

# 也门 71 区块钻井防塌技术方案及应用

刘友义<sup>1,2</sup> 雷娅丽<sup>3</sup> 王长生<sup>1</sup> 崔卫华<sup>1</sup>

(1. 中国石化国际石油勘探开发有限公司, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 3. 中国石化河南油田分公司石油工程技术研究院, 河南 南阳 473132)

**摘要:**也门 71 区块是中国石化国际石油勘探开发有限公司在中东地区的重点勘探区块之一,目前已完钻 2 口探井并获得了良好的油气发现。针对该区块在钻探过程中出现的井壁失稳、井眼垮塌等井下故障,根据井壁失稳的强度判别准则,分析了不同井段的工程特点、地质特点和井眼垮塌原因,在全井优化设计的基础上,从井身结构、钻井工艺和钻井液体系等方面提出了一套综合的防塌技术方案。该方案在也门 71 区块第三口探井——Judayaah-1 井的钻井设计和钻井施工中进行了应用,结果表明,该井井下故障明显减少,避免了井下事故,提高了钻井效率,取得了较好的经济效益。

**关键词:**井眼稳定; 井塌; 井身结构; 钻井液; 防塌; 也门 71 区块

中图分类号: TE28 文献标识码: B 文章编号: 1001-0890(2010)05-0042-04

## Block 71 of Yemen Formation Collapse Prevention Technique and Its Application

Liu Youyi<sup>1,2</sup> Lei Yali<sup>3</sup> Wang Changsheng<sup>1</sup> Cui Weihua<sup>1</sup>

(1. Sinopec International Petroleum Exploration and Production Corporation, Beijing, 100083, China; 2. School of Engineering & Technology, China University of Geosciences, Beijing, 100083, China; 3. Petroleum Engineering Technology Institute, Henan Oil Field, Sinopec, Nanyang, Henan, 473132, China)

**Abstract:** Block 71 is one of the key exploration blocks of SIPC in Yemen. Two exploration wells have been drilled and good gas & oil discovery is obtained. For borehole instability, borehole collapse, and other complications, the engineering characteristics of various well sections, geological characteristics and reasons for borehole collapse were analyzed. Based on whole well optimization, a comprehensive program for collapse prevention was proposed in terms of well structure, drilling technology and drilling fluid system, etc. This technique was used in drilling the 3rd exploration well—Judayaah-1, in Block 71. The application results show that this technology significantly reduced downhole complexity, avoided drilling accident, improved drilling efficiency and achieved good economical benefit.

**Key words:** hole stability; hole caving; casing program; drilling fluid; hole sloughing prevention; Block 71 in Yemen

井壁失稳是一个涉及多种因素的复杂问题。当井内液柱压力小于地层坍塌压力时,将发生井壁坍塌或缩径<sup>[1]</sup>。实钻过程中,处理井壁失稳主要从力学稳定和化学防塌两方面着手,并依据当地的地质条件、施工条件和技术水平采取相应技术措施。力学因素是井眼稳定的前提和基础,化学方法能在很大程度上改变和强化这一前提和基础,并与力学因素协同作用起到防塌的效果<sup>[2]</sup>。

也门 71 区块是中国石化国际石油勘探开发有限公司(SIPC)在也门的 3 个勘探区块之一,该区块最主要的钻井技术难点,就是由井壁失稳造成的井

收稿日期:2010-06-02; 改回日期:2010-07-31

作者简介:刘友义(1964—),男,四川中江人,1986 年毕业于重庆大学矿山工程专业,在读博士研究生,高级工程师,主要从事油气井钻井工程技术的研究及应用工作。

联系方式:(010)82318786, youyiliu@sipc.cn

眼垮塌、卡钻等井下故障或事故,并导致井身结构改变、钻井周期延长、钻井成本超出预算,从而影响到整个区块的勘探部署和进程。为此,笔者通过分析研究该区块的情况,提出了一套综合防塌技术方案,在Judayaah-1井的现场应用结果表明,该技术方案能有效减少井下故障,提高钻井效率。

## 1 井壁失稳的强度判别准则

影响井壁稳定性的力学因素主要有地应力、地层孔隙压力和地层强度等<sup>[3]</sup>。按照忽略中间主应力的Mohr-Conlnmb剪切破坏理论,作用在井壁岩石最大剪切应力平面上的剪切应力和有效法向应力分别为:

$$\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \quad (1)$$

$$\sigma_n = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 - p_s \quad (2)$$

式中: $\tau_{\max}$ 为最大剪切应力, MPa;  $\sigma_n$ 为作用在最大剪切应力平面上的有效法向应力, MPa;  $\sigma_1$ 为作用在井壁岩石上的最大主应力, MPa;  $\sigma_3$ 为作用在井壁岩石上的最小主应力, MPa;  $\sigma_2$ 为中间主应力, MPa;  $p_s$ 为地层孔隙压力, MPa。

