress of hydrodynamic pressure effect of non-contact face seal

XUE Ting<sup>1,2</sup>, WANG Yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Kai<sup>1,2</sup>, KONG Lingrong<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2</sup>, LIU Baolin<sup>1,2</sup>

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Deep GeoDrilling Technology, MNR, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Non-contact face seal has a stable operation and no direct friction between the faces, which can greatly extend the seal life and has a wide application prospect as a shaft seal for various rotary machinery. Non-contact face seals are designed with a configuration on the face to produce a hydrodynamic pressure effect to improve the load carrying capacity of the seal. This paper describes the influence of groove shapes, face deformation, temperature-stick effect and cavitation effect on the hydrodynamic pressure effect of face seals, summarizes the current research status on the theory, experiment and application of hydrodynamic pressure effect, and prospects the future development direction of non-contact face seals.

**Key words:** non-contact; face seals; hydrodynamic pressure; drilling tools; rotary machinery

## 0 引言

钻探是勘探和获得矿产资源、探明水文地质和工程地质最重要的技术手段, 深井、超深井钻探工程面临着井底高温、高压、振动、磨粒磨损等恶劣工况条件, 且高温下钻井液对钻具的腐蚀较常温下更为复杂, 端面密封作为各种旋转部件的主要轴封方

式<sup>[1]</sup>, 其可靠性对于钻具的运行和钻井效率有着重要意义。

常见的端面密封都属于接触式端面密封, 但由于端面间的直接接触易造成磨损过度, 导致密封失效, 难以适应井下工况。国内外学者基于流体动压润滑理论设计了非接触式端面密封, 通过在端面表

收稿日期: 2023-05-30; 修回日期: 2023-07-23 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.006

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“高温全金属马达定转子高速冲蚀与冲滑磨损耦合作用机理研究”(编号: 42172343)

第一作者: 薛婷, 女, 汉族, 1999年生, 博士生, 地质资源与地质工程专业, 从事流体动密封和摩擦磨损研究, 北京市海淀区学院路29号中国地质大学(北京)自然资源部深部钻探技术重点实验室205室, 3002220021@email.cugb.edu.cn。

通信作者: 王瑜, 男, 汉族, 1979年生, 副教授, 博士生导师, 地质工程专业, 博士, 研究方向为钻注修复技术与装备研究, 北京市海淀区学院路29号中国地质大学(北京)工程技术学院, wangyu203@Cugb.Edu.cn。

引用格式: 薛婷, 王瑜, 张凯, 等. 非接触式端面密封流体动压效应的研究进展[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 38-43.

XUE Ting, WANG Yu, ZHANG Kai, et al. Research on progress of hydrodynamic pressure effect of non-contact face seal[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 38-43.

面开设一定的几何构型对密封进行改进优化,在端面之间形成微小厚度的液膜使得动静环彼此分离,避免端面之间磨损。理论上可通过流体动压形成密封空间,达到密封介质“零泄漏”和不磨损或低磨损的目的。随着表面织构技术的发展<sup>[2-4]</sup>,端面构型得到进一步研究。

端面密封的流体动压效应主要取决于密封端面间的流体膜,流体膜由两端面相对运动产生,并提供密封承载能力。端面几何形状决定两密封面之间润滑膜的厚度和密封泄漏情况,因此,通过合理选择并优化端面构型能有效控制泄漏率。流体动压效应主要受密封面流体膜形状、密封面变形、温粘效应和空化效应等因素的影响。针对这些效应,大量研究基于一定的假设展开。本文回顾近几十年来国内外非接触式端面密封动压效应的研究历程,归纳总结流体动压效应理论、实验和应用的研究现状,并展望今后一段时期的研究方向。

## 1 流体膜形状

流体动压端面密封依靠在密封端面上加工不同形状的流体动压槽来产生流体动压效应,增强密封支撑能力,且由于流体动压作用,可以在端面之间形成微尺度薄层的流体膜,避免两端面直接接触,从而减小二者之间的磨损,这些特性能够提高密封面的寿命。不同密封面形状和流槽形状明显影响密封面流体膜的形状效应,随着表面织构技术的发展,端面构型得到进一步研究,通常建立的密封端面模型有周向台阶、环形槽、螺旋槽、周向波度模型、微观表面粗糙度模型等。

