

极地钻探装备动密封失效分析及改进措施研究综述

王宇轩^{1,2}, 张凯^{*1,2}, 杨甘生^{1,2}, 李亚洲^{1,2}, 周子毅^{1,2}

(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 10083)

摘要: 南极地区资源的开发和利用是世界能源可持续发展中的重大课题之一。在极地钻探装备研究中, 密封技术是决定钻探装备能否安全、高效、经济运行的关键性技术。在此背景下, 本文分析了极地钻探装备密封现存的问题, 根据密封材料和密封技术的新发展, 综合考虑到密封结构、材料的力学性能和极地低温钻井工况, 指出了极地钻探装备密封目前常见的失效形式, 并综述了已有改进方案, 系统归纳了国内外现有极地装备类型及其技术特点, 剖析了国内外之间存在的技术差距。

关键词: 极地钻探; 钻探装备; 低温密封; 密封结构; 密封材料

中图分类号: P634.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)S1-0077-05

Research status of failure analysis and improvement measures of dynamic seal for key equipment in polar drilling

WANG Yuxuan^{1,2}, ZHANG Kai^{*1,2}, YANG Gansheng^{1,2}, LI Yazhou^{1,2}, ZHOU Ziyi

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

2. Key laboratory on Deep GeoDrilling Technology, MNR, Beijing 100083, China)

Abstract: The exploitation and utilization of Antarctic resources is one of the important issues in the sustainable development of energy in the world. In polar drilling equipment research, sealing technology is the key technology to determine whether drilling equipment can operate safely, efficiently and economically. In this context, this paper systematically analysis the existing seal problems of polar drilling equipment. According to the new development of sealing materials and sealing technology, taking into account the seal structure, mechanical properties of materials and polar low-temperature drilling conditions, it points out the common failure forms of polar drilling equipment seal and summarizes the existing improvement schemes. The types and technical characteristics of existing polar equipment at home and abroad are systematically summarized, and the existing technical gap between home and abroad is analyzed.

Key words: polar drilling; drilling equipment; low-temperature seal; seal structure; seal material

0 引言

研发极地冰下基岩钻探装备对获取冰下基岩样品、探究冰下地质构造重要信息有着十分重要的科学意义。但由于极地恶劣的环境条件和复杂的

冰下环境(基底冰、基底融水和冰碛物等), 对极地冰下基岩钻探装备的性能要求也相对较高。在极地钻探装备研发过程中, 密封技术是决定钻探装备是否安全、高效、经济运行的关键性技术。极地低

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-08-14 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.012

基金项目: 国家重点研发计划“变革性技术关键科学问题”重点专项“南极冰下复杂地质环境多工艺钻探理论与方法”项目(编号: 2021YFA0719100)课题四“多工艺极地钻探装备研发与系统集成”(编号: 2021YFA0719104)

第一作者: 王宇轩, 女, 汉族, 1999年生, 硕士研究生, 研究方向为密封设计、摩擦学与表面工程, 北京市海淀区学院路29号, 2919640756@qq.com。

通信作者: 张凯, 男, 汉族, 1989年生, 副教授, 博士, 地质工程专业, 从事岩石破碎学、钻探机械与工具研发、超硬材料在地质工程中应用、摩擦学与表面工程等方面的研究工作, 北京市海淀区学院路29号, zhangkai66@cugb.edu.cn。

引用格式: 王宇轩, 张凯, 杨甘生, 等. 极地钻探装备动密封失效分析及改进措施研究综述[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 77-81.

WANG Yuxuan, ZHANG Kai, YANG Gansheng, et al. Research status of failure analysis and improvement measures of dynamic seal for key equipment in polar drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 77-81.

