

南海深水钻井导管水下打桩可打性评估

邓玉明¹ 刘正礼² 赵维青¹ 赵苏文¹

1. 中海油能源发展股份有限公司, 广东 深圳 518000;
2. 中海石油深海开发有限公司, 广东 深圳 518000

摘要: 针对深水油气田开发钻井表层导管的安装, 业内提出了基于动力沉桩理论的深水钻井导管水下打桩技术, 并通过实践证明了该技术的可行性。由于国内尚无该技术应用, 为评价该技术在中国南海深水区块的适用性, 从对导管可打性角度出发, 基于南海深水典型表层土壤特性与钻井实践, 对国外已实施油田的土壤特性进行了类比分析, 利用波动方程分析软件建立了管-土-锤模型, 分析并设定了打桩工况, 对导管在设定工况下进行了可打性评估, 分析了打桩过程导钢管体应力、锤效率、锤击数表现及锤击能量影响。分析表明, 对于南海深水区块, 典型深水钻井导管能在设定打桩工况下安全锤入至南海深水典型导管入泥设计深度, 导管的可打性满足作业要求, 有利于该技术的探索。分析结果可以为南海深水导管水下技术应用评估提供参考。

关键词: 深水钻井; 导管打桩; 南海深水土质; 工况设定; 可打性分析

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.06.014

Drivability Analysis on Deepwater Drilling Conductors in South China Sea

Deny Yuming¹, Liu Zhengli², Zhao Weiqing¹, Zhao Suwen¹

1. Engineering Technology Company of CNOOC, Shenzhen, Guangdong, 518000, China;
2. CNOOC Deepwater Development Limited, Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract: As to the installation of deepwater oil and gas development drilling conductor, a new alternative, i. e. conductor subsea driving technology, has been proposed and carried out in recent years and its feasibility has been proven in practice. Due to the lack of application of this technology in China, in order to evaluate the applicability of this technology in the deepwater block of South China Sea, based on the typical surface soil characteristics of South China Sea and drilling practice, the paper makes an analogy analysis of the soil characteristics of the oil fields that have been implemented abroad. Meanwhile, a conductor-soil-hammer model has been established using the wave equation analysis software to analyze and set the driving conditions and boundary under which the conductor drivability is performed to analyze the conductor stress, the influence and interaction of hammer efficiency, output energy and blow counts. The analysis shows that for the deepwater block in South China Sea, the typical deepwater drilling conductor can be safely driven into the typical designed penetration under the given driving conditions. The driving

收稿日期:2020-08-10

基金项目:中国海洋石油集团有限公司“十三五”科技重大项目“南海深水钻完井关键技术研究”(CNOOC-KJ 135 ZDXM 05 LTD 01 SHENHAI 2016)

作者简介:邓玉明(1985-),男,福建三明人,工程师,学士,主要从事深水钻井技术应用与研究工作。E-mail:dengym@cnooc.com.cn

performance meets the operational requirements, which is conducive to the exploration of this technology. The analysis results can provide reference for the application assessment of this technology in the South China Sea.

Keywords: Deepwater drilling; Subsea conductor driving; South China Sea soil; Driving boundary setting; Drivability analysis

0 前言

随着全球海洋油气开发向深水海域的快速发展,深海油气产量占比持续增加。尽管深水蕴藏着丰富的油气资源,但受制于深水环境特点,国内外深水开发始终面临着各种挑战与技术壁垒^[1-5],如浅层气、浅层流、邻井土壤扰动等,使得深海油气开发钻井表层作业呈现高风险与高成本特性。近年业内提出了深水钻井导管水下打桩技术,该技术采用深水桩锤将钻井导管锤至设计入泥深度来实现导管的安装。实践表明,深水钻井导管水下打桩技术相比传统的导管喷射与钻孔技术有独特的技术优势,如安装精度高、无固井候凝或静置吸附、承载力时效性好等,且在特定条件下能提高时效,降低成本。