Khonsari等<sup>[5]</sup>描述了在低速度下平面圆形阶梯止推轴承的运行状况,表明台阶位置和几何形状能显著影响该类轴承的承载能力,且惯性影响随运行速度的增加趋于明显。Hossain等<sup>[6]</sup>发现台阶式开槽对承载能力的提高尤为显著,提出沟槽的几何参数是决定端面密封承载能力的重要参数。李振涛等<sup>[7]</sup>建立周向斜面台阶螺旋槽模型(如图1),研究表明在适当槽深和斜面转角比条件下,该新型结构的引入有利于提升背流侧低压区的液膜压力,增强流体动压性能和承载能力,降低空化面积比。

环形槽广泛应用于压缩机、轴承、泵等旋转机械<sup>[8-10]</sup>。Zheng等<sup>[11]</sup>研究表明不同槽型对密封间隙之间的压力分布和流动特性影响有差异,适当的环

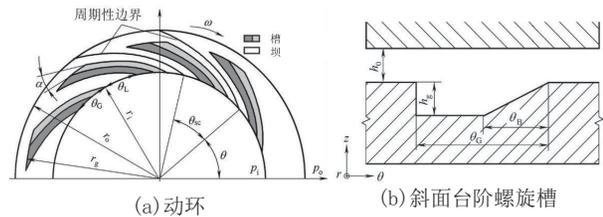


图1 周向斜面台阶螺旋槽液膜密封物理模型<sup>[7]</sup>

形槽结构参数有利于改善压力分布的均匀性,可以减小膜压力下降速率。马学忠等<sup>[12]</sup>对比了正向、反向瑞利台阶型环形槽(如图2)诱导空化区对端面密封性能的影响,发现环形槽有限制分离作用,能促进反向瑞利台阶主槽区产生液膜空化,强化空化抽吸效应,减弱正向瑞利台阶主槽区的流体动压效应。

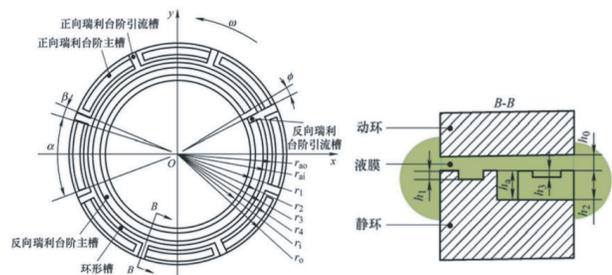


图2 带有环形槽的瑞利台阶型端面密封<sup>[12]</sup>

螺旋槽端面密封作为一种非接触式机械密封,能增强密封间隙之间液膜的生成,在旋转机械中也得到了广泛应用,尤其是中高速工况条件下。冯秀<sup>[13]</sup>对螺旋槽上游泵送机械密封的端面摩擦系数进行研究,发现在槽型参数中相较于槽数、槽宽比和槽长,槽深、螺旋角对端面摩擦系数影响较大,该研究为上游泵送机械密封提供一定的理论指导。关于下游泵送螺旋槽密封,李振涛等<sup>[14]</sup>研究发现螺旋槽内会发生空化现象,提高油压有助于降低液膜空化的发生,提升端面密封的润滑质量,且油压和转速对密封泄漏量影响明显。马学忠等<sup>[15]</sup>发现反向螺旋槽区域易发生液膜空化,影响端面流场分布,并提出了一种新型的正反向螺旋槽组合表面结构,实现反向螺旋槽控制泄漏,正向螺旋槽提供动压支承。

除典型的单向螺旋凹槽外,一些学者也提出了用几种组合螺旋的广义几何模型来表征表面纹理并获得具有大开启力和液膜刚度的最佳结构,Jiang等<sup>[16-17]</sup>提出了一系列基于鸟类翅膀的仿生凹槽结构,相较于普通螺旋凹槽端面密封的膜刚度提高了20%。后又建立了一种新的带有重叠凹槽的纹理

