

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

陈浩文^{1,3}, 于彦江^{2,3}, 王艳丽^{1,3}, 秦如雷^{1,3}, 田烈余²,
王 偲^{2,3}, 殷国乐^{1,3}, 王林清^{*1,3}, 谢文卫^{1,2}, 冯起赠^{1,2,3}

(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;

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458)

摘要: 无隔水管泥浆回收钻井技术作为新兴钻井技术, 具有安全环保、简化井身结构和降低钻探风险等优点。传统的无隔水管泥浆回收钻井技术依靠水下泵将海底井口泥浆举升至甲板面, 该方式对水下泵的举升能力及可靠性要求极高。未来深海钻井领域, 水下泵将会是限制无隔水管泥浆回收钻井技术应用的“瓶颈”。本文借鉴陆地气举反循环钻井原理, 利用气举技术部分或完全替代水下泵, 分别从设备技术现状、流量可调性、适用环境、井控安全等方面探究气举用于无隔水管泥浆回收技术的可行性。结果表明, 气举反循环技术及相关设备性能满足无隔水管泥浆回收的使用要求, 而且具有上返流量可调、安全等特点, 有较高的研究应用价值。

关键词: 气举; 泵举; 无隔水管; 深海钻井; 泥浆回收

中图分类号: P634 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2022)02-0009-07

Feasibility analysis of gas lift technology for application in deep-sea riserless mud recovery drilling

CHEN Haowen^{1,3}, YU Yanjiang^{2,3}, WANG Yanli^{1,3}, QIN Rulei^{1,3}, TIAN Lieyu²,
WANG Cai^{2,3}, YIN Guoyue^{1,3}, WANG Linqing^{*1,3}, XIE Wenwei^{1,2}, FENG Qizeng^{1,2,3}

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

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

3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou),
Guangzhou Guangdong 511458, China)

Abstract: As an emerging drilling technology, riserless mud recovery drilling technology has the advantages of safety and environmental protection, simplified well structure and reduced drilling risk. The traditional riserless mud recovery drilling technology relies on subsea pumps to lift drilling mud from the subsea wellhead to the deck surface, which requires extremely high lifting capacity and reliability of the subsea pumps. Therefore, for future deep-sea drilling, subsea pumps will be the bottleneck restricting the application of riserless mud recovery drilling technology. Drawing on

收稿日期: 2022-01-18; 修回日期: 2022-03-09 DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.02.002

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项“新型无隔水管闭路循环钻井技术研究”(编号: GML2019ZD0501); 中国地质调查局地质调查项目“深海钻探技术与工程支撑(中国地质科学院勘探技术研究所)”(编号: DD20190585); 工信部项目“天然气水合物钻采船(大洋钻探船)总装建造关键技术研究”(编号: CJ05N20)

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, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, 409812829@qq.com。

通信作者: 王林清, 男, 汉族, 1993年生, 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, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, wanglinqingmail@163.com。

引用格式: 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 for application in deep-sea riserless mud recovery drilling[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2): 9-15.

the principle of onshore gas lift reverse circulation drilling, this paper explores the feasibility of use of gas lift technology in part or in whole to replace subsea pumps for mud recovery in terms of equipment availability, flow adjustability, applicable conditions, well control safety, etc. The results show that the performance of gas lift reverse circulation technology and related equipment can meet the requirements of RMR with the features of adjustable up-hole return flow and safety, and it is highly worthy of research.

Key words: gas lift; pump lift; riserless; deep sea drilling; mud recovery

0 引言

海洋约占地球表面的71%，蕴藏了丰富的油气、天然气水合物和固体矿物等能源资源，是人类重要的能源保障基地和战略活动空间。同时海洋也是解决生命起源、地球演化、气候变化等重大科学问题的前沿领域。习近平总书记强调，“建设海洋强国是中国特色社会主义事业的重要组成部分，要进一步关心海洋、认识海洋、经略海洋，推动我国海洋强国建设不断取得新成就”。《国家“十四五”规划和2035年远景纲要》中强调，要围绕海洋工程、海洋资源、海洋环境等领域突破一批关键核心技术。

