

引文: 王政银, 刘红强, 王俊晓. LNG 接收站海水泵检修维护实践与思考[J]. 油气储运, 2024, 43(7): 827-832.

WANG Zhengyin, LIU Hongqiang, WANG Junxiao. Practice and discussion on maintenance of seawater pump at LNG terminal[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(7): 827-832.

LNG 接收站海水泵检修维护实践与思考

王政银 刘红强 王俊晓

国家管网集团粤东液化天然气有限责任公司

摘要:【目的】海水泵作为 LNG 接收站的核心设备之一,其正常运行对 LNG 接收站安全高效生产至关重要,而对海水泵科学实施检修维护有助于提升其运行的安全性、稳定性、高效性及服役寿命。【方法】基于海水泵基本结构与工作原理,系统梳理了海水泵检修维护要点,包括外观、冷却系统、轴封与轴承、叶轮与泵壳、电机与电气系统、润滑系统等检修维护的主要目的、基本流程及操作方法,尤其对轴封与润滑系统的检修维护进行了详细阐述。【结果】在生产实践中严格落实上述检修维护流程与方法,可以有效保障海水泵安全高效运行,但在极端海洋环境影响及新技术、新材料发展推动下,海水泵在工程应用中仍然面临严峻挑战,需要采取切实有效的应对措施,持续提升海水泵检修维护效率与水平。【结论】建议研发新型防腐涂层材料与有效的生物附着控制方法,以提高海水泵的耐腐蚀性能与抗生物污染能力;利用物联网(Internet of Things, IoT)技术,将传感器、数据分析、云计算等智能技术集成到海水泵维护检修流程中,实现实时监控与预警;根据不同工况与使用环境,开发个性化海水泵检修与保养策略,使检修维护更加精准有效;定期对检修维护人员进行新技术、新方法培训,增强其对海水泵最新维护技术的掌握与应用能力。(参 24)

关键词: 海水泵; 检修; 关键技术; 注意事项

中图分类号: TE82

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2024)07-0827-06

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.07.012

Practice and discussion on maintenance of seawater pump at LNG terminal

WANG Zhengyin, LIU Hongqiang, WANG Junxiao

PipeChina Yuedong LNG Co. Ltd.

Abstract: 【Objective】 Seawater pumps serve as one of the core equipment at LNG terminals, and their normal operation is crucial to the safe and efficient production of these facilities. Proper overhaul and maintenance of these pumps are essential to enhance their safety, stability, efficiency, and longevity. 【Methods】 This paper systematically summarizes the overhaul and maintenance essentials for seawater pumps, taking into account their foundational structure and operational principles. It delves into different components including visual appearance, the cooling system, shaft seal and bearing, impeller and pump casing, motor and electrical system, and the lubrication system. These components are discussed from the perspectives of main purposes, basic procedures, and operational techniques for overhaul and maintenance. Special focus is directed towards elucidating the overhaul and maintenance of the shaft seal and lubrication system in these pumps. 【Results】 Rigorous adherence to the outlined overhaul and maintenance procedures and techniques can effectively ensure the safe and efficient functioning of seawater pumps in practical production scenarios. Despite this, the environmental impacts under extreme marine conditions and advancements in new technologies and materials still present significant hurdles for the engineering applications of seawater pumps. Consequently, it is imperative to take practical and efficient countermeasures to continually enhance the overhaul and maintenance efficiency and effectiveness of seawater pumps. 【Conclusion】 The study concludes with several key recommendations. It suggests prioritizing further research and development towards innovative anti-corrosive coating materials and effective biological adhesion control methods to enhance the corrosion and biological pollution resistance of seawater pumps. Incorporating intelligent technologies such as sensors, data analysis, and cloud computing via the Internet of Things (IoT) into overhaul and maintenance procedures can enable real-time monitoring and alerts. Customized overhaul and maintenance strategies for seawater pumps should be devised, taking into consideration

different operational conditions and service environments, to enhance accuracy and efficiency. Additionally, regular training for maintenance staff on new technologies and methodologies is proposed to keep their maintenance skills updated and enhance their proficiency in implementing these advanced technologies. (24 References)

