

RMR 技术在海域天然气水合物钻探中的适应性分析

王 偲^{1,2}, 谢文卫^{1,2,3}, 张 伟^{1,2}, 陈 靓^{1,2}, 陈浩文³

(1.中国地质调查局广州海洋地质调查局,广东 广州 510075;

2.自然资源部海底矿产资源重点实验室,广东 广州 510075;

3.中国地质科学院勘探技术研究所,河北 廊坊 065000)

摘要:深水表层天然气水合物沉积体埋藏浅、地层软、未固结,泥浆密度窗口窄,使用常规隔水管泥浆循环钻进钻遇水合物分解会引起井周孔隙压力及储层水合物饱和度发生变化,导致水合物储层泥浆密度窗口更窄,引发井壁以及井口失稳等问题,并且时间长、成本高。文章介绍了无隔水管泥浆回收(RMR)技术原理,对该技术在深水表层海域天然气水合物钻探中的适应性进行了分析。结果表明,RMR 技术利用双梯度原理,能有效解决目前深水表层钻井窄密度窗口难题;实时监控系统的提高遇险机动性,严防硫化氢等气体发生泄漏;能够简化井身结构,缩短建井周期,降低建井成本;同时对海洋零排放,安全环保。

关键词:海洋钻探;海域天然气水合物;无隔水管泥浆回收技术(RMR);双梯度钻井;钻井风险

中图分类号:P634;P744.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)02-0017-07

Adaptability of RMR for marine gas hydrate drilling

WANG Cai^{1,2}, XIE Wenwei^{1,2,3}, ZHANG Wei^{1,2}, CHEN Liang^{1,2}, CHEN Haowen³

(1.Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou Guangdong 510075, China;

2.Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources,
Guangzhou Guangdong 510075, China;

3.The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: Natural gas hydrate (NGH) sedimentary bodies are shallow, soft and unconsolidated, where the mud window is narrow. It is time-consuming and expensive to drilling NGH with conventional riser drilling; meanwhile, NGH dissociation leads to changes in NGH saturation and wellbore pore pressure, causing the mud window to narrow down and the borehole be instability. This paper introduces the principle of deep water riserless mud recovery drilling (RMR) and analyzes its adaptability in marine NGH drilling. The results indicate that RMR can solve the problem of the narrow mud window. The real-time monitoring system can improve the maneuverability and completely eradicate the hydrothion leakage. It simplifies the wellbore configuration and reduces the well construction cost. It is safe and environment friendly without any discharge into the ocean.

Key words: marine drilling; marine natural gas hydrate; reserless mud recovery drilling (RMR); dual gradient drilling; risk of drilling

天然气水合物是在自然界中广泛分布于永久冻土带和大陆边缘^[1-2],由如 CH₄ 等小“客体”分子(<0.9 nm)在低温、高压环境下接触到水分子而形成的白色似冰的笼型结晶化合物^[3-5]。初步估算,

全球水合物蕴藏的天然气资源总量约为 2.1×10^{16} m³,相当于 2.1×10^{13} t 油当量^[6-7],目前世界各国已逐步进入区带勘探评价与试开采的阶段^[8]。

海域天然气水合物存在于海底的沉积层中,水

收稿日期:2019-11-04;修回日期:2019-12-28 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.02.002

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“深海钻探技术与工程支撑(广州海洋地质调查局)”(编号:DD20190584);自然资源部海底矿产资源重点实验室开放基金“海底泵举升双梯度钻井技术在海域天然气水合物开采中的可行性分析”(编号:KLMMR-2017-A-06)

作者简介:王偲,男,汉族,1991年生,工程师,钻井工程专业,硕士,主要从事钻井工艺和技术方面的研究工作,广东省广州市黄埔区广海路188号大院,wangcsy0922@163.com。

引用格式:王偲,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 of RMR for marine gas hydrate drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(2):17-23.