结构(如图3),通过实验和数值分析的方法对比研究该几何模型在不同工况下的稳态和动态性能<sup>[18]</sup>。

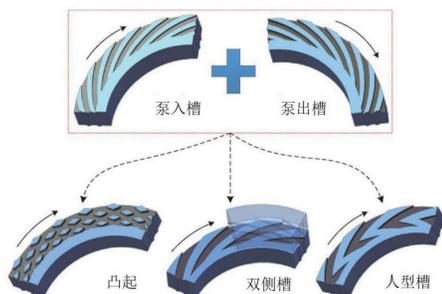


图3 双向螺旋槽组合结构<sup>[18]</sup>

周向波度端面的典型应用是在核主泵上,并且为提高密封性能,对常规周向波度端面进行优化,提出了一种波形-倾斜-坝式(wave-tilt-dam,简称WTD)端面密封。Liu等<sup>[19]</sup>研究表明WTD端面密封径(如图4)向锥度产生静压效应,周向波度产生动压效应,启动工况和稳态工况下的密封机理不同,密封的表面波纹产生足够的开启力和支撑力使密封面保持非接触状态。Su等<sup>[20]</sup>采用直接数值模拟的方法得到结论,除波纹幅值外,膜厚、锥度、坝宽比均对密封的泄漏率、开启力和刚度有明显影响,综合考虑多因素影响,可优选出一组结构参数保证设备安全稳定运行。Wang等<sup>[21]</sup>基于质量守恒定律提出了均匀相变模型来分析波浪倾斜端面结构的两相机械密封的流场,结果表明,波纹结构通过改变润滑膜压力分布影响气液分布,根据不同工况参数对密封性能的影响优化端面结构的几何参数。

对于微米级间隙润滑膜而言,端面表面粗糙度将对动压效应、内部流动摩阻、空化特性和泄漏流动等产生影响,除宏观几何模型外,也有大量研究基于微

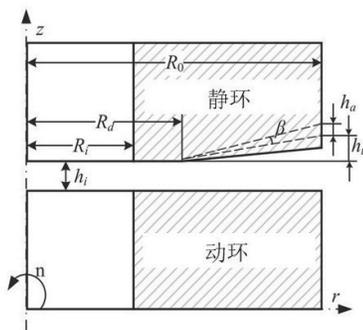


图4 WTD端面几何模型<sup>[19]</sup>

观表面粗糙度模型展开。Brunetière等<sup>[22]</sup>考虑粗糙接触,对比光滑表面得出结论:粗糙纹理表面能提升流体动压效应,且在流体动压状态下,表面的摩擦显著减少。微观粗糙度和宏观织构的相互作用有利于提高密封特性。Harp等<sup>[23]</sup>研究齿间空化和整体空化对端面密封间润滑膜的影响,发现当膜厚和均方根粗糙度比值较小时,整体空化具有较高的支承能力。

端面几何形状决定两密封面之间润滑膜的厚度和泄漏情况,相关研究已证实密封端面表面构型的设置在改善密封性能方面所具有的有效性,因此合理选择并优化端面构型能有效控制泄漏率,更好地适应复杂工况下对密封端面的高要求。

## 2 密封面变形

密封端面变形与液膜流场的相互作用逐渐成为研究的热点,当前研究端面变形理论主要是基于Mayer等<sup>[24]</sup>的圆环理论和张书贵等<sup>[25]</sup>的壳体力矩理论。密封端面的变形主要有机械变形和热变形,变形后的密封环会改变液膜厚度,相应的泄漏率、承载能力也发生变化,此时密封端面之间可能会发生干摩擦,密封运行不稳定最终致使密封失效。因此研究端面密封变形具有重要意义,针对机械变形和热变形,国内外学者主要从稳态和瞬态应力场、温度场和流场等方面进行了相关研究。

关于机械变形方面,Bai等<sup>[26]</sup>通过计算螺旋槽密封面的弹性变形和压力分布,得到结论:端面变形导致两密封面之间的间隙发散,密封面之间压力分布不均匀,随转速增加,低压下密封面变形减小,高压下变形增大,且弹性变形和空化效应使密封性能发生改变,影响端面密封运行的稳定性。

关于热变形方面,白少先等<sup>[27]</sup>通过分析T型槽端面密封热弹流润滑动态稳定性,发现高速和高压下弹性变形和热变形导致端面密封产生发散间隙,气膜厚度明显降低,端面磨损风险增加。李彦启等<sup>[28]</sup>通过计算镶嵌式机械密封在不同应力条件下密封端面的变形量,发现相较于结构应力,热应力对端面变形的影响更大。Wang等<sup>[29]</sup>对密封在不同温度梯度下的热变形进行了数值分析,发现大的温度梯度虽然会增大气膜温升,但却能显著提高端面密封的热流动力特性,有助于减小热变形和泄漏,增大开启力,提高密封性能。Zhu等<sup>[30]</sup>通过数值模拟研究了氦气T型槽端面密封在低温高压条件下的热