考虑中间主应力均方根(广义剪切应力)和有效法向应力:

$$J_2^{0.5} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{6}} \quad (3)$$

$$J_1 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} - p_s \quad (4)$$

式中: $J_2^{0.5}$ 为剪切应力均方根, MPa;  $J_1$ 为有效法向应力, MPa。

最后,根据直线型剪切强度公式,计算井壁岩石的剪切强度,即:

$$\tau = C_h + \sigma_n \tan \phi \quad (5)$$

$$C_h = 1/2 \sqrt{\sigma_c \sigma_t} \quad (6)$$

式中: $\tau$ 为岩石的剪切强度, MPa;  $C_h$ 为岩石的内聚力, MPa;  $\phi$ 为储层岩石的内摩擦角, (°);  $\sigma_c$ 为岩石的单轴抗压强度, MPa;  $\sigma_t$ 为岩石的单轴抗拉强度, MPa。

基于井壁应力、主应力的计算结果,利用强度准则,就可判别钻井过程中的井壁稳定性<sup>[4-5]</sup>。若由式(5)算出的岩石剪切强度  $\tau$  大于由式(1)计算出的井壁岩石最大剪切应力  $\tau_{\max}$ , 即  $\tau > \tau_{\max}$ , 表明井眼稳定;反之,将会发生井眼力学不稳定的情况,即可能发生井眼坍塌。因此,在钻井设计和施工中,应在综合分析各种地质与工程因素的前提下,结合力学分

析结果确定合理的井身结构、钻井措施和钻井液体系与性能,采取综合性防塌技术措施,才能取得事半功倍的效果<sup>[6]</sup>。

## 2 上部井段防塌技术方案

### 2.1 上部井段地层特点

也门71区块上部井段主要有2种情况:一是上部井段有第三系乌姆拉杜玛组地层,该地层虽然厚度小于100 m,但孔隙裂缝发育,易发生严重井漏而导致出现井下复杂情况无法正常钻进(如南部的Al Qarn-1井);二是乌姆拉杜玛组地层剥蚀严重,主要为穆卡拉组河流相碎屑岩,该地层厚度变化大(超过600 m),以砂岩为主,下部夹少量泥岩(如北部的Rabaa-1井)。

Al Qarn-1井为国外石油公司早期在该区块所钻的一口探井,钻至井深53 m时便发生失返性井漏,常规堵漏及打水泥浆堵漏等均无效,被迫改为泡沫钻井,但在钻进过程中还发生了卡钻事故,导致钻井成本大幅增加。

### 2.2 上部井段防塌措施

在上述第一种情况下,重点考虑发生严重井漏而导致的井塌、卡钻等井下复杂情况和事故。乌姆拉杜玛组地层为一套浅海相碳酸盐岩沉积,主要以灰白色隐晶质灰岩为主,夹白云质灰岩。从岩石力学方面分析,该地层稳定性较好;另外,在发生失返性井漏的情况下,因漏层的位置较高(静液面在80 m以上),对下部的穆卡拉组地层的稳定性不会造成严重影响。因此在钻井设计和施工中,可采用盲钻技术方案。

第二种情况下,钻井设计和施工均可按常规方法正常进行,主要是以低密度优质膨润土聚合物钻井液快速钻完上部井段未固结砂岩和渗漏性砂岩,进入下部泥岩地层后下套管固井封隔,防塌技术方案相对简单。

### 2.3 盲钻方案的效果分析

Judayaah-1井上部井段在钻井设计和施工中,均采用了盲钻技术方案,盲钻至下部穆卡拉组的泥岩后下套管固井封隔。该井一开φ660.4 mm井段钻至井深68.1 m发生井漏并完全失返(钻井液密度1.03 kg/L),估算漏速为180 m<sup>3</sup>/h以上,从井深

68.1 m 开始盲钻至一开中完井深 350.0 m, 盲钻井段的平均机械钻速为 3.2 m/h, 比非盲钻井段的平均机械钻速 1.63 m/h 提高近 100%, 节约钻井时间近 2 d, 并且在不堵漏的情况下安全顺利地完成了下套管和固井作业, 保守估计可节约堵漏时间 3 d。实践表明, 该技术方案与各种堵漏、打水泥塞、充气钻井或者在井身结构上另外增加一层防漏技术套管等方案相比, 经济合理、简单易行。