温下密封材料逐渐变硬,拉伸、压缩变形后的恢复速度越来越缓慢,恢复程度也越来越低,对大部分密封结构来说产生不利的影响。对此,本文按照运动类型对密封元件做出分类,综述极地钻探装备密封常见失效形式,总结已有密封方案,对比国内外极地钻探技术现状。为提升极地钻机使用性能提供依据。

1 国内外低温钻机及密封技术发展现状

由于传统商用钻机液压系统、钻井液处理系统等在极地低温下工作性能不佳,所以需要专门针对极地环境对钻机进行设计。冰下基岩取心关键在于快速钻穿南极冰盖,在基岩层取心。由于基岩钻进对钻探装备动力需求较高,早期应用于深冰心钻探的铠装电缆式电动机机械取心装备不适用于冰下基岩钻进。2016年 Goodge 等^[1]设计了名为 Rapid Access Ice Drill(简称 RAID)的快速冰钻钻具,如图1所示。并于2015年在美国犹他州完成了该装备的野外测试。RAID的冰层钻进情况和岩心收集情况均满足冰下基岩取心要求。并于2019—2020年应用于南极钻探。2021年 Boeckmann 等^[2]将商用钻机进行改进,在闭环系统中使用正向流体循环,套管部分加入了膨胀封隔器设计,使钻井液在极地环境中仍能保持良好的性能,且该钻机可更加方便快捷地进行组装和拆卸。Kuhl 等^[3]于同年设计了 ASIG 钻机,该装备先导孔采用螺旋钻进行钻进,穿过粒雪层后下入套管,然后采用钻井液钻进。

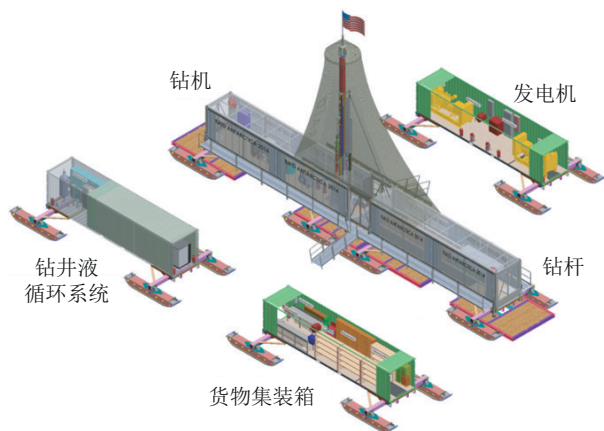


图1 美国 RAID 钻机结构示意图

针对极地冰下基岩取心钻探的尝试由来已久,但成功的案例并不多。由此看来,针对极地冰下基岩取心钻探的技术与装备仍需持续改进与创新。

2014年吉林大学开展了极地深冰下基岩无钻杆取心钻探装备研发工作^[4],针对南极甘布尔采夫山脉基岩取心钻探任务设计了极地深冰下无钻杆取心钻探装备系统,如图2所示,正式开启了我国极地深冰下基岩钻探技术的研究。该钻探系统将所有设备集成于便于转场运输工作舱内,降低了偏远地理位置钻探运输、后勤保障的难度和成本。基于新式反扭系统、冰下基岩仿生金刚石取心钻头研制出的无钻杆式电动机机械取心钻具可针对不同地层更换相应的功能模块,以达到安全高效取心的目的。

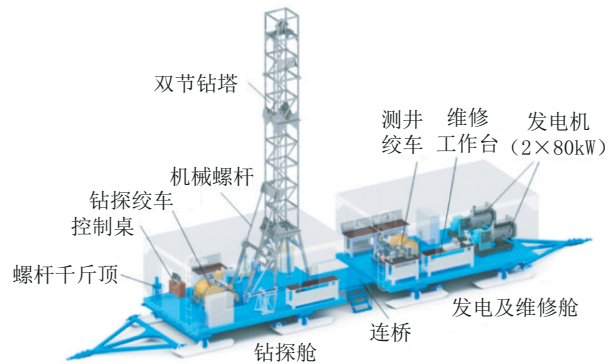


图2 极地深冰下无钻杆取心钻探装备系统^[4]

