

## 渤中凹陷深层高压井地质工程一体化技术研究与应用

李战奎 吴立伟 郭明宇 徐鲲 马福罡 李文龙

### Research and Application of Integrated Geological Engineering Technology for Deep High-Pressure Wells in the Bozhong Sag

LI Zhankui, WU Liwei, GUO Mingyu, XU Kun, MA Fugang, LI Wenlong

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024031>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 页岩气储层工程地质力学一体化技术进展与探讨

Advances in Shale Gas Reservoir Engineering and Geomechanics Integration Technology and Relevant Discussions

石油钻探技术. 2017, 45(2): 25–31 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201702005>

#### 丁页5井“井筒一体化”钻井提速技术

Integrated Wellbore Technologies to Enhance the Rate of Penetration for Well Dingye 5

石油钻探技术. 2018, 46(1): 24–29 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018029>

#### 涪西南凹陷勘探开发一体化开发评价井钻探模式研究

Research on Development Evaluation Well Drilling Modes for Exploration and Development Integration in Weixinan Sag

石油钻探技术. 2021, 49(6): 42–49 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021108>

#### 济阳拗陷页岩油水平井钻井完井关键技术

Key Technologies for Drilling and Completion of Horizontal Shale Oil Wells in the Jiyang Depression

石油钻探技术. 2021, 49(4): 22–28 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021073>

#### 中短半径井眼固井防砂一体化管柱研究与试验

Research and Testing of the Integrated String for Cementing and Controlling Sand in a Medium–Short Radius Wellbore

石油钻探技术. 2019, 47(2): 99–104 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019012>

#### 随钻一体化测井仪平台开发

The Development of an Integrated Logging Instrument Platform while Drilling

石油钻探技术. 2019, 47(1): 118–126 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019016>



扫码关注公众号，获取更多信息！

doi:10.11911/syztjs.2024031

引用格式: 李战奎, 吴立伟, 郭明宇, 等. 渤中凹陷深层高压井地质工程一体化技术研究与应用 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(2): 1-8.

LI Zhankui, WU Liwei, GUO Mingyu, et al. Research and application of integrated geological engineering technology for deep high-pressure wells in the Bozhong Sag [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 1-8.

## 渤中凹陷深层高压井地质工程一体化技术研究与应用

李战奎<sup>1</sup>, 吴立伟<sup>2</sup>, 郭明宇<sup>2</sup>, 徐 鲲<sup>2</sup>, 马福罡<sup>1</sup>, 李文龙<sup>2</sup>

(1. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300459; 2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459)

**摘 要:** 渤海湾盆地渤中凹陷深层潜山地质条件复杂, 目的层埋藏深, 钻遇地层层位多, 岩性复杂多变, 地层压力系统变化大, 钻井过程中复杂情况频发, 薄弱层易漏失, 影响勘探开发进程。为此, 研究了钻前井漏风险预测及地层压力校正, 钻中高压段中完科学决策、潜山界面精确卡取和潜山地层压力随钻识别与控制等方面的技术, 实现了钻井设计及随钻调整方案优化, 形成了渤中凹陷深层高压井全过程地质工程一体化技术。渤海油田 20 口深层高压探井应用全过程地质工程一体化技术后, 钻井复杂情况降低了 60%, 井漏、溢流等复杂情况处理时间缩短了 40%, 潜山界面识别准确率 100%, 单井钻井成本降低 3 000 万元以上。全过程地质工程一体化技术为渤海油田深层超深层勘探开发提供了技术途径, 具有较好的应用前景。

**关键词:** 渤中凹陷; 深层; 风险预测; 随钻优化; 全过程; 地质工程一体化

中图分类号: TE242 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2024)02-0001-08

## Research and Application of Integrated Geological Engineering Technology for Deep High-Pressure Wells in the Bozhong Sag

LI Zhankui<sup>1</sup>, WU Liwei<sup>2</sup>, GUO Mingyu<sup>2</sup>, XU Kun<sup>2</sup>, MA Fugang<sup>1</sup>, LI Wenlong<sup>2</sup>

(1. CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Tianjin, 300459, China; 2. Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin, 300459, China)

**Abstract:** The geology of the deep buried hills in the Bozhong Sag of the Bohai Bay Basin are complex, with deep burial of the target layer, multiple geological layers encountered during drilling, complex and variable lithology, and significant changes in the formation pressure system. During the drilling process, complex situations frequently occur, and weak layers are prone to leakage, which affects the exploration and development process. By predicting the risk of wellbore leakage before drilling, correcting formation pressure, making scientific decisions in the high-pressure section during drilling, accurately capturing the buried hill interface, and identifying and controlling the formation pressure of the buried hill while drilling, the drilling design and adjustment plan optimization during drilling were achieved, and an integrated geological engineering technology for the whole process of deep high-pressure wells in the Bozhong Sag was established. After the application of the integrated geological engineering technology throughout the whole process in 20 deep high-pressure exploration wells in Bohai Oilfield, the drilling complexity was reduced by 60%, and the processing time for complex situations such as wellbore leakage and overflow was reduced by 40%. The accuracy of identifying buried hill interfaces was 100%, and the cost of a single well was reduced by more than 30 million yuan. The integrated geological engineering technology for the whole process provides a technical approach for deep and ultra-deep exploration and development of Bohai Oilfield, and it has good application prospects.

