

超深水超浅层储层无隔水管钻井取心 难点与对策

陈浩东¹, 吴艳辉¹, 马传华¹, 黄洪林^{1,2*}, 罗鸣^{1,2}, 李文拓^{1,2}, 代锐¹, 廖高龙¹

(1. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海南海口 570100; 2. 海南省深海深层能源工程重点实验室, 海南澄迈 571099)

摘要:超深水超浅层(简称“双超”)储层钻井取心作业难度大, 成功率低, 作业费用高, 可供参考经验少。对此, 开展了无隔水管条件下的“双超”储层钻井取心难点分析, 并提出了相应技术对策, 形成了一套“双超”储层高效取心方案。研究表明, 在“双超”环境下, 储层以未胶结、松散泥质-粉砂岩为主, 地层疏松, 钻井取心作业面对着取心筒“堵心”、排量和钻压控制难度大、超深水作业费用高等难题与挑战。优选Rb-8100型全封闭式保形取心工具和HSC043-8100型取心钻头, 配合小排量(200 L/min)、低转速(15~40 r/min)、阶梯式钻压(2~10 t)的小参数模式, 自制网兜将钻头处海水进行分流并保护底部岩心。在南海“双超”气田开展了无隔水管钻井取心先导试验, 取心收获率达100%。实现了“双超”储层高效钻井取心, 同时为“双超”气田的后期开发奠定了重要的基础。

关键词:超深水超浅层储层; 疏松地层; 海洋钻井取心; 保形取心工具; 无隔水管作业

中图分类号: TE921; P634.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)06-0119-06

Difficulties and countermeasures of core drilling without riser in ultra-deep water and ultra-shallow reservoirs

CHEN Haodong¹, WU Yanhui¹, MA Chuanhua¹, HUANG Honglin^{1,2*},

LUO Ming^{1,2}, LI Wentuo^{1,2}, DAI Rui¹, LIAO Gaolong¹

(1. Hainan Branch of CNOOC (China) Co., LTD., Haikou Hainan 570100, China;

2. Key Laboratory of Deep Sea Deep Formation Energy Engineering of Hainan Province, Chengmai Hainan 571099, China;

Abstract: In the ultra-deep and ultra-shallow reservoirs (“double ultra” for short), problems exist such as difficult coring operation, low success rate, high operation cost, and lack of reference experience. In view of this, the analysis of the coring difficulties without risers is carried out, the corresponding technical countermeasures are put forward, and a set of efficient coring scheme is formed. The results show that in the “double ultra” environment, the reservoir is dominated by unconsolidated and loose argillous sandstone, and the coring operation faces the problems and challenges of “blocked core”, the difficulty of controlling displacement and bit weight, and the high cost of ultra-deep water operation. The Rb-8100 fully enclosed conserved coring tool and HSC043-8100 coring bit are selected, incorporated with small parameter mode of small displacement (200L/min), low speed (15~40r/min) and stepped bit weight (2~10t). The self-made net diverts seawater at the bit and protects the bottom core. The pilot test of riserless coring was carried out in “double ultra” gas field in South China Sea, and the core recovery reached 100%. It is the first time to realize the efficient coring operation in “double ultra” reservoirs, and lays an important foundation for the later

收稿日期: 2024-03-24; 修回日期: 2024-05-21 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.06.015

基金项目: 中海油“十四五”重大科技项目课题“深水超深水复杂井安全高效钻完井关键技术”(编号: KJGG2022-0201)

第一作者: 陈浩东, 男, 汉族, 1984年生, 高级工程师, 钻井工程专业, 主要从事海洋油气钻完井技术与理论方面的研究工作, 海南省海口市秀英区长滨三路6号, chenhd3@cnooc.com.cn。

通信作者: 黄洪林, 男, 汉族, 1994年生, 工程师, 油气井工程专业, 博士, 主要从事海洋油气钻完井技术方面的研究工作, 海南省海口市秀英区长滨三路6号, huangh_cup@163.com。

引用格式: 陈浩东, 吴艳辉, 马传华, 等. 超深水超浅层储层无隔水管钻井取心难点与对策[J]. 钻探工程, 2024, 51(6): 119-124.