鉴于此,该技术可作为对现有导管安装技术的补充,其适用性评估对技术方案选择有重要意义。充分的调查与研究表明,该技术应用的关键前提之一是导管的打性能满足要求,即导管、桩锤及土相互作用能使导管安全锤入至设计入泥深度。由于导管打性能分析涉及管-土-锤复杂的相互作用,很难实现准确预测,目前采用桩基工程中广泛应用的波动方程分析法,其分析结果准确度与经验数据相关。

为评价深水钻井导管水下打桩技术在我国南海深水区块的适用性,从导管打性能角度出发,结合我国南海深水区块典型土壤特性与导管结构参数,与国外已实践油田土壤特性进行了类比分析,利用波动方程分析软件建立了管-土-锤模型,分析并设定了打桩工况,对导管进行了打性能评估,分析导管能否安全锤至设计深度,为该技术在我国南海深水区块的适用性评估提供参考。

1 技术应用现状

深水钻井导管水下打桩技术于 2008 年首次提出并应用于巴西 BC-10 深水油气田开发项目^[6],提出该技术的主要原因是该项目需要安装人工举升管汇和钻井导管,考虑到人工举升管汇的支撑盘安装需要进行水下桩基安装作业,为了能同期完成钻井导管预安装,一次性完成两项工程作业,提出了将支撑盘的基础桩安装与导管安装作业相结合的设计,并建立深水钻井导管水下打桩技术。由于该技术的独特优势,巴西在西非深水开发项目上进行了再次应用且实现了预期目标。

目前我国南海深水开发钻井导管安装技术仍以钻孔与喷射技术为主^[7],深水油气尚未大规模开发,该技术的应用尚处于研究与评估阶段^[8]。

2 南海深水土质特性分析

根据目前行业研究与规范理论方法^[9-10],土质参数中土体强度对导管打桩贯入有重要的影响。基于南海水深大于 300 m 的典型井场土壤不排水抗剪强度数据统计,与巴西、西非已实施案例油田土壤强度进行了对比,见图 1。结果表明,南海深水表层土壤松软,泥线以下 100 m 内土壤强度小于 150 kPa,远小于浅水土壤强度(大于 250 kPa),与已实施案例土壤强度(小于 140 kPa)相近。因此,从土质特性角度,其有利于该技术的探索。

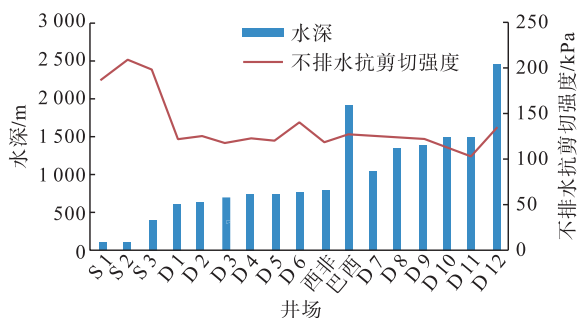


图 1 南海典型土壤不排水抗剪强度统计图

Fig. 1 South China Sea typical soil undrained shear strength

3 导管打桩分析过程

深水钻井导管水下打桩系统由三部分构成:导管、土壤和桩锤。在进行导管打性能分析前,需要对系统建立模型,再基于模型理论分析确定导管打桩的动阻力,其次分析计算锤与导管组合的贯入力,最后对管-土-锤系统综合模拟分析,预测锤击数、分析导管压拉应力、分析锤击能量影响等,评估导管锤入至设定深度的能量需求及导管在锤入过程中是否会出现应力破坏或拒锤。

3.1 分析方法

目前打桩分析应用最广泛的方法为波动方程分析法,它通过模拟打桩过程,获得打桩系统的力学状况^[11]。1960 年 Smith E A L 提出打桩系统的离散数据模型,并借助计算机建立了波动方程的差分方程^[12],随着发展,出现了基于波动方程理论的打桩分析软件,其中以 PDI 公司的 GRLWEAP^[13]为典型代表。本文分析中,将导管

视为钢桩,利用该软件进行分析。

3.2 导管数据

南海深水开发中典型的导管尺寸外径通常为 762 ~ 914.4 mm,壁厚 25.4 ~ 38.1 mm,钢级 X 56 /X 65,屈服强度 386 ~ 450 MPa,导管典型入泥设计深度以 70 ~ 80 m 为主。导管弹性模量 21 000 MPa,密度 7 850 kg /m³。