深 300 m 以深,在温度为 $0\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,压力在 3 MPa 以上的条件下处于稳定状态^[9],使用深水油气田开发模式开发这种类型储藏较合适^[10-11]。但这又与常规深海海底埋深几千米的油气藏开发差异很大,相当于在深海海底表层开采天然气水合物。水合物的特殊性也给钻井带来许多风险和挑战。

1 海域天然气水合物钻井风险分析

常规深水油气藏大都赋存于海底以下几千米,且储层基本成岩。隔水管在常规深水油气钻井中比较普遍,导管+表层套管基本作为表层套管层次,采用喷射法将导管下入至泥线以下 70 m 左右,之后表层套管下入则采用钻入法。

深水表层导管入泥深度目前主要通过 ROV 观察导管深度标记和牛眼读数判断,肉眼观察误差较大,喷射钻井施工参数和水力学参数的选择非常重要,影响喷射速率和作业时长;喷射导管的尺寸和强度选取不当增加井口倾斜或者下陷等复杂事故发生的风险。深水表层钻井早期钻遇浅层高压水层和气层由于缺乏水下井口装置,不能使用常规井控方法,井控问题变得更加复杂,严重时可能导致钻井平台的倾覆。下套管期间,井斜控制难度大,导致套管与井壁摩擦力过大而影响套管下入^[12]。

海底富含泥质粉砂型天然气水合物的沉积体胶结性差、未成岩、抗剪强度极弱。在钻进过程中水合物储层受到扰动,压力和温度的变化导致水合物发生分解,此时,储层中的应力发生变化,垂直方向的形变很可能造成剪应力增大发生剪切破坏。此外,水合物分解会引起井周孔隙压力及储层水合物饱和度的变化,破裂压力和地层压力之间的余量减小,导致泥浆密度窗口变得更窄。井壁稳定性较差,可能发生井漏,造成井壁坍塌,泥浆大量流失,一方面影响钻进的安全性和高效性,另一方面增加成本且污染环境,甚至会危及海底的工程设施^[13-17]。

水合物分解产生大量的甲烷气体侵入泥浆,降低了泥浆密度,环空液柱压力降低破坏储层压力平衡。若井筒内达到一定压力温度条件,会二次形成天然气水合物。水合物分解与形成过程实际是热量吸收和释放的过程,泥浆局部温度不断发生变化,将引起泥浆性能(粘度、密度和切力等)发生变化,影响钻井安全^[18-22]。

窄密度窗口钻井一直都是深水钻井重点攻关的

方向,水合物储层钻井在井下压力控制、井控安全和经济环保方面提出了更高的要求。针对深水浅层未固结水合物储层易漏失、井壁易垮塌等特点,采用 RMR 技术能有效解决漏失、井壁失稳等难题。

2 RMR 技术

RMR 技术全称无隔水管泥浆回收钻井技术^[23],该技术与常规深水隔水管钻井不同,钻杆输送泥浆至井底,钻屑和泥浆流经井口的吸入模块后实现分流,进入到海底的举升泵组,通过高压举升,岩屑和泥浆经一条小直径回流管线返回钻井平台或钻井船处理后循环使用。整个系统主要包括:吸入和集中模块、回流管线系统、控制下放工具以及密封装置、海底泵和马达模块、管缆绞车控制装置、意外事故应急关井控制系统、海底控制舱以及动力供应系统等^[24],如图 1 所示。

RMR 钻井技术具体流程如下:船(或平台)上的泥浆泵将泥浆通过立管系统泵入钻杆流至钻头,钻进过程的岩屑随从钻头水眼处返出的泥浆通过环空返回井口的吸入装置分流至海底举升泵,海底举升泵将泥浆和岩屑混合液通过回流管线泵送至船上,经过固控系统分离岩屑处理,泥浆进入泥浆罐重复利用。RMR 技术示意图如图 2 所示^[25]。

