

# 400 m级无隔水管泥浆回收系统研发及海试

陈浩文<sup>1</sup>, 王林清<sup>\*1</sup>, 王 偲<sup>2</sup>, 于彦江<sup>2</sup>, 田烈余<sup>2</sup>, 殷国乐<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075)

**摘要:** 无隔水管泥浆回收系统可以实现开路钻井工况下进行泥浆回收循环再利用, 具有安全环保、简化井身结构和降低钻探风险等优点。该技术在国外已发展多年并成功推广工业应用, 国内目前尚处于跟踪研究阶段。本文介绍了我国首套400 m级无隔水管泥浆回收系统设计研发过程, 并通过海试试验验证系统的各项功能及指标。结果表明, 所研设备样机搭载于“海洋地质十号”船, 设备装船适配合理, 最大海试水深384.7 m, 设备各项功能性均符合设计要求, 成功实现泥浆液位的识别与自动控制功能, 全流程验证无隔水管泥浆回收循环钻井技术可行性。

**关键词:** 海洋钻井; 无隔水管; 泥浆回收系统; 液位识别; 海试试验

**中图分类号:** TE951:P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)06-0037-08

## Development and sea trial of 400 m riserless mud recovery system

CHEN Haowen<sup>1</sup>, WANG Linqing<sup>\*1</sup>, WANG Cai<sup>2</sup>, YU Yanjiang<sup>2</sup>, TIAN Lieyu<sup>2</sup>, YIN Guoyue<sup>1</sup>

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou Guangdong 510075, China)

**Abstract:** The riserless mud recovery system can realize the recovery and recycling of mud under open drilling conditions, which has the advantages of safety and environmental protection, simplified wellbore structure and drilling risk reduction. This technology has been developed abroad for many years and successfully promoted in the industrial application, however, China is still in the stage of tracking research. This paper introduces the design and development process of first 400m riserless mud recovery system in China, and verifies the functions and indicators of the system through sea trial tests. The results show that the prototype of the developed equipment is equipped on the “Marine Geology-10” ship, the equipment loading is reasonably adapted, the maximum sea test depth is 384.7m, the functions of the equipment meet the design requirements, the identification and automatic control function of mud level are successfully realized, and the feasibility of riserless mud recovery and circulation drilling technology is verified in the whole process.

**Key words:** marine drilling; riserless; mud recovery system; level identification; sea trial test

## 0 引言

海洋蕴藏了丰富的油气、天然气水合物和固体矿物等能源资源, 同时也是解决生命起源、地球演化、气候变化等重大科学问题的前沿研究领域。海洋钻探是获取海底地层信息最直观准确的方法, 也

是海洋资源勘查开发最主要的手段之一<sup>[1]</sup>。随着海洋钻探不断向深海挺进, 深海环境下的钻探作业面临诸多挑战: 由于孔隙压力与破裂压力余量较小, 必须采用多层套管体系, 可钻水深和井深极限受多种因素制约<sup>[2-3]</sup>; 开路钻井工况下泥浆直接排海, 污

收稿日期: 2023-01-06; 修回日期: 2023-08-03 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.06.005

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“深海钻探工程关键技术支撑(中国地质科学院勘探技术研究所)”(编号: DD20221721); 广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目“天然气水合物储层改造增产与测试技术支撑”(编号: GDNRC[2022]44); 国家重点研发计划项目“深海开路泥浆液位闭环控制系统研制”(编号: 2021YFC2800802)、“深海泥浆举升泵关键技术及研制”(编号: 2021YFC2800803)

第一作者: 陈浩文, 男, 汉族, 1988年生, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事钻探技术、设备及工艺的研发工作, 河北省廊坊市金光道77号, 409812829@qq.com。

通信作者: 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, 河北省廊坊市金光道77号, wanglinqingmail@163.com。

引用格式: 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.

CHEN Haowen, WANG Linqing, WANG Cai, et al. Development and sea trial of 400 m riserless mud recovery system[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(6): 37-44.

