

文章编号: 1008-2336 (2021) 02-0074-05

表开快钻技术在西湖凹陷的应用研究

邱康¹, 黄召², 李基伟¹, 熊振宇¹, 王颖¹

(1. 中石化海洋石油工程有限公司, 上海 200120; 2. 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200030)

摘要: 随着西湖凹陷油气勘探向深层发展, 钻探深度不断增加, 在现有套管层次下, 需要增加表开钻井深度以缓解下部套管层次钻探压力。表开下部地层岩石可钻性差, 机械钻速低, 钻井周期长, 同时表开最大安全钻深难以确定限制了表开优快钻井技术。针对难题, 通过分析地层压力特性与坍塌周期, 确定了保持地层稳定与裸眼安全的最大钻深确定方法; 通过优化钻具组合、钻井液工艺与钻井参数, 提高表开下部地层机械钻速, 最终形成了一套适用于西湖凹陷表开快钻技术。现场实践表明, 该套技术实现了西湖凹陷表开最大安全钻深的突破, 有效提高表开下部地层机械钻速, 具有较好的推广价值。

关键词: 西湖凹陷; 最大安全钻深; 表开快钻; 机械钻速; 井身结构

中图分类号: TE242

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1008-2336.2021.02.074

Study on High Drilling Rate Technique of the Surface in Xihu Sag

QIU Kang¹, HUANG Zhao², LI Jiwei¹, XIONG Zhengyu¹, WANG Ying¹

(1. SINOPEC Offshore Oilfield Services Company, Shanghai 200120, China;

2. Shanghai Branch of CNOOC (China) Limited, Shanghai 200030, China)

Abstract: With the development of oil and gas exploration in the Xihu Sag to deep layers, the drilling depth continues to increase. Under the existing casing layers, it is necessary to increase the surface drilling depth to relieve the drilling pressure of the lower layers. With the poor rock drill-ability of the surface drilling, the low mechanical drilling speed, the long drilling cycle, and the difficulty to determine the maximum safe-drilling depth of the surface opening, the surface opening fast drilling technology was limited. To solve the problems, by analyzing the formation pressure characteristics and collapse periods, the determination method of the maximum drilling depth to maintain the stability of the formation and the safety of the open hole was determined; by optimizing the drilling tool assembly, drilling fluid technology and drilling parameters, the mechanical drilling speed of the formation under the surface drilling was increased, and finally a set of surface-opening fast drilling techniques suitable for Xihu Sag have been formed. Field practice shows that this set of technologies has achieved a breakthrough in the maximum safe drilling depth of the surface drilling in the Xihu Sag, effectively increasing the mechanical drilling speed of the lower surface drilling with good promotion value.

Keywords: Xihu Sag; maximum safe drilling depth; high speed surface drilling; mechanical drilling speed; well structure

西湖凹陷处于东海陆架盆地东部坳陷中北部, 属陆缘裂谷盆地, 水深范围 80~120 m, 主要勘探开发区域集中在保俶构造带、三潭深凹和中央背斜带。随着勘探开发的深入, 勘探目标由花港组下段及平湖组构造圈闭, 逐渐扩展到平湖组、宝石组岩性及岩性-构造复合圈闭^[1-3], 钻井深度越

越深, 探井最大井深达到 5 300 m, 开发井最大井深 7 296 m。西湖凹陷花港组以下压力体系复杂, 存在异常高压^[4-5], 井壁易垮塌^[6-8], 作业成本高, 降本增效需求迫切, 急需要对原井身结构进行优化, 其中表层快速钻井技术, 通过优化 444.5 mm 井眼最大钻井深度, 最大限度解放了下部各开次

收稿日期: 2020-09-08; 改回日期: 2020-12-01

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(编号: 2016ZX05027)

第一作者简介: 邱康, 1983年生, 博士, 高级工程师, 2011年毕业于中国石油大学(北京)油气井工程专业, 现主要从事海洋油气勘探开发的钻完井技术工作。E-mail: qiuk.shhy@sinopec.com。