RMR 技术作为一种新兴的旨在解决深海钻井井控问题的技术,国内目前仍处于试验阶段,尚无大规模工业应用,同时国外大公司对此项技术进行封锁。国内研究尚处于跟踪研究阶段,中海油研究总院、中国石油大学(华东)、中国石油大学(北京)等科研院校对于无隔水管泥浆回收钻井技术进行了相关研究工作,其中中国石油大学(华东)在无隔水管泥浆回收系统装备设计研究以及室内试验上正在进行探索性研究,目前也取得了部分成果。

2001 年,AGR 公司在钻屑输送系统基础上成功研发了无隔水管泥浆回收钻井技术^[26]。2003 年,BP 石油公司在里海 Azeri 油田利用 RMR 技术钻探 15 口油井获得成功,截至 2014 年,RMR 技术已经在全球成功钻探 100 多口井(见表 1)。

3 RMR 技术在海域天然气水合物钻探中可行性分析

3.1 窄密度窗口

钻井压力在一定范围内,能够保持井壁稳定,不



图 1 RMR 系统模块
Fig.1 Modules of RMR

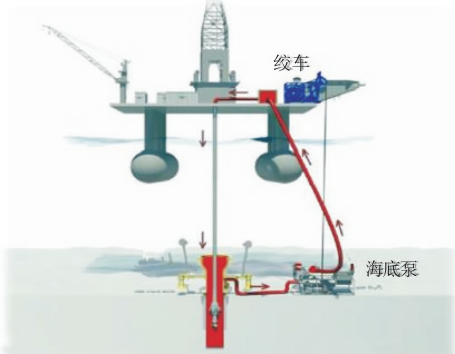


图 2 RMR 技术示意
Fig.2 Riserless mud recovery drilling system

发生井喷、井漏、坍塌、卡钻等事故,该压力范围称作钻井安全密度窗口。窄密度窗口则是指压差 Δp ($\Delta p = \text{当量地层破裂压力} - \text{当量地层孔隙压力}$ 或 $\Delta p = \text{当量地层破裂压力} - \text{当量地层坍塌压力}$) 接近、等于或小于循环压耗以及 $\Delta p \leq 0$ 的情况。水合物储层深水浅埋未固结,钻井时井下温度压力变化使水合物发生分解,泥浆密度窗口变得更加狭窄。目前主要有 3 种途径解决窄窗口钻井技术难点:(1) 精确定窄密度窗口;(2) 采用相关工艺和化学方法扩大泥浆密度窗口;(3) 通过装备或工艺控制当量循环密度 ECD 和环空压力在窄密度窗口内^[27]。

表 1 RMR 技术应用情况
Table 1 Application of RMR

钻井区域	钻井数量	水深/m	施工年份	使 用 RMR 目 的
大西洋东部北海	35	85~430	2004—2009	减轻地质灾害风险,减轻内波流影响,不使用导孔,浅层造斜
里海	33	118~525	2003—2008	减轻地质灾害风险,加长表层套管深度
澳大利亚附近海域	24	47~306	2006—2009	减轻地质灾害风险,加长表层套管深度,零污染排放
俄罗斯和巴伦支海	7	76~350	2006—2009	零污染排放,不使用导孔、隔水管和连接头
埃及附近海域	7	85~108	2007—2008	减轻地质灾害风险,不使用钻井尾管
马来西亚附近海域	1	1419	2008	加长表层套管深度
墨西哥湾	1	620	2009	泥浆回收,加长表层套管深度
马来西亚附近海域	1	1416	2014	加长表层套管深度

常规深水隔水管钻井主要通过改变钻井泥浆密度来调整地层压力和泥浆柱压力之间的压差,达到控制钻进速度的目的。地层压力随着井深增加而逐

渐增大,钻井过程中钻井泥浆密度维持过平衡状态更加明显。但是隔水管中很大质量的泥浆柱使得控制泥浆当量密度在泥浆密度窗口内非常困难。钻井

过程中,针对泥浆密度具有严格的把控,想利用减小泥浆密度以提高钻进速度,而后再增加泥浆密度调控起下钻柱的抽汲压力很难实现。因为泥浆整体循环的时间较短,短时间内反复调节泥浆密度费用较高,同时大大增加了钻井风险。