染海洋环境等。无隔水管泥浆回收技术(Riserless Mud Recovery,以下简称RMR)作为新兴的钻井技术,可以实现在开路钻井工况下进行泥浆回收循环再利用,具有安全环保、简化井身结构和降低钻探风险等优点<sup>[4]</sup>。

2001年,挪威AGR公司基于岩屑输送系统技术开发了RMR技术,最初仅用于浅水油气钻井,主要用来解决复杂海底条件和浅层地质风险等钻井难题,保障表层井眼的顺利钻进<sup>[5]</sup>。随着钻井技术和装备性能日益进步,RMR也从浅水走向深海,最大应用水深达1419 m<sup>[6]</sup>。截止目前,RMR技术已在国内外成功应用超过300口井,其工艺方法及相关设备发展较为成熟(见表1),已成为一种高效、安全、环保的深海钻井技术,其技术优点包括可实现海底“零排放”、降低泥浆和录井成本、降低浅层作业风险、增加表层套管下入深度、避免钻领眼等。

表1 RMR钻井记录  
Table 1 RMR drilling records

地区	井眼数量/口	水深/m	时间
北海	35	85~430	2004—2009
里海	34	152	2004
澳大利亚	24	47~306	2006—2009
俄罗斯(巴伦支海)	7	76~350	2006—2009
埃及(地中海)	7	85~108	2007—2008
南中国海(马来西亚)	1	1419	2008
美国墨西哥湾	1	620	2009
挪威	53	65~925	2004—2013
英国	9	85~600	2006—2013
加拿大	16	120	2010—2013

目前国内尚无RMR技术工程应用,仍处于跟踪研究阶段。现阶段我国海洋资源勘探开发主要集中在浅海区域,同时由表1可知目前RMR技术主要用于400 m水深以浅。为发展我国无隔水管泥浆回收钻井技术,推动海洋钻探发展,基于我国目前技术现状,遵循由浅入深原则,优先设计研发400 m级RMR系统。

## 1 总体方案设计

400 m级RMR系统搭载“海洋地质十号”船进行海试,因此基于海试船钻探系统、基盘收放系统、

电力通讯系统及常规钻探工况等因素,制定本套系统基本设计指标如表2所示。

表2 400 m级RMR系统参数  
Table 2 System parameters of 400m RMR

项目	参数
工作水深	400 m
工作环境	海水
工作介质	钻井泥浆
颗粒体积分数	10%
颗粒直径	10 mm
泥浆比重	≥1.02
额定流量	50 m <sup>3</sup> /h
适配船型	“海洋地质十号”船

RMR技术在钻井过程中不使用隔水管,而采用单独的管线作为泥浆上返的通道,通过泥浆举升泵将海底井口吸入模块内的泥浆泵送至甲板面固控系统,完成水下井内泥浆的回收利用<sup>[7]</sup>。本系统的总体方案如图1所示,主要由泥浆举升泵,吸入模块、海底基盘、泥浆上返管线、弱电控制系统、强电驱动系统、脐带缆及绞车等组成。由于海试船不具备ROV水下作业条件,故采用吸入模块及泥浆举升泵集成于海底基盘设计,避免水下连接作业。海底基盘通过海试船的基盘收放系统从月池下放,泥浆上返管线连接海底基盘上的泥浆举升泵,最终从月池返回甲板面。

泥浆举升泵分系统主要负责海底泥浆的举升;

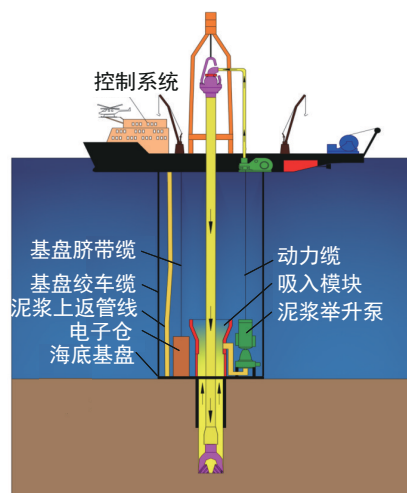


图1 RMR系统示意

Fig.1 Schematic diagram of RMR system

吸入模块主要作用为暂存上返泥浆、井口内泥浆的液位识别、视频监控,泥浆导出等;泥浆上返管线主要提供举升泥浆的上返通道;弱电控制系统主要负责接收传感器传输数据,分析并自动控制如变频器等系统执行部件;强电驱动系统主要负责为水下泵提供电力驱动,变频控制等。