3.3 土体数据

土壤是打桩系统中最复杂的组成部分。在 GRLWEAP 中土的模型采用 Smith 模型。本次分析取南海 500 m 水深 D 油田土壤数据,见表 1。

土体的临塑变形与阻尼系数设置基于 Smith 模型:临塑

变形取 2.54 mm,侧向阻尼取 0.65 s /m(黏土)/0.16 s /m(砂土),端部阻尼系数取 0.5 s /m。

3.4 桩锤数据

深水钻井导管打桩要求桩锤能适应深水环境。目前全球技术先进且应用广泛的深水桩锤主要为 MENCK 公司深水桩锤^[14]。本次分析中设定的桩锤为其深水系列桩锤中能量级别最小的桩锤 MENCK MHU - 270 T,该桩锤应用于全球已实施的深水钻井导管打桩案例中,其主要性能参数:额定能量 270 kJ,锤能效率 > 90%,最大打击频率 100 锤 /min,锤芯重 16.2 t,锤总重 30.8 t,最大作业水深 3 000 m。

表 1 南海深水 D 油田表层土壤参数表

Tab. 1 Soil parameters of South China Sea D oilfield

| 土层 | 土性 | 土层深度 /m | 土浮容重 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$) | 不排水抗剪切强度 /kPa | 内摩擦角 /($^{\circ}$) |
|----|-----|-------------|---|---------------|----------------------|
| 1 | 黏性土 | 0.0 ~ 0.8 | 6.6 | 10 | — |
| 2 | 砂土 | 0.8 ~ 3.3 | 6.8 | 15 | 25 |
| 3 | 黏性土 | 3.3 ~ 6.9 | 7.4 | 20 | — |
| 4 | 砂土 | 6.9 ~ 10.4 | 9.2 | 30 | 25 |
| 5 | 黏性土 | 10.4 ~ 11.4 | 7.5 | 45 | — |
| 6 | 黏性土 | 11.4 ~ 16.9 | 7.5 | 45 | — |
| 7 | 黏性土 | 16.9 ~ 19.9 | 7.7 | 35 ~ 45 | 23 |
| 8 | 黏性土 | 19.9 ~ 30.9 | 7.5 | 45 ~ 80 | — |
| 9 | 黏性土 | 30.9 ~ 34.9 | 7.6 | 80 | — |
| 10 | 砂土 | 34.9 ~ 38.9 | 8.5 | 75 ~ 80 | 31 |
| 11 | 砂土 | 38.9 ~ 42.8 | 8.7 | 85 | 31 |
| 12 | 黏性土 | 42.8 ~ 47.8 | 8.1 | 90 ~ 100 | — |
| 13 | 黏性土 | 47.8 ~ 51.7 | 8.0 | 80 ~ 125 | — |
| 14 | 黏性土 | 51.7 ~ 62.2 | 8.4 | 100 ~ 110 | — |
| 15 | 黏性土 | 62.2 ~ 71.5 | 8.1 | 110 | — |
| 16 | 砂土 | 71.5 ~ 72.3 | 8.4 | 120 | 25 |
| 17 | 黏性土 | 72.3 ~ 80.0 | 8.5 | 125 | — |

3.5 工况设定

基于行业经验及已实施案例,为了使分析具有边界条件,增加计算设定透明度及参考性,提高评估的覆盖面,使计算设定偏保守,对分析的工况参数进行如下设定:

1) 导管入泥深度。基于中国南海深水钻井实践^[15-17],设定本次分析导管入泥深度为 70 m。

2) 打桩工况设定。深水钻井导管水下打桩作业通常要避免恶劣天气窗口,导管柱与桩锤均完全在水下,假定施工中桩锤性能稳定,导管为连续贯入。由于导管外径较大且土壤松软,根据我国沿海软土地区大量实际

工程及现场试验^[18],口径越大,土质越软,土塞效应越弱,再结合已实施案例中未发生土塞闭塞情况,本次分析中不考虑完全土塞情况。但为了评估极端工况下导管的打性,分析中考虑了完全闭塞的情况。