深度,为井身结构简化、优化提供了空间;将444.5 mm井眼优化为406.4 mm井眼,提高机械钻速,有利于提高建井效率。“十二五”以来,表层钻井深度不断增加,表开井段钻深由2011年的1 500 m左右发展到2019年的2 400 m,其中,2019年A9井表开钻深最深为2 888 m,创下了历年表层井段钻深最深的纪录。表层快钻技术的核心是高机械钻速,技术难点是如何确定表层最大钻深,而这两点互相关联;只有高机械钻速才能快速穿过表层松软易垮塌井段,实现表开最大延伸,只有确定了表开最大允许钻深,才能确保钻井及固井安全。本文通过地层压力特性与地层坍塌周期,确定西湖凹陷表开最大钻探深度,同时结合已钻井经验,确定表层井段合理的钻井工艺参数,有效提高表开井段机械钻速,从而形成了一套适用于西湖凹陷的表开快钻技术,为东海西湖凹陷探井提速增效提供了技术支撑。

1 西湖凹陷表开最大钻深确定依据

西湖凹陷表开通常采用444.5 mm或406.4 mm井眼,最大钻井深度受到主客观多方面因素影响。主观因素包括:(1)地质资料获取要求,(2)钻井平台循环系统能力,(3)提速措施及机械钻速;客观因素包括:(1)地质岩性条件及浅层气分布情况,(2)储集层深度,(3)地层压力体系,(4)地层坍塌压力及坍塌周期。

结合目前东海西湖凹陷实际地层情况(包括岩性、可钻性、地层压力)、油气储集层分布情况、钻井平台作业能力以及地质资料获取要求等,在较浅的柳浪组~龙井组没有油气条件下,实际决定表开井眼最大钻井深度需满足地层稳定与裸眼安全作业时间两个关键条件。

1.1 满足地层稳定的最大钻深

由于采用开路钻进,钻井液为海水,无法调整钻井液密度和钻井液防塌性能。井眼,特别是泥岩段,在力学和化学作用下易失稳,并且有很明显的时间效应^[9-12]。因此地层坍塌压力不宜过高,在允许适度扩径的条件下,根据不同情况,原则上坍塌压力当量密度不宜超过1.1 g/cm³。

采用文献^[13]中保持井壁稳定的坍塌压力计算公式为:

$$P_{cr} = \frac{\eta(3\sigma_H - \sigma_h) - 2C_0A + \alpha P_P(A^2 - 1)}{(A^2 + \eta)H} \times 100 \quad (1)$$

式中: $A = ctg\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)$; ϕ 为岩石的内摩擦角,°; H 为井深,m; P_{cr} 为坍塌压力当量密度,g/cm³; C_0 为岩石的黏聚力,MPa; σ_H 为水平最大地应力,MPa; σ_h 为水平最小地应力,MPa; P_P 为地层孔隙压力,MPa; α 为有效应力系数; η 为应力非线性修正系数。

保持表开井眼井壁稳定的最大钻井深度计算公式为:

$$H_C = \frac{\eta(3\sigma_H - \sigma_h) - 2C_0A + \alpha P_P(A^2 - 1)}{P_{cra}(A^2 + 1)} \times 100 \quad (2)$$

式中: H_C 为保持表开地层稳定的最大钻井深度,m; P_{cra} 为最大允许坍塌压力当量密度,g/cm³。

1.2 满足裸眼安全时间的最大钻深

由于海水钻井,钻井液性能无法维护和保证,钻井液几乎没有防塌性能,因此地层裸眼稳定时间会很短,需要在安全裸眼时间内完成钻进、循环垫浆、起钻、下套管等作业,防止严重井壁垮塌导致起钻、下套管受阻。