### 3 易塌井段防塌技术方案

#### 3.1 井塌复杂情况分析

也门 71 区块白垩系的 Saar 组、Nayfa 组地层井壁稳定性差, 其中 Saar 组地层又是全井防塌的关键。Saar 组地层为一套浅海-滨浅海相灰岩和泥灰岩夹泥页岩地层, 纵向厚度较大, 钻进过程中井下复杂情况较多。一方面, 其中的泥页岩具有烃源岩的属性, 导致地层孔隙压力变化较大、井控风险增加; 另一方面, 中上部存在多段破碎性泥页岩和部分软泥岩, 钻井过程中容易发生漏失、垮塌、泥包和卡钻等井下故障。

国外石油公司在邻区 QQ2 井的钻探过程中, 在 Saar 组地层遇高压气侵, 加重钻井液压井时发生井漏, 导致井塌、卡钻。SIPC 也门分公司 2009 年在该区块北部所钻的 Rabaa-1 井, 在 Saar 组地层也发生井塌、卡钻, 被迫填井侧钻, 损失钻井时间 11.5 d, 报废进尺 347 m (2 233~2 580 m), 打乱了后续定向钻井、测井、下套管固井等的作业计划。

#### 3.2 地层稳定性分析

邻井实钻情况表明, 白垩系 Saar 组泥页岩地层是导致出现井下故障的主要因素, 钻井液密度过高易漏、过低易塌。利用测井资料通过软件模拟分析, 该区块 Saar 组地层的稳定性差异较大, 灰岩地层相对较为稳定, 泥页岩稳定性较差。按照井壁稳定的强度判别准则, 理论上只要钻井液密度达到 1.20~1.25 kg/m<sup>3</sup> 便不会发生井眼力学失稳。但因该地层中存在多段破碎性泥页岩, 井眼形成后如果长时间受到钻井液滤液的影响, 泥页岩的强度减弱、稳定性变差, 在同样的钻井液密度下, 便可能发生井眼力学失稳, 即可能发生井眼坍塌等<sup>[6~7]</sup>。前期钻探的 Rabaa-1 井, 对 Saar 组地层的井眼失稳认识不足,  $\phi 339.7$  mm 套管仅下至井深 1 483.10 m, 难以满足

防塌要求。

#### 3.3 防塌技术措施

针对易塌地层的特点, 采用力学稳定和化学防塌的协同防塌技术方案, 在保证力学稳定的同时, 强化钻井液的防塌作用<sup>[6~7]</sup>。具体措施包括在钻井设计和施工中, 一方面确定合理的井身结构和套管下深, 将低密度下易垮塌、高密度下易漏失的复杂地层有效封隔; 另一方面优化钻井液体系和性能, 并根据实钻情况及时采取相应措施, 提高钻井液对破碎性泥页岩的封堵能力和抑制性。

Judayaah-1 井在钻井设计与施工中, 采用了上述防塌技术方案, 将  $\phi 339.7$  mm 技术套管的下深增加, 封隔井深 1 800 m 以浅的易塌地层、破碎性泥页岩地层; 同时, 钻井密度保持在 1.20~1.25 kg/L 之间, 并用密度为 1.25~1.45 kg/L 的钻井液进行三开钻进, 既能避免发生井眼力学失稳和井控的风险, 又能防止压漏地层引发更大风险。

在化学防塌方面, 设计并采用了 KCl 聚合物钻井液体系 (KCl/PHPA Polymer), 并配合使用页岩抑制剂 (Kla-Stop) 等强化钻井液的抑制性, 使用磺化沥青增强钻井液的封堵防塌能力, 钻井液的 API 滤失量控制在 5 mL 左右, KCl 加量控制在 5%~6%, 磺化沥青的质量浓度保持在 22~25 kg/m<sup>3</sup>, PHPA 的质量浓度保持在 0.25~0.42 kg/m<sup>3</sup>。

### 4 全井优化设计方案及应用

全井优化设计方案以地质工程综合分析和井下故障预测为基础, 以优快钻井为目的, 为各项防塌措施的实施提供技术保障, 是综合防塌技术方案的前提和基础, 它包括井身结构优化、钻井液体系优选和性能优化、钻井工艺优化等。

Judayaah-1 井的全井优化方案, 就是综合权衡  $\phi 444.5$  mm 井段的钻井难度,  $\phi 339.7$  mm 技术套管下至 Saar 组地层的压力过渡带, 以封隔 Saar 组上部的易漏地层和其下部的不稳定泥页岩地层, 保证  $\phi 311.1$  mm 井段能在异常高压层内安全钻进, 以较高的钻井液密度满足长裸眼的防塌要求;  $\phi 244.5$  mm 技术套管下至 Shuqra 组高压层的底部, 防止钻进 Kulan 组地层的低压风化壳发生井漏进而井塌, 保证  $\phi 215.9$  mm 井段能在裂缝性低压地层和花岗岩基底地层内安全钻进, 并充分利用  $\phi 215.9$  mm 钻头的技术优势解决花岗岩地层可钻性差的问题。