3) 摩擦损失。根据大量工程实践,导管连续贯入过程黏性土的摩擦损失约为 50% ~ 80%^[19],砂土强度通常折减 1.1 ~ 1.5 倍。为了使计算更加保守,本次分析设定导管端摩擦阻无损失,而侧土阻力损失 30%。

4) 拒锤条件设定。根据海上开发井隔水导管设计和作业规范,连续锤击入泥时最大锤击数不超过 250 锤 / 0.25 m;最大锤击数 400 锤 / 0.25 m 的锤击入泥深度不

能超过 0.75 m。根据桩锤使用建议,其能量输出效率不超过 95%,本文分析最大取 90%。

3.6 模型建立

将管-土-桩系统参数输入至波动方程计算程序,建立打桩系统模型,打桩系统模型示意图见图 2。

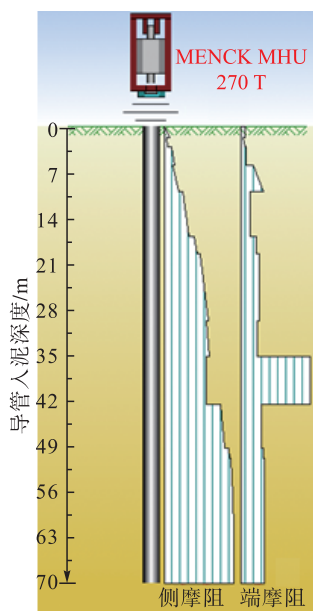


图 2 导管打桩系统模型示意图

Fig. 2 Conductor driving system model diagram

4 分析结果

4.1 导管锤击应力分析

针对不同外径与壁厚的导管,设定锤效率 90%,考虑导管完全闭塞最不利的情况,分析导管应力。结果表明压应力较拉压力大,影响权重更大,因此分析中主要考虑压应力对导管破坏的影响表现。图 3 显示了导管打桩过程中压应力曲线,由图 3 可知,随着导管入泥深度的增加,应力逐渐减小。其中 $\Phi 914.4$ mm 导管(38.1 mm 壁厚)承受压应力最小,而 $\Phi 762$ mm 导管(25.4 mm 壁厚)承受压应力最大(239 MPa)。依据 API RP 2 A-WSD 进行校核,应力不能超过材料屈服强度的 80%~90%。为了使分析结果更保守,选取 X 56 材质,80% 的安全系数,则允许屈服强度即 $386 \text{ MPa} \times 80\% = 308 \text{ MPa}$ 。因此,导管不会发生屈曲破坏。

4.2 锤击能量分析

桩锤的输出能量是桩锤选型的关键参数,合适的输出能量有利于导管打桩作业^[20]。调整桩锤输出能量,分析导管在不同锤击能量输出效率下的应力,分析结果见表 2。由表 2 可知,锤击能量越大,导管的打桩动应力越大,最大打桩动应力出现在 100% 锤击能量输出效率情况下。 $\Phi 762$ mm 导管(25.4 mm 壁厚)在 17%~100% 锤效率下的打桩应力范围为 115~255 MPa,在屈服强度