**Key words:** Bozhong Sag; deep zone; risk prediction; optimization while drilling; whole process; integrated geological engineering

收稿日期: 2023-12-11; 改回日期: 2024-03-09。

作者简介: 李战奎 (1986—), 男, 陕西韩城人, 2009 年毕业于中国地质大学 (北京) 资源勘查工程专业, 高级工程师, 主要从事海上油气勘探管理和现场地质录井工作。E-mail: lizhk@cnooc.com.cn。

基金项目: 中海石油 (中国) 有限公司 “七年行动计划” 重大科技专项 “渤海油田上产 4 000 万吨新领域勘探关键技术 (编号: CNOOC-KJ 135 ZDXM36 TJ 08 TJ)” 部分研究成果。

渤海湾盆地渤中凹陷深层潜山勘探储量巨大,已发现渤中 19-6、渤中 13-2 和渤中 26-6 构造等 3 个亿吨级潜山油气田<sup>[1-3]</sup>。渤中凹陷深层潜山勘探钻井作业过程中面临地质条件复杂、目的层埋藏深(超过 5000 m)、岩性复杂多变、地层压力系统变化大和薄弱层易漏等作业风险<sup>[4-6]</sup>,多次出现井漏、溢流等复杂钻井井况,导致无法钻至设计目的层位,使深层高压探井部署受到较大限制,影响了勘探进程<sup>[7]</sup>。常规的勘探钻井技术已经无法满足深层井的作业需求,地质和工程必须相互支持,实现双赢。目前,陆地地质工程一体化工作集中在深部低渗透储层压裂增产效果的提升,南海西部油田重点加强对地层压力的预监测方面提升,所建立的方法对渤中凹陷适用性较差<sup>[8]</sup>。通过多年探索和创新,根据地质工程一体化技术思路,在钻前风险预测及设计方案优化技术、深层高压井中完决策技术、潜山界面精准卡取技术和潜山段地层压力随钻识别与控制技术等方面取得较大突破,形成了渤中凹陷深层高压井全过程地质工程一体化技术,并在渤海油田 20 口井深层高压探井进行了推广应用,提高了勘探成果率和作业效率。

## 1 区域地质条件

渤中凹陷位于渤海湾盆地中部,是重要的产油区和有利勘探区之一,近年来发现了许多大型油气田<sup>[9]</sup>。已钻井揭示,自上而下钻遇地层包括新近系明化镇组、馆陶组,古近系东营组、沙河街组和孔店组,中生界,古生界,太古界,构造位置不同,地层层序和岩性组合略有不同。主要勘探目的层为中生界、古生界和太古界潜山,不同构造位置钻探潜山类型不同,有单层潜山(中生界、古生界和太古界)、双层潜山(中生界+古生界、中生界+太古界、古生界+太古界)和 3 层潜山(中生界+古生界+太古界)。

渤中凹陷 60 口已钻井统计结果表明,地层超压井数量超过三分之一,从上往下地层压力系统复杂,压力成因复杂多变<sup>[10-13]</sup>。东二上段以上地层为正常压力系统,地层压力系数 1.00 左右;东二下段开始地层压力系数逐渐增大,东三段底部地层压力系数达到最高,最大可达 1.85;沙一二段地层压力系数相对稳定,沙三段缓慢下降,最大 1.60;中生界地层压力系数一般在 1.20~1.30,最大 1.50;古生界地层压力系数一般在 1.10~1.20,最大 1.30;太古界地层压力系数一般在 1.00~1.20,最大 1.25。不同类型

潜山和构造位置的地层压力系数不同,如果是多层潜山,越靠近上部,潜山地层压力系数越高,随着井深增加,地层压力逐步降低,直至恢复常压。

渤中凹陷周边已钻井统计表明,40% 的井在新生界地层发生不同程度的漏失<sup>[14-16]</sup>。新生界地层漏失主要原因包括断裂带漏失和薄弱层漏失,井漏位置在垂向上具有明显的分带性,主要集中在东营组上部的东一段、东二上段和馆陶组,其中馆陶组漏失主要原因是断层性漏失。东一和东二上段漏失井段地震剖面上断裂特征不明显,岩性为砂泥岩互层,沉积环境为海陆交互相,地层沉积差异明显,造成地层承压能力不足而发生漏失。薄弱层漏失特点是反复漏失,堵漏困难,处理时间长(见表 1),导致井壁不稳定、井垮等复杂情况,是目前深层高压探井面临最大的井漏风险挑战。

表 1 渤中凹陷井漏层位及原因分析统计

Table 1 Statistics for analysis of wellbore leakage layers and causes in the Bozhong Sag

地层	漏失井数/口	处理时间/h	漏失原因
馆陶组	2	小于30	断层
东一、二段	12	50~200	薄弱层
东三段	1	30~40	断层

## 2 钻井技术难点分析

渤中凹陷深层井面临的地质条件复杂,特别是钻遇地层多,岩性复杂,地层压力变化大,薄弱层易发生井漏等风险。

### 2.1 井漏事故多发,堵漏困难

渤中凹陷断裂带发育,断层多,且存在区域地质薄弱层,地层承压能力弱,井漏事故频发,严重影响钻井安全和勘探进程。例如,BZ19-A2 井东二上段井深 3 185,3 264 和 3 490 m 等处发生井漏,采取多种堵漏措施均无法成功堵漏,累计堵漏时间 10 d。

### 2.2 地层压力复杂,井控风险高

渤中凹陷已钻地层超压井统计表明,预测地层压力与实钻地层压力误差较大,多口井发生气侵、井涌等复杂情况,导致钻井周期增长、钻井液污染和单井报废等严重后果,造成了极大的经济损失。BZ25-A10 井设计地层压力系数为 1.30,实际钻井过程中地层压力系数最高达 1.55,造成了严重的溢流等工程复杂情况,被迫弃井侧钻。