采用文献^[14]中泥岩水化模型计算安全裸眼时间 T ,假设表层快速钻井技术能够实现综合作业速度 V (表开井眼新钻进尺/钻开新地层至下339.7 mm套管结束的时间),可以得到基于地层裸眼稳定时间最大钻井深度:

$$H_T = T \times V \quad (3)$$

2 西湖凹陷表开快钻提速工艺技术

通过多年的摸索,西湖凹陷逐步形成了包括钻头、钻具组合、钻井液及钻井参数等的表开提高机械钻速的钻井工艺。

2.1 钻头及钻具组合优选

西湖凹陷表开井眼可能钻遇地层以稀松砂岩或软泥岩为主,整体可钻性较好,但三潭组、玉泉组含砂砾岩,且夹层较多,易造成钻头切削齿的冲击性破坏。综合考虑机械钻速要求及钻头抗冲击性,表开井眼优选采用了6刀翼、19 mm切削齿、双排齿PDC钻头,具有较强的抗冲击性和攻击性,能够实现表开井眼一趟钻快速完成。

表开井段采用PDC+马达钻具组合:444.5 mm

(406.4 mm) PDC 钻头+244.5 mm 马达 (0.75°) + 196 mm 钻铤 1 根+扶正器+钻铤+震击器+加重钻杆 14 根, 为典型的钟摆钻具组合, 具有较好的防斜打直的效果。在马达选择上, 选用等壁厚马达或者震荡马达。

2.2 钻井液工艺技术

表层井段地层成岩性差, 采用海水钻进的方式, 易引起井壁失稳, 因此, 表层作业的关键就是要快速钻进, 尽量减少井眼浸泡时间, 钻达中完井深后, 根据钻遇层位岩性、水化分散情况, 选取合理的密度快速垫稠浆, 保持井眼稳定。目前表层井段钻井液采用海水+膨润土浆, 开钻前按照以下配方: 钻井水+3 kg/m³ NaOH+3 kg/m³ Na₂CO₃+120 kg/m³ 膨润土^[15]。

钻井液配置思路:

(1) 开钻前, 配置预水化搬土浆 (稠化时间需足够, 保证性能)。

(2) 钻进中, 每两柱扫一次稠浆, 每次 10~15 m³ 稠浆, 中完后扫 30~50 m³ 稠般土浆循环, 携砂, 钻进期间根据扭矩及泵压变化调整扫浆次数及频率。建议尽量采用大排量钻进, 维持较高的环空返速, 接立柱前上下多划眼 2~3 次及时用稠膨润土浆清扫井眼, 提高泥浆携岩能力和井眼净化能力; 起钻前井底垫入合理密度的稠膨润土浆。

(3) 钻进至中完深度后用 25 m³ 稠膨润土浆清扫井眼, 循环结束后, 基于各井段坍塌压力情况分段垫浆, 井底垫较重的聚合物搬土浆 (密度 1.1~1.13 g/cm³, 黏度大于 100 mPa·s), 随着井深减小, 逐渐降低聚合物搬土浆的密度, 要求稠浆垫满整个裸眼。

(4) 若所钻层位有不整合面, 存在井漏风险。如果井口出现失返, 则可分几次泵入稠般土浆; 如若井口仍失返, 则往稠膨润土浆中加入 10 kg/m³ PF-SEAL 和 10 kg/m³ PF-SZDL, 视情况分几次泵入地层, 提高疏松地层的承压能力。

2.3 钻井参数

水力参数的优化很关键, 排量过小则钻井液携岩能力差, 不能有效清洁井眼, 机械钻速降低, 因此, 需要合理确定排量, 提高井眼清洁度, 增加机械钻速, 原则上排量不小于 4 500 L/min。

根据不同地层、井段、井径及钻头类型, 选

择合理的钻压取值范围: 采用钻压 80~150 kN, 采用复合钻进, 顶驱转速以 90~110 rpm 为宜。

3 西湖凹陷 X 区块现场应用效果

3.1 X 区块表层快钻最大钻深

表开快钻技术在西湖凹陷 X 区块进行了应用。按照最大允许坍塌压力 1.05 g/cm³ 原则, 武云亭构造仅考虑满足地层稳定时, 见图 1, 表开井眼最大钻井深度 2 500~2 980 m 之间, 中完地层为龙井组; 此深度以下地层坍塌压力逐步升高, 需要较高钻井液密度、较好钻井液性能维护井壁稳定, 已经不适宜海水开路钻进。