弹流体动力润滑行为,发现与高温气体密封明显不同的是,该密封在低温高压下呈现明显的发散变形,密封开启力减小,泄漏率增大。郑婉等<sup>[31]</sup>通过热力耦合计算得到转速提高一倍,端面密封温度、应力及变形都相应增加。

除以上文章外,部分研究表明还有其他条件会对端面变形产生影响。密封面的沟槽结构也会对弹性变形产生影响,从而改变密封性能。Alfredo等<sup>[32]</sup>通过实验探究了不同螺旋槽结构参属下气体端面密封的热弹性变形行为及流体膜的流体动压,发现 $11^\circ$ 的螺旋角比 $15^\circ$ 的螺旋角在径向变形上更小。李启彦等<sup>[28]</sup>发现在对镶嵌式密封结构设计时,采用较效的动环厚度和过盈量能够减小动环端面的变形量。

端面变形对密封性能影响的研究较为完整,但是密封面变形与液膜流场之间相互作用的规律还有待进一步研究,同时端面变形受多种因素的影响,当前研究大多集中在针对某一具体结构或者给定一种边界条件设定,端面密封变形机理性工作依然还有待更系统的研究。

### 3 温粘效应

摩擦等因素使密封间的流体温度升高,造成液膜温度场不均匀分布,温度场的变化必然会引起流体粘度场的变化,粘度变化又会导致液膜压力分布变化。液体流态对端面密封对流换热有较大影响,随着旋转机械高速高压应用的趋势,密封中传热问题变得重要,经典流体润滑理论中的等温假设、等粘度假设与实际情况有较大出入,无法反映出流体性质的变化,同样也无法正确表征端面密封的密封特性,需要进一步研究液膜温度场问题。

研究表明,温粘效应一方面增加密封泄漏量,降低开启力和液膜刚度,对端面密封运行稳定性带来负面影响,另一方面会导致液膜温升,某种程度上会提高密封运行的安全性<sup>[33]</sup>。Qiu等<sup>[34]</sup>研究发现热行为对密封性能有显著影响,并对螺旋槽参数进行优化以提升密封性能。宫晓清等<sup>[35]</sup>考虑温粘效应,分析流体入口流速及转速对端面温度的影响,研究表明,深槽结构导致端面温度分布不均匀,且端面温度随转速增大而升高。Feng等<sup>[36]</sup>基于流体动压润滑理论,以实验和数值计算对比分析,发现温度和波纹幅度对密封性能有重要影响,密封压力影响更大。Jin等<sup>[37]</sup>研究了四种易汽化密封介质对螺旋槽机械

密封相变和密封特性的影响,研究结果表明动态粘度是影响密封介质稳定性和相变的关键因素,高动态粘度的密封介质可以明显阻断汽化现象,延缓相变过程,缩短端面密封不稳定的准蒸汽相温度范围。

### 4 空化效应

空化是由于剪切作用,发散区膜压力下降,密封间隙之间的液体中溶解的气体被释放,或者被包裹在液体中的气体变大,或者液体相变为蒸气,形成空穴或气穴的现象<sup>[38]</sup>,对密封的承载能力、润滑性能等都产生重要影响。在流体膜润滑中,空化主要有气体空化和蒸气空化两种。目前人们普遍认为局部流体压力的下降时产生液膜空化现象的主要原因<sup>[39]</sup>,空化现象的存在会破坏液膜,产生振动和噪声、壁面剥蚀等,影响液膜刚度、密封性能,因此动压润滑下空化现象的产生受到学者的广泛关注。

流体动力润滑下空化现象影响的边界条件主要有四种,分别是Sommerfeld边界、Gumbel(half-Sommerfeld)边界、Swift-Stieber(Reynolds)边界、和Jakobsson-Floberg-Olsson(JFO)边界。在理论方面,最早提出来的Sommerfeld边界不符合实际会产生空化的现象,可用于润滑问题的定性分析;half-Sommerfeld边界可排除负压问题,但在物理上不可能实现;Reynolds边界条件应用较多,但忽略质量守恒条件,无法解释液膜再生成问题,对空化现象描述并不完整,需提出更合适的空化模型进行完善,当前理论研究大多集中在提出新的空化边界和空化算法上。