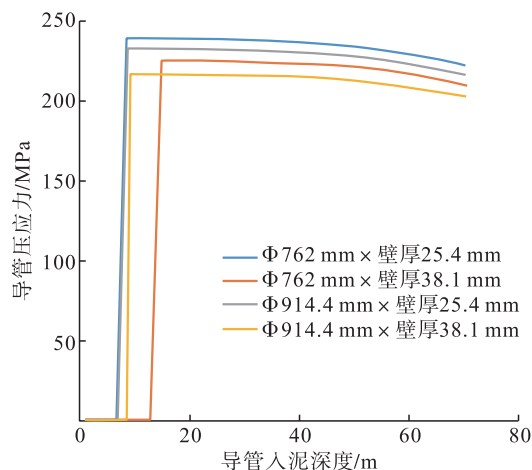


图 3 打桩过程导管压应力曲线图

Fig. 3 Conductor driving compress stress curve

范围内,满足强度要求。同时表明,桩锤能量可以将导管锤入至设计入泥深度且导管不会发生应力破坏。

表 2 导管在不同锤效率下的打桩过程压应力表

Tab. 2 Conductor compress stress with different hammer efficiency

| 入泥深度 / m | 外径 / mm | 壁厚 / mm | 不同桩锤输出效率下的导管最大应力 / MPa | | | |
|----------|---------|---------|------------------------|-----|-------|------|
| | | | 17% | 40% | 70% | 100% |
| 70 | 762 | 25.4 | 115 | 175 | 2 762 | 255 |
| 70 | 762 | 38.1 | 106 | 164 | 217 | 238 |
| 70 | 914.4 | 25.4 | 110 | 169 | 224 | 248 |
| 70 | 914.4 | 38.1 | 101 | 157 | 208 | 228 |

4.3 锤击数分析

为了分析导管在打桩过程是否会形成拒锤,假定导管为完全闭塞的极限工况,此时最不利于导管贯入,分析该情况下锤击能量效率 90% 的锤击数,分析结果见图 4。

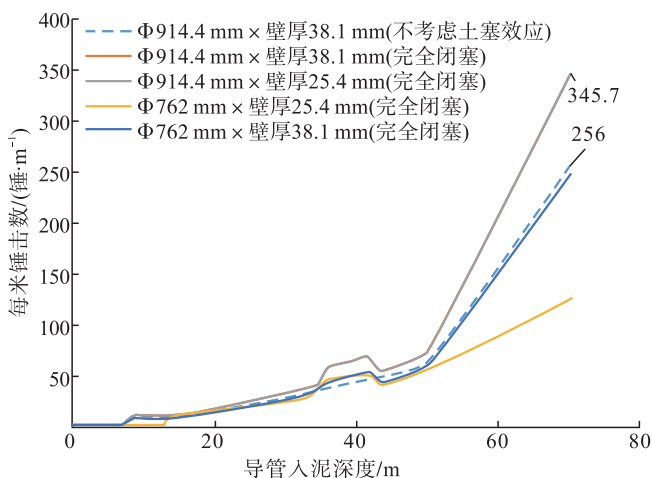


图 4 $\Phi 914.4$ mm 导管(38.1 mm 壁厚)贯入过程锤击数图

Fig. 4 $\Phi 914.4$ mm conductor(38.1 mm wall thickness) blow counts during penetration

由图4可知,导管完全闭塞情况较不考虑土塞效应情况的锤击数明显要大。而 $\Phi 914.4$ mm导管(38.1 mm壁厚)锤击数最大值,约为345锤/m,小于连续贯入拒锤条件250锤/0.25 m,不会发生拒锤。

对 $\Phi 914.4$ mm导管(25.4 mm壁厚)在不同能量下的锤击数与压应力进行分析,结果见图5~6。由图5可知,导管在锤效率50%时锤击数超过了连续贯入拒锤条件250锤/0.25 m,发生了拒锤。从图6可知,此时导管的最大应力值为172 MPa,仍满足强度要求。因此,在选定的桩锤与锤击参数下,南海深水典型导管锤至典型入泥深度70 m可避免拒锤。

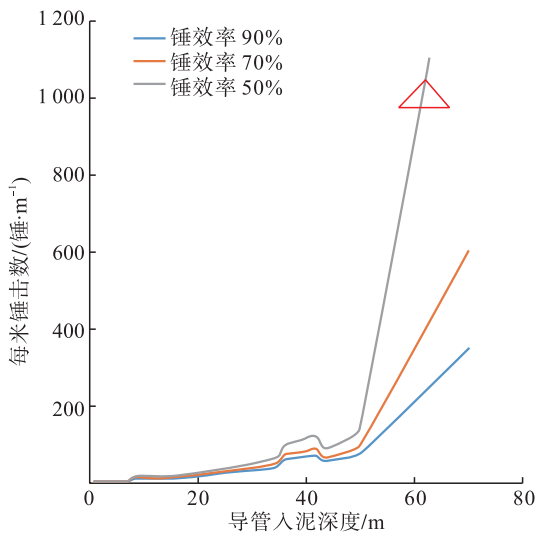


图5 $\Phi 914.4$ mm 导管(25.4 mm 壁厚)在不同锤效率下的锤击数与深度关系图

Fig. 5 $\Phi 914.4$ mm conductor(25.4 mm wall thickness) blow counts during penetration with different hammer efficiency