CHEN Haodong, WU Yanhui, MA Chuanhua, et al. Difficulties and countermeasures of core drilling without riser in ultra-deep water and ultra-shallow reservoirs[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 119-124.

development of ultra-deep and ultra-shallow reservoirs gas field.

Key words: ultra-deep water and ultra-shallow reservoir; loose formation; offshore coring; conformal coring tool; riserless operation

0 引言

2022年6月,我国在南海琼东南盆地首次开展超深水超浅层气田(简称“双超”气田)的勘探钻井作业,获得了良好的气显示。并于2023年10月开展进一步的探索。该气田水深达1500~1600 m,埋深仅200~300 m。由于上部是海水,近泥线地层胶结程度低,土质疏松,呈未成岩松散状态^[1]。在钻井期间,固井质量难以保障,防漏堵漏、井壁稳定性和钻具定向能力也面对着巨大挑战;在生产期间,储层出砂和塌陷的风险极大^[2]。同时,岩心是地层中最直接的实物资料,可以对岩心样品进行含油性、微观物理特性分析等,获取储层岩性、物性、电性、含油气性、可压性等参数,实现对储层的精细评价,准确计算区块储量,以便制定合理的开发方案^[3]。

针对深水/超深水弱胶结地层的钻井取心研究,主要集中在取心钻具的研制与分析,如卢春华等^[4]研制了齿轮-齿条关闭球阀式水合物保压取心钻具,张会寅等^[5]尝试了顶部双驱动联动隔水管钻探取心作业,刘协鲁等^[6]对海域天然气水合物保温保压取样的钻具开展了详细的调研,并从工作原理、结构特点和试验应用等方面对国内保温保压取心钻具的研究与应用进展进行了分析与总结。同时,深水/超深水浅表层取心作业也集中在水合物层,且收获率较低^[7-10]。与深水/超深水浅表层水合物层钻井取心相比,“双超”环境下的地层没有水合物的固结作用,其质地更为松软,钻井取心作业难度更大,可供参考经验少,面对巨大的困难和挑战。

为了保障新区块的储量评价、后期开发等的顺利实施,亟须开展“双超”气田的储层钻井取心工作。对此,开展了“双超”储层钻井取心难点分析,并提出了相应技术对策,形成一套高效取心方案,为取得详细的储层岩土资料提供保障。

1 取心难点分析

根据已钻井的井壁取心资料(见图1)，“双超”储层井壁岩心多数极为松散,部分呈柱状。岩性以泥质-粉砂岩为主,部分带有胶结物,含石英晶体,矿物颗粒松散、孔隙大、含水多等^[11],取心过程中易

碎,取心效果不好,岩心收获率难以保证。

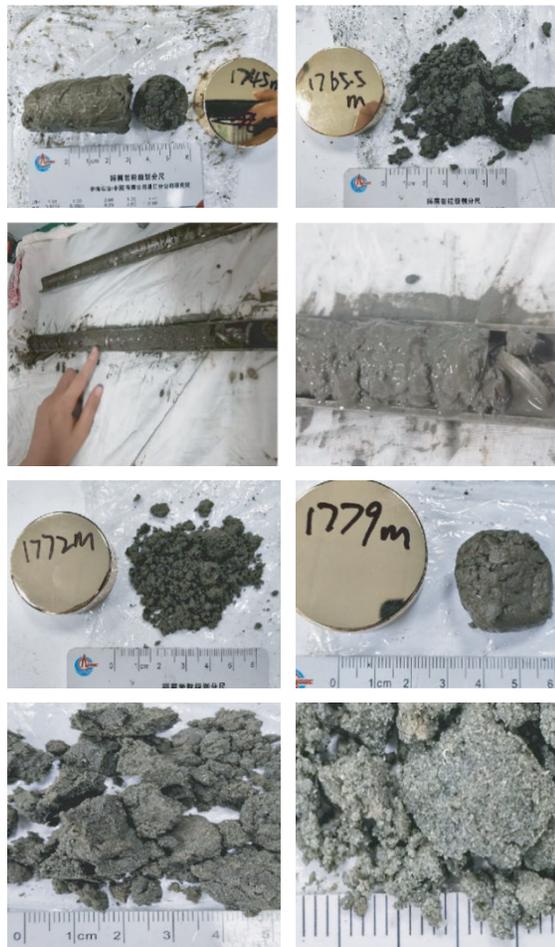


图1 井壁取心样品

Fig.1 Lateral core sample

与陆上浅层钻井取心相比,海洋浅层取心难度更大^[12-13]。在“双超”环境下,钻井取心难点主要集中在以下几个方面:

