海上无隔水管钻井泥浆举升泵叶轮耐磨性能研究

王林清[1,2]，和国磊[1,2]，刘　欣[3]，秦博文[3]，殷国乐[1,2]，陈浩文[1,2]，秦如雷[1,2]
（1.中国地质科学院勘探技术研究所，天津 300300；2.中国地质学会自动化智能化钻探装备创新基地，天津 300300；3.天津市百利溢通电泵有限公司，天津 300380）

摘要：在海上钻井中，采用离心泵型式的无隔水管泥浆举升泵，通过电机带动叶轮转动，从而举升泥浆。由于举升泵长时间工作，泥浆中携带的大量岩屑会对叶轮造成磨损，严重影响泥浆举升泵的正常使用。因此，有必要对叶轮进行耐磨工艺处理，提升材料耐磨耐腐蚀性能。通过优选叶轮本体材料，调研表面耐磨处理工艺，并进行耐磨试验。试验证明，2205双相不锈钢综合性能较好，适用于无隔水管泥浆举升工况；碳化钨超音速喷涂工艺对叶轮耐磨性能提升最大，泥浆举升泵可选取双相不锈钢作为叶轮材料，并进行碳化钨超音速表面喷涂工艺处理，从而提升泥浆举升泵使用寿命。

关键词：无隔水管；泥浆举升泵；叶轮；耐磨试验；2205双相不锈钢；碳化钨超音速喷涂；海上钻井
中图分类号：P634.3^{+}2；TE926　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2096-9686(2026)S1-0149-05

Research on wear-resistance of mud lifting pump impeller for marine riser-less drilling

WANG Linqing[1,2], HE Guolei[1,2], LIU Xin[3], QIN Bowen[3], YIN Guoyue[1,2], CHEN Haowen[1,2], QIN Rulei[1,2]
(1. *Institute of Exploration Techniques, CAGS, Tianjin* 300300, *China*; 2. *Innovation Base for Automatic and Intelligent Drilling Equipment, Geological Society of China, Tianjin* 300300, *China*; 3. *Tianjin Premier ESP Pumping Systems Co., Ltd., Tianjin* 300380, *China*)

Abstract: The centrifugal-pump-type riser-less mud lifting pump is adopted in offshore drilling, lifting mud by motor-driven impeller rotation. During long term operation, abundant cuttings carried in drilling fluid cause severe impeller wear, which seriously impairs normal service of the mud lifting pump. Therefore, it is necessary to adopt wear-resistant treatment for impellers to improve their wear and corrosion resistance. In this study, impeller substrate materials were optimized, surface wear-resistant treatment processes were investigated, and wear-resistance tests were carried out. The test results show that 2205 duplex stainless steel possesses favorable comprehensive properties and is suitable for riser-less mud lifting service conditions. Tungsten carbide supersonic spraying achieves the most significant improvement in impeller wear-resistance. Duplex stainless steel is recommended as the impeller substrate material for mud lifting pumps, combined with tungsten carbide supersonic surface spraying, so as to extend the service life of mud lifting pumps.

Key words: riser-less; mud lifting pump; impeller; wear-resistance test; 2205 duplex stainless steel; tungsten carbide supersonic spraying; offshore drilling

0　引言

泥浆举升泵是海上钻探中无隔水管泥浆回收钻井系统的核心设备，是泥浆回收、循环的动力来源[1-3]。举升泵多采用离心泵型式[4-7]，其在使用时

收稿日期：2026-06-16；**修回日期**：2026-07-25　　**DOI**：10.12143/j.ztgc.2026.S1.016
基金项目：国家重点研发计划课题（编号：2021YFC2800803、2023YFC2813102）
第一作者：王林清，男，汉族，1993年生，工程师，地质工程专业，硕士，主要从事钻探新技术、新设备、新工艺的研发工作，天津市东丽区锦鲤道23号，wanglinqingmail@163.com。
引用格式：王林清，和国磊，刘欣，等.海上无隔水管钻井泥浆举升泵叶轮耐磨性能研究[J].钻探工程，2026，53(S1)：149-153.
WANG Linqing, HE Guolei, LIU Xin, et al. Research on wear-resistance of mud lifting pump impeller for marine riser-less drilling [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 149-153.