RMR 技术属于双梯度钻井的一种类型,压力梯度曲线如图 3 所示。水合物储层水深大埋藏浅,储层上覆主要是海水和疏松的沉积层,破裂压力和地层压力之间的压力区间很小。常规钻井泥浆静水压力曲线穿过泥浆密度窗口的垂直距离较短,控制井眼环空压力保持在如此短垂直距离的压力曲线内比较困难,控制不当容易造成井漏,通常通过下入多

层套管柱达到控制井身质量目的。RMR 技术利用控制隔水管内泥浆密度,在井下持续循环,降低海面以下环空压力至与海水的压力基本相同,通过建立双梯度循环,双梯度泥浆静水压力曲线的斜度大幅减小,破裂压力和孔隙压力之间的垂直距离相对增大许多,首先减小了隔水管的余量。另外,调节海底举升泵保持环空顶部的压力与海底的静水压力一致,从而可以通过调整泥浆密度来控制泥面以下井眼的井底压力和环空压力,使得破裂压力与地层压力之间狭小的空间获得更好的匹配,保证能够在过平衡压力条件下进行安全钻井,有效解决目前深水浅埋水合物钻井窄密度窗口难题。

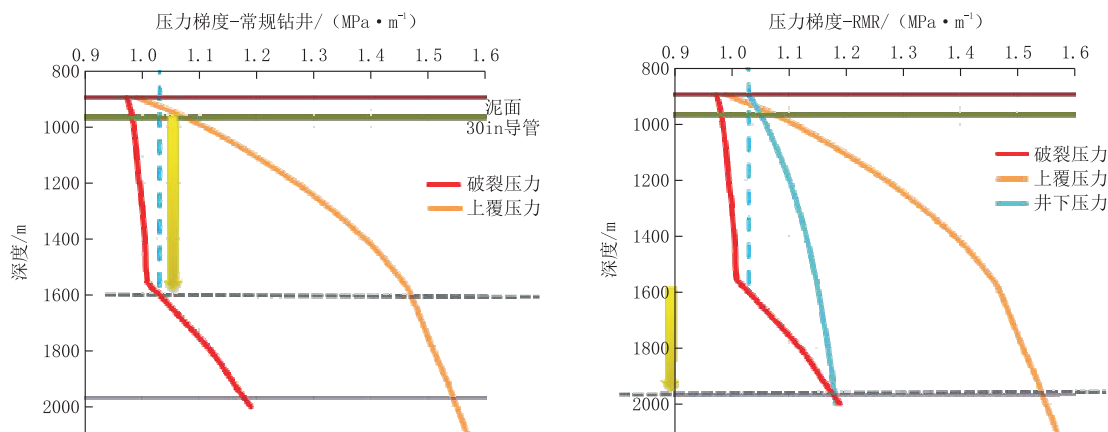


图 3 双梯度钻井原理

Fig.3 Principle of dual-gradient drilling

澳大利亚某海上气井,浅水、气流层多且分布不均,井壁强度低,泥浆密度窗口较窄,上部非储层段平均泥浆密度窗口为 $1.01 \sim 1.07 \text{ g/cm}^3$ 。储层平均泥浆密度窗口为 $1.00 \sim 1.12 \text{ g/cm}^3$ 。下部非储层段泥浆密度窗口略微变窄为 $1.02 \sim 1.13 \text{ g/cm}^3$ 。与泥质粉砂天然气水合物储层类似,设计导管下入泥面以下 1080 m。使用过常规导管下入法下到泥浆管线以下 51 m,使用 RMR 系统和抑制性水基泥浆,钻出了 26 in (1 in = 25.4 mm,下同) 直径的井眼。由于砂砾粗大钻井过程中会损失很多泥浆,为了补偿损失的部分,需要在泥浆里添加聚合物和堵漏剂(LCM)。相对于泥浆充满套管和泥浆回收管线的情况,泥浆只存在于海平面以下的套管中时,套管鞋处的当量泥浆密度(ECD)会减少 0.4 g/cm^3 ,因此,套管鞋不会有断裂的可能。通常情况下,22 in 套管通过 RMR 系统,把泥浆液面稳定在与海平面一致的时候,会用水泥固定,这个过程中不会有泥