(1)取心筒“堵心”:目的层以泥质-粉砂互层为主,当泥岩进筒后,后续松散砂岩上顶困难,取心过程中容易在泥岩处发生“堵心”,导致后续取心失败。

(2)排量控制难度大:目的层安全密度窗口极窄(0.02~0.06 g/cm³),井底压力当量循环密度(ECD)过高极易压漏地层。在已完钻的多口井中,地层压力当量密度为1.035~1.045 g/cm³,由于井底憋压导致ECD升高(1.065~1.89 g/cm³),井底发生

多次漏失。且排量过高容易冲垮井壁,造成卡钻等井下复杂。同时,钻头射流冲刷地层,井底岩土被破坏,取心筒无法收获岩心。而排量过低,取心钻头外部砂泥无法有效清除,取心钻头易产生“泥包”现象,限制进尺;另一方面,钻头水眼也容易被堵。

(3) 钻压控制困难:小钻压不利于取心钻头的吃入,而取心钻头长时间在同一深度旋转切削容易破坏松散岩土,影响岩心的完整性与收获率。但钻压过大,取心工具进尺过快,岩心易被压缩,导致后期校对层位出现误差,影响分析。同时,受海况影响,平台上下浮动可能导致取心钻头脱离井底,取心中断或进尺突增。

(4) 取心费用高:半潜式平台在超深水区域开展作业,起下隔水管时间长,费用高。按照 60~80 m/h 的速度起/下隔水管和防喷器,1500 m 水深约需 2.9~3.3 d,费用高达 1300~1500 万元。

2 技术对策

针对“双超”储层的取心难点,提出了以优选取心工具、优化取心参数和无隔水管作业为主的技术对策。

2.1 取心工具优选

首次“双超”储层取心,以“保形”为主,即以保取得心成功率和岩心完整性为目的。取心层位岩土松散,较低压力即可下压取心筒进行取心。但相对于加压取心方式,旋转取心能有效提高岩心收获率和完整程度。因此,可采用加压和旋转结合的形式进行取心。Rb-8100 型全封闭式保形取心工具是一种能有效保护岩心的高效取心工具,在陆地浅层取心具有较高的收获率^[14-15]。该工具通过在地面投入钢球,采用液力憋压的方式实现内外筒分离。当内筒下落到钻头内腔台阶处,岩心爪沿钻头内腔的斜面收缩,割断岩心并收拢^[16]。该工具优点如下:

(1) 采用液力憋压割心方式,可有效解决机械加压取心工具钻具配重和大井斜钢球不居中问题。

(2) 设计安全卸压装置,憋压至额定压力,卸压阀自动打开泄压,安全可靠。

(3) 不需要投多个钢球,减少投球后等待时间,停泵时间短,有效降低卡钻风险。

该工具采用全封闭式的岩心爪,配合导向套,在割心后岩心爪可以完全闭合,防止进筒岩心落井,如图 2 所示。同时,采用冷冻保型取心工艺,内

筒加低摩阻铝合金衬筒,实现岩心的保形,利于岩心的进入,提高收获率。



图 2 导向套+全封闭岩心爪

Fig.2 Guide sleeve & fully enclosed core claw

根据“双超”储层易进尺的特点,优选 HSC043-8100 型刮刀式取心钻头(见图 3)。该钻头采用硬质合金替代 PDC 复合片,有效破岩的同时,降低小排量工况下钻头泥包风险。刮刀取心钻头内腔设计角度小,更加有利于岩心爪完整收缩^[17]。其次,采用 5 刀翼、10 个水眼的结构设计,减小单个水眼对地层的水力冲击,防止冲散岩心。



图 3 HSC043-8100 型取心钻头

Fig.3 HSC043-8100 coring bit

2.2 取心参数优化

以 HSC043-8100 型取心钻头为基础,通过理论计算与对比分析,发现取心排量 200 L/min 的工况下,钻头射流喷速较小(见表 1),疏松地层不易被钻井液冲散。此时,钻头射流对地层的冲击力较小,可有效保护井底岩心。