### 2.3 勘探层系多, 井身结构设计受限

渤中凹陷主要勘探目的层埋深大于 4 500 m, 完钻井深为 5 000~5 500 m。勘探层位主要为潜山地层, 勘探需求高, 不同类型潜山地层需要分不同开次录取资料; 且渤中凹陷新生界存在多套压力系统, 需要在起压段和压力回归段进行分隔, 导致最后一开需使用  $\phi 152.4$  mm 钻头钻开潜山储层后进行裸眼测试, 没有多余的套管层级, 无法应对钻进过程中出现的复杂情况。

### 2.4 地质条件复杂, 潜山界面的卡取难度大

渤中凹陷潜山埋藏深, 地震资料品质差, 钻前的潜山界面深度预测误差较大, 最大误差超过 300 m, 且受多层潜山、岩屑细碎和井段长等地质工程因素影响, 卡取潜山界面面临巨大挑战<sup>[17]</sup>。潜山界面如果识别不准, 会导致潜山进尺过多, 易发生漏失、溢流等复杂情况, 对潜山储层造成污染; 或者未钻进潜山中完, 潜山与上部地层无法实现有效封隔, 且已无备用井眼可用, 无法获取地层资料或实现勘探目的。

### 2.5 潜山储层压力预测误差大, 储层保护难度大

渤中凹陷潜山地层受油气充注和储层发育情况影响, 地层压力差异性较大。钻井过程中如果钻井液密度过高, 不利于油气发现和储层识别, 且高密度钻井液进入裂缝储层易堵塞油气运移通道<sup>[18]</sup>; 如果钻井液密度过低, 钻遇优质储层后容易出现溢流、井喷等事故, 安全和勘探效率受到严重影响。例如, CFD23-A2 井钻井过程中为了发现油气显示, 使用低密度钻井液钻进, 钻遇优质储层后出现溢流, 处理复杂情况用时 5 d, 影响了勘探进程。

## 3 全过程地质工程一体化技术

全过程的地质工程一体化理念, 要求地质和钻井人员全流程参与钻井作业流程<sup>[19-22]</sup>, 从钻前风险预测和分析、钻中高压段中完科学决策、潜山界面精确卡取、潜山地层压力随钻识别和控制等方面, 实现信息互通, 建立全流程技术方法, 实现安全高效钻探。

### 3.1 钻前风险预测及设计方案优化

#### 3.1.1 井漏风险预测

探井作业最大的挑战是不确定性, 井漏风险已成为制约钻井施工的主要因素。钻前对待钻井进行井漏风险预测和评估, 能够指导工程设计和钻井作业。通过近几年的探索, 将地震常规剖面、滤波剖

面、方差剖面和瞬时振幅等剖面的特征相结合, 实现了钻前阶段对小断层的精细刻画、火成岩相带的识别, 形成了基于地震属性的多尺度井漏风险预测技术, 确定井漏风险井段, 并为钻井作业提供井漏风险评估。

通过对漏失层位进行地震属性标定, 结合漏失情况、处理过程及处理时间等, 将钻前井漏风险分为高、中和低等级。不同等级应对预案不同, 对于井漏高风险井段, 建议采用避钻技术和提前加入随钻堵漏材料, 并储备足够的堵漏浆; 对于井漏中风险井段, 建议提前采用小参数(低钻压、低排量等)钻进, 防止工程原因造成漏失, 钻进过程中向循环池加入随钻堵漏材料; 对于井漏低风险井段, 建议采用小参数进行钻进。对于区域东一、二段井漏薄弱层, 无法识别地震剖面特征, 需单独进行风险提示, 渤中凹陷地区要按照中风险采取针对性措施。

井漏风险预测工作不局限于钻前, 钻进过程中根据实钻地层变化情况实时预测井漏风险, 指导钻井作业过程中选择相应的钻井液密度和采取相应的防漏措施; 实钻发生漏失时, 及时进行井漏位置标定、漏失原因分析和断裂带井段预测, 为制定堵漏措施提供依据。

#### 3.1.2 钻前地层压力校正

实测地层压力数据是最准确的校正预测地层压力系数的数据, 但测井压力有效点都集中在储集层, 数据集中, 对于致密层或者泥岩段, 无法获得真实的地层压力数据<sup>[23-24]</sup>。而多口已钻井证实, 泥岩段和致密储层内的地层压力情况存在不确定性, 井控风险大。

多口井实钻情况分析发现, 在钻井过程中, 单根气、微弱气侵等钻井现象的出现, 能够反映地层压力与钻井液密度相当, 为近平衡钻井, 钻井液密度可以等效为地层压力系数。通过获得的地层压力数据, 对泥岩段和未测井段进行地层压力校正, 使地层压力预测结果更加准确。BZ26-A9 井钻前预测地层压力时, 根据地震资料预测沙河街组地层压力系数最高为 1.32, 但分析邻井实钻情况发现, 多口邻井的钻井液密度为 1.50 kg/L, 且钻至沙河街组时均有单根气出现, 需要对地层压力预测结果进行校正。实测地层压力系数为 1.48, 与校正后的地层压力系数基本相同。

#### 3.1.3 钻井设计优化调整

1) 井眼轨道优化设计。通过对地层、岩性、井漏风险及地层压力情况的正确认识, 对于井漏风险

高的大断层或薄弱层,通过优化井眼轨道,将直井变为定向井避开断层,或者将断层上移至浅层,与异常高压井段分开,降低井漏风险。BZ11-A1井最初设计为直井,预测井漏风险后,认为井深2 300 m附近为一条大断层,井漏风险高,并且邻井钻遇该断层发生严重漏失。为此,对上部井眼进行井眼轨道优化,将直井变为定向井,避开断层,实钻未发生漏失。