钻井液体系方面,采用常规膨润土浆配合盲钻以解决严重漏失情况下的钻井液消耗和成本问题,采用KCl/Kla-Stop聚合物钻井液体系钻中上部的复杂地层并以不同的密度和配方解决防塌、防卡的问题,采用低密度无固相Duo-Vis钻井液体系钻下部的裂缝性低压油气层以解决储层保护及漏失问题。

实践表明,采用全井优化设计和力学-化学协同防塌技术方案,钻井过程安全顺利,井眼失稳、垮塌、卡钻等井下故障得到控制,提高钻速、降低钻井成本的效果明显。

## 5 结论与认识

1) 也门71区块上部井段可采用盲钻技术方案代替停钻堵漏、充气钻井、增加套管层次等措施,能显著提高钻井速度,降低钻井成本。

2) Saar组地层的中上部存在多段破碎性泥页岩,钻井过程中容易发生垮塌、卡钻等井下故障,是全井防塌的关键和重点,必须采取力学稳定与化学防塌的综合协同防塌技术方案。

3) 全井优化设计方案是综合防塌技术方案的前提和基础,在全井优化的基础上,采取力学稳定与化学防塌的配套措施,可有效减少或避免井下故障、提高钻井效率。

## 参 考 文 献

[1] 李天太,高德利.井壁稳定性技术研究及其在呼图壁地区的应用[J].西安石油学院学报:自然科学版,2002,17(3):23-26.

Li Tiantai, Gao Deli. Study on the stability of sidewall and its

application in Kelamayi Oil Field[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute; Natural Sciences Edition, 2002, 17(3): 23-26.

- [2] 王京印,程远方,赵益忠,等.多因素耦合钻井液密度窗口随钻监测技术研究与应用[J].石油钻探技术,2007,35(6):66-68.  
Wang Jingyin, Cheng Yuanfang, Zhao Yizhong, et al. Research and application of mud weight monitoring while drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(6): 66-68.
- [3] 蔡宝华,邓金根,闫伟.层理性泥页岩地层井壁坍塌控制方法研究[J].石油钻探技术,2010,38(1):56-59.  
Yu Baohua, Deng Jinggen, Yan Wei. Borehole sloughing control in shale formations[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(1): 56-59.
- [4] 汪金林,石晓兵,陈平,等.欠平衡钻井欠压差的确定方法研究[J].钻采工艺,2002,25(1):11-13.  
Wang Jinlin, Shi Xiaobing, Chen Ping, et al. Research on the method of determining negative differential pressure in underbalanced drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2002, 25(1): 11-13.
- [5] McLamore R T, Gray K E. A strength criterion for anisotropic rocks based upon experimental observations[R]. SPE 1721, 1967.
- [6] 陈丽萍,张军,温银武,等.中江地区井壁失稳机理及对策研究[J].天然气工业,2005,25(12):100-102.  
Chen Liping, Zhang Jun, Wen Yinwu, et al. Mechanism and countermeasures of borehole instability in Zhongjiang area[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(12): 100-102.
- [7] 郭小勇.火成岩地层井壁稳定技术研究进展[J].重庆科技学院学报:自然科学版,2009,11(6):42-44.  
Guo Xiaoyong. Advances of the igneous wellbore stability technique[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2009, 11(6): 42-44.
- [8] Yu M, Chen G, Chenevert M E, et al. Chemical and thermal effects on wellbore stability of shale formations [R]. SPE 71366, 2001.

## 欢迎订阅 2011 年《油气地质与采收率》

《油气地质与采收率》是经国家新闻出版总署批准,由中国石油化工集团公司主管,胜利油田分公司主办,面向国内外公开发行的国家级石油类技术期刊。中国标准连续出版物号:CN37-1359/TE,国际标准连续出版物号:ISSN1009-9603。该刊为山东省优秀期刊、华东地区优秀期刊、中国石油和化工行业优秀期刊、中国石化集团公司核心科技期刊、中文核心期刊和中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)。

《油气地质与采收率》以讨论“油气勘探开发新理论、新方法”和“提高油气采收率技术”为主题,报道内容涵盖了油田勘探开发主业的各个专业。设有“油气地质”、“勘探技术”、“油气藏工程”、“油气采收率”、“油气钻采工程”、“油气藏经营管理”、“专家论坛”等栏目。

《油气地质与采收率》为双月刊,大16开本,110页,逢单月25日出版,每期定价25元,全年150元。欢迎广大读者直接从本期刊社订阅。在校学生半价优惠。

邮局汇款:(257015)山东省东营市聊城路3号期刊社。

联系人:左萍,电话:(0546)8715240,传真:(0546)8715261,E-mail:pgre@vip.163.com。

银行汇款:中国石化股份胜利油田分公司地质科学研究院;开户行:工商银行东营区支行;帐号:1615002109022100494。