为了避免因钻压过大导致的岩心在取心筒内

表 1 不同排量下的钻头射流喷速和冲击力

Table 1 Jet velocity and impact force of bit under different displacement

排量/(L·min ⁻¹)	钻头射流喷速/(m·s ⁻¹)	钻头射流冲击力/N
1000	21.2	42.8
650	13.7	17.8
200	6.30	3.8

压缩,采用阶梯式的钻压,即在不同的进尺阶段,采用不同的钻压。在前期造心阶段,施加10~20 kN小钻压;在进尺1~2 m阶段,将钻压提至20~40 kN;当进尺达到3 m后,将钻压增至30~50 kN。同时,根据取心速度,严格控制进尺^[18]。若取心速度极快,需增大钻压,以保证钻头不脱离井底为原则,最大钻压可增加至80~100 kN。取心速度较快时,顶驱转速宜低不宜高,减小取心钻头对地层的扰动。在取心过程中,不停泵不停转,避免取心中断。采用低参数进行弱胶结地层取心作业具有明显优势,采用低转速(≤ 40 r/min)钻进在满足取心的同时,能避免高转速破坏岩心完整性^[19]。

2.3 无隔水管取心作业模式

不下隔水管和防喷器,能大幅度降低作业费用^[20-21]。但没有隔水管的引导作用,取心工具进入井眼难度大。对此,充分利用水下机器人(ROV)的辅助作用:提供水下视野的同时,使用机械手臂协助取心工具入井,实现“一杆入洞”。在井眼中下入工具串时,降低下入速度,避免钻具刮蹭、破坏井壁。同时,在完成取心后,将工具上提至泥面以上,取心钻头处携带的岩心易受海水的侵扰,致使“掉心”,尤其是在天气海况较差的情况下。为了进一步保护岩心爪处的岩心,自制网兜,对海水进行分流处理,同时防止岩心爪未有效关闭而引起“掉心”。在取心工具完全起出泥线后,ROV用网兜将取心钻头包裹住,避免“掉心”,如图4所示。

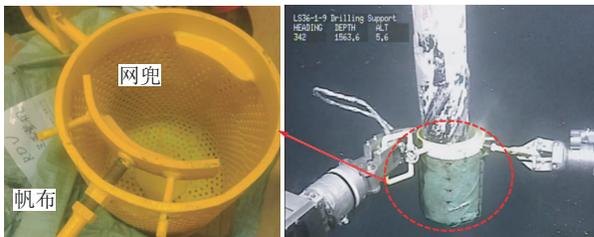


图4 自制网兜装置

Fig.4 Self-made net device

3 应用效果分析

2024年1月,在南海琼东南盆开展了先导试验。为了降低海况的影响,取心作业选择在海况较好的天气窗口进行。取心工具在井眼内下放时,将速度严格控制在0.3 m/min以内,保护井壁;取心钻进时,采用小排量(200 L/min)、低转速(15~40 r/

min),阶梯式钻压(20~100 kN)的小钻参模式,每次进尺3~4 m;钻进时打开顶驱补偿,避免因平台升沉导致钻头提前离开井底。在整个过程中,ROV水下时刻关注取心工具和井口状态。

为了增强取心工具居中度,钻具组合配备3根扶正器,其中在取心筒前后配备2根扶正器。具体取心钻具组合为:8.5 in HSC043-8100型取心钻头+8.25 in扶正器+7 in取心筒+8.25 in扶正器+定位接头+变扣接头+8 in钻铤+11.875 in扶正器+8 in浮阀+8 in震击器+变扣+5.875 in加重钻杆+5.875 in钻杆(1 in=25.4 mm)。

尽管最终岩心爪未完全回收,但由于网兜的分流与保护作用,钻头岩心未出现“掉心”情况,如图5所示。本次取心设计总进尺5.5 m(1825.21~1830.71 m),最终出心5.88 m(含钻头处的0.33 m),收获率100%。以1 m为间隔进行切割保存,不同位置端面情况如图6所示。除了岩心筒内岩心顶部(1825.21 m)出现岩心未充满岩心筒,其他端面均填满岩心筒,表明取心效果极好。