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。海洋钻探通常采用开路钻井或隔水管钻井工艺。采用开路钻井时，泥浆从海底井口上返后直接排海，不但造成海洋环境污染，同时造成大量泥浆消耗；采用隔水管钻井工艺时，虽然可实现泥浆的回收，但隔水管体积及质量大，施工作业效率低，泥浆循环压力易导致浅部软弱地层压裂漏失^[1]，且通常使用水深限制在3000 m以内。针对以上难题，国外石油公司已进行了多年技术研究，其中挪威AGR公司研发的无隔水管泥浆回收钻井技术(Riserless Mud Recovery, 以下简称RMR)可较好地解决上述问题^[2]，经济效益显著。但目前RMR技术常用于500 m水深左右的钻井中，国外最大应用水深为1419 m，对于应用水深>2000 m的传统RMR钻井工艺的使用目前存在诸多挑战。

1 RMR工艺

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，通过海底举升泵将海底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^[3]。RMR系统如图1所示，主要包括：海底举升泵、泥浆上返管线、吸入模块、脐带缆及绞车、控制系统和动力系统等^[4]。其中

泥浆举升泵作为RMR系统核心部件，其主要作用是为上返的泥浆提供动力，举升泵的扬程决定了整个RMR系统的适用水深^[5]。

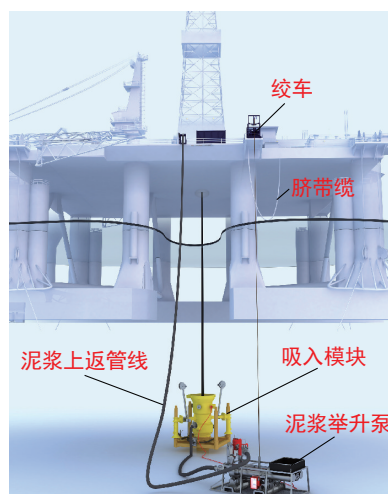


图1 RMR系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the RMR system

进行泵扬程计算时，首先要考虑泵的流量应满足其“驱动泥浆上升的速度>颗粒群沉降速度”的条件。同时需综合考虑现有钻井泵的排量范围，选择与之范围重合的举升泵，以满足RMR系统变排量举升功能的实现。颗粒群沉降速度可参考文献[6]中列出的公式进行计算：

$$W_t = \xi S_f^{0.815} \left(gd \frac{\rho_s - \rho_{df}}{\rho_{df}} \right)^{1/2}$$

$$W_{gt} = W_t e^{-(2.65C_v - 3.32C_v^2)}$$

式中： W_t ——颗粒临界沉降速度； W_{gt} ——颗粒群临界沉降速度； ξ ——修正系数； S_f ——结合颗粒形状系数； ρ_s ——颗粒密度； ρ_{df} ——钻井液密度； d ——管道直径； C_v ——流量系数。

泵的扬程应根据工程需要来确定，也即需满足“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:

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

式中: ρ_{sw} ——海水的密度, kg/m^3 ; D ——管道内径, mm ; Δ ——管道粗糙度, 取值 0.30 mm ; V_m ——实际提升速度, m/s 。

计算出水力坡度 J_m 后,即可计算泵的最小扬程:

$$H = J_m L + H_{ag}$$

式中: L ——管道长度, m ; H_{ag} ——船舶的气隙, m 。

通过上述公式可以看出,在钻遇地层相同情况下,举升泵扬程与 ρ_{df} (钻井液密度)、 Δ (管道粗糙度)、 L (管道长度)、 H_{ag} (船舶的气隙)等参数成正比,与 D (管道内径)成反比。对于深海钻井使用RMR系统时,随着管道长度增加,对举升泵功率要求相应提高,由此可见,制约RMR技术应用于深海的因素主要是海底举升泵的举升能力。

因此,泵举RMR工艺用于深海钻探时需克服以下难题:(1)泵扬程要求高,采用多泵串联功率需求大;(2)多泵串联时,若其中1个泵损坏,则整个系统失效,系统稳定性降低;(3)举升泥浆中含有大量岩屑等固相颗粒,举升泵长期运转易造成泵叶轮及导壳的磨损。在此可借鉴气举反循环钻井工艺,利用气举原理,可降低举升泵的能力要求,提高RMR系统的可靠性。