浆损失。把表层套管下到 1085 m 的深度已经打破了该领域的记录。此案例表明,RMR 通过精确及时调整,保证泥浆密度始终在泥浆密度窗口内,理论上可解决水合物钻探泥浆密度窗口窄的问题。

3.2 井控安全

水合物储层若位于水深 1200 多米,海底静水压力超过 12 MPa,海底表层未固结,非常软弱,工程特性极差。在如此深水环境下,采用常规隔水管钻井技术时,隔水管内高密度泥浆液柱在海底泥线处压力非常高,远远大于海水静压力,处于过平衡钻井状态。采用隔水管,需要考虑不压裂地层条件下尽可能保持井底泥浆密度,保证常规钻井的排渣需求,否则钻进时井底压力过高。钻进水合物层由于压力和温度发生改变,水合物发生分解,储层内部产生大量的气体和水,水合物的持续分解,逐渐降低海底局部地层稳定性,静止时还存在井内气体溢出风险。此外,常规隔水管钻井一旦钻井系统发生故障就需要

马上采取紧急卸扣措施,泥浆会持续从断开了的隔水管的底部流出来,直到泥浆液柱压力与海水压力相当。更重要的是,井口在关闭之后只有一个井控闸板,井喷风险较高,并且隔水管底端还可能会触及海底突起而引发事故。

RMR 系统由于不使用隔水管,减轻了隔水管以及充满隔水管环空泥浆的载荷对井口稳定的影响,而且使用 RMR 技术钻井和设计配比的泥浆,不会对井壁产生严重冲刷,提高了井壁稳定性。系统能够对基盘和井下的情况实时监控,避免井口基盘以下海床出现底蚀。在遇到紧急情况时只需切断钻杆即可,提高了钻井系统移动的机动性。井口在关井之后还剩余两个井控闸板,且相互独立,进一步提高井控安全性能。此外,RMR 系统还能对气体含量进行有效监测,一旦有硫化氢等气体发生泄漏,及时发出警报以迅速处理。

3.3 经济环保

水合物储层及上部沉积层均是未固结地层,工

程特性极差。若使用常规深水钻井首先需要使用隔水管以及多层套管体系并固井,确保井壁稳定。这需要花费大量时间与成本,并且存在较大难度。其次,此类地层钻井非常容易发生井漏,可能需要使用昂贵的水基型或者合成泥浆,大量的泥浆损失,运输、混浆和运输成本过高,同时泥浆漏失还会造成环境污染。

RMR 是一种经过实践验证的闭路循环式双梯度钻井系统,能够实现基本的井控功能,加深表面套管的入下深度,使其穿过不稳定区域,减少套管柱使用量,精简井身结构、井眼和套管尺寸,缩减套管下入、固井及整体建井周期,降低整体建井的成本。AGR 公司根据 2004 年、2005 年澳大利亚附近海域使用常规隔水管钻井技术所钻的 2 口井(井 1 和井 2)的钻进深度和时间与其 2006 年在本地域使用 RMR 技术钻进的 2 口井(井 3 和井 4)进行对比(如表 2、图 4),优势明显。

表 2 钻井时间与深度对比

Table 2 Comparison of drilling periods and drilling depths

年份	井号	钻进方法	钻井时间/d	钻进深度/m	钻进井眼尺寸/in	备 注
2004	井 1	常规钻井	13.45	562	26	附带导流孔
2005	井 2	常规钻井	15.33	644	26	附带导流孔
2006	井 3	RMR	7.01	769	17½	无导流孔
2006	井 4	RMR	4.85	728	17½	无导流孔