图5 岩心爪回收状态

Fig.5 Recovery state of core catcher

“双超”储层取心工作的高效完成,表明“Rb-8100型全封闭式保形取心工具+HSC043-8100型取心钻头”的取心工具组合适用于“双超”环境;采用“小排量+低转速+阶梯式低钻压”的取心参数,加之网兜装置的防冲刷和防“掉心”作用,能有效保证取心收获率;无隔水管作业模式,则能大幅度降低取心费用。

4 结论与建议

针对超深水超浅层气田的储层环境,开展了“双超”储层钻井取心难点分析,并提出了相应技术对策,形成了一套高效取心方案,分析了现场取心



图6 不同位置端面岩心状态

Fig.6 State of core transverse at different positions

效果。得出的主要结论与建议如下:

(1)“双超”环境下,储层以未胶结、松散泥质-砂泥岩为主,取心作业面临着取心筒“堵心”、排量和钻压控制难度大、作业费用高等难题与挑战。

(2)通过优选Rb-8100型全封闭式保形取心工具和HSC043-8100型取心钻头,优化取心参数(小排量+低转速+阶梯式低钻压),使用网兜保护出井眼后的底部岩心,能有效提高取心收获率;同时,采用无隔水管作业模式,能大幅度降低取心费用。

(3)首次进行“双超”储层钻井取心作业,以保形为主。为了获取更为真实的“双超”环境下的岩心资料,后续需考虑进行保压保温钻井取心作业。

参考文献(References):

- [1] 杨进,傅超,刘书杰,等.超深水浅层建井关键技术创新与实践[J].石油学报,2022,43(10):1500-1508.
YANG Jin, FU Chao, LIU Shujie, et al. Key technological innovation and practice of well construction in ultra-deepwater shallow formations[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(10): 1500-1508.
- [2] 李军,杨宏伟,张辉,等.深水油气钻采井筒压力预测及其控制研究进展[J].中国科学基金,2021,35(6):973-983.
LI Jun, YANG Hongwei, ZHANG Hui, et al. Progress of ba-

sic research on wellbore pressure control in deepwater oil and gas drilling and production[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(6): 973-983.

- [3] 张士超.浅谈松散砂砾岩地层钻井取心工艺[J].西部探矿工程,2022,34(7):56-58.
ZHANG Shichao. Discussion on core-drilling technology of loose sand conglomerate formation[J]. West-China Exploration Engineering, 2022, 34(7): 56-58.
- [4] 卢春华,张涛,徐俊,等.海域天然气水合物保压取心钻具的研制与试验[J].钻探工程,2023,50(6):18-26.
LU Chunhua, ZHANG Tao, XU Jun, et al. Development and experiment of pressure core sampler for marine natural gas hydrates[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(6): 18-26.
- [5] 张会寅,田烈余,林康,等.海上顶部双驱动联动隔水管钻探取心技术[J].钻探工程,2022,49(6):110-115.
ZHANG Huiyin, TIAN Lieyu, LIN Kang, et al. Ocean core drilling with the top double-drive linkage riser system[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6): 110-115.
- [6] 刘协鲁,阮海龙,赵义,等.海域天然气水合物保温保压取样钻具研究与应用进展[J].钻探工程,2021,48(7):33-39.
LIU Xielu, RUAN Hailong, ZHAO Yi, et al. Progress in research and application of the pressure-temperature core sampler for marine natural gas hydrate[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7): 33-39.
- [7] 吴玲妍.水合物地层钻探取心工程风险分析[D].青岛:中国石油大学(华东),2013.
WU Lingyan. Risk analysis of hydrate formation drilling coring engineering[D]. Qindao: China University of Petroleum (East China), 2013.
- [8] 刘健.天然气水合物钻探取样保真器结构研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2010.
LIU Jian. Study on the structure of sampling fidelity device for gas hydrate drilling[D]. Qindao: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [9] 张凌,宁伏龙,蒋国盛,等.海洋水合物钻探取心与处理现状分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(S1):100-103.
ZHANG Ling, NING Fulong, JIANG Guosheng, et al. Current state of the art of coring and processing in marine gas hydrate drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(S1): 100-103.
- [10] 马清明,任红,许俊良.天然气水合物钻探取样——WEPC工具研制[J].非常规油气,2014,1(3):47-51.
MA Qingming, REN Hong, XU Junliang. Gas hydrate drill coring sample: WEPC system development[J]. Unconventional Oil & Gas, 2014, 1(3): 47-51.
- [11] 罗鸣,高德利,黄洪林,等.深水浅层呼吸效应机理及影响因素分析[J].钻井液与完井液,2022,39(6):668-676.
LUO Ming, GAO Deli, HUANG Honglin, et al. Analyses of the ballooning effect and its affecting factors in drilling shallow formations in deep water[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2022, 39(6): 668-676.
- [12] 付晓平,刘彬,舒挺.深水油气勘探中钻井取心的难点与对策[J].石油石化物资采购,2021,8:119-120.
FU Xiaoping, LIU Bin, SHU Ting. Difficulties and countermeasures of drilling coring in deep water oil and gas exploration