Key words: seawater pump, overhaul and maintenance, key technologies, precautions

海水泵作为 LNG 接收站中的核心设备,其正常运行直接关系 LNG 接收站的运行可靠性与生产效率,但在海洋环境下运行的海水泵,因长期受海水腐蚀、机械磨损及海洋微生物影响,其安全稳定运行面临严峻挑战^[1-3]。随着 LNG 接收站建设与海洋资源开发利用的持续推进,海水泵的应用日益广泛并持续创新,通过采用高性能材料、先进设计理念及综合性维护策略,一定程度上提高了海水泵的耐久性与可靠性,例如:使用钛合金、双相不锈钢等材料制造泵体与零件^[4-9],可以显著抵抗海水腐蚀;同时在海水泵运行监测与故障诊断技术^[10-13]方面也取得长足进步。当前,部分 LNG 接收站的海水泵仍使用传统材料与技术,检修维护策略也较保守,限制了其性能的发挥与寿命的延长。基于此,通过分析海水泵的运行特点,采取针对性检修维护策略,提高运行效率,延长使用寿命,以期 LNG 接收站的可靠高效运行提供保障。

1 海水泵结构与工作原理

海水泵是一种专门用于输送海水的泵,广泛应用于冷却系统、海水淡化、船舶工业等领域,其主要功能是将海水从低处输送至高处或远处。

海水泵的基本结构主要包括泵体、叶轮、轴封、轴承及驱动装置。泵体是提供密封的容器,用以形成吸入与排出流体的通道;叶轮是泵内的核心旋转部件,通过旋转产生离心力,提高流体的能量;轴封用于防止泵内液体泄漏与外部杂质进入泵内;轴承确保叶轮有效旋转,并支撑机械负荷;驱动装置通常是电动机,提供动力使叶轮旋转^[14-15]。

海水泵的工作原理主要是基于离心力的概念。当电动机驱动叶轮旋转时,叶轮叶片上的海水受到离心力的作用向外抛出,在叶轮中心形成一定的低压区或真空区;该低压区或真空区将新的海水吸入泵体,同时旋转的叶轮将抛出的海水通过泵体的排水通道输送出去。海水泵在复杂的海洋环境中服役,由于海水腐蚀性较强,其在结构与材料选择方面需充分考虑抗腐蚀性

能,并能够承受海洋环境中的各种物理、化学影响。

2 海水泵检修维护

海水泵是 LNG 接收站的重要设备,用于将海水引入与排出船舶或海洋平台。为确保海水泵正常运行并延长其使用寿命,定期开展检修维护尤为重要,其检修重点包括外观、冷却系统、轴封与轴承、叶轮与泵壳、电机与电气系统、润滑系统。

2.1 外观检查

外观检查的目的是确保海水泵的安装位置正确且稳固,包括检查泵的基础、底座、支架是否牢固,紧固螺栓是否松动,泵的进出口管道连接是否紧密,泵壳表面是否有腐蚀、磨损或其他损坏,泵密封是否良好,泵是否存在异常振动^[16]。同时,清洁泵壳内部,确保无异物积聚。

2.2 冷却系统

海水泵通常通过冷却系统保持正常运行温度^[17]。需要检查冷却系统中的冷却水是否充足,冷却水管道是否畅通无堵塞,泵或风扇电机是否运行正常,叶轮是否损坏或堵塞,冷却水过滤器是否积聚杂质或堵塞。同时,通过安装温度传感器或使用红外线测温仪等设备,监测冷却水的温度变化,若发生冷却水温度异常升高,可能是冷却系统出现故障或冷却水不足,应及时排查修复。

2.3 轴封与轴承

2.3.1 轴封

海水中含有盐分等腐蚀性物质,如果渗透到泵体内部,将对海水泵内部零部件产生不可逆的腐蚀作用,加速泵老化,甚至导致泵失效。轴封在海水泵中起到重要作用,其密封性能直接关系到泵体内部是否会受到海水侵害。因此,保持海水泵轴封的密封性能是确保设备长时间稳定运行的重要一环,通过定期检查轴封,可以有效预防海水侵入泵体,防止泵的腐蚀与损坏。