Ma等<sup>[40]</sup>设计了正向、反向螺旋槽和环形槽的端面密封,通过实验研究空化吸力对泄漏量和摩擦力矩的影响,结果表明,空化与转速和载荷相关,产生空化吸力效应的根本原因是空化区低压,空化的产生有利于减少泄漏,但是空化区域的膜压力分布较低,会导致液膜的承载能力降低。Fan等<sup>[41]</sup>研究润滑油惯量对空化的影响,采用Elrod算法和Gumbel空化边界条件对空化进行建模,并于实验数据对比,分析结果表明,流体惯性效应显著的扩大了空化区域,影响空化的产生和液膜再生成。

空化的产生影响流体动力润滑接触面的压力分布,进而影响端面密封的承载能力。Ma等<sup>[42]</sup>分析流体惯量和空化对高速条件下的螺旋槽端面密封性能的影响,研究表明由于膜厚不连续引起的惯性效应能够提高密封的承载能力,泄漏率增加,同时密封

间隙之间流体流动的对流惯性也促进了流体的空化。Zhao等<sup>[43]</sup>研究在不同转速和进口压力下空化现象的发生及动态特性,转速从500 rpm增加到2000 rpm时,油膜刚度下降12.9%,进口压力从1.0~2.2 MPa变化时,液膜刚度几乎保持不变。Meng等<sup>[44]</sup>建立了考虑空化效应的热流体力学模型,结合Jakobsson-Floberg-Olsson空化边界条件,采用有限元法求解能量方程和雷诺方程,对凹槽的几何参数进行优化,以提升承载能力和摩擦系数。

许多理论和实验研究发现,密封面之间的密封间隙可能影响空化区域的压力分布。Shen等<sup>[45]</sup>研究表明,稳态润滑时空化压力受液膜中溶解气体的影响,空化压力随端面间隙的增大而增大,原因之一是间隙增大,润滑区液体增多,能提供更多溶解的空气。由于密封结构的复杂性及液膜厚度的微米量级,密封端面的直接可视化空化试验较少,部分研究提出一些有效的手段对端面密封的空化现象进行了观察。Zhao等<sup>[43]</sup>建立了一个新的实验装置来测量油膜刚度,验证理论模型,并且研究了Reynolds和JFO边界条件的有效性。

## 5 结论与展望

非接触式端面密封因性能优越,运行稳定,泄漏率低,广泛应用于各种旋转机械的轴端密封,且在正常运行下没有磨损或低磨损,使用寿命长,可提高整个设备的工作效率。在密封端面开设不同槽型可提升端面流体动压效应,基于端面变形、温粘效应和空化效应,并优化结构参数、模型设计、边界参数都有利于提升密封承载能力和润滑性能。

端面密封性能研究由简单的流体分析、流固耦合分析逐渐向热流固多场耦合分析发展。近年来随着表面织构技术、计算机技术等技术的发展,研究人员以这些技术为依托,使研究从稳态向瞬态和动态发展,为实际应用提供了可靠的理论依据。根据目前的研究现状,还有内容有待进一步深入研究。

(1)当前研究模型相对不够完善,无法解释液膜再生等实际问题,需要提出新的边界条件和模型算法已更贴切实际应用。

(2)研究大多针对某种特定结构或者预先设定某一边界条件展开,对于密封面变形与流场之间、温度场与流场及压力场之间相互作用规律,关于密封机理和动压润滑的协同机制还未进行系统的探究,

这是一个值得关注的对象。

(3)关于端面密封的可视化实验相关研究较少,多是关于机理性试验或实验结果的分析,缺乏密封运行过程的动态表征,可以采用一些先进的传感技术对密封状态进行在线监测。

(4)密封材料表面改性技术的研究与应用可进一步开展,非接触式端面密封随着应用得到推广,逐渐应用于高温、高压、磨损、腐蚀等恶劣工况,提升密封材料性能可以达到增强密封耐磨、耐蚀性能,提高工作寿命的目的。