综合来看,虽然我国开展极地钻探技术研究起步较晚,但随着极地战略不断推进,我国的极地冰钻关键技术与装备的研究正持续向着赶超极地钻探强国方向迈进,这必将为我国的极地科学研究提供强有力的技术支撑。

密封技术是决定钻探装备是否安全、高效、经济运行的关键性技术,其机械性能影响钻进工作效率。我国密封领域相关的学者在做了大量工作后对机械密封提出了通用规范,密封材料的选择、制造和安装极大程度上影响密封效果。龚洁等^[5]、Henningson 等^[6]用软金属制成在低温下使用的垫片和O形圈。李海麟等^[7]则以航空用液压制动器为研究对象,研究密封件表面不同表征参数对低温密封特性的影响规律。在低温金属密封中,法兰结构是低温密封常采用的结构,在常温下装配后在低温条件下依然能保持良好的密封性能。2017年赵玉刚等^[8]研究了低温下法兰对真空的密封性能。陈远鹏^[9]分析了低温钻机橡胶密封件低温性能,为极地钻探密封件选型提供了依据。

2 极地钻探装备密封元件分类

极地作业期间,各种设备长时间在恶劣工况下运行,这就对钻探装备的密封技术提出了更高的要求。所以优选出适合于极地钻探关键设备的密封材料、改进密封结构参数既具有理论意义又有重要的工程实用价值。密封元件分类方式很多,按照结合面之间是否相对运动可分为动密封和静密封。其中较为关键的为动密封,按其运动类型又可分为往复式动密封和旋转式动密封。本文主要从结构设计、材料使用入手,针对极地钻探装备机械动密封现存问题及改进措施进行综述。

2.1 往复式动密封

密封界面磨损失效是往复动密封常见的失效形式。随着机械系统工作时间的增长,往复机构运动单元应力集中部位发生磨损或过度变形,进而容易导致密封失效。因此,常温工况下降低磨损是提高往复运动构件性能的关键。在低温工况下,介质的可压缩性发生改变,材料冷缩造成密封比压下降。低温工况下往复动密封失效分析,在原有基础上还需考虑低温下密封介质体积变化以及材料耐低温性。

2.1.1 往复密封界面摩擦磨损

降低磨损是提高往复运动构件可靠性、延长使用寿命的关键。目前降低磨损的研究主要是从结构设计、表面工程技术、改善材料本身性能3方面入手。

综合考虑极地钻探环境温度,在材料选择时对耐磨性以及耐低温性要求较高。李永胜^[10]通过分析活塞缸缸套的主要失效形式,以及材料的摩擦磨损特性,得出泥浆泵对缸套材料的使用要求。高如琴等^[11]通过对钻井泵缸套的分析,提出了长寿命陶瓷缸套的要求,从陶瓷材料的选择、力学性能及其微观结构等方面探讨了提高陶瓷缸套使用寿命的方法。车剑飞^[12]采用接枝法在纳米氧化物表面形成聚合物修饰层,在原有材料基础上添加高分子材料成分,使其成为复合材料来提高自身的耐磨性。除此之外,改进材料的热处理技术也是提高材料耐磨性能的有效方法之一。在结构设计方面,应考虑运动单元应力分布,提高应力集中区域性能。1975年江汉石油管理局钻井处^[13]研制出了组装式活塞,在之后的钻探作业中利用率大于整体式活塞。杨贺民等^[14]分别用光弹性法和平衡压力法测定了活塞全