2.3.1.1 检查轴封的密封性能

轴封在海水泵中起关键的密封作用,一旦出现磨损,将直接影响泵的密封性能与整体稳定性^[18]。轴封

检查步骤:①观察轴封的外观,检查其是否存在裂纹、磨损或变形等明显缺陷;②密封圈作为轴封的核心部件,直接决定密封的有效性,需要检查其是否完整、柔软,确保其与轴良好贴合;③检查密封垫是否紧固、完整,防止其出现松动或损坏的情况;④检查轴封与轴的结合部位是否有异物或积聚物,清理可能影响密封性能的任何杂质,保证密封环境的洁净。此外,可以通过泵压力测试或运行状态观察,实时关注轴封的密封性能,确保轴封在运行过程中无漏水迹象,以保证密封系统正常运行。

2.3.1.2 更换磨损的轴封

磨损的轴封若不及时更换,将导致海水泵密封性能下降,增加海水渗透到泵体内的风险,故及时更换磨损的轴封对于保障海水泵长时间高效运行至关重要。在轴封的更换过程中,需确保选择适用的轴封型号,并严格依据海水泵制造商提供的技术规范与操作手册进行更换。此外,在更换磨损的轴封时,需对轴封附近的其他部件进行检查,确保整个密封系统处于良好状态。

2.3.1.3 调整轴封压力

定期调整轴封压力是维护海水泵稳定运行的必要措施。过紧的轴封压力可能导致摩擦增大,加速轴封磨损,甚至引起轴卡死,因此需要合理设置轴封压力,确保其正常运行时既能保持密封性又能减少对轴的不必要摩擦。过松的轴封压力可能导致密封不严,泵体内海水大量泄漏,因此需要定期调整轴封压力,确保轴封与轴紧密贴合,防止海水渗透。可以参考海水泵制造商提供的技术规范与操作手册,通过调整轴封支撑结构、更换弹簧或调整压力螺丝实现轴封压力的调整。

2.3.2 轴承

轴承起到支撑泵的转子的作用,其工作状态直接关系到泵的运行平稳性与服役寿命^[19-22]。需要检查轴承润滑油是否充分,轴承是否有损坏或不正确安装导致的异响或异常振动。此外,利用拨片指示器等检测工具检查泵轴与电机轴的轴对中是否准确,若不准确,会增加轴承的负荷,导致其过早损坏。

2.4 叶轮与泵壳

叶轮与泵壳是海水泵的核心组成部分,需要定期检查其磨损情况。具体包括:①检查叶轮是否存在腐蚀、磨损或其他损伤,并清洁叶轮表面,确保无杂质积聚^[23];②泵壳给叶轮提供工作环境,因此需检查其表面是否光滑,是否发生腐蚀或磨损,并清洁泵壳内部,确保无异物积聚^[24]。此外,叶轮与泵壳之间的间隙直

接影响泵的效率与性能,需确保间隙适当且一致,同时确保叶轮与泵壳之间的配合紧密且无松动,以避免流体泄漏或过度摩擦。

2.5 电机与电气系统

海水泵的电机与电气系统的定期检查包括:①检查电机的运行状态,观察电机是否正常启动与工作,检查电机温度是否正常,若发现电机过热或异响等异常,则应立即停机检修;②定期清洁电机表面,确保其散热良好;③检查电气系统的配线与连接是否牢固可靠;④检查电气线路的绝缘情况,消除漏电与短路等安全隐患;⑤清理电气系统中的灰尘与杂物,确保电气信号的稳定传输;⑥检查电气系统的保护装置,确保过载保护、短路保护及接地保护等装置正常运行;⑦检查电气系统的控制设备,如开关、按钮及仪表等,确保其灵敏度与准确性。