## 参考文献:

- [1] Zheng Wei, Sun Jianjun, Ma Chenbo. The theoretical basis of face contact pressure design of the zero-leakage mechanical seal [J]. *Coatings*, 2022, 12(4):536.
- [2] Duffet G, Sallamand P, Vannes A B. Improvement in friction by Cw Nd: YAG laser surface treatment on cast iron cylinder bore[J]. *Applied Surface Science*, 2003, 205(1-4):289-296.
- [3] Yan D S, Qu N S, Li H S. Significance of dimple parameters on the friction of sliding surfaces investigated by orthogonal experiments[J]. *Tribology Transactions*, 2010, 53(5):703-712.
- [4] Su X, Shi L P, Huang W. A multi-phase micro-abrasive jet machining technique for the surface texturing of mechanical seals [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016:1-8.
- [5] Khonsari M. M., Booser E. R. Applied tribology: bearing design and lubrication[J], *Journal of Tribology*, 2008, 124(2):432665.
- [6] Hossain M.Z., Razzaque M.M. Load capacity of a grooved circular step thrust bearing[J]. *Journal of Tribology*, 2014, 136(1): 011705.
- [7] 李振涛,黄佰朋,郝木明.周向斜面台阶螺旋槽液膜密封流体动压性能[J]. *化工学报*, 2017, 68(5):2016-2026.
- [8] Zhao X, Zhang J, Dong H. Numerical simulation and experimental study on the gas-solid coupling of the aerostatic thrust bearing with elastic equalizing pressure groove[J]. *Shock and Vibration*, 2017(PT5):1-11.
- [9] 葛诚,孙见君,苏徐辰.扩压式自泵送流体动静压型机械密封性能分析[J]. *化工学报*, 2020, 71(5):2202-2214.
- [10] Jiang J, Peng X, Zong C. Enhancing film stiffness of spiral groove dry gas seal via shape modification at low speed: numerical results and experiment[J]. *Tribology Transactions*, 2019, 62(6):931-942.
- [11] Nan Zheng, Baohong Tong, Wen Yang. Study on pressure balance and clearance flow characteristics of composite-grooved piston-copper pair[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, 42(6):1-11.
- [12] 马学忠,孟祥铠.瑞利台阶型机械密封端面环形槽的空化诱导机理分析[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(13):166-174.
- [13] 冯秀.螺旋槽上游泵送机械密封摩擦特性试验研究[J]. *流体机械*, 2012, (9):9-13.
- [14] 李振涛,王赞磊,郝木明.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.
- [15] 马学忠,孟祥铠,王玉明.机械端面密封反向螺旋槽空化效应与泄漏控制机理[J].化工学报,2018,69(4):1558-1568.
- [16] Jiang JinBo, Peng XuDong, Li JiYun. A comparative study on the performance of typical types of bionic groove dry gas seal based on bird wing[J]. Journal Of Bionic Engineering, 2016,13(2):324-334.
- [17] Jiang JinBo, Peng XuDong, Li JiYun. Leakage and stiffness characteristics of bionic cluster spiral groove dry gas seal[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018,31(1):21.
- [18] Jiang JinBo, Zhao WenJing, Peng XuDong. A novel design for discrete surface texture on gas face seals based on a superposed groove model[J]. Tribology International, 2020,147:106269.
- [19] Ying Liu, Wei Liu, Yongjian Li. Mechanism of a wavy-tilt-dam mechanical seal under different working conditions[J]. Tribology International, 2015,90:43-54.
- [20] Wentao Su, Yang Li, Yahui Wang. Influence of structural parameters on wavy-tilt-dam hydrodynamic mechanical seal performance in reactor coolant pump [J]. Renewable Energy, 2020,166:210-221.
- [21] Wang Tao, Huang Weifeng, Liu Ying. A homogeneous phase change model for two-phase mechanical seals with three-dimensional face structures [J]. Journal Of Tribology-Transactions Of The Asme, 2014,136(4):1-11.
- [22] Noël Brunetière, Bernard Tourmerie. Numerical analysis of a surface-textured mechanical seal operating in mixed lubrication regime[J]. Tribology International, 2012,49:80-89.
- [23] Ma W, Biboulet N, Lubrecht AA. Numerical solution and FFT-based prediction of the hydrodynamic pressure generation of parallel rough surfaces[J]. Bear World, 2019,4:27-38.