域应力状态和活塞表面接触应力分布,提出在活塞易疲劳损伤部位加上护根环的改进方法。美国Reed公司^[15-16]在尼龙根部和软橡胶之间用缓冲材料做隔离弹性垫,使活塞由硬到软逐渐过渡,延长了活塞使用寿命。提高往复运动构件密封性能还有加工表面织构、仿生优化设计等方法。Nayak等^[17]以汽车发动机为例,分析高负荷、极度低温条件下活塞往复运动时的机械摩擦产生能量,表面微观组织及其性能对发动机寿命的影响。指出通过激光表面处理产生的相互连接的微流体通道和凹坑有助于油在层流状态下的保留和毛细流动,从而减少磨损缸孔和油耗。吉林大学汝绍锋^[18]依据蚯蚓体表结构特点,设计仿生条纹形、凹坑形活塞,并对仿生活塞进行了磨损和密封性能试验,揭示了仿生条纹和凹坑形活塞的耐磨密封机理。

2.1.2 低温下介质可压缩性影响

由于流体温度和夹带空气含量会对流体的体积模量产生影响,故低温条件将改变往复运动构件液体介质可压缩性,进而改变密封腔压力差。可通过合理控制活塞密封间隙来改善此问题。接触式密封可以显著解决泄露问题,但会限制运动单元的运行速度以及机构整体的运行寿命。采用间隙密封的方式对提高速度以及延长使用寿命都有显著的效果。建议尽量采用间隙密封,若机构为流量较小的活塞泵可考虑接触式密封。1959年Tornare等^[19]研究了低温下往复式柱塞泵流量及排出压力,此研究开启了低温下往复密封流量的初步探索。2008年华中科技大学战颖^[20]以液氢泵为例,分析了间隙的动态泄露以及活塞的运动规律,设计了往复密封系统主要参数。2016年桂鹏等^[21]针对油气弹簧O形圈低温往复条件下普遍出现的失效现象进行分析,得出了摩擦力随油液压力的变化规律。

2.2 旋转式机械密封

旋转机械广泛用于极地钻探装备循环系统和钻进系统,在轴承密封、轴与轴套、泵类零件中起着重要作用。作为循环系统的核心动力部件,其运行性能对整个系统工作效率具有决定性影响。密封元件是旋转机械的关键部件,控制着旋转机械中动静间隙处工作介质的泄漏流动,对旋转机械能量转换效率和运行稳定性具有显著影响。常温工况下,旋转式动密封常见的失效形式有:润滑条件差,造成接触面局部过热烧伤、轴类零件与密封元件磨损,导致密

封元件内径变大而过盈量减小,最终密封失效。在低温环境下,液体介质中夹杂冰屑,加剧密封元件内表面与轴类零件之间磨损。综合以上几点,按照其对密封元件带来的影响分类,总结目前可用于改善极地环境旋转密封性能的方法主要有3种。

2.2.1 旋转密封界面磨损

常温下旋转式密封研究已经较为成熟。由于温度对材料机械性能以及液体粘度的影响,导致旋转类机械密封高温、低温环境下会出现一系列的新问题。徐辅仁^[22]得出了动力粘度、同心间隙量与油温的关系,介绍了环状缝隙泄漏量的计算公式及其推导过程。2016年杨江波^[23]依据热胀系数分析温度对密封间隙的影响,通过粘温特性分析温度对液体介质粘度的影响,利用 fluent 对间隙密封工作间隙内的压力分布进行仿真,得出了间隙密封泄漏量与温度的对应关系。为密封间隙的设计和确定合适的工作温度范围提供依据。对于间隙密封,目前以温度为研究对象的研究大多针对高温,低温条件下间隙密封结构参数研究尚不完善。由于低温条件下液体介质粘度增大,有利于密封。故进行结构设计时可适当增大密封间隙,有利于减小烧结磨损。可以根据金属冷缩系数、粘温特性,进行数值计算和仿真分析,得出温度与临界泄露率最大间隙值的对应关系,对极地环境下间隙密封的结构参数设计具有指导意义。

由于极地钻探中液体介质当中夹杂一定冰屑,工作过程中冰屑进入密封界面,对密封元件表面造成损伤。谢雪刚^[24]提出在摩擦副动环表面添加耐磨性较强的副材料,例如以 YG 为摩擦副静环材料,在动环表面涂抹适量的氧化铬。可使动环表面与静环表面硬度差异增大,有效地规避了动静环密封面损伤问题。2016年陈国明^[25]以旋转密封为研究对象研究了典型旋转密封材料的流体动压润滑特性以及材料的摩擦磨损规律,建立相关的磨损量预测模型。