2)井身结构优化。针对高压层的不确定情况,要充分考虑其突变性,必须将封隔薄弱层和高压层的套管尽可能下得更深。通过总结区域钻井经验,技术套管必须下至东二段-东三段厚层泥岩中,钻井过程中复杂情况会减少70%。BZ21-A3井最初设计 $\phi 311.1$  mm井段中完井深3 000 m,层位为东二上段,由于地层压力存在不确定性,为了保障钻井安全顺利,通过分析将中完井深优化为3 500 m,进入东三段泥岩中完,钻井过程高效顺利。

3)钻井液密度优化。渤中凹陷东一段+东二上段存在薄弱层,且薄弱层之下地层压力缓慢升压,不会造成井涌溢流等情况。建议钻井过程中使用低密度钻井液钻进,优先保障薄弱层安全钻进,顺利中完后,再根据井壁稳定性要求逐步提高钻井液密度。BZ19-A4井的多口邻井使用密度1.35 kg/L钻井液钻进东一段时发生漏失,该井钻进东一段时使用钻井液密度1.25 kg/L钻进至中完,未发生漏失,作业顺利。

### 3.2 中完科学决策技术

渤中凹陷高压井的异常压力段集中发育在东二段-沙河街组,而薄弱层和断层发育在东二上段以

上,有效分隔薄弱层和高压层是整口井成功钻探的关键。钻井过程中地质与工程相结合,确定已钻过易漏薄弱层,进入承压能力强的地层,但又不能钻进高压层段,造成溢流等井控风险。

分析地层压力变化井段与地层沉积特征以及钻、录井参数的关系发现,地层压力变化与地质录井参数有一定的关系,根据泥岩颜色、烃源岩生烃潜量、元素录井S含量及气测录井C<sub>2</sub>与C<sub>3</sub>比值,能够区分正常压力段、缓慢起压井段、快速起压井段及高压层段(见图1和表2),钻井过程中结合地层压力监测技术,建立中完位置判断标准,以便钻井过程中快速做出科学决策。

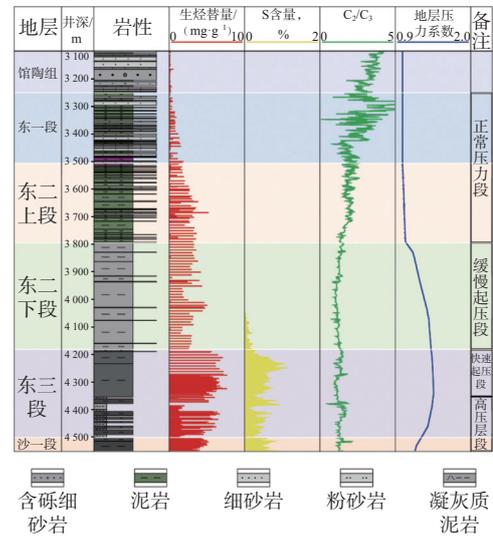


图1 渤中凹陷A构造地层压力系数纵向分布

Fig.1 Vertical distribution of formation pressure coefficient in structure A of the Bozhong Sag

表2 渤中凹陷地层压力系数与录井参数判别结果

Table 2 Discrimination results of formation pressure coefficient and logging parameters in the Bozhong Sag

纵向分带	地层	泥岩颜色	烃源岩生烃潜量/(mg·g <sup>-1</sup> )	S含量, %	C <sub>2</sub> 与C <sub>3</sub> 比值	压力系数
正常压力段	东一段+东二上段	绿灰色、红褐色	< 1.5	< 0.15	2.1~3.1	1.00
慢速起压井段	东二下段	灰色	1.5~5.0	0.15~0.30	1.8~2.4	1.00~1.30
快速起压井段	东三段上部	褐灰色	5.0~15.0	0.30~0.50	1.3~1.8	1.30~1.40
高压层段	东三段+沙河街组	深灰色、灰黑色	> 15.0	> 0.50	0.4~1.6	1.50~1.80

### 3.3 潜山界面精准卡取技术

目前,通过综合分析潜山类型、随钻地层对比、钻井工程参数特征、岩性特征及矿物特征及流体性质等信息,已初步形成了渤海油田潜山界面卡取技术<sup>[25-27]</sup>。渤中凹陷潜山包括单层至三层潜山,地层

出露不同,对于潜山界面的精准识别提出更高要求。通过针对性分析,形成了敏感元素随钻预警结合多元信息岩性精准识别技术,实现了渤中凹陷复杂潜山界面及岩性的精准识别。渤海油田潜山界面识别精度达到中生界5 m以内、太古界4 m以内和

古生界 3 m 以内。

### 3.3.1 敏感元素随钻预警技术

现场钻井施工时最关注的地质信息是当前地层的认识及下部地层的预测。常规做法是将已钻岩性及岩性组合情况与区域或邻井进行对比,判断地层层位,但精度低,准确性差。渤海油田经过多年探

索,逐步建立了区域不同层段的敏感元素特征,利用敏感元素变化进行潜山界面预警,实现实时动态调整潜山界面预测深度。渤中凹陷 A 构造筛选出元素录井 S, Ca 和 Fe 的含量作为随钻预警元素,将 A2 井与 BZ26-A1 进行连井对比(见图 2),快速判断潜山界面距离。