- [J]. Petroleum and Petrochemical Materials Procurement, 2021,8:119-120.
- [13] 郭海泉,罗军.保形取心技术在欢627-兴H1井中的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2011,31(4):244.
GUO Haiquan, LUO Jun. Application of conformal coring technology in Huan 627-Xing H1 well[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2011,31(4):244.
- [14] 乔纯上,杜克拯,曹鹏飞.深水钻井取心深度测量方法的设计与应用[J].录井工程,2017,28(1):24-28.
QIAO Chunshang, DU Kecheng, CAO Pengfei. Design and application of depth measuring method for deepwater drilling coring[J]. Mud Logging Engineering, 2017,28(1):24-28.
- [15] 杜鹏,陈泽升,吐洪江.井壁取心与地化录井技术在冀东油区中浅层勘探中的配套应用[J].录井工程,2019,30(3):58-62.
DU Peng, CHEN Zesheng, TU Hongjiang. Matching application of sidewall coring and geochemical logging technology in middle-shallow layers exploration in Jidong oil area[J]. Mud Logging Engineering, 2019,30(3):58-62.
- [16] 于文涛,张辉,孙振刚.保形取心工具的改进及其应用[J].钻采工艺,2013,36(5):117-118,110.
YU Wentao, ZHANG Hui, SUN Zhengang. Improvement and application of conformation coring tool[J]. Drilling & Production Technology, 2013,36(5):117-118,110.
- [17] 潘小志.陇东煤田适岩钻头的研究与应用[J].企业技术开发,2014,33(16):53-55.
PAN Xiaozhi. Research and application of suit rock drill bit in Longdong coal regions[J]. Technological Development of Enterprise, 2014,33(16):53-55.
- [18] 乔纯上,孙金山,杜克拯,等.深水钻井取心中如何计算取心进尺[C]//中国石油学会石油工程专业委员会海洋工程工作部2014年年会暨技术交流会,中国石油学会,2014.
QIAO Chunshang, SUN Jinshan, DU Kecheng, et al. How to calculate the core penetration of deep water drilling core[C]//The 2014 Annual Meeting and Technical Exchange Meeting of the Marine Engineering Work Department of the Petroleum Engineering Professional Committee of the Chinese Petroleum Society, China Petroleum Institute, 2014.
- [19] 曹永亮.煤层取心钻进用钻头的优选与实践应用[J].机械管理开发,2019,34(3):31-32,45.
CAO Yongliang. Optimum selection and practical application of drill bit for coal seam coring drilling[J]. Mechanical Management Development, 2019,34(3):31-32,45.
- [20] 高德利,张辉.无隔水管深水钻井作业管柱的力学分析[J].科技导报,2012,30(4):37-42.
GAO Deli, ZHANG Hui. Mechanical analysis of tubes in deepwater drilling operation without riser[J]. Science & Technology Review, 2012,30(4):37-42.
- [21] 张晓东,王海娟.深水钻井技术进展与展望[J].天然气工业,2010,30(9):46-48,54,123-124.
ZHANG Xiaodong, WANG Haijuan. Progress and outlook of deepwater drilling technologies [J]. Natural Gas Industry, 2010,30(9):46-48,54,123-124.

(编辑 王文)