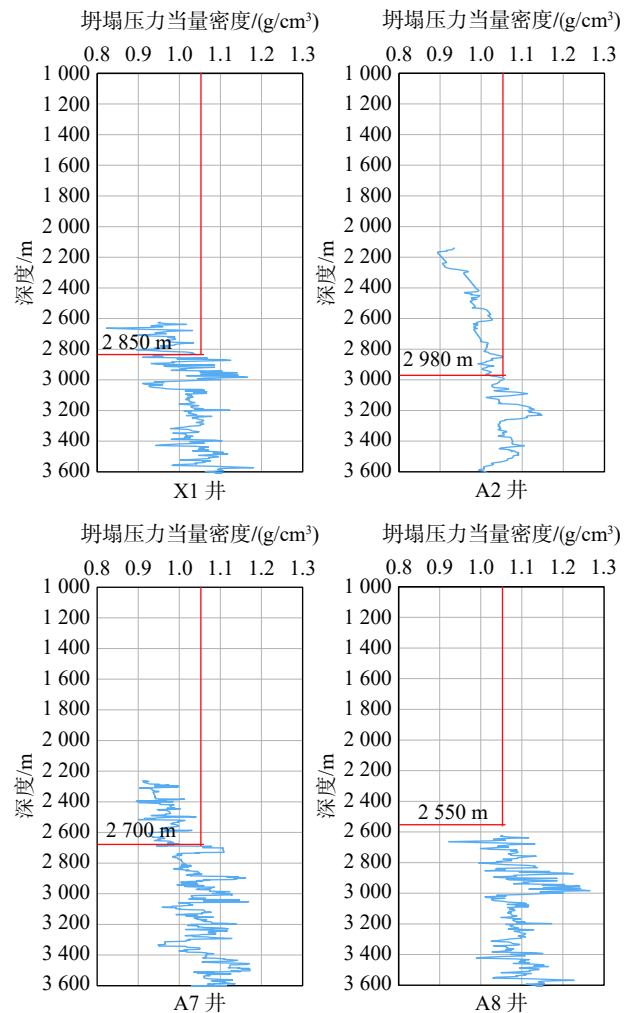


图 1 X 区块部分已钻井坍塌压力
Fig. 1 Collapse pressure of part of drilled wells in block X

按照 1.2 节的方法计算了表开井眼安全裸露时间, 结果见图 2, 按照不同扩径率看, 安全裸露时

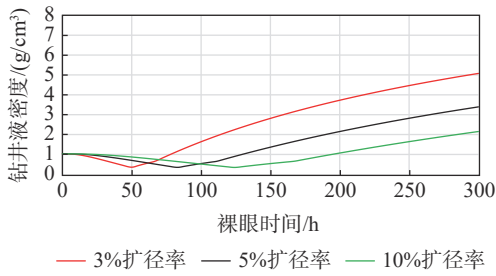


图 2 X 区块表开井眼安全裸露时间

Fig. 2 The safe exposure time of the surface drilling of block X

间为 80~120 h, 在安全裸露时间通常不会发生严重的井壁失稳现象。近三年表开井眼 (444.5 mm 或 406.4 mm) 进尺和裸眼时间 (裸眼时间为表开井眼钻开新地层至下 339.7 mm 套管结束所用的时间), 见表 1, 从统计结果来看, 目前西湖凹陷表开井眼钻井技术经过不断优化, 单位综合作业时间内进尺已经接近 40 m/h, 按照图 2 计算时间下限, 预留 8 h 安全余量, 可以得出目前钻井工艺下, 安全最大钻井深度为 2 900 m。

对比实钻情况, 见表 2, X 区块表开井眼

表 1 X 区块表开井眼进尺及综合作业时间

Table 1 Surface drilling footage and general operation time in block X

年份	井号	表开进尺/m	综合作业时间/h	单位综合时间进尺/(m/h)
2017年	A1	2 211.12	65	34.02
	A2	1 928.66	59.25	32.55
2018年	A3	029.5	66	30.75
	A4	2 001	58.75	34.06
	A5	1 986.4	51.5	38.57
	A6	2 153	54.75	39.32
2019年	A7	2 046	67.5	30.31
	A8	2 110	57.5	36.70
	A9	2 683	71.25	37.66