长期浸泡在海水中，通过水下电机带动叶轮转动产生离心力，举升带有固相颗粒的泥浆时，由于固相颗粒形状不规则、硬度较大，对举升泵叶轮等关键部件耐磨耐腐蚀性能有较高要求。为此有必要优选叶轮本体材料，调研表面耐磨处理工艺，进行耐磨试验，对比叶轮耐磨效果，选择最优耐磨工艺，保障泥浆举升泵的正常运转。

1 材料选择

无隔水管泥浆回收钻井系统举升的泥浆介质多为固液混合物，泥浆举升泵长时间浸没在海水中使用，而海水中含有大量的氯化物和硫化物等腐蚀性物质。因此，在考虑举升泵耐磨性能时，需同时考虑与海水接触的关键零部件的抗腐蚀性和耐久性等性能。

叶轮模型如图1所示，叶轮的材料选择应同时满足以下要求：(1)有足够的强度、刚度及耐磨性能；(2)有良好的焊接及机加工性能；(3)具有耐腐蚀和抗气蚀等性能。

图1 叶轮模型

不锈钢材料如304、316L和2205、2507双相不锈钢等，在腐蚀性环境中其表面易于形成致密的钝化膜而具有优异的腐蚀抗力，因此成为海洋装备不可或缺的结构材料[8-9]。2205、2507双相不锈钢相比其他不锈钢力学性能更好，但2507双相不锈钢价格更高，且焊接需特殊工艺，举升泵叶轮材质宜采用2205双相不锈钢，其化学成分见表1，经固溶处理后试样的力学性能见表2。

表1 化学成分 单位：%

元素	最小值	最大值
碳(C)		0.03
硅(Si)		1.00
锰(Mn)		2.00
铬(Cr)	22.00	23.00
镍(Ni)	4.50	6.50
钼(Mo)	3.00	3.50
氮(N)	0.14	0.20
硫(S)		0.02
磷(P)		0.03

表2 力学性能

抗拉强度σ_b/MPa	屈服强度σ_s/MPa	延伸率δ/%	硬度/HV
≥655	≥450	≥25	≤310

2 叶轮耐磨工艺

2205双相不锈钢兼具了良好的防腐和耐磨性能，为进一步提升叶轮耐磨性能，延长使用寿命，进行了耐磨工艺研究。氧化铬等离子喷涂、碳化钨超音速喷涂、离子渗氮等表面处理工艺可有效提升零件的耐磨性能[10-12]，是常用的耐磨处理手段。对上述三种耐磨处理工艺进行对比试验，以此确定泥浆举升泵叶轮、导壳流道的表面处理工艺，提高其硬度，从而提高耐磨性能。

氧化铬等离子喷涂技术，是提升金属表面性能的重要手段。通过超音速喷涂设备，将耐磨防腐的氧化铬涂层均匀喷涂于金属表面，赋予金属出色的耐磨、防腐性能，有效延长使用寿命，在化工、航天、电子领域应用广泛。

利用热喷涂技术在泵叶轮及其组件的表面制备耐磨涂层，可以有效地降低运行成本、延长使用寿命。在石油行业，碳化钨涂层常常被应用于石油机械的螺杆钻具、螺杆泵螺杆、阀板阀座及电器等各类柱塞的制造与修复。超音速火焰喷涂工艺(HVOF)是一种新型高能火焰喷涂方法，火焰流动速度极快，可达2200 m/s，比普通热喷涂工艺的焰流速度快5～10倍，由于速度快，粉末粒子携带强大的动能打击在基体表面上，形成的涂层致密度高，结合强度好，而且火焰含氧较少，温度适中，能有效防止喷涂过程中WC的氧化和分解，涂层耐磨性好，因此涂层耐磨损性能更加优越，可高达1200 HV，主

要应用于离心泵、轴流泵及搅拌机转轴密封套等零部件修复,水轮机叶片抗气蚀及耐磨涂层,风机叶轮、球磨机等磨损件耐磨涂层等。

根据2205双相组织特点,对其表面进行渗氮处理,可将奥氏体不锈钢具有的优良韧性和铁素体不锈钢具有的较高强度结合起来,通过渗氮提高表面硬度以提高耐磨性并保持心部良好韧性,从而满足耐磨耐海水腐蚀的使用要求。研究表明,为避免在渗氮过程中Cr原子与N原子结合形成CrN的析出破坏双相不锈钢的耐蚀性,通常认为双相不锈钢进行离子渗氮温度应低于450 ℃。因此,渗氮温度控制在400 ℃左右,表面硬度可达到600 HV。

3　耐磨工艺对比试验

为增强泥浆举升泵耐磨性能,对上述耐磨处理工艺进行对比试验,以此确定泥浆举升泵叶轮等关键部件的表面处理工艺。分别利用以上三种耐磨处理工艺对叶轮叶片进行耐磨处理,将处理后的三个叶片装在同一个叶轮上,并额外添加一个未做耐磨处理的叶片作为对照。将待测试叶轮浸入掺有模拟岩屑的泥浆中,通过电机带动叶轮转动,观察并记录叶轮叶片磨损情况。