2.6 润滑系统

海水泵的润滑系统至关重要,直接关系到泵的寿命与性能,因此需要定期检查。

2.6.1 润滑油质量

润滑油能够有效降低泵的摩擦损耗与运行温度,提高能效,因此检查润滑油质量是润滑系统检查的首要任务。润滑油的质量指标包括黏度、清洁度及含水量等关键参数:通过取样检测、实验室测试等手段确定润滑油的黏度,若发现黏度异常,应及时调整润滑油种类或加入添加剂,以满足泵在不同工况下的黏度要求;通过过滤、离心分离等手段,去除润滑油中的杂质,提高清洁度,而合理选择高效的过滤设备及定期更换滤芯是保证润滑油清洁度的有效措施;海水泵运行环境湿度大,易导致润滑油中含水量超标,影响其润滑效果,可通过水分传感器等设备,实时监测润滑油中的含水量,若检测到含水量过高,应及时排除泄漏源、更换密封件等,保证润滑油干燥清洁。

2.6.2 润滑油位

确保润滑油位在规定范围内,是保障润滑系统可靠性与海水泵服役寿命的重要环节。若油位过量,可能导致润滑油在泵体内积聚过多,不仅增大泵内压力,还可能引起泵过热,进而降低泵的效率;反之,若油位过低,润滑油将不足以覆盖泵体内的运动部件,导致过度摩擦与磨损,影响泵的正常运行。检查油位时,海水泵需处于停机状态,并等待润滑油冷却,以确保操作安全并准确观察与测量润滑油位;打开润滑系统的检查

口,细致观察润滑油的液面高度,液面应位于设备标识的润滑油标准范围之内;使用专业的液位尺或其他合适的测量工具测量液面高度,确保数据的准确性,为后续分析与评估提供保障。此外,需查阅设备技术手册或润滑系统标识,确保使用的润滑油符合要求,以确保润滑效果及润滑系统的稳定性与持久性。

2.6.3 润滑系统清理

润滑系统中的杂质与沉淀物会影响润滑油的流动性与黏度,需要定期清理,以减小泵体内部零部件的磨损与腐蚀,延长润滑系统与海水泵的使用寿命。操作步骤如下:①停机状态检查,即清理之前,确保海水泵处于停机状态,关闭润滑系统供油阀,断开系统与泵体的连接;②清理油箱,即清除油箱底部可能存在的杂质与废油,确保油箱内清洁;③清理滤芯,即通过拆卸滤芯,用清洁的溶剂或压缩空气将其中的污垢彻底清除;④冲洗油管,即使用清洁的润滑油或特定的清洗剂,冲洗油管系统,保证油液流畅;⑤清理油泵,即清理泵内杂质,并检查密封件状态;⑥清理油冷却器,即使用清洁剂与水冲洗冷却器,确保其表面无污垢;⑦重新组装,即在清理工作完成后,将清理过的部件重新组装,替换滤芯、密封件等易损部件,确保系统完整性;⑧检测润滑效果,即在重新启动之前,检测润滑效果,确认油液清澈透明,无异味与异物,保证润滑系统处于良好的工作状态。

完成检修工作后,需要进行系统性能测试,包括泵的流量、扬程、压力等性能指标,并与标准数值进行对比,确认检修效果。

3 结束语

鉴于海水泵在 LNG 接收站的重要作用,确保其安全高效运行极为必要。基于 LNG 接收站生产实践,系统总结了海水泵的检修重点与操作方法,可有效提高海水泵的运行效率与安全性,减少故障发生,延长使用寿命。当前,海水泵在工程运行中仍面临很大挑战,例如:海水泵在极端海洋环境下长期运行,极易受到海水腐蚀与生物附着的影响,而传统检修技术尚不能充分应对;随着新型润滑材料、密封技术的应用及智能高效检修维护需求,海水泵检修维护面临新的挑战。为此,提出以下建议:

1) 引入更先进的腐蚀与生物附着防护技术,研发

新型防腐涂层材料与有效的生物附着控制方法,以提高海水泵的耐腐蚀性与抗生物污染能力。

2) 采用智能化检修技术,利用物联网(Internet of Things, IoT)技术,将传感器、数据分析、云计算等智能技术集成到海水泵维护中,实现实时监控与预警,降低人工检修频率,提升检修的预见性与精确性。

3) 开展定制化维护策略研究,根据不同工况与使用环境,开发个性化海水泵检修与保养策略,使检修维护工作更加精准有效。

4) 强化技术培训,定期对检修维护人员进行新技术、新方法培训,增强其对海水泵最新维护技术的掌握与应用能力。

参考文献:

- [1] 张云乾,马向阳,高倩钰,张晓虎.核电站海水循环水泵部件腐蚀原因分析及处理[J].全面腐蚀控制,2023,37(4):106-111. DOI:10.13726/j.cnki.11-2706/tq.2023.04.106.06.
ZHANG Y Q, MA X Y, GAO Q Y, ZHANG X H. Cause analysis and treatment of corrosion of seawater circulating pump components in nuclear power plant station[J]. Total Corrosion Control, 2023, 37(4): 106-111.
- [2] 赵基宏,刘新强.海水泵球型配流阀冲蚀磨损的数值模拟研究[J].液压气动与密封,2022,42(1):23-26,29. DOI:10.3969/j.issn.1008-0813.2022.01.004.
ZHAO J H, LIU X Q. Numerical simulation of the particle erosion for seawater pump ball check valve[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2022, 42(1): 23-26, 29.
- [3] 张培杰,董方龙,任利东,张志权,刘井年,张金芳.海水泵泵轴腐蚀分析与改进[J].内燃机与动力装置,2021,38(4):86-90. DOI:10.19471/j.cnki.1673-6397.2021.04.016.
ZHANG P J, DONG F L, REN L D, ZHANG Z Q, LIU J N, ZHANG J F. Corrosion analysis of seawater pump shaft and its improvement[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2021, 38(4): 86-90.
- [4] 陈军.钛合金特点及其在美国海军中的应用[J].稀有金属快报,2004,23(12):34-36. DOI:10.3969/j.issn.1674-3962.2004.12.010.
CHEN J. Characters of titanium alloys and their applications in U.S. navy surface ships[J]. Rare Metals Letters, 2004, 23(12): 34-36.
- [5] 董旭光.双相不锈钢在海水泵上的应用[J].通用机械,2019(6):23-25. DOI:10.3969/j.issn.1671-7139.2019.06.014.
DONG X G. Application of duplex stainless steel in sea water