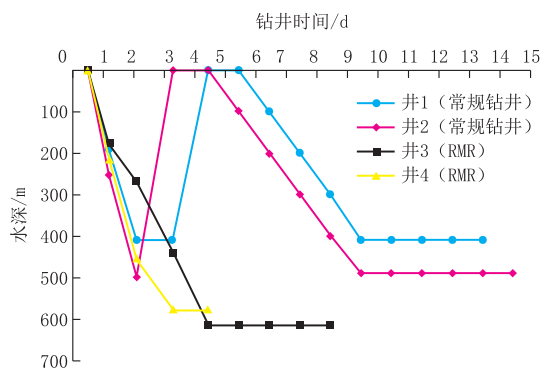


图 4 钻井时间曲线

Fig.4 Drilling time curves

我国目前发现的水合物主要赋存于南海神狐海域,水深 1200 m 左右,水合物勘查钻探需要保压取心,使用钻探船^[28],成本较低,RMR 可以直接应用,如果在举升效率和设备机动性方面继续加强,应用前景会更好。水合物试采考虑海上作业连续性和安全性,首选钻井平台,综合成本高,RMR 一定程度

上可以降低成本,但目前我国水合物试采重点关注的是增产,需要试验相关工艺技术,综合考虑海上作业风险,RMR 在水合物开发后期降本阶段使用机会较大。

此外,使用精确的计量泵,通过测量举升泵外壳内的泥浆和海水之间的静压力差,调整举升泵转速,控制举升泵外壳内泥浆的液位,实现了双梯度钻井。另外,能够充分利用设计配比的泥浆对井压进行控制,防止泥浆流失,并且实时监控井内加重泥浆的量。这样就可以随时监控泥浆的回收和泄漏情况,并根据收集到的信息采取相应的措施,确保能够充分回收,而不会导致泥浆被大量排放到海底,污染环境。

密西西比 GoM(10)区域存在巨大的地质灾害的风险,该区域的浊流岩沉积形成的地质很不稳定、多浅水流、砂岩中含高压天然气。该油井设计深度为 7620 m,所在位置水深 620 m。使用 RMR 系统

钻进 960 m 深度并下入 22 in 的表层套管。一开始使用的是密度 1.3 g/cm^3 的抑制性水基泥浆,后来,密度增加到 1.6 g/cm^3 。钻井过程中产生了强大的反冲力,但是 RMR 系统可以在 1 min 之内检测到反冲力变化情况,并相应提高水下泥浆泵的速度。最后,把泥浆密度调整到 1.7 g/cm^3 ,这样确保整个钻进过程高效安全。

4 结论

(1)RMR 不采用常规隔水管,泥浆循环回收利用,利用双梯度原理,有效解决目前深水浅埋水合物钻井窄密度窗口难题;水合物储层钻井井控风险突出,RMR 系统减轻了隔水管以及充满隔水管环空泥浆的载荷对井口稳定的影响,实时监控基盘和井下情况,遇险机动性提高,同时能有效监测气体含量,严防硫化氢等气体发生泄漏;RMR 加深表面套管的下入深度,减少套管柱使用量,精简井身结构、井眼和套管尺寸,缩减套管下入、固井及整个建井周期,降低整体建井的成本。精确的计量泵实时监控井内加重泥浆的量,达到随时监控泥浆的回收和泄漏情况,确保充分回收。

(2)RMR 在国内目前处于试验阶段,在国外应用深度还限制在 1500 m,制约深海 RMR 技术应用的难点主要在于泥浆举升泵举升能力、可靠性以及泥浆返回管线的强度等。我国目前海域水合物勘查使用钻探船保压取心,RMR 可以直接应用,如果在举升效率和设备机动性方面继续加强,应用前景会更好。水合物试采目前首选钻井平台,选用 RMR 技术一定程度上可以降低成本,但目前我国水合物试采重点关注的是增产,综合考虑海上作业风险,RMR 在水合物开发后期降本阶段使用机会较大。

参考文献(References):