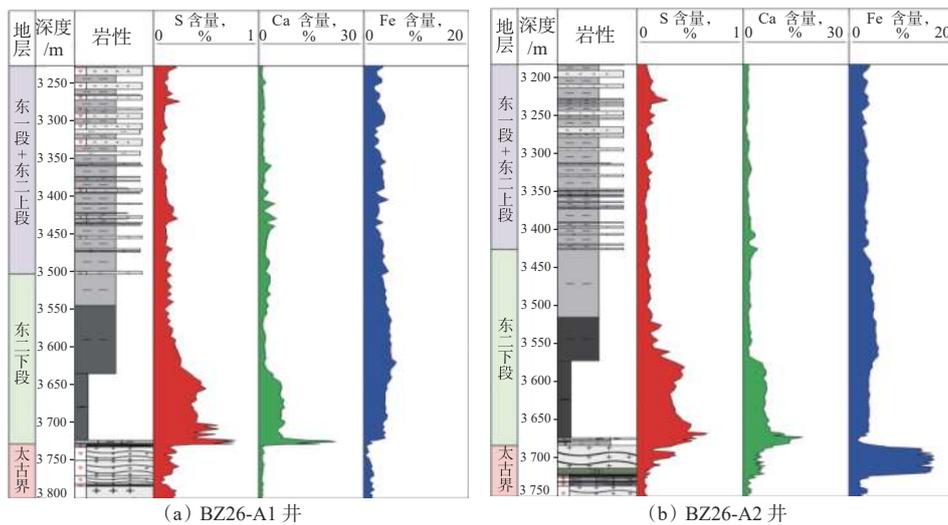


图 2 渤中凹陷 A 构造敏感元素对比

Fig.2 Comparison of sensitive elements in structure A of the Bozhong Sag

### 3.3.2 多元信息岩性精准识别技术

渤海油田现场岩性确定方法包括元素和衍射录井、岩屑及薄片鉴定等。其中,利用元素和衍射录井资料能够快速识别岩性的变化及岩性类别;根据薄片鉴定结果能确定岩性成分、微观结构特征等,结合岩屑整体宏观情况,可精准判断岩性。

### 3.4 潜山段地层压力随钻识别及控制技术

渤中凹陷潜山地层存在异常压力,但分布规律不明确,且潜山无法进行地层压力预测和监测,勘探风险较高。潜山地层压力的不确定性,造成钻井液密度无法准确选择。若选择高密度钻井液,可以保障地层流体不侵入井筒内,但不利于发现油气层甚至存在伤害储层的风险;若使用低密度钻井液,一旦钻遇高压油气层,井底压力无法维持平衡,面临处理井控难题。通过地质工程相结合,结合钻进潜山前地层压力监测结果及钻进潜山后工程关井求压,对潜山地层压力情况进行探索,并在潜山钻进过程中应用精细压力控制钻井技术,全方位保障潜山钻井安全和储层保护。

#### 3.4.1 中完前潜山地层压力预判技术

利用随钻压力监测技术判断在进入潜山前地层压力的变化情况,如果在潜山顶部地层压力明显回

落至常压,判断潜山的地层压力为常压,钻进潜山的钻井液密度按照常压地层准备。如果在潜山顶部地层压力无明显回落,潜山存在压力异常的概率大,潜山段钻进过程要谨慎,需要通过关井求压等方式获得准确的地层压力系数后再继续钻进。

#### 3.4.2 潜山段地层压力求取技术

钻进潜山段中完后,确定进入新地层 3 m 左右时进行地质循环,观察气全量、岩性及油气显示情况,判断是否有气侵溢流等,并关井求压,确定当前钻井液密度是否能够满足潜山段钻进要求。如果关井井口无压力,按照当前密度继续钻进;如果出现气侵等状况,及时提高钻井液密度,确保钻井液密度能够平衡地层压力,无明显气侵后恢复钻进。

#### 3.4.3 潜山精细压力控制钻井技术

精细控压钻井是近几年在高压井、窄密度窗口探井中应用的新技术。通过维持井底压力相对恒定,减少井底压力波动,使钻井作业安全地通过窄密度窗口地层,可通过调节井口回压维持井底压力等于或略大于地层压力,保证钻井作业安全、高效<sup>[28-30]</sup>。在潜山钻井过程中,由于储层主要以裂缝和溶蚀孔洞为主,钻井液密度过高会造成储层污染。因此,在潜山段钻进期间,应用精细压力控制技术,采用

相对低密度钻井液钻进,实时监控井口回压,通过微调井口回压,补偿环空循环压耗的变化,始终保持在较小的工作窗口范围内。井底压力出现异常时,通过调节回压,满足井底压力稳定的要求,可降低储层伤害,提高油气发现,降低潜山的井漏、压差卡钻和溢流等风险。

## 4 现场应用

通过全流程的地质工程一体化实践,渤海油田深层高压井地质作业及钻井工程降本增效成果显著,已累计应用20口井,钻井复杂情况降低60%,井漏、溢流等复杂情况处理时间缩短40%,作业时效显著提升,全部钻达地质目的层位,助力了渤中凹陷深层潜山勘探发现,为渤海油田深层超深层勘探提供了技术保障。

### 4.1 BZ8-A2 井

BZ8-A2井设计完钻井深5700m,目的层为中生界,预测地层压力系数最高1.55(东二下段),周边已钻井馆陶组和东一段多次发生漏失,被迫提前完钻。井身结构设计为六开,其中四开采用 $\phi 311.1$ mm钻头钻至井深4370.00m左右中完;五开采用 $\phi 215.9$ mm钻头钻至井深5030.00m左右,确定进入潜山中完;六开采用 $\phi 152.4$ mm钻头钻至完钻井深,无备用井眼,钻井作业中面临巨大的挑战。通过践行全过程地质工程一体化,不断优化调整井身结构和钻井液密度,成功实现高效钻探,钻井周期比设计缩短了20%,未发生复杂情况。