2 气举反循环钻井工艺

气举反循环钻井工艺已成熟应用于陆地水井、地热井及矿山工程井等陆地钻井及洗井中,是大口径钻探及深井钻探施工最为有效的工艺方法^[7]。气举反循环钻井工艺具有在复杂地层中钻进安全可靠、钻头寿命长、携渣能力强等优点^[8]。气举反循环钻进工艺在我国的地质勘探领域已得到广泛应用,最大使用孔深已超过4000 m。

气举反循环原理如图2所示,采用注气管向钻杆内注入高压空气,高压空气进入钻杆内部后与钻

井液混合形成密度较低的气水混合液,使钻杆内外流体的密度产生差异,根据U型管原理,钻杆外部的钻井液会持续不断从钻杆底部钻头处进入到钻杆内部,形成反循环,同时将钻进过程中产生的岩屑携带至地面。

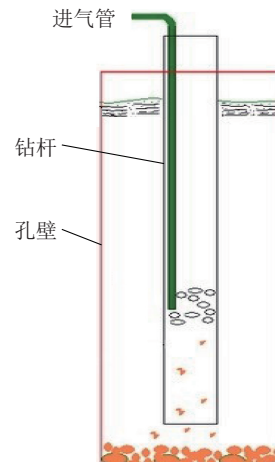


图2 气举反循环原理

Fig.2 Principle of gas lift reverse circulation

陆地钻井中常用的气举反循环钻井系统配置如图3所示。主要由钻机、空压机、气水龙头、双壁主动钻杆、双壁钻杆、气水混合器、气举反循环用钻头

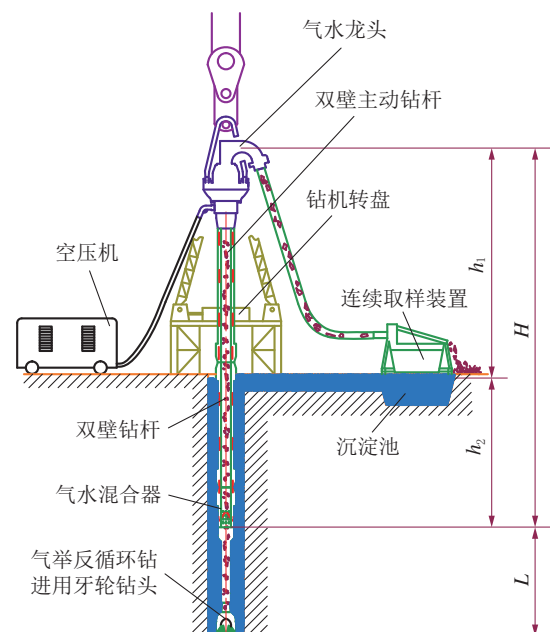


图3 气举反循环钻井系统组成

Fig.3 Composition of the gas lift reverse circulation drilling system

等组成。空压机产生高压空气输送至气水龙头,经气水龙头配气后高压空气沿双壁主动钻杆/双壁钻杆环状间隙输送至气水混合器处,气水混合器将高压空气与双壁钻杆内管中的水混合形成气水混合液,从而形成气举反循环。

3 气举技术用于RMR工艺可行性分析

将气举技术与泵举原理相结合,利用气举效应替代一部分泵的扬程需求,形成气举+泵举联合举升系统方案,方案如图4所示。在传统RMR系统配置基础上,增添了空压机、注气管线及气水混合器等设备。气举用于RMR泥浆举升优势非常明显,主要有:

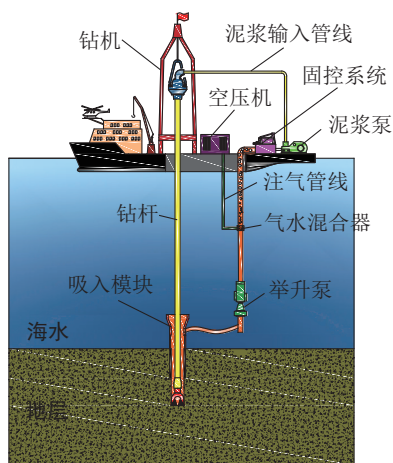


图4 气举+泵举联合举升方案

Fig.4 Combined gas lift + pump lift plan

(1)降低举升泵能力要求,使RMR工艺能够用于更深的海洋钻探中。

(2)减少水下举升泵数量甚至完全替代,简化RMR系统中的水下设备,提高系统的稳定性。

(3)气举过程不存在泵举时固相颗粒磨损叶轮及导壳情况,提高系统寿命,减少维护保养时间,并且气举系统主要设备均在甲板之上,方便日常维护保养。

现分别从设备技术现状、流量可控性、适用环境、井控安全等方面进行分析,探讨气举技术用于RMR工艺的可行性。

3.1 设备技术现状分析

气举技术用于RMR工艺主要增加的设备为空压机,注气管线和气水混合器。

3.1.1 空压机

空压机可输出一定压力和流量的压缩空气,为驱动钻井液循环流动提供动力^[9]。考虑钻井船作业时,会根据实际情况切换不同钻井工艺,同时钻井船空间有限,故空压机无需置于船舱内部,采用撬装结构(图5),当采用RMR钻井工艺时,直接将空压机布放至甲板适当位置即可。而且,气举反循环钻进专用空压机不同于常规空压机,要求高压力、低流量^[10],性能参数如表1所示。由表1可知其总功率并不大,在大多数钻井船电力负载范围内,而且撬装结构的空压机可移动搭载,适用于多种型号钻井船。



图5 撬装式空压机

Fig.5 Skid-mounted air compressor

表1 空压机参数

Table 1 Air compressor parameters

| 名称 | 参数 |
|------|--------------------------|
| 额定压力 | 15 MPa |
| 额定流量 | 12.5 m ³ /min |
| 结构 | 活塞+螺杆复合式 |
| 安装型式 | 整体撬装式 |
| 压缩介质 | 空气 |
| 总功率 | 230 kW |

目前陆地常用的气举反循环空压机满足RMR泥浆举升能力需求,考虑到使用环境为海上作业,故机械部件防腐、电子元件防侵蚀等方面需进行特殊喷漆处理;同时海上作业时涌浪影响,会造成空压机的摇摆晃动,对于润滑系统需进行针对性设计。

3.1.2 注气管线

陆地气举反循环钻井时,考虑到钻进过程钻杆需进行回转,故注气管线与钻杆合二为一设计为双壁钻杆形式^[11](图6),但在RMR作业时,泥浆上返管线无回转运动,所以在此可简化为并列管形式(图

7),同时可通过卡箍将注气管线与直径较大的泥浆上返管线固定,防止海流等作用下造成注气管线的损坏。



图6 双壁钻杆
Fig.6 Dual wall drill pipe



图7 并列管形式
Fig.7 Parallel pipe gas lift reverse circulation

注气管线输送介质为高压空气,同时工作环境为水下,可采用专用高压海管(见图8)。主要由内胶层、应力分散层、增强骨架层、中间胶层和外部橡胶层等组成,具体性能参数要求如表2所示。



图8 高压海管结构形式
Fig.8 High-pressure submarine hose structure

表2 注气管线性能参数

Table 2 Performance parameters of the gas injection hose

| 名称 | 参数 |
|--------|------------|
| 内径 | 50 mm |
| 工作压力 | 15 MPa |
| 最小爆破压力 | 20 MPa |
| 抗负压强度 | ≥ 5 MPa |
| 工作温度范围 | -30~100 °C |
| 抗拉强度 | >100 kN |