- [24] 迈尔.机械密封第六版[M].北京:化学工业出版社,1981.
- [25] 张书贵,顾永泉.机械密封变形的研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),1992,16(2):48-53.
- [26] Shaoxian Bai, Yuansen Song, Jing Yang. Elastic deformation of liquid spiral groove face seals operating at high speeds and low pressure[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022,226:107397.
- [27] 白少先,魏佳,朱得磊.T型槽端面密封气膜热弹流润滑动态稳定性[J].摩擦学学报,2019,39(2):131-139.
- [28] 李彦启,刘启东,刘合荣.基于热力耦合的镶嵌式机械密封端面变形分析[J].润滑与密封,2021,46(9):113-119.
- [29] Wang Rong, Bai Shaoxian. Thermo-hydrodynamic analysis of low-temperature supercritical helium spiral-grooved face seals: large ambient temperature gradient [J]. Applied Sciences, 2022,12(21):11074.
- [30] Zhu Delei, Yang Jing, Bai Shaoxian. Thermo elastic hydrodynamic characteristics of low-temperature helium gas t-groove face seals [J]. Materials (Basel, Switzerland), 2021,14(11):2873.
- [31] 郑尧,张敬博,李双喜.船舶艉轴双端面密封端面热-力耦合变形及影响因素分析[J].流体机械,2022,50(12):20-26.
- [32] Alfredo Chávez, Oscar De Santiago. Experimental measurements of the thermo elastic behavior of a dry gas seal operating with logarithmic spiral grooves of 11° and 15°[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2021,235(9):1807-1819.
- [33] Ma Yu, WangYa Hui, Zhou HaiChun. Characteristics of the waviness end-face mechanical seal in reactor coolant pump considering the viscosity-temperature effect[J]. Frontiers in Energy Research, 2021(9).
- [34] Qiu Y, Khonsari M M. Thermohydrodynamic analysis of spiral groove mechanical face seal for liquid applications [J]. Journal of Tribology, 2012,134(2):390-392.
- [35] 宫晓清,孟祥铠,李纪云.核主泵用流体动压型机械密封温度场的数值研究[J].流体机械,2015(7):16-21.
- [36] Feng Xiaodong, Su Wentao, Ma Yu. Numerical and experimental study on waviness mechanical seal of reactor coolant pump[J]. Processes, 2020,8(12):1611.
- [37] Jie Jin, Xudong Peng, Yuntang Li. Comparison and analysis of the performance of a spiral groove mechanical seal subjected to phase change with different sealing media[J]. Applied Thermal Engineering, 2023,219:119618.
- [38] Braun MJ, Hannon WM. Cavitation formation and modelling for fluid film bearings: a review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2010,224(9):839-863.
- [39] Gevari M T, Abbasiasl T, Niazi S. Direct and indirect thermal applications of hydrodynamic and acoustic cavitation: A review [J]. Applied Thermal Engineering, 2020,171(5):115065.
- [40] Ma Xuezhong, Meng Xiangkai, Wang, et al. Suction effect of cavitation in the reverse-spiral-grooved mechanical face seals [J]. Tribology International, 2019(132):142-153.
- [41] Fan Tieshu, Hamzehlouia Sina, Behdina Kamran. The effect of lubricant inertia on fluid cavitation for high-speed squeeze film dampers[J]. Journal of Vibroengineering, 2017,19(8):6122-6134.
- [42] Ma Xuezhong, Meng Xiangkai, Wang Yuming. Fluid inertia effect on spiral-grooved mechanical face seals considering cavitation effects[J]. Tribology Transactions, 2021,64(2):367-380.
- [43] Zhao Yimin, Wei Chao, Yuan Shihua. Theoretical and Experimental Study of Cavitation Effects on the Dynamic Characteristic of Spiral-Groove Rotary Seals (SGRSs)[J]. Tribology Letters, 2016,64(3):50.
- [44] Meng Xiangkai, Khonsari M. M. Viscosity wedge effect of dimpled surfaces considering cavitation effect [J]. Tribology International, 2018,122(1):58-66.
- [45] Cong Shen, M. M. Khonsari. On the Magnitude of Cavitation Pressure of Steady-State Lubrication [J]. Tribology Letters, 2013,51(1):153-160.
- [46] Zhao Yimin, Wei Chao, Yuan Shihua. Theoretical and experimental study of cavitation effects on the dynamic characteristic of spiral-groove rotary seals (SGRSs) [J]. Tribology Letters, 2016,64(3).