井漏风险预测分析邻井馆陶组漏失的主要原因是断层+厚层砂岩造成的,该井要避开断层和馆陶组厚层砂岩组合,但由于中生界目的层的限制,无法避开断层,通过研究优化井点位置,将钻遇断层的位置从馆陶组上移至明下段,明下段为厚层泥岩夹砂岩,泥岩对断层封堵性强,不易漏失。实钻时断层未发生漏失,验证了方案优化的合理性。

$\phi 311.1$ mm井段钻进过程中实时监测录井地层压力和录井参数变化趋势,钻至设计中完井深4375m时地层压力系数为1.05,且泥岩颜色为灰色,未达到中完标准,决定继续钻进。钻至井深4610m,监测地层压力系数达到1.30,泥岩颜色变为褐灰色,烃源岩生烃潜量升高至7mg/g,元素S含量升高至0.40%, $C_2$ 与 $C_3$ 比值降至1.50左右,进入快速起压段的顶部,决策中完,中完井深比设计深度增加了235m(见图3)。

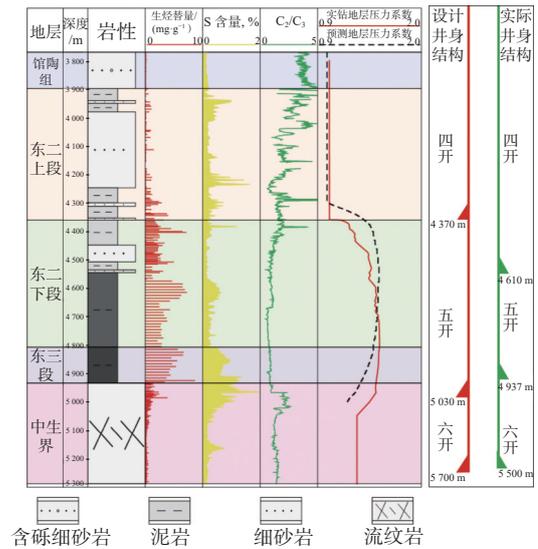


图3 BZ8-A2井钻井作业综合信息图

Fig.3 Comprehensive information map of drilling in Well BZ8-A2

$\phi 215.9$ mm井段钻至井深4937.00m,进入潜山3.80m,精准识别进入中生界潜山界面中完。随钻地层压力监测发现,井底地层压力与钻前地层压力预测相差较大,未出现回落现象,钻遇中生界地层后出现明显单根气,监测地层压力系数最高达到1.49。因此,调整潜山段设计钻井液密度,从1.20kg/L调整至1.50kg/L开钻,潜山段采用精细压控技术,保障潜山作业安全。潜山段关井求压,证实地层压力系数为1.50,确定无明显溢流和气测异常后继续钻进,钻井作业安全顺利。

### 4.2 CFD23-A3 井

CFD23-A3井设计完钻井深5650m,目的层为古生界和太古界。井身结构设计为六开,其中 $\phi 406.4$ mm井段钻至井深3350m左右中完; $\phi 311.1$ mm井段钻至井深4158.00m左右,进下古生界灰岩潜山中完;五开采用 $\phi 215.9$ mm钻头钻至井深5183.00m左右,确定进入太古界潜山中完;六开采用 $\phi 152.4$ mm钻头钻至完钻井深,无备用井眼。该井设计钻遇层位多,岩性复杂,地层压力变化大,作业难度大,通过践行全过程地质工程一体化,在关键界面实现精准识别,优化调整井身结构和钻井液性能,在渤海油田首次实现24套不同地层高效钻探,为多层位的勘探发现打开了局面。

该井钻遇中生界、古生界和太古界等3套潜山地层。其中,古生界卡层难度最大,灰岩潜山孔洞发育,易发生严重漏失,并导致复杂情况发生。通

过利用敏感元素预警和精准岩性识别,在实际钻深度比设计钻深加深 200 m 的情况下,实现了灰岩潜山界面 2.30 m 精准识别,太古界潜山界面 3.50 m 精准识别,中生界潜山界面 4.30 m 精准识别,且均未发生井漏等复杂情况,为工程安全和地质资料的获取提供了保障。

该井  $\phi 215.9$  mm 井段钻至井深 5 183.00 m 左右时,进入太古界花岗片麻岩,落实无显示。通过地质和工程共同讨论,认为目前太古界储层不发育,上下都是潜山,钻井液一样,继续钻进井漏风险低,若无油气显示可缩短作业时间。继续钻进后,潜山未发现油气显示,决策完钻。通过随钻优化井身结构,单井钻井成本降低 3 000 万元以上。

## 5 结论与建议

1) 渤中凹陷区域地质条件复杂,钻井作业风险高,井漏、溢流等复杂情况频发,严重制约了勘探进程,必须采取地质工程一体化技术思路,破解勘探作业难题。

2) 通过全过程地质工程一体化,形成了钻前风险预测及设计方案优化技术、深层高压井中完科学决策技术、潜山界面精准卡取技术和潜山段地层压力随钻识别及控制等技术,高效保障了工程作业安全顺利,提质增效明显,且实现了勘探地质目的。