## 2 系统关键设备研发

### 2.1 泥浆举升泵

作为 RMR 系统的核心部件,泥浆举升泵负责为水下井口返出泥浆回流至钻探船提供动力。钻井时,井口返回的泥浆是由固相地层岩石碎屑与液相钻井液组成的固液两相流体。工业中常用的流体输送泵达 19 种之多,如离心泵、盘片泵、轴流泵、柱塞泵等等,但不是所有泵都适宜于工程施工。参照行业内经验和文献,并根据输送介质含固相颗粒的特性和泵的结构特点,不同类型泵的优缺点见表 3<sup>[8]</sup>。

综合分析泥浆中固相颗粒的通过性、泥浆性质与泵结构可靠性、尺寸质量、后期维护、工作效率和成本等因素,在 3 种泵型中最终选择离心泵(蜗壳泵)作为泥浆举升泵。

水下钻探作业时,地层岩屑一般粒径范围为 5 mm 左右,体积浓度 < 10%;依据地质钻探常用泵量,结合海试钻井船的泥浆泵能力,确定 RMR 系统泥浆举升泵设计流量为 50 m<sup>3</sup>/h。取作业泥浆密度为 1200 kg/m<sup>3</sup>,海水密度近似为 1030 kg/m<sup>3</sup>,泥浆举升泵扬程计算如下<sup>[9-10]</sup>:

泵的扬程需满足“沿程压降+净举升高度 ≤ 最小扬程”这一最低要求。其中沿程压降是泥浆沿着管路输送时由于摩擦产生的压力损失,单位压力损

失即为水力坡度  $J_m$ ;净举升高度为船舶甲板与海面间的净空高度(气隙)。

水力坡度  $J_m$  的计算公式为:

$$J_m = C_v \frac{\rho_s - \rho_{df}}{\rho_{sw}} + 1.192 \left\{ \left[ 0.11 \left( \frac{\Delta}{D} + \frac{68}{R_e} \right)^{0.25} + 0.2578 \left( \frac{\sqrt{gD}}{V_m - W_{gt}} \right)^{2.9514} C_v^{1.1108} \left( \frac{\rho_s - \rho_{sw}}{\rho_o} \right) \right] \right\} \frac{V_m^2}{2gD} \quad (1)$$

式中: $C_v$ ——流量系数; $\rho_s$ ——颗粒密度,kg/m<sup>3</sup>; $\rho_{df}$ ——钻井液密度,kg/m<sup>3</sup>; $\rho_{sw}$ ——海水密度,kg/m<sup>3</sup>; $\Delta$ ——管道粗糙度,取值 0.30; $D$ ——管道内径,mm; $R_e$ ——雷诺数; $g$ ——重力加速度,取 9.8 m/s<sup>2</sup>; $V_m$ ——实际提升速度,m/s; $W_{gt}$ ——颗粒群临界沉降速度,m/s;

计算出水力坡度后  $J_m$  后,即可计算泵的最小扬程:

$$H = J_m \times L + H_{ag} \quad (2)$$

式中: $L$ ——管道长度,m; $H_{ag}$ ——船舶的气隙,m。

将相关参数代入上述公式,最后计算得出扬程  $H=88.5$  m,取 90 m。依据扬程进行举升泵其他关键参数计算,设计结果如表 4 所示。

依据设计方案开展对泥浆举升泵样机的研制加工,考虑到叶轮及导壳受岩屑冲蚀,选用防腐防腐的 2507 双相不锈钢,水下电机等其他附件选用 316L 不锈钢,电机选用湿式充油式电机,可实现水下压力补偿平衡。举升泵及水力叶轮如图 2、图 3 所示。