3.1　试验原理

按照泥浆配比,在水槽内加入清水、黄原胶、NaCl,搅拌均匀,为模拟钻井时泥浆中的岩屑,加入粉砂岩。水槽上方安装一台立式下出轴电机,电机下端安装耐磨测试用叶轮,耐磨测试叶轮在水中运转,搅动水流,使粉砂岩悬浮在水中,模拟叶轮磨损情况。

基于等比转速的叶轮流动相似的原理,用缩小尺寸的叶轮做耐磨测试,并按照与产品相同的零件基体材料(2205双相不锈钢)、颗粒浓度、叶轮圆周速度进行试验。在同一叶轮上装配上述三种不同耐磨处理后的叶片,并用不做耐磨处理的叶片做试验进行对照分析。

3.2　试验装置制备

(1)参照泥浆举升泵叶轮,按比转速n_s=42.5设计测试叶轮,转速2950 r/min,叶轮直径220 mm,出口圆周速度为34 m/s。

(2)按图2所示制造测试叶轮,叶轮上装配4个叶片,分别标记1、2、3、4号,其中1号做氧化铬等离子喷涂,2号做碳化钨超音速喷涂,3号做离子渗氮,4号未处理。耐磨处理后测量叶片表面硬度及涂层厚度,见表3。

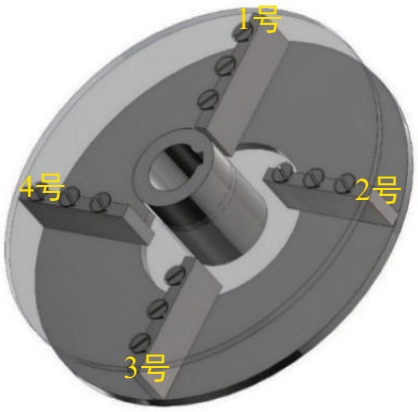

图2　测试叶轮模型及实物

表3　四种叶片表面硬度及涂层厚度

编号	处理方式	表面平均硬度/HV	涂层厚度/mm
1	氧化铬等离子喷涂	1050	0.25~0.40
2	碳化钨超音速喷涂	1300	0.15~0.20
3	离子渗氮	630	0.05
4	未处理	310	

(3)选取测试叶轮配套电机转速2950 r/min,电压380 V,50 Hz,功率18.5 kW。

(4)制造配套轴承支架。

(5)制造试验用水槽,槽底为圆弧形,水槽长600 mm,宽400 mm,水槽中心深度约500 mm。

(6)制造水槽压盖,与水槽四个边之间密封,防止泥浆溅出,并留出气口。

(7)完成耐磨试验装置装配,该装置及其三维模型如图3所示。

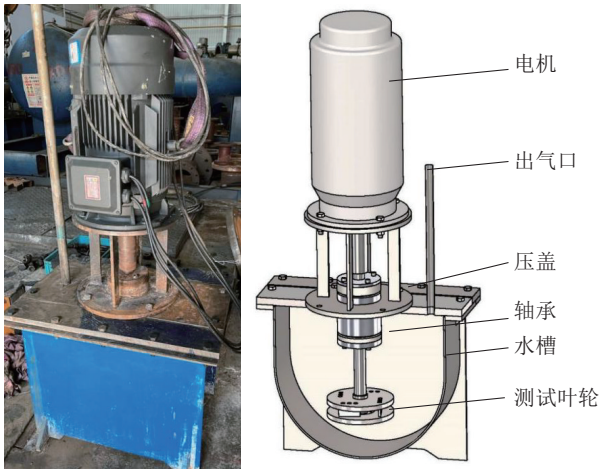

图3 耐磨试验装置

3.3 试验步骤

(1)模拟海水泥浆配比为:清水+0.2%~0.3%纯碱+12% NaCl+5% KCl+6% MEG+1% PF-FLOTROL(降滤失剂)+0.3% PF-PAC-LV(降滤失剂)+0.1% PF-XC(黄原胶)+2% PF-EZCARB(储层桥堵剂)+2% PF-FT-1(沥青-封堵剂)+2% PF-LSF(改性树脂封堵剂)+0.2% PF-PLUS(增黏包被剂)+3% PF-UHIB(聚胺)+3% PF-HLUB(防泥包润滑剂)+2% PF-LUBE(润滑剂),计算40 L清水所需黄原胶和NaCl质量,见表4。