2.2.2 泵类内外压差平衡

根据调研目前现有密封形式情况^[26-27],钻井液泵可选用骨架密封。将唇口指向泵室内侧,这种结构对于钻井液一侧具有很强的密封性能,但是对于外侧大气端,几乎没有密封作用。在此背景下,2017年渤海钻探第一钻井公司针对 6 in (152.4 mm) 杆泵安装盘,设计了一种新型的密封结构,如

图3所示。在小法兰轴承槽内加工能容纳两个骨架油封的密封槽,唇口向外安装骨架油封,可以增强杆泵密封空气的能力,保证杆泵扬程的同时,减小气蚀对泵室的损坏。该钻井队实践证明使用效果良好,可大大提高杆泵的使用寿命。对于泵类零件(以 NL 型钻井液泵为例),通过在叶轮上加工平衡孔将叶轮两侧连通,使泵室正压区与负压区平衡掉一部分压力,在叶轮的截面上形成微循环。这样能够减小泵室密封处的液体压力,减小密封元件的轴向受力,提高泵头的整体性能。靠加工平衡孔来提升密封性能,关键在于孔的数量、孔径、位置等参数的确定,以及叶轮工作运转时动平衡的测量和校正。

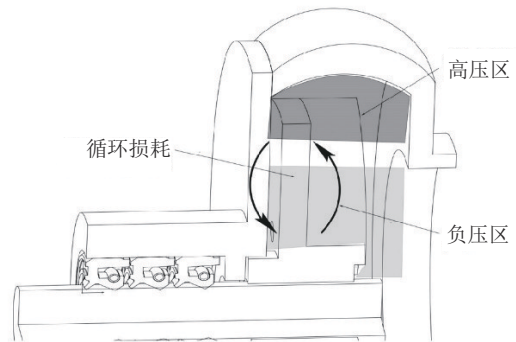


图3 带平衡孔叶轮两侧压力分布^[26]

3 存在问题及建议

目前,针对极地冰下基岩钻探技术与装备,需要在冰岩夹层及冰下基岩取心钻探和孔底驱动循环、暖冰层取心钻进等方面进行深入研究,以解决条件复杂的冰岩界面和冰下基岩钻探技术难题^[28]。对于低温工况下钻探装备动密封研究已取得很大突破,对于不同形式密封按其失效形式已有相关应对措施。但仍存在以下局限:

(1) 目前已有针对极地钻探装备橡胶密封选型的相关研究,但对于低温下金属密封的综述较为笼统,缺少有针对性的、高度贴合南极钻探工况的密封设计,无法对极地钻机金属密封设备选型提供指导。

(2) 当前对于低温环境的研究中,间隙密封的径向间隙及密封长度等参数较多依赖于经验数据,缺乏对密封尺寸与泄漏情况之间敏感性分析,不能对间隙密封尺寸设计提供指导。可以借鉴浮环结构的研究成果,以低温下冷缩程度和液体压力引起密封间隙的形变量为研究对象,探究低温工况下,允许

泄露率下对应的最大间隙。

(3)针对极地冰盖深冰芯钻探技术与装备,需要在快速钻进方面和装备轻量化方面进行深入探索,以便可以在南极冰盖更广泛和便捷地开展大规模深冰芯钻探活动。

参考文献:

- [1] Goodge J W, Severinghaus J P. Rapid access ice drill : A new tool for exploration of the deep Antarctic ice sheets and subglacial geology [J]. Journal of Glaciology, 2016, 62 (236) : 1049-1064.
- [2] Boeckmann G V, Gibson C J, Kuhl T W, et al. Adaptation of the Winkie Drill for subglacial bedrock sampling [J]. Annals of Glaciology. 2021, 62(84):109-117.
- [3] Kuhl T, Gibson C, Johnson J, et al. Agile Sub-Ice Geological (ASIG) Drill development and Pirrit Hills field project [J]. Annals of Glaciology, 2021, 62(84):53-66.
- [4] 李冰,韩丽丽,李亚洲,等.美国极地钻探科学目标分析与钻探技术进展[J].钻探工程,2021,48(9):10-25.
- [5] 龚洁,裴一飞.空间环境模拟器内液氮冷管密封技术[J].航天器环境工程,2005,22(3):168-174.
- [6] Henningson C. J. Cartridge seal assembly for cryogenic applications [J]. Sealing Technology, 2004, 24(5):14.
- [7] 李海麟,张伟,高云琦,等.密封结构表面表征参数对低温密封特性的影响[J].润滑与密封,2023,48(1):131-135.
- [8] 赵玉刚,胡传飞,郭万红,等.低温法兰密封实验研究[J].低温与超导,2017,45(1):27-29.
- [9] 陈远鹏.极地钻井关键设备低温密封和润滑材料优选[D].青岛:中国石油大学(华东),2019.
- [10] 李永胜.泥浆泵用工程陶瓷缸套的研制[D].长沙:中南大学,2007.
- [11] 高如琴,全建军,白周喜.提高钻井泵陶瓷缸套使用寿命的研究[J].现代技术陶瓷,2010,31(3):23-27,34.
- [12] 车剑飞.纳米氧化物表面改性及分散技术及其在分子摩擦材料中的应用[D].南京:南京理工大学,2005.
- [13] 江汉石油管理局钻井处.丁腈橡胶组装机泥浆泵活塞工业性试验阶段总结[J].石油钻采机械情报,1975(6):17-21.
- [14] 杨贺民,杨敏嘉,张勃立.钻井泥浆泵活塞尼龙环护根机理研究[J].石油学报,1983(4):81-91.
- [15] Reed Tool Company. We couldn't leave well enough alone [J]. Drilling Contractor, 1986.
- [16] 周锡容,彭胜商.美、苏几种新型的钻井泵活塞[J].西南石油学院学报,1988(2):87-95.
- [17] Nayak S, Dahotre N B. Surface engineering of aluminum alloys for automotive engine applications [J]. JOM, 2004, 56(1):46-48.
- [18] 汝绍锋.泥浆泵活塞仿生优化设计及其耐磨密封性能研究[D].长春:吉林大学,2015.
- [19] Tornare J. Pump for cryogenic fluid [P]. U.S. Patent: No. 5,901,5564639197, 1987.
- [20] 战颖.全低温液氢泵的研制[D].武汉:华中科技大学,2008.
- [21] 桂鹏,毛明,陈铁杰,等.油气弹簧主活塞斯特封泄漏流量计算与仿真研究[J].兵工学报,2017,38(7):1255-1262.
- [22] 徐辅仁.关于液压阀环状缝隙泄漏量的研究[J].组合机床与自动化加工技术,1990(6):29-31,50.
- [23] 杨江波,邹迪,胡亚,等.钻机配油套密封性能仿真研究[J].煤田地质与勘探,2016,44(1):132-136,140.
- [24] 谢雪刚.油浆泵机械密封泄漏分析及处理措施[J].设备管理与维修,2020(6):64-65.
- [25] 陈国明.典型车用旋转密封材料的摩擦磨损和润滑特性研究[D].北京:北京理工大学,2016.
- [26] Jaunich M, Stark W, Wolff D. A new method to evaluate the low temperature function of rubber sealing materials [J]. Polymer Testing, 2010, 29(7):815-823.
- [27] 乔雷超,魏志涛,李明泽.浅谈NL型钻井液泵密封结构的改进与应用[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(3):99-101.
- [28] 张楠,王亮,Pavel Talalay,等.极地冰钻关键技术研究进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(2):1-16.

(编辑 周红军)