- [1] 张文亮,贺艳梅,孙豫红.天然气水合物研究历程及发展趋势[J].断块油气田,2005(2):8-10,89.
ZHANG Wenliang, HE Yanmei, SUN Yuhong. The course of study and the trend of development of natural gas hydrate[J]. Fault Block Oil & Gas Field, 2005(2):8-10,89.
- [2] KVENVOLDENKA. Gas hydrate-geological perspective and global change[J]. Review of Geophysics, 1993,31(2):173-187.
- [3] SLOAN E D. Clathrate hydrate measurements: microscopic, mesoscopic, and macroscopic[J]. Journal of Chemical Thermodynamics, 2003,35(1):41-53.
- [4] 吴华,邹德永,于守平.海域天然气水合物的形成及其对钻井工

程的影响[J].石油钻探技术,2007,35(3):91-93.

- WU Hua, ZOU Deyong, YU Shouping. Gas hydrate formation and its influence on offshore drilling operations[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007,35(3):91-93.
- [5] 任冠龙,孟文波,张崇,等.深水气井测试中天然气水合物的抑制和调控方法[J].断块油气田,2018,25(1):107-110.
REN Guanlong, MENG Wenbo, ZHANG Chong, et al. Hydrate inhibition and control method for deep water gas well testing[J]. Fault Block Oil & Gas Field, 2018,25(1):107-110.
- [6] Jinfa LI, Jianliang YE, Xuwen QIN, et al. The first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea[J]. China Geology, 2018,(1):5-17.
- [7] 沙志彬,许振强,王平康,等.世界天然气水合物研究发展对我国加快推进其产业化的启示[J].海洋地质前沿,2019,35(8):1-10.
SHA Zhibin, XU Zhenqiang, WANG Pingkang, et al. World progress in gas hydrate research and its enlightenment to accelerating industrialization in China[J]. Marine Geology Frontiers, 2019,35(8):1-10.
- [8] 张炜,邵明娟,姜重昕,等.世界天然气水合物钻探历程与试采进展[J].海洋地质与第四纪地质,2018,38(5):1-13.
ZHANG Wei, SHAO Mingjuan, JIANG Chongxin, et al. World progress of drilling and production test of natural gas hydrate[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018,38(5):1-13.
- [9] 方银霞,黎明碧,金翔龙,等.海底天然气水合物稳定带的特征分析[J].海洋地质与第四纪地质,2001(1):103-106.
FANG Yinxia, LI Mingbi, JIN Xianglong, et al. Character analysis of the marine gas hydrate stability zone[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001(1):103-106.
- [10] 邓嵩,樊洪海,牛军,等.深水浅层钻井液安全密度窗口研究[J].中国海上油气,2017,29(4):138-144.
DENG Song, FAN Honghai, NIU Jun, et al. Study on the safety window of drilling fluid density for shallow formations in deep water drilling operations[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017,29(4):138-144.
- [11] HOLDER G D, Angert P F. Simulation of gas production from a reservoir containing both gas hydrates and free natural gas[R]. SPE11005, 1982.
- [12] 董广建,陈平,马天寿,等.深水表层钻井关键技术及装备研究应用现状[J].石油机械,2013,41(6):49-53,80.
DONG Guangjian, CHEN Ping, MA Tianshou, et al. Key technology of deepwater top hole drilling and current situation of equipment research and application[J]. China Petroleum Machinery, 2013,41(6):49-53,80.
- [13] 姚慧智,魏鲲鹏,古小红,等.高含硫化氢气井水合物的预测及防治[J].断块油气田,2011,18(1):107-109.
YAO Huizhi, WEI Kunpeng, GU Xiaohong, et al. Forecast prevention and treatment of hydrate in high-sulphur gas wells[J]. Fault Block Oil & Gas Field, 2011,18(1):107-109.
- [14] 宁伏龙,蒋国盛,张凌,等.影响含天然气水合物地层井壁稳定的关键因素分析[J].石油钻探技术,2008,36(3):59-61.
NING Fulong, JIANG Guosheng, ZHANG Ling, et al. Analysis of key factors affecting wellbore stability in gas hy-