- pump[J]. General Machinery, 2019(6): 23-25.
- [6] 王子健, 万林林, 高自成, 周飞科. 海水泵用 UNS S32760 超级双相不锈钢焊接接头的组织和性能[J]. 热加工工艺, 2018, 47(9): 219-221. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2018.09.058.
- WANG ZI J, WAN L L, GAO Z C, ZHOU F K. Microstructure and properties of UNS S32760 super duplex stainless steel welded joint for seawater pump[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(9): 219-221.
- [7] 陈猛, 葛宁, 薛志勇. 浅谈双相钢在海水泵蝶阀上的应用[J]. 天然气技术与经济, 2017, 11(增刊 1): 48-49, 63.
- CHEN M, GE N, XUE Z Y. Discussion on the application of dual phase steel in butterfly valves of seawater pumps[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2017, 11(S1): 48-49, 63.
- [8] 高晋. 海洋平台用海水泵选材分析与研究[J]. 水泵技术, 2019(5): 45-49.
- GAO J. Analysis and study of the material selection of seawater pump at the offshore platform[J]. Pump Technology, 2019(5): 45-49.
- [9] 白鼎甲, 白秀琴, 郭智威, 袁成清. 大型邮轮海水泵叶轮材料的空蚀性能[J]. 船舶工程, 2022, 44(9): 7-13. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2022.09.02.
- BAI D J, BAI X Q, GUO Z W, YUAN C Q. Cavitation erosion performance of impeller materials for large cruise seawater pump[J]. Ship Engineering, 2022, 44(9): 7-13.
- [10] 雒海隆, 田建坤, 王大林, 李旭. 轴心轨迹特征算法在唐山 LNG 海水泵故障监测中的应用[J]. 石油化工设备技术, 2024, 45(1): 49-53. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8805.2024.01.011.
- LUO H L, TIAN J K, WANG D L, LI X. Application of axis orbit feature algorithm in fault monitoring of Tangshan LNG seawater pumps[J]. Petro-Chemical Equipment Technology, 2024, 45(1): 49-53.
- [11] 舒相挺, 杨璋, 徐逸哲, 蒋彦龙. 某循环海水泵振动故障诊断与趋势分析[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(4): 791-796. DOI: 10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2022.04.024.
- SHU X T, YANG Z, XU Y Z, JIANG Y L. Vibration fault diagnosis and trend analysis of circulating seawater pump[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(4): 791-796.
- [12] 吴海洪. LNG 接收站海水泵振动故障分析与处理[J]. 机电设备, 2023, 40(3): 11-14. DOI: 10.16443/j.cnki.31-1420.2023.03.004.
- WU H H. Analysis and treatment of LNG receiving terminal sea water pump vibration failure[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2023, 40(3): 11-14.
- [13] 于昊成, 张红武, 高晓东, 王昆, 张耘赫, 文云毅. FPSO 海水泵的故障排查与处理[J]. 天津科技, 2023, 50(4): 97-100. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8945.2023.04.023.
- YU H C, ZHANG H W, GAO X D, WANG K, ZHANG Y H, WEN Y Y. Troubleshooting and handling of FPSO seawater pump[J]. Tianjin Science & Technology, 2023, 50(4): 97-100.
- [14] 仇德朋, 陈景生. LNG 接收站中工艺海水泵系统分析[J]. 水泵技术, 2022(6): 14-18.
- QIU D P, CHEN J S. Analysis of seawater pump system for vapourisation in LNG terminal[J]. Pump Technology, 2022(6): 14-18.
- [15] 任建勋. LNG 接收站工艺海水系统水力特性研究[J]. 山东化工, 2022, 51(2): 150-153, 156. DOI: 10.3969/j.issn.1008-021X.2022.02.048.
- REN J X. Research on the characteristics of transient flow in the sea-water system of LNG terminal[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(2): 150-153, 156.
- [16] 张生乐, 应冬, 徐海群, 邱发富. 基于频响函数法的海水泵动载荷对隔振系统影响分析[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(24): 22-25. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2022.24.005.
- ZHANG S L, YING D, XU H Q, QIU F F. Analysis of the influence of dynamic load of sea water pump on vibration isolation system based on frequency response function method[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(24): 22-25.
- [17] 王宁, 付云鹏, 李艇, 李铁, 依平. 基于 FloMaster-Simulink 联合仿真的大流量海水冷却系统控制方案优化[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(3): 379-385. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.023.
- WANG N, FU Y P, LI T, LI T, YI P. Optimization of control scheme for large flow seawater cooling system based on FloMaster-Simulink co-simulation[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(3): 379-385.
- [18] 王栋, 许鹏飞, 张建新. 海水提升泵机械密封优化换型[J]. 设备管理与维修, 2023(5): 56-58. DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2023.03.22.
- WANG D, XU P F, ZHANG J X. Optimization and replacement of mechanical seals for seawater lift pumps[J]. Plant Maintenance Engineering, 2023(5): 56-58.