(444.5 mm 或 406.4 mm) 实际钻井深度均小于按照坍塌压力计算的最大钻井深度, 已钻井均未出现严重起下钻、下套管受阻问题, 表明按照各标准确定的表开井眼最大钻井深度有较好的参考价值。

表 2 X 区块已钻井各开次钻井深度

Table 2 Drilling depths of drilled wells in block X

井眼/套管尺寸/mm	下深/m				
	X1井	A2井	A7井	A8井	A9井
914.4/762	180.3/180.1	195/193.36	211/209.80	200/200	200/200
660.4/508	373.4/370.9	\	\	\	\
444.5(406.4)/339.7	1 788/1 783	2 122.6/2 117.0	2 257/2 257	2 310/2 310	2 888/2 888
311.2/244.5	3 488/3 480	3 840/2 833.41	3 765/2 765	3 836/3 836	3 552/3 552
215.9(212.7)/177.8	4 301/3 896	4 670/4 670	4 790/	4 640/4 636	4 730/

3.2 X 区块表层快钻技术应用效果

X 区块四口已钻井钻具组合为: 444.5 mm (406.4 mm) PDC 钻头+244.5 mm 马达+196 mm 钻铤×1+444.5 mm 扶正器+196 mm 钻铤×7+

196 mm (挠性接头+震击器)+139.7 mm 加重钻杆。从 A7 井开始进行了井身结构的优化, 444.5 mm 井眼优化为 406.4 mm 井眼。A7 井与 A8 井表层所钻井深相近, 由表 3 可知, 相比 A7 井 444.5 mm

表 3 X 区块已钻井机械钻速对比

Table 3 Comparison of drilling speed in block X

井名	钻井方式	井段/m	进尺/m	钻时/h	机械钻速/(m·h ⁻¹)	钻头评价
A2	PDC+螺杆马达	194~2 166.66	1 928.66	18.20	105.97	2-3-WT-A-X-1/16-CT-TD
A7	PDC+螺杆马达	211~2 257	2046	25.39	80.58	2-4-CT-A-X-1/16-BT-TD
A8	PDC+螺杆马达	200~2 310	2 110	15.80	133.54	2-3-CT-A-X-I-BT-TD
A9	PDC+螺杆马达	205~2 888	2 683	25.07	107.02	2-2-WT-A-X-I-BT-TD

井段的钻进速度，A8井406.4 mm井段的平均机械钻速最高提高了65.72%，井眼尺寸的减小有效提高了机械钻速。A9井表层钻进至2 888 m，创下东海表层井段钻深最深的纪录。

统计A2井、A7井和A8井三口井钻到A9井表层所钻深度的平均机械钻速情况，见图3、表4。从图中可以看出，表层井段通过优化井眼尺寸与钻深，提速效果明显，A9井比A8井提高了20.23%，A9井比A2井提高了67.14%，纯钻时间最大节省了19.17 h。