### 2.2 吸入模块与海底底盘研发

吸入模块用于海底井口缓冲井下上返的泥浆,然后通过泥浆举升泵将泥浆输送回钻井船。海底基

表 3 各类型泵特点对比

Table 3 Comparison of characteristics of different type of pump

类 型	水力效率/%	优 点	缺 点
离心泵 蜗壳泵	60~65	结构简单紧凑,维修方便,可直连电机高速运行	在小流量大扬程情况下水力设计困难
盘片泵 圆盘泵	约 40	无脉动,输送的介质不被破坏,盘片经久耐用	水力效率低
隔膜泵/活塞泵	≥90	工作效率高,特性曲线易掌握,可达到较高水压	原理结构决定了其体积和重量最大,不适合水下布放
容积泵 螺杆泵	60%	容积式泵,效率较高	尺寸大,加工装配及后期维护复杂,短时间输送含砂介质,输送低粘流体效率低

表4 泥浆举升泵参数

Table 4 Parameter of mud lift pump	
项目	参数
额定流量	50 m <sup>3</sup> /h
额定功率	65 kW
扬程	90 m
电压	3000 V
转速	1450 r/min
工作环境	海水,水深≤500 m
颗粒体积分数	10%
颗粒直径	10 mm



图2 泥浆举升泵

Fig.2 Mud lift pump



图3 举升泵水力叶轮

Fig.3 Hydraulic impeller in lift pump

盘用于集成安装水下设备,根据总体方案设计,吸入模块、泥浆举升泵、水下电子仪器等需安装于海底基盘之上。RMR系统海底基盘参照海试船现有基盘外形设计,基盘顶部设计有三个收放滑轮,基盘绞车钢缆通过三个滑轮,控制基盘的下放与起升。在基盘顶部转向滑轮对角处,设计有180°旋转弯头作为预留泥浆上返管线接口,旋转弯头上部连接泥浆上返管线,下部连接泥浆举升泵出口,泥浆上返管线在水中会随洋流及涌浪波动,旋转弯头可以防止上返管线大角度弯折损伤<sup>[11-13]</sup>,如图4所示。

### 2.3 弱电控制系统

弱电控制系统主要功能为RMR系统数据采集、自动分析、人工操作、执行控制、远程监控等功

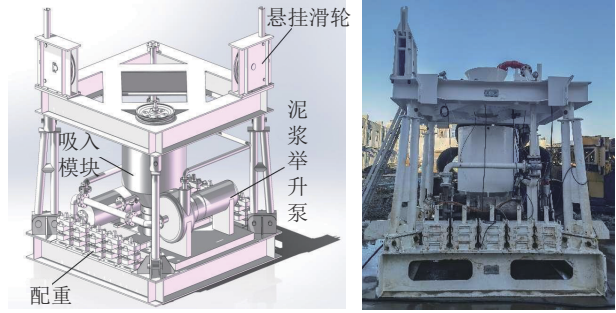


图4 海底基盘

Fig.4 Seabed base

能。弱电控制系统可收集水下传感器返回数据,自动分析判断工况,并发送指令至RMR系统相关执行机构;同时还具有远程视频监控功能,方便操作人员介入控制等<sup>[14-17]</sup>。控制系统架构如图5所示,主要包括甲板控制系统和水下测控单元等。其中甲板控制系统包括工作站、甲板通讯机、视频刻录及分配器、控制器、数据存储器和UPS等设备,主要功能为接受水下测控单元传输的信息,处理数据并发送相应指令给甲板泥浆泵、泥浆举升泵及放喷管线等执行设备。水下测控系统包括摄像头和照明灯等视频单元,以及液位识别传感器、深度+温度传感器、高度+姿态传感器、气测传感器组等检测单元,主要功能为采集水下图像、泥浆液位信息、深度、高度、温度及姿态等信息,为甲板控制系统提供控制依据。

### 3 系统调试

系统各关键部件研制完成以后,于中国地质科学院勘探技术研究所中试基地开展了陆地联机调试,以检验系统各项功能性是否达正常,整套系统是否达到搭载海试船开展海试要求。

系统联调设备主要包括弱电控制集装箱、海底基盘、泥浆上返管线、强电驱动系统等,如图6所示。本次联机调试先后开展关键部件打压测试、电控系统拷机测试、泥浆液位识别试验、流量调节试验,自动控制试验、水下监控测试等,试验结果符合设计要求,满足海试要求。