3.1.3 气水混合器

气水混合器主要作用为将高压空气与泥浆上返管线内的泥浆相混合,原理结构可借鉴陆地钻井用气水混合器结构(图9),考虑到使用工况,材质可选择耐磨、耐腐蚀的双相不锈钢。

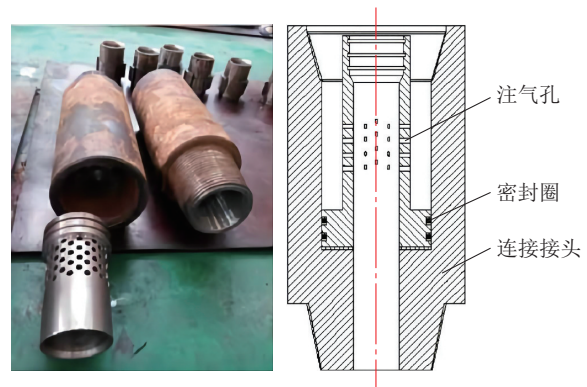


图9 气水混合器结构形式
Fig.9 Structure of the gas-water mixer

3.2 上返流量调节分析

使用RMR工艺钻井时,要求吸入模块内泥浆液位动态稳定。由于在钻井过程中随时会发生井漏、井涌等现象,所以吸入模块内上返的流量时刻变化,因此需实时调节举升泵流量,达到泥浆液位动态稳定的目的^[12]。若气举技术用于RMR泥浆举升,则需满足上返流量可调。

根据陆地气举钻井可知,上返流量并非一成不变的,其随着空压机注气量变化而改变,具体趋势为上返流量开始随着注气量增加而增加,当供气量增大到某一临界值后,上返流量会随着空压机注气量增大而减少,此趋势在不同井深、不同井径下均存在。主要原因为当注气量较小时,钻杆内钻井液气体含量较少,钻杆内外压力差较小,因此上返流量较

小。随着注气量的增加,钻杆内外压力差开始增大,气水混合流体的流速增大,上返流量也随之增加。然而随着注气量继续增加超过某一临界值时,由于气水混合流体中含气量过高,液体所占比例降低,液体排量开始下降。

3.3 适用环境分析

陆地气举反循环钻井中,要求钻孔内尽可能多地充满水或泥浆,这样才能形成U型管效应,产生气举,因此常常在钻井过程中还会往孔内补充水或泥浆^[13]。但当气举用于RMR工艺时,由于海水的存在,则不存在此问题,利于气举作业。

除此之外还需考虑水深的影响。根据气举原理及陆地施工经验,只有当气水混合器下入足够深时,才会产生气举现象。结合RMR目前技术现状,建议水深<500 m时,采用泵举;水深>500 m时,可添加气举技术。需要注意的是,开展气举RMR作业时,由于海水的存在,气水混合器的沉没比无特殊要求,但考虑到实际使用效果,仍需满足一定条件,即:

$$n = \frac{h}{H}$$

式中: h ——甲板面至气水混合器的距离; H ——气水混合器至水下井口的距离。

根据陆地气举反循环使用经验, $n > 1/4$ 时,气举效果较为理想^[14]。参见图10。

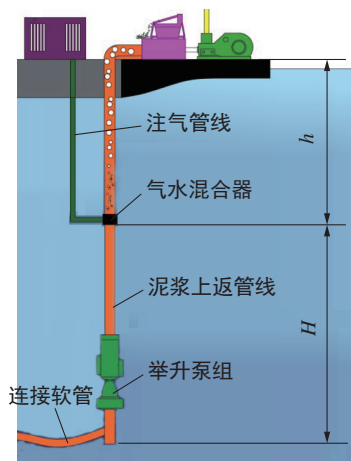


图10 气举+泵举示意

Fig.10 Schematic diagram of gas lift + pump lift

3.4 井控安全

钻井过程中会存在井涌、井喷和有害气体溢出等情况^[15]。对于隔水管钻井时,上述情况尤为危

险,因为隔水管的存在,喷出的流体会通过隔水管到达钻井平台,造成事故;对于RMR工艺,由于没有隔水管的存在,喷出的流体仅从吸入模块喷出至海水,不会直接到达钻井平台。

而如果将气举技术应用于RMR工艺中,仅仅是将气体注入上返管线内,助力泥浆举升上返,增加的气举设备不影响RMR工艺在井控安全方面的优点。但需要注意,由于泥浆上返管线的存在,喷出的流体仍有上返通道,因此当检测到有井涌、井喷和有害气体溢出等情况时,需要马上停止空压机及举升泵,必要时还需关闭上返管线,防止事故发生。