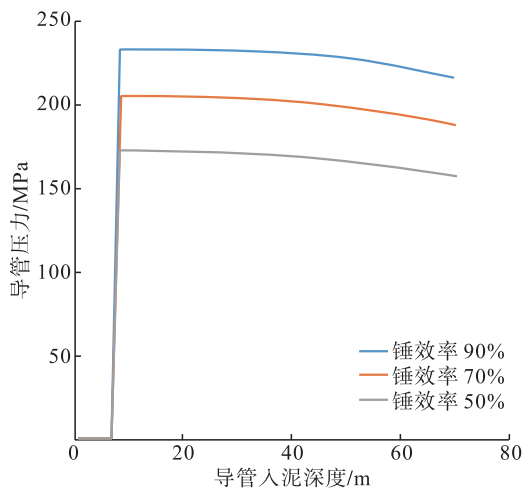


图6 $\Phi 914.4$ mm 导管(25.4 mm 壁厚)在不同锤效率下的压应力与深度关系图

Fig. 6 $\Phi 914.4$ mm conductor(25.4 mm wall thickness) compress stress during penetration with different hammer efficiency

5 结论

1) 通过类比南海深水土壤与已实施案例的土壤强度,南海深水区块通常泥线以下100 m内土壤不排水抗剪强度小于150 kPa,在土壤强度上适宜进行该技术的应用探索。

2) 分析中选定的桩锤为深水桩锤中能量级别最小的锤型,额定输出能量为270 kJ。根据分析,对于南海深水区块典型土质参数,该桩锤能将常用导管锤至典型入泥设计深度。因此,现有深水桩锤可以满足南海深水钻井导管打桩对锤击能量的要求。

3) 中国南海深水典型钻井导管的材料性能在设定的打桩工况下,能安全锤至典型入泥设计深度,不会发生应力破坏和拒锤。

4) 可打性分析涉及变量较多,如锤效率、导管参数、土资料及土体强度衰减效应等,而现场实际情况往往与设计存在偏差,对分析的可靠性造成影响。因此,还需要借鉴大量的实践数据进行反分析,确定合适的参数,优化计算模型,以提高分析可靠性。

参考文献:

- [1] 周守为. 南中国海深水开发的挑战与机遇[J]. 高科技与产业化, 2008(12): 20-23.
Zhou Shouwei. The Challenges and Solutions in South China Sea Deepwater Development [J]. High-Technology & Industrialization, 2008(12): 20-23.
- [2] 王友华, 王文海, 蒋兴迅. 南海深水钻井作业面临的挑战和对策[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(2): 50-55.
Wang Youhua, Wang Wenhai, Jiang Xingxun. South China Sea Deepwater Drilling Challenges and Solutions [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(2): 50-55.
- [3] 刘正礼, 胡伟杰. 南海深水钻井完井技术挑战及对策[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(1): 8-12.
Liu Zhengli, Hu Weijie. Countermeasures and Challenges of Deepwater Drilling and Completion Technology in South China Sea [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(1): 8-12.
- [4] Rocha L A S, Arduino E G, Gozzi D, et al. Overcoming Deep and Ultra Deepwater Drilling Challenges [C]//Offshore Technology Conference, 5-8 May, 2003, Houston, Texas, USA. Houston: OTC, 2003.
- [5] Rocha L A S, Arduino E G, Gozzi D S, et al. Overcoming Black Sea Ultra Deepwater Drilling Challenges [C]//Offshore Technology Conference, 2-5 May, 2011, Houston, Texas, USA. Houston: OTC, 2011.
- [6] Noort R V, Murray R, Wise J, et al. Conductor Pre-