3) 建议进一步研究和储备更多层次的井身结构,以应对渤海未来超深层多层系勘探作业的需求。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 徐鲲,陶林,李文龙,等. 渤海油田变质岩潜山油藏钻井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(3): 16-21.  
XU Kun, TAO Lin, LI Wenlong, et al. Key drilling technologies for metamorphic buried hill reservoirs in Bohai Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(3): 16-21.
- [2] 马英文,杨进,李文龙,等. 渤中 26-6 油田发现井钻井设计与施工[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(3): 9-15.  
MA Yingwen, YANG Jin, LI Wenlong, et al. Drilling design and construction of a discovery well in Bozhong 26-6 Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(3): 9-15.
- [3] 薛永安,李慧勇. 渤海海域深层太古界变质岩潜山大型凝析气田的发现及其地质意义[J]. 中国海上油气, 2018, 30(3): 1-9.  
XUE Yongan, LI Huiyong. Large condensate gas field in deep Archean metamorphic buried hill in Bohai Sea: discovery and geological significance[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(3): 1-9.
- [4] 徐长贵,杜晓峰,刘晓健,等. 渤海海域太古界深埋变质岩潜山优质储集层形成机制与油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(2): 235-247.  
XU Changgui, DU Xiaofeng, LIU Xiaojian, et al. Formation mechanism of high-quality deep buried-hill reservoir of Archean metamorphic rocks and its significance in petroleum exploration in Bohai Sea Area[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 235-247.
- [5] 李慧勇,牛成民,许鹏,等. 渤中 13-2 大型整装覆盖型潜山油气田的发现及其油气勘探意义[J]. 天然气工业, 2021, 41(2): 19-26.  
LI Huiyong, NIU Chengmin, XU Peng, et al. Discovery of Bozhong 13-2 Archean large monoblock volatile buried hill oilfield and its oil and gas exploration significance[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(2): 19-26.
- [6] 侯明才,曹海洋,李慧勇,等. 渤海海域渤中 19-6 构造带深层潜山储层特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2019, 39(1): 33-44.  
HOU Mingcai, CAO Haiyang, LI Huiyong, et al. Characteristics and controlling factors of deep buried-hill reservoirs in the BZ19-6 structural belt, Bohai Sea area[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(1): 33-44.
- [7] 罗鸣,吴江,陈浩东,等. 南海西部窄安全密度窗口超高温高压钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(1): 8-12.  
LUO Ming, WU Jiang, CHEN Haodong, et al. Ultra-high temperature high pressure drilling technology for narrow safety density window strata in the western South China[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(1): 8-12.
- [8] 廖高龙,郭书生,胡益涛,等. 地质工程一体化理念在南海高温高压井的实践[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 142-154.  
LIAO Gaolong, GUO Shusheng, HU Yitao, et al. Practice of the geology-engineering integration concept in high temperature and high pressure wells in South China Sea[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 142-154.
- [9] 邓建明,马英文. 渤海中深层天然气田钻井关键技术现状及展望[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(6): 677-683.  
DENG Jianming, MA Yingwen. Status and prospect of key drilling and completion technologies used in middle-deep natural gas fields of the Bohai Sea[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(6): 677-683.
- [10] 郭明宇,李战奎,徐鲲,等. 渤中 26-6 构造太古界潜山储层含水识别方法[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(3): 137-143.  
GUO Mingyu, LI Zhankui, XU Kun, et al. Method of identifying water content in the Archean buried hill reservoir of BZ 26-6 Structure[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(3): 137-143.
- [11] 李丹鹭,马劲风,李琳,等. 渤中凹陷异常压力储层地层压力预测方法研究[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(3): 1266-1273.  
LI Danlu, MA Jinfeng, LI Lin, et al. Prediction method of formation pressure in abnormal pressure reservoir in Bozhong Sag[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(3): 1266-1273.
- [12] 何玉,周星,李少轩,等. 渤海湾盆地渤中凹陷古近系地层超压成因及测井响应特征[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(3): 60-69.  
HE Yu, ZHOU Xing, LI Shaoyuan, et al. Genesis and logging response characteristics of formation overpressure of Paleogene in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(3): 60-69.
- [13] 李战奎,徐鲲,郭明宇,等. 地层压力随钻判别技术在旅大 M 构造钻井工程中的应用[J]. 录井工程, 2022, 33(1): 33-37.  
LI Zhankui, XU Kun, GUO Mingyu, et al. Application of formation