4 结论及展望

(1)目前陆地用气举反循环相关设备性能满足RMR使用要求,针对海洋环境中腐蚀、涌浪等影响进行针对性的改造即可。

(2)气举技术满足RMR钻井过程中上返流量可调的要求。

(3)海洋环境更有利于气举效应的产生,对于水深>500 m环境下推荐气举使用,为达到较好的气举效果,气水混合器下深还需满足 $n > 1/4$ 。

(4)RMR钻井工艺相较于隔水管钻井工艺,在井控安全方面更有优势,对于气举技术的加入,并未影响RMR井控安全方面的优越性。

综上,气举技术可应用于深海无隔水管泥浆回收钻井中,并具有诸多优势。对于后续的研究,需继续探究气举注气量、泥浆举升泵排量和泥浆上返流量等各参数之间的耦合关系。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [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. Deepwater riserless mud recovery drilling technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009,31(2):44-47.
- [3] 王恩,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 & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020,47(2):17-23.
- [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. Configuration and installation procedures for deepwater riserless mud lift drilling system [J]. *Oil Field Equipment*, 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. Research on design and application technology of submarine mud lifting disc pump[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.
- [6] 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):393-397.
QIN Rulei, YU Yanjiang, CHEN Haowen, et al. Selection of non-riser mud circulation lift pump and calculation method of performance parameters [J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48 (S1) : 393-397.
- [7] 许刘万,刘智荣,赵明杰,等.多工艺空气钻进技术及其新进展[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2009,36(10):8-14.
XU Liuwan, LIU Zhirong, ZHAO Mingjie, et al. Multi-process air drilling technology and its new developments [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2009, 36 (10):8-14.
- [8] 许刘万,伍晓龙,王艳丽.我国地热资源开发利用及钻进技术[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2013,40(4):1-5.
XU Liuwan, WU Xiaolong, WANG Yanli. Development and Utilization of Geothermal Resources and Drilling Technology in my country [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2013,40(4):1-5.
- [9] 李元灵.油气井气举反循环携岩效果理论和设备配套方案研究[D].北京:中国地质大学(北京),2015.
LI Yuanling. Research on the theory of rock carrying effect of gas lift reverse circulation for oil and gas wells and equipment matching scheme [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- [10] 许刘万,王艳丽,殷国乐,等.多工艺空气钻进技术在地热井开发中的应用[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2016,43(10):225-229.
XU Liuwan, WANG Yanli, YIN Guoyue, et al. Application of multi-process air drilling technology in geothermal well development [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016,43(10):225-229.
- [11] 陈勇,陆生林,黄晟辉.空气反循环取样钻探技术应用于金矿勘查的地质效果对比研究[J].*钻探工程*,2021,48(9):82-88.
CHEN Yong, LU Shenglin, HUANG Shenghui. Comparative study on geological effect of air reverse circulation sampling drilling technology in gold exploration [J]. *Drilling Engineering*, 2021,48(9):82-88.
- [12] 陈浩文,刘晓林,王林清,等.无隔水管泥浆回收钻井技术控制系统功能设计[J].*钻探工程*,2021,48(S1):387-392.
CHEN Haowen, LIU Xiaolin, WANG Linqing, et al. Function design of control system for mud recovery drilling technology without riser [J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48 (S1) : 387-392.
- [13] 苏敬达.空气反循环钻探技术在矿山勘查中的应用[J].*钻探工程*,2021,48(12):38-42.
SU Jingda. Application of air reverse circulation drilling technology in mine exploration [J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48 (12):38-42.
- [14] 李帮民,侯树刚,杨甘生,等.气举反循环防漏钻井施工参数适应性分析[J].*断块油气田*,2016,23(6):838-841.
LI Bangmin, HOU Shugang, YANG Gansheng, et al. Adaptability of air-lifting reverse circulation caulk drilling with different parameters [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2016,23(6):838-841.
- [15] 纪永强.深水钻井井控风险定量评价方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2014.
JI Yongqiang. Research on quantitative evaluation method of deepwater drilling well control risk [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.

(编辑 荐华)