(2)根据该项目要求的颗粒体积分数为10%及粉砂岩堆积密度,计算需要加入的粉砂岩总质量,并分配到5种不同粒径,具体见表4。

表4 试验含砂泥浆主要成分

成分		含量/kg
清水		40.00
NaCl		4.80
黄原胶		0.04
粉砂岩	26~40目(0.375~0.577 mm)	0.68
	16~26目(0.577~0.938 mm)	0.68
	1~2 mm	1.84
	2~4 mm	1.84
	4~8 mm	2.16

(3)先加入清水,再加入NaCl,搅拌均匀后启动测试叶轮配套电机,少量多次加入黄原胶,利用高速旋转的叶轮实现充分搅拌,完成后停机,加入粉砂岩。

(4)启动测试叶轮配套电机,搅动水流带动水中粉砂岩运动,使测试叶轮带动粉砂岩旋转,与叶片充分摩擦。

(5)每运行20~30 h,取出测试叶轮,观察表面磨损情况,测量4个叶片质量,直至累计运行满200 h,做好记录。

3.4 试验结果

离子渗氮、氧化铬等离子喷涂、碳化钨超音速喷涂、未处理四个叶片累计运行200 h后,进行了质量损失对比,见表5。

表5 累计运行200 h前后叶片质量

编号	处理方式	运行前质量/g	累计运行200 h后质量/g	质量损失/g
1	氧化铬等离子喷涂	159.2	146.6	12.6
2	碳化钨超音速喷涂	162.4	158.2	4.2
3	离子渗氮	150.2	138.4	11.8
4	未处理	150.2	137.6	12.6

由表5可以看出,经过碳化钨超音速喷涂处理后的叶片质量损失最少,耐磨效果最好,氧化铬等离子喷涂及离子渗氮工艺不适用于泥浆举升泵工作场景,耐磨效果较差。其中,未做任何处理的双相不锈钢原材料制作的叶片质量损失同氧化铬等离子喷涂及离子渗氮工艺处理后的叶片耐磨效果相差无几,也可判定双相不锈钢作为原材料制作叶轮是较为合适的。

四个叶片累计运行200 h后,表面磨损对比见图4。

可明显看出,经过碳化钨超音速喷涂处理后的叶片(2号)试验前后变化最少,磨损最轻。

经过200 h前后的质量损失对比和外观对比,可以看出碳化钨超音速喷涂的耐磨效果最好,质量损失最少,优势突出。对泥浆举升泵的叶轮进行碳化钨超音速喷涂,提高其硬度,从而提高耐磨性能,延长使用寿命。

1号—氧化铬等离子喷涂;2号—碳化钨超音速喷涂;3号—离子渗氮;4号—未处理

图4　200 h后叶片表面磨损对比

4　结论

(1)2205双相不锈钢材料硬度高,抗腐蚀性能好,耐久度高,可长时间在海水中保持材料初始性能,因此可以作为叶轮等关键部件的原材料。

(2)碳化钨超音速喷涂工艺的耐磨效果最好,经过200 h的耐磨试验,质量损失最少,优势突出。因此对泥浆举升泵的叶轮进行碳化钨超音速喷涂,提高其硬度,从而提高耐磨性能,延长使用寿命。

参考文献:

[1]　解永超.海底泥浆举升水合物钻井系统设计与配置研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2016.
[2]　王国栋.深水钻井泥浆举升装置系统设计与监控策略研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2015.
[3]　王志伟.大洋勘探船无隔水管泥浆闭式循环钻井系统设计研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2019.
[4]　秦如雷,高洁云,于彦江,等.深海泥浆举升泵设计与水力特性研究[J].钻探工程,2024,51(6):77-84.
[5]　高本金.海底泥浆举升圆盘泵流场仿真与性能研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2009.
[6]　陈浩文,王林清,王偲,等.400 m级无隔水管泥浆回收系统研发及海试[J].钻探工程,2023,50(6):37-44.
[7]　秦如雷,于彦江,陈浩文,等.无隔水管泥浆循环举升泵选型及性能参数计算方法[C]//中国地质学会.第二十一届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集.2021:5.
[8]　梁超.双相不锈钢管材在海洋石油平台的应用与研究[J].化工管理,2024(21):158-160,168.
[9]　张钰涵,郭春春.双相不锈钢的性能特点及其应用[J].冶金与材料,2024,44(4):151-153.
[10]　李其连,李淑青,杨伟华.轴向送粉等离子喷涂纳米氧化铬涂层的结构与性能[J].材料保护,2009,42(12):7-9,80.
[11]　张素忠,马运昌,万祺,等.碳化钨涂层盘管的制备及寿命预测[J].化工设备与管道,2024,61(3):45-53.
[12]　靳曾博,王沐凡,逯宇暄,等.奥氏体不锈钢离子渗氮技术研究进展[J].热处理技术与装备,2023,44(4):66-73.

(编辑　王文)