### 4 设备海试

海试主要对自主研发的RMR系统开展样机试验,验证相关理论基础是否正确,检验系统各项功能性,及时发现存在的问题和不足,为后期优化升级提



图 5 控制系统硬件架构

Fig.5 Hardware architecture diagram of the control system



图 6 系统联机调试

Fig.6 System joint debugging

出科学合理的解决方案。本次海试搭载于海洋地质十号调查船,航次 HYDZ10-202202,试验海域为中国南海,分别在海洋地质码头、102.6 m 水深、384.7 m 水深、93.01 m 水深、29.31 m 水深开展 5 次试验,全流程验证 RMR 系统技术可行性及设备各项功能性,海试时间总计 12 d。

#### 4.1 系统作业流程试验

本次试验主要在海洋地质码头及 102.6 m 水深开展,主要检验设备下放回收流程是否合理,同时系统各项功能是否正常,以及设备耐压及运行稳定性,为深水试验奠定基础。

整个试验过程主要分为基盘下放、管缆协同下放、基盘坐底、基盘回收、管缆协同回收五部分。设备下放阶段,按照预先设计的作业流程,先将海底基盘下放至月池(图 7),上电查看摄像头、照明灯、高度计、姿态仪、深度计等工作是否正常,检查供电通讯是否畅通,并在整个下放流程中保持上电通讯,进行水下信息的实时监控。检查无误后,继续下放基盘,并同步随动下放脐带缆、泥浆上返管线及动力缆,直至基盘坐底。



图 7 海底基盘置于月池内

Fig.7 The base of the seabed is placed in the lunar pool

在设备回收阶段,先上提海底基盘,同时协同回收脐带缆、动力缆和泥浆上返管线,避免速度过快将管缆破坏。基盘从水下将要进入月池内时,需保证所有管缆均保持绷直状态,防止基盘进入月池时损伤管缆,整个过程通过基盘搭载的水下摄像头观察(图 8),最终所有水下设备均成功回收(图 9)。

#### 4.2 液位识别试验

本次试验主要在 384.7 m 水深开展,主要检验所研发的液位识别技术是否可行。吸入模块内泥浆液位高度数据对于 RMR 系统举升泵量控制至关重要。由于水下吸入模块内上返的泥浆与外部海水相互混合,传统的液位识别技术无法准确识别泥浆液位,在此研发专用液位识别技术。

液位传感器置于吸入模块内部。试验开始时,随着吸入模块内部泥浆的不断注入,液位识别传感器读数也随之发生明显的变化(图 10),其中下透光

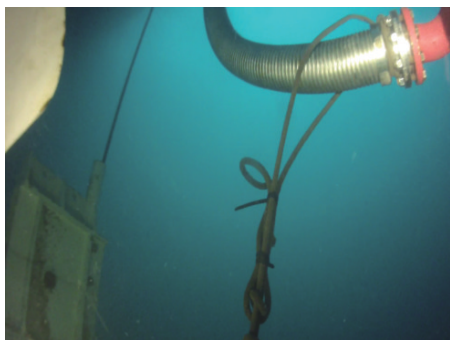


图8 水下管缆状态

Fig.8 Status of underwater pipe cables



图9 水下设备成功回收

Fig.9 Successful recovery of underwater equipment

为吸入模块最下端传感器读数,随着泥浆上升,其读数最先发生变化;中透光为吸入模块中间传感器读数,随着泥浆上升,其读数次之发生变化;上透光为吸入模块最下端传感器读数,随着泥浆上升,其读数最后发生变化。各传感器读数通过与水下视频监控比对,试验结果符合设计要求。