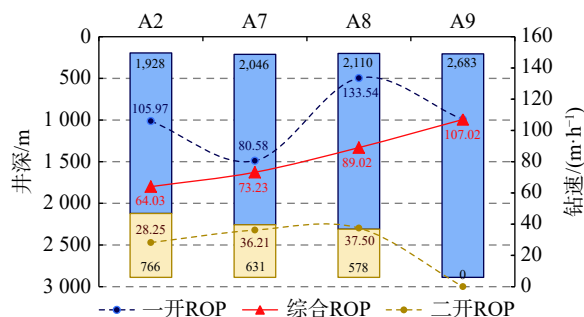


图3 X区块各井表层井段钻速情况对比

Fig. 3 Comparison of drilling speed of surface intervals of each well in Block X

表4 X区块表层钻速情况分析

Table 4 Analysis of surface drilling rate in block X

井号	二开						三开				统一深度		
	钻头尺寸/mm	入深/m	出深/m	进尺/m	钻时	机械钻速/(m/h)	钻深/m	进尺/m	钻时/h	ROP	进尺/m	钻时/h	机械钻速/(m/h)
A2	444.5	194	2 122	1 928	18.2	105.97	3 027	904.34	32.01	28.25	2 833	44.24	64.03
A7	444.5	211	2 257	2 046	25.39	80.58	3 104	847	23.39	36.21	2 893	39.51	73.23
A8	406.4	200	2 310	2 110	15.8	133.54	2 925	615	16.4	37.5	2 725	30.61	89.01
A9	406.4	205	2 888	2 683	25.07	107.02	—	—	—	—	2 683	25.07	107.02

4 结论

本文建立了表开快钻最大钻深的计算方法，提出了包括提速工具、钻井液等适用于西湖表开快钻工艺技术，通过在X区块的应用表明：

(1) 表开快速钻井最大钻井深度计算方法能够为表开快钻技术提供最大钻深的设计依据；在实际施工过程中，最大钻深不仅依赖于井壁稳定所需的坍塌压力和安全裸眼时间，也取决于综合作业速度，在提高机械钻速的同时，要做好现场操作工艺的优化，提高非钻进时的时效。

(2) 目前以钻头选型、防斜打直快速钻井钻具组合、钻井参数、钻井液等为核心的表层快速钻井技术，有效地提高了西湖凹陷表层的建井效率，为井身结构进一步优化创造了空间，适用于西湖凹陷探井作业，并有较好的推广价值。

参考文献：

[1] 高伟中, 田超, 赵洪, 等. 西湖凹陷平湖斜坡带非构造油气藏勘探潜力探讨[J]. 海洋石油, 2015, 35(1): 22-26, 57.
 [2] 张建培, 余逸凡, 张田, 等. 东海西湖凹陷深盆气勘探前景探讨[J]. 中国海上油气, 2013, 25(2): 24-29, 35.
 [3] 陶士振, 邹才能. 东海盆地西湖凹陷天然气成藏及分布规律[J].

石油勘探与开发, 2005, 32(4): 103-110.
 [4] 杨彩虹, 孙鹏, 田超, 等. 东海盆地西湖凹陷平湖组异常高压分布及形成机制探讨[J]. 海洋石油, 2013, 33(3): 8-12.
 [5] 侯志强, 张书平, 李军, 等. 西湖凹陷中部西斜坡地区超压成因机制[J]. 石油学报, 2019, 40(9): 1059-1068, 1124.
 [6] 孙东征, 张海山, 段飞飞, 等. 西湖凹陷中央洼陷区下部地层岩石力学特征与可钻性实验研究[J]. 中国海上油气, 2016, 28(1): 93-97.
 [7] 邱康. 东海X构造煤系地层钻井复杂情况分析及其对策研究[J]. 海洋石油, 2013, 33(1): 81-85, 99.
 [8] 张海山, 宫吉泽. 东海深部致密储层主要钻井技术及其应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(1): 39-44.
 [9] 王中华. 钻井液性能及井壁稳定问题的几点认识[J]. 断块油气田, 2009, 16(1): 89-91.
 [10] 王倩, 王刚, 蒋宏伟, 等. 泥页岩井壁稳定耦合研究[J]. 断块油气田, 2012, 19(4): 517-521.
 [11] 杨志彬, 胡永章, 钟敬敏, 等. 工程地质因素对钻井提速的影响[J]. 断块油气田, 2010, 17(3): 363-365.
 [12] 向朝纲, 陈俊斌, 杨刚. 钻井液浸泡作用下脆性页岩强度特征实验[J]. 断块油气田, 2018, 25(6): 803-806.
 [13] 陈勉, 金衍, 张广清. 石油工程岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
 [14] 黄荣樽, 陈勉, 邓金根, 等. 泥页岩井壁稳定力学与化学的耦合研究[J]. 钻井液与完井液, 1995, 12(3): 18-24, 28.
 [15] 黄召, 王喜杰, 廖江东. 东海开发井表层钻井作业新方法[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(9): 143-146.