- pressure while drilling discriminant technology in drilling engineering of Structure LD-M[J]. *Mud Logging Engineering*, 2022, 33(1): 33–37.
- [ 14 ] 邓津辉, 谭忠健, 袁亚东, 等. 渤海海域古近系—新近系裂缝性漏失断缝体系特征及力学机理研究 [J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(5): 84–98.  
DENG Jinhui, TAN Zhongjian, YUAN Yadong, et al. Study on characteristics and mechanical mechanism of fracture leakage fault-fracture system in the Paleogene-Neogene in Bohai Sea Area[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(5): 84–98.
- [ 15 ] 张晓诚, 霍宏博, 林家昱, 等. 渤海油田裂缝性油藏地质工程一体化井漏预警技术 [J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(6): 72–77.  
ZHANG Xiaocheng, HUO Hongbo, LIN Jiayu, et al. Integrated geology-engineering early warning technologies for lost circulation of fractured reservoirs in Bohai Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(6): 72–77.
- [ 16 ] 房超, 张辉, 陈朝伟, 等. 地质工程一体化漏失机理与预防措施: 以塔里木库车山前古近系复合盐层为例 [J]. *石油钻采工艺*, 2022, 44(6): 684–692.  
FANG Chao, ZHANG Hui, CHEN Zhaowei, et al. Geology-engineering integrated investigation of leakoff mechanisms and prevention measures: a case study of the Palaeogene composite salt layer in the Kuqa piedmont zone, Tarim Basin[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2022, 44(6): 684–692.
- [ 17 ] 李战奎, 尚锁贵, 郭明宇, 等. 变质岩潜山储层分带特征及在地质作业中的应用: 以渤中凹陷及周缘潜山为例 [J]. *中国海上油气*, 2023, 35(5): 61–68.  
LI Zhankui, SHANG Suogui, GUO Mingyu, et al. Zoning characteristics of metamorphic rock buried hill reservoirs and application in geological operations: a case study of Bozhong Sag and surrounding buried hills[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(5): 61–68.
- [ 18 ] 吴江, 李炎军, 张万栋, 等. 南海莺歌海盆地中深层高温高压水平井钻井关键技术 [J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(2): 63–69.  
WU Jiang, LI Yanjun, ZHANG Wandong, et al. Key drilling techniques of HTHP horizontal wells in mid-deep strata of the Yinggehai Basin, South China Sea[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(2): 63–69.
- [ 19 ] 陈波, 和鹏飞, 宋峙潮, 等. 渤海中深部地层多源信息一体化压力监测方法 [J]. *石油钻采工艺*, 2022, 44(1): 112–116.  
CHEN Bo, HE Pengfei, SONG Zhichao, et al. A pressure monitoring method integrating multi-source information in middle and deep formations in Bohai Sea[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2022, 44(1): 112–116.
- [ 20 ] 李炎军, 吴江, 黄熠, 等. 莺歌海盆地中深层高温高压钻井关键技术及其实践效果 [J]. *中国海上油气*, 2015, 27(4): 102–106.  
LI Yanjun, WU Jiang, HUANG Yi, et al. Key technology and application of HTHP drilling in mid-deep formations in Yinggehai Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(4): 102–106.
- [ 21 ] 李文拓, 李中, 罗鸣, 等. 莺歌海盆地超高温高压探井作业模式探索 [J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2020, 22(3): 21–23.  
LI Wentuo, LI Zhong, LUO Ming, et al. Operation mode study of ultra-high temperature and ultra-high pressure exploration wells in Yinggehai Basin[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Sciences Edition)*, 2020, 22(3): 21–23.
- [ 22 ] 慕立俊, 拜杰, 齐银, 等. 庆城夹层型页岩油地质工程一体化压裂技术 [J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(5): 33–41.  
MU Lijun, BAI Jie, QI Yin, et al. Geological engineering integrated fracturing technology for Qingcheng interlayer shale oil[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(5): 33–41.
- [ 23 ] 许玉强, 何保伦, 王葵舒, 等. 深度学习与 Eaton 法联合驱动的地层孔隙压力预测方法 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(6): 50–59.  
XU Yuqiang, HE Baolun, WANG Yanshu, et al. A novel prediction method of formation pore pressure driven by deep learning and Eaton method[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2023, 47(6): 50–59.
- [ 24 ] 杨前亮, 黄洪林, 罗鸣, 等. 基于机械钻速的地层孔隙压力随钻监测方法 [J]. *石油钻采工艺*, 2023, 45(5): 548–554.  
YANG Qianliang, HUANG Honglin, LUO Ming, et al. Monitoring method for formation pore pressure while drilling based on rate of penetration[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2023, 45(5): 548–554.
- [ 25 ] 胡云, 谭忠健, 张建斌, 等. 岩屑成分分析在渤中 19-6 潜山界面识别中的应用 [J]. *中国海上油气*, 2020, 32(6): 70–76.  
HU Yun, TAN Zhongjian, ZHANG Jianbin, et al. Application of cuttings composition analysis in identification on BZ19-6 burial hill surface[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2020, 32(6): 70–76.
- [ 26 ] 阚留杰, 毛敏, 陈伟, 等. 渤海油田潜山界面识别录井技术及其组合 [J]. *录井工程*, 2016, 27(3): 79–83.  
KAN Liujie, MAO Min, CHEN Wei, et al. Mud logging technology and its combination for identifying buried hill interface in Bohai Oilfield[J]. *Mud Logging Engineering*, 2016, 27(3): 79–83.
- [ 27 ] 温海涛, 郭明宇, 阚留杰, 等. 元素特征组合法在 BZ 凝析气田开发井潜山界面预警中的应用 [J]. *录井工程*, 2023, 34(1): 29–34.  
WEN Haitao, GUO Mingyu, KAN Liujie, et al. Element characteristics combination method of buried hill interface early warning of development wells in BZ condensate gas field[J]. *Mud Logging Engineering*, 2023, 34(1): 29–34.
- [ 28 ] 许杰, 窦蓬, 林海, 等. 渤中凹陷西南环深层探井钻井难点与技术对策 [J]. *石油钻采工艺*, 2021, 43(2): 177–183.  
XU Jie, DOU Peng, LIN Hai, et al. Drilling difficulties of deep explorations wells in the southwest zone of Bozhong Sag and their technical countermeasures[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(2): 177–183.
- [ 29 ] 赵德, 赵维青, 卢先刚, 等. 西非 S 深水区块裂缝性碳酸盐岩地层控压钻井技术 [J]. *石油钻采工艺*, 2022, 44(1): 20–25.  
ZHAO De, ZHAO Weiqing, LU Xiangang, et al. Managed pressure drilling technology for fractured carbonate formation in deep water Block S, West Africa[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2022, 44(1): 20–25.
- [ 30 ] 闫睿昶, 陈新勇, 汝大军, 等. 巴彦河套新区深井钻完井关键技术 [J]. *石油钻采工艺*, 2022, 44(1): 15–19.  
YAN Ruichang, CHEN Xinyong, RU Dajun, et al. Key technologies for deep well drilling and completion in Bayan Hetao New Area[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2022, 44(1): 15–19.

[ 编辑 滕春鸣 ]