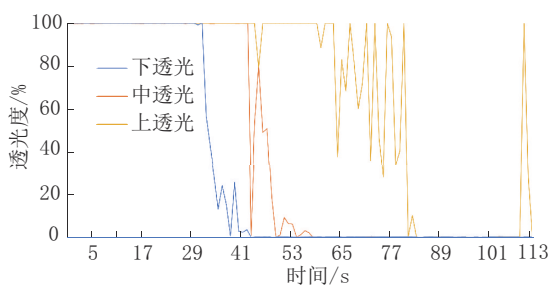


图10 液位识别传感器变化趋势

Fig.10 The change trend recognized by the liquid level sensor

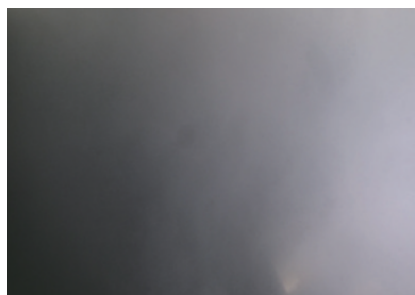
#### 4.3 自动控制试验

本次试验主要在384.7 m水深开展,主要检验系统在泥浆液位非平衡状态下,使用自动控制系统,查看控制系统能否按照实际的液位值,自动控

制强电驱动系统的供电频率,从而改变泥浆举升泵量,最终实现吸入模块内泥浆液位的动态平衡。在此过程先通过人工干预分别模拟井涌工况(图11a)、井漏工况(图11b),再进入系统自动控制状态。试验表面系统能够根据检测数据自动控制举升泵流量,最终保证泥浆液位稳定在吸入模块内部预设高度(图11c)。



(a) 井涌工况



(b) 井涌工况



(c) 稳定状态

图11 井下工况

Fig.11 Downhole working condition

#### 4.4 全面钻进下RMR试验

本试验在各水深均开展,主要检验RMR系统对于含岩屑高固相泥浆的举升能力,泥浆举升泵对于岩屑的通过性以及固控系统净化能力。开展本次试验时,先启动甲板泥浆泵进行泥浆注入,同时开启RMR系统开始泥浆举升回收纯泥浆。然后开启钻机进行钻探,此时回收含岩屑泥浆,两次回收的泥浆具有明显的区别,如图12所示。最后将回收的泥浆

接入固控系统,开始持续泥浆回收净化循环过程,如图13。通过试验表明,RMR系统能够举升高固相泥浆,期间未发生堵塞,具有良好的通过性;同时所研固控系统能够将清除泥浆中的固相颗粒,处理后的泥浆达到循环使用的要求。



图12 不同工况泥浆对比

Fig.12 Comparison of mud under different working conditions



图13 泥浆净化

Fig.13 Mud purification

## 5 结论与建议

(1)400 m级无隔水管泥浆回收系统的成功研发与海试,实现了我国在海洋钻探无隔水管泥浆回收技术领域“从0到1”的突破。攻克了泥浆液位识别、海底泥浆举升、闭环自动控制、深海动力与通讯传输等关键技术环节,有效解决了隔水管钻井中成本高、泥浆循环压力大及开路钻井中泥浆消耗量大、海水污染等诸多难题,达到核心装备完全国产化替代,进一步完善了我国深海钻探装备体系。

(2)通过海试发现所研RMR系统也存在不足之处,如系统设备众多,作业流程较为繁琐;液位识别精度还有待提高;自动控制算法还有待优化等。在后期的工作中将针对上述问题进行完善改进。

(3)本次所研RMR系统适用水深为400 m,对于未来深海钻探来说还有待提高。结合深海钻探需

求,中期目标瞄准2000 m水深目标,远期目标标准4000 m水深,在泥浆举升系统、泥浆上返立管系统、深海大功率高压输能技术等方面持续攻关,力争构建拥有自主知识产权的深海无隔水管闭路循环钻井技术及装备体系。