- drate formations[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2008, 36(3): 59–61.
- [15] 杜垚森, 冯起赠, 许本冲, 等. 海域天然气水合物试采研究现状及存在的问题[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, 45(4): 6–9.
- DU Yaosen, FENG Qizeng, XU Benchong, et al. Research status and existing problems in oceanic gas hydrate trial production[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(4): 6–9.
- [16] 顾军, 陶雷, 干品, 等. 天然气水合物钻探低温低密度水泥浆体系优选试验[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, 45(1): 24–27.
- GU Jun, TAO Lei, GAN Pin, et al. Optimization test of low-temperature and low-density cementing slurry system for natural gas hydrate drilling [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(1): 24–27.
- [17] 李庆超, 程远方, 李强, 等. 水合物储层安全钻井液密度下限确定方法[J]. *大庆石油地质与开发*, 2018, 37(5): 168–174.
- LI Qingchao, CHENG Yuanfang, LI Qiang, et al. Determining method of the safe lower limit of the drilling fluid density in hydrate-bearing formations[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2018, 37(5): 168–174.
- [18] 宫智武, 张亮, 程海清, 等. 海底天然气水合物分解对海洋钻井安全的影响[J]. *石油钻探技术*, 2015, 43(4): 19–24.
- GONG Zhiwu, ZHANG Liang, CHENG Haiqing, et al. The influence of subsea natural gas hydrate dissociation on the safety of offshore drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(4): 19–24.
- [19] 白玉湖, 李清平. 天然气水合物取样技术及装置进展[J]. *石油钻探技术*, 2010, 38(6): 116–123.
- BAI Yuhu, LI Qingping. Progress on natural gas hydrate sampling techniques and tools[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2010, 38(6): 116–123.
- [20] 付帆, 熊正强, 陶士先, 等. 天然气水合物钻井液研究进展[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, 45(10): 71–76.
- FU Fan, XIONG Zhengqiang, TAO Shixian, et al. Research progress in drilling fluid for natural gas hydrate[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(10): 71–76.
- [21] 辜幕丹. 水合物分解对钻井液侵入影响的一维数值模拟研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2015, 42(8): 49–54.
- GU Mudan. Analysis on one-dimensional numerical stimulation of hydrates dissociation effect on drilling fluid intruding into hydrate-bearing sediment [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2015, 42(8): 49–54.
- [22] 李庆超, 程远方, 鲁钟强, 等. 钻井液特性对近井地带水合物分解的影响[J]. *大庆石油地质与开发*, 2019, 38(3): 59–64.
- LI Qingchao, CHENG Yuanfang, LU Zhongqiang, et al. Influences of the drilling fluid properties on the hydrate dissociation nearby the wellbore[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2019, 38(3): 59–64.
- [23] 叶建良, 张伟, 谢文卫. 我国实施大洋钻探工程的初步设想[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2019, 46(2): 1–8.
- YE Jianliang, ZHANG Wei, XIE Wenwei. Preliminary thoughts on implementation of the ocean drilling project in China[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019, 46(2): 1–8.
- [24] 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, 34(2): 246–251.
- CHEN Guoming, YIN Zhiming, XU Liangbin, et al. Review of deepwater dual gradient drilling technology[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(2): 246–251.
- [25] 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. Deep water riserless mud recovery drilling technology[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2009, 31(2): 44–47.
- [26] BROWN J D, URVANT V V, et al. Deployment of a riserless mud recovery system offshore Sakhalin Island [R]. SPE105212-M S, 2007.
- [27] 周英操, 杨雄文, 方世良, 等. 窄窗口钻井难点分析与技术对策[J]. *石油机械*, 2010, 38(4): 1–7, 92.
- ZHOU Yingcao, YANG Xiongwen, FANG Shiliang, et al. Analysis and technical counter measures for narrow window drilling[J]. *China Petroleum Machinery*, 2010, 38(4): 1–7, 92.
- [28] 汪品先. 大洋钻探与中国的海洋地质[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(1): 7–14.
- WANG Pinxian. Ocean drilling and marine geology in China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(1): 7–14.

(编辑 韩丽丽)