- Installation, Deepwater Brazil [C]//Offshore Technology Conference, 4 - 7 May, 2009, Houston, Texas, USA. Houston: OTC, 2009.
- [7] 唐海雄, 罗俊丰, 叶吉华, 等. 南海超深水喷射钻井导管入泥深度设计方法[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(3): 147 - 151.
Tang Haixiong, Luo Junfeng, Ye Jihua, et al. Method of Design of Conductor Setting Depth for Ultra-deepwater Jetting Drilling in South China Sea [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33 (3): 147 - 151.
- [8] 刘正礼, 叶吉华, 田瑞瑞, 等. 南海深水表层导管水下打桩安装技术适应性分析[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 41 - 45.
Liu Zhengli, Ye Jihua, Tian Ruirui, et al. Adaptability of Underwater Tamping for Deepwater Drilling Conductor Installation in South China Sea [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42 (1): 41 - 45.
- [9] American Petroleum Institute. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design: API RP - 2 A-WSD [S]. 21st ed. Washington D. C.: American Petroleum Institute, 2000.
- [10] 中国海洋石油总公司钻完井专业标准化技术委员会. 海上开发井隔水导管设计和作业规范: Q/HS14009 - 2011 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2012: 8.
CNOOC Standardization Technical Committee of Drilling and Completion. Specifications for Design and Operation of Conductor of Offshore Development Well: Q/HS14009 - 2011 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012: 8.
- [11] Tokhi H, Ren G, Li J. An Application of Wave Equation Analysis Program to Pile Dynamic Formulae [J]. Geomechanics and Engineering, 2015, 9 (3): 345 - 360.
- [12] 林在贯. 波动方程用于桩基工程的现状[J]. 勘察科学技术, 1984(4): 1 - 6.
Lin Zaiguan. Application Status of Wave Equation in Pile Engineering [J]. Site Investigation Science and Technology, 1984 (4): 1 - 6.
- [13] Ding Xuanming, Liu Hanlong, Liu Jinyuan, et al. Wave Propagation in a Pipe Pile for Low-Strain Integrity Testing [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2011, 137 (9): 598 - 609.
- [14] 张大千, 谢朝忠, 吕从双, 等. MENCK 液压打桩锤工作原理[J]. 科技创新与应用, 2014(25): 135.
Zhang Daqian, Xie Chaozhong, Lü Congshuang, et al. MENCK Hydraulic Hammer Working Mechanism [J]. Technology Innovation and Application, 2014 (25): 135.
- [15] 徐荣强, 陈建兵, 刘正礼, 等. 喷射导管技术在深水钻井作业中的应用[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(3): 19 - 22.
Xu Rongqiang, Chen Jianbing, Liu Zhengli, et al. The Application of Jetting Technology in Deepwater Drilling [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35 (3): 19 - 22.
- [16] 刘和兴, 方满宗, 刘智勤, 等. 南海西部陵水区块超深水井喷射下导管技术[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(1): 10 - 16.
Liu Hexing, Fang Manzong, Liu Zhiqin, et al. Jetting-Based Conductor Running Technology Used in Ultra-Deep Water Well of Lingshui Block in the Western South China Sea [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45 (1): 10 - 16.
- [17] 陈彬, 刘正礼, 罗俊丰, 等. 南海深水钻井表层导管喷射作业实践[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(9): 109 - 112.
Chen Bin, Liu Zhengli, Luo Junfeng, et al. Deepwater Drilling Conductor Jetting Practices in South China Sea [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36 (9): 109 - 112.
- [18] 陆昭球, 高倚山, 宋铭栋. 关于开口钢管桩工作性状的几点认识[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 111 - 114.
Lu Shaoqiu, Gao Qishan, Song Mingdong. Some Knowledge About Working Performance Open-End Steel Pipe Pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21 (1): 111 - 114.
- [19] 李廷. 基桩高应变锤桩土相互作用机理及其模拟试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
Li Ting. The Study of Interaction Mechanism and Simulation of Hammer-Pile-Soil in High Strain Dynamic Testing [D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [20] 邓玉明, 刘正礼, 赵维青, 等. 深水钻井导管水下打桩锤选型分析[J]. 石油矿场机械, 2020, 49(5): 49 - 55.
Deng Yuming, Liu Zhengli, Zhao Weiqing, et al. Type Selection Analysis of Underwater Driving Hammer for Deepwater Drilling Conductors [J]. Oil Field Equipment, 2020, 49 (5): 49 - 55.