## 参考文献(References):

- [1] 陈浩文,于彦江,王艳丽,等.气举技术应用于深海无隔水管泥浆回收钻井工艺可行性分析[J].钻探工程,2022,49(2):9-15.  
CHEN Haowen, YU Yanjiang, WANG Yanli, et al. Feasibility analysis of gas lift technology applied to drilling process of deep-sea riser-free mud recovery [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2):9-15.
- [2] 高本金,陈国明,殷志明,等.深水无隔水管钻井液回收钻井技术[J].石油钻采工艺,2009,31(2):44-47.  
GAO Benjin, CHEN Guoming, YIN Zhiming, et al. Drilling technology of drilling fluid recovery without riser in deepwater [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(2):44-47.
- [3] 陈国明,殷志明,许亮斌,等.深水双梯度钻井技术研究进展[J].石油勘探与开发,2007(2):246-251.  
CHEN Guoming, YIN Zhiming, XU Liangbin, et al. Research progress of deepwater dual gradient drilling technology [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007(2):246-251.
- [4] 王国栋,陈国明,殷志明,等.深水无隔水管泥浆举升钻井系统配置及安装流程[J].石油矿场机械,2012,41(11):11-15.  
WANG Guodong, CHEN Guoming, YIN Zhiming, et al. Deep-water riserless mud lifting drilling system configuration and installation process [J]. Petroleum Field Machinery, 2012, 41(11):11-15.
- [5] 张叶.海底泥浆举升圆盘泵设计应用技术研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2015.  
ZHANG Ye. Study on design and application method for subsea mudlift disc pump [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.
- [6] 徐群.海底泥浆举升钻井系统吸入模块样机研究与开发[D].青岛:中国石油大学(华东),2011.  
XU Qun. Prototype research and development of the subsea mud suction module [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2011.
- [7] 王德,谢文卫,张伟,等.RMR技术在海域天然气水合物钻探中的适应性分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(2):17-23.  
WANG Cai, XIE Wenwei, ZHANG Wei, et al. Adaptability analysis of RMR technology in offshore natural gas hydrate drilling [J]. Exploration Engineering (Rock and Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(2):17-23.
- [8] 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[J].钻探工程,2021,48(S1):381-385.

- QIN Rulei, YU Yanjiang, CHEN Haowen, et al. Selection and calculation of parameters of the mud lifting pump for RMR[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(S1):381-385.
- [9] 葛瑞一,陈国明,周昌静,等.无隔水管钻井泥浆举升系统管路特性计算与分析[J].*石油矿场机械*,2012,41(7):33-37.  
GE Ruiyi, CHEN Guoming, ZHOU Changjing, et al. Calculation and analysis of pipeline characteristics of drilling mud lifting system without riser[J]. *Petroleum Mine Machinery*, 2012, 41(7):33-37.
- [10] 周昌静,陈国明,刘杰,等.无隔水管钻井泥浆举升系统参数计算[J].*石油钻采工艺*,2011,33(1):42-44.  
ZHOU Changjing, CHEN Guoming, LIU Jie, et al. Calculation of parameters of silt lifting system for drilling without riser[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2011, 33(1):42-44.
- [11] 王世栋,潘冬阳,廖天保,等.RGB32-100海底基盘及其收放技术[J].*地质装备*,2020,21(4):11-15,18.  
WANG Shidong, PAN Dongyang, LIAO Tianbao, et al. RGB32-100 seabed substrate and its retraction technology[J]. *Geological Equipment*, 2020, 21(4):11-15, 18.
- [12] 刘晓林,刘家誉,王嘉瑞,等.海底基盘控制系统方案设计[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2019,46(7):77-82,93.  
LIU Xiaolin, LIU Jiayu, WANG Jiarui, et al. Scheme design of subsea foundation control system[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling Engineering)*, 2019, 46(7):77-82,93.
- [13] 邓都都,阮海龙,刘广治,等.深海无缆海底基盘井口夹持系统的研制与应用[J].*钻探工程*,2021,48(6):68-73.  
DENG Dudu, RUAN Hailong, LIU Guangzhi, et al. Development and application of the deep water cable-free subsea frame [J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(6):68-73.
- [14] 何新霞,闫加亮,徐长航.海底钻井液举升钻井系统监测与控制[J].*中国石油大学学报(自然科学版)*,2014,38(3):129-134.  
HE Xinxia, YAN Jialiang, XU Changhang. Monitoring and control of subsea drilling fluid lift drilling system[J]. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 2014, 38(3):129-134.
- [15] 葛瑞一.无隔水管钻井泥浆举升系统设计与控制单元研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2013.  
GE Ruiyi. Design and control unit of silt lifting system for drilling without riser[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2013.
- [16] 孙政委.双梯度钻井EC-Drill系统动力传输及控制单元研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2015.  
SUN Zhengwei. Research on power transmission and control unit of EC-Drill system for double-gradient drilling[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.
- [17] 侯岳,刘春生,刘聘,等.海域天然气水合物浅软地层水平井钻井液技术[J].*钻探工程*,2022,49(2):16-21.  
HOU Yue, LIU Chunsheng, LIU Dan, et al. Drilling fluid technology for natural gas hydrate horizontal wells in marine shallow soft formation[J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(2):16-21.

(编辑 王文)