- [19] 王伟灿, 吴德发, 张浩, 许锋炜, 吴世海, 高川琦. 超高压海水泵润滑轴承承载与散热仿真分析[J]. 液压与气动, 2023, 47(11): 55-60. DOI: 10.11832/j.issn.1000-4858.2023.11.007.
- WANG W C, WU D F, ZHANG H, XU F W, WU S H, GAO C Q. Simulation analysis of deepsea water-lubricated bearing support and heat dissipation in ultra-high pressure sea water pump[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2023, 47(11): 55-60.
- [20] 任书强, 徐猛, 代鸿凌, 刘星. 某核电站循环海水泵泵轴缺陷的研究与处理[J]. 水泵技术, 2020(5): 49-52.
- REN S Q, XU M, DAI H L, LIU X. Research and treatment of a nuclear power station seawater circulating pump shaft fault[J]. Pump Technology, 2020(5): 49-52.
- [21] 马晓, 党兴武, 刘俭辉, 贺媛. 海水泵转子系统的临界转速计算分析[J]. 液压与气动, 2020(7): 16-21. DOI: 10.11832/j.issn.1000-4858.2020.07.003.
- MA X, DANG X W, LIU J H, HE Y. Calculation and analysis of critical speed of seawater hydraulic pump rotor system[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020(7): 16-21.
- [22] 王庆军, 崔均, 丁超, 李东旭, 佟奕凡, 王天铭. 海水泵轴承支撑板断裂分析[J]. 水泵技术, 2020(2): 25-31.
- WANG Q J, CUI J, DING C, LI D X, TONG Y F, WANG T M. Fracture analysis of the bearing support plate of seawater pump[J]. Pump Technology, 2020(2): 25-31.
- [23] 罗小飞, 唐龙兵. 16VPA6 型海水泵叶轮晶间腐蚀问题的研究[J]. 铸造工程, 2023, 47(1): 31-36. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3320.2023.01.005.
- LUO X F, TANG L B. Study on intergranular corrosion of 16VPA6 sea pump impeller[J]. Foundry Engineering, 2023, 47(1): 31-36.
- [24] 王小闯, 董俊斌. 海水循环泵顶盖泥沙淤积问题分析及应对措施研究[J]. 电工技术, 2023(8): 202-204. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2023.08.053.
- WANG X C, DONG J B. Study on analysis and countermeasures for sediment deposition on top cover of seawater circulation pump[J]. Electric Engineering, 2023(8): 202-204.

(编辑: 刘朝阳)

作者简介: 王政银, 男, 1985 年生, 工程师, 2024 年毕业于中国石油大学(华东)机械设计制造及其自动化专业, 现主要从事 LNG 接收站机械检修工作。地址: 广东省揭阳市惠来县前詹镇沟疏村粤东 LNG 接收站, 515200。电话: 13417621154。Email: wangzy01@pipechina.com.cn

- Received: 2024-02-06
- Revised: 2024-03-11
- Online: 2024-04-01



(上接第 826 页)

- 报, 2016, 37(10): 1424-1431. DOI: 10.11990/jheu.201509032.
- ZHANG X H, XIA Y M, TAN Q, LIN L K, LAO T B, LIU J. Study on the characteristics of breaking jointed rock by tunnel boring machine single-point and double-point cutters[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(10): 1424-1431.
- [21] 王超, 龚国芳, 杨华勇, 周建军, 段理文, 张亚坤. NSVR 硬岩隧道掘进机刀盘扭矩预测分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(3): 479-486. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2018.03.009.
- WANG C, GONG G F, YANG H Y, ZHOU J J, DUAN L W, ZHANG Y K. NSVR based predictive analysis of cutterhead torque for hard rock TBM[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(3): 479-486.

(编辑: 祁梦瑶)

基金项目: 中国铁建股份有限公司科研课题“常压刀盘刀筒结构改进及智能感知管控系统研发与应用”, 2022-B07; 中铁十四局集团有限公司科研课题“新型滑动滚刀、智能刀具、新式刀筒研制及刀具科学管理系统”, 913700001630559891202107。

作者简介: 王华伟, 男, 1973 年生, 教授级高工, 1996 年毕业于西南交通大学地下工程与隧道工程专业, 现主要从事隧道与地下工程研究与管理方向的研究工作。地址: 江苏省南京市浦口区园广路中铁十四局集团大盾构研究院 1213 室, 210000。电话: 13335277128。Email: wanghuawei.14g@crcc.cn

- Received: 2024-01-06
- Revised: 2024-03-11
- Online: 2024-04-11

