

断层封闭性评价及过断层钻井关键技术 研究与应用

张 磊 李治衡 林 海 李文龙 侯欣欣

中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459

摘 要:旅大某油田 14 口井于垂深 847 ~ 993 m 处钻遇辽西一号断层,此断层为继承性生长正断层,总体为北东走向的通海底断层。针对钻遇断层可行性和过断层安全钻进问题,运用泥岩涂抹因子、断面正压力分析方法结合实际钻井情况,对辽西一号断层封闭性进行了评价。通过分析研究,创新性地提出了过断层面钻进泥浆比重设计和过断层井轨迹优化设计的过断层坍塌压力计算方法,并依据计算结果对过断层井进行轨迹优化;形成了过断层钻井液防漏堵漏技术。研究成果为钻遇断层可行性分析、井眼轨迹设计和过断层安全钻进提供了一定指导。

关键词:辽西一号;断层封闭性;坍塌压力;防漏堵漏;轨迹设计

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2024.04.005

Research and application of fault sealing evaluation and key technologies for drilling through faults

ZHANG Lei, LI Zhiheng, LIN Hai, LI Wenlong, HOU Xinxin

CNOOC China Ltd., Tianjin Branch, Tianjin, 300459, China

Abstract: 14 wells of LD oilfield are designed to drill into the Liaoxi No. 1 fault at depth ranging from 847 to 993 m. This fault is an inherited growth normal fault with a general northeast trending direction and extends through the seabed. To address the feasibility of encountering faults during drilling and the safety of drilling through faults, the sealing performance of the Liaoxi No. 1 fault was evaluated using methods such as a mudstone smearing factor and cross-sectional normal pressure analysis in conjunction with actual drilling conditions. Through analysis and research, innovative methods have been proposed for calculating the mud weight design for drilling through fault planes and optimizing the trajectory of wells crossing faults, based on the calculated collapse pressure. At the same time, the trajectory of the wells was optimized based on these results. Techniques for preventing and plugging leaks in drilling fluids during fault crossing were also established. The research results provide guidance for the feasibility analysis of drilling faults, wellbore trajectory design, and safe drilling through faults.

Keywords: Liaoxi No. 1 fault; Fault sealing; Collapse pressure; Leak prevention and plugging; Trajectory design

收稿日期:2023-10-31

基金项目:国家自然科学基金项目“基于井筒—裂缝—封堵层耦合的堵漏力学机理研究”(52074312)

作者简介:张 磊(1990-),女,河北唐山人,工程师,硕士,主要从事油田前期研究和科研工作。E-mail:zhanglei134@cnooc.

com.cn

0 前言

渤海海域断层发育,其中辽西一号断层为继承性生长正断层,总体为北东走向的通海底断层^[1-2]。旅大油田某北构造位于此断层下降盘,主要开发浅部稠油油藏。油田设计时 14 口井于垂深 847~993 m 处钻遇辽西一号断层,无法通过井眼轨迹优化避免钻遇该断层。

由于工程因素和人为因素,某些钻遇断层的井下复杂情况频发,如井壁坍塌、卡钻、井漏等;但在实际钻井过程中,部分井在钻遇断层时未出现明显的钻井参数波动或表明井下复杂情况的征兆^[3-4]。耿立军等人^[5]运用几何分解的数学方法对井眼受力及区域应力场进行分析,建立了过断层井段坍塌和漏失压力计算新模型。林海等人^[6]考虑断层周围地层非均质性和各向异性,建立了过断层的坍塌压力计算模型。邓金根等人^[7]根据孔隙弹性理论及 Mohr-coulomb 强度准则,结合断层对地层力学性质的影响建立过断层时井壁稳定预测模型。国内外学者建立了多套过断层坍塌压力模型,同时提出了通过调整井眼轨迹来降低坍塌压力的方法,但钻遇断层是否可行除考虑坍塌压力的影响外,还需研究断层封闭性的评价影响。

因此,基于上述背景,本文开展了针对辽西一号断层的封闭性评价研究,创新性地提出了过断层面钻进泥浆比重设计和过断层井轨迹优化设计的过断层坍塌压力计算方法,并依据计算结果对过断层井进行轨迹优化。

1 辽西一号断层封闭性研究

断层封闭性由断层性质、产状、断裂充填物性质等多种地质因素决定^[8-10]。目前主要通过断层活动性、断层两盘岩性对接关系、泥岩涂抹程度和断面正压力进行断层封闭性评价^[11-13]。本文主要通过泥岩涂抹程度、断面正压力及统计实际钻遇辽西一号断层井复杂情况进行封闭性评价。

1.1 泥岩涂抹程度评价

泥岩涂抹因子为断距内泥岩累计厚度与断距斜厚的比值^[14]。具体定义如下。

$$F_{ss} = \frac{L}{\sin a \sum_{i=1}^n h_i} \quad (1)$$

式中: F_{ss} 为泥岩涂抹因子; L 为垂直断距,m; a 为断面倾斜角度,(°); $\sum_{i=1}^n h_i$ 为断层内每层泥岩层厚度之和,m。

选取钻遇辽西一号断层的 A 井与 B 井,计算过断层的泥岩涂抹因子。当泥岩涂抹因子<3 时,说明断层侧向封闭性良好,泥岩涂抹因子计算结果见表 1。小层泥岩涂抹因子<3,表征辽西一号断层具有较好的侧向封闭性。

表 1 A 井和 B 井泥岩涂抹因子表

Tab. 1 Mud-stone smearing factors in wells A and B

断距 /m	断面位移 /m	泥岩层厚度 /m	泥岩涂抹因子
93	151	59.50	2.83

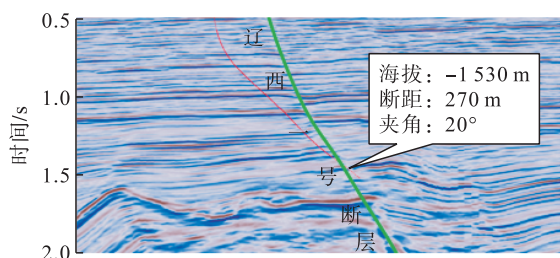
1.2 断面正压力评价

断面正压力为主地应力在断面法向上投影的合力^[15],可简化为以下公式。

$$p = H \times (\rho_r - \rho_w) \times 0.0098 \cos \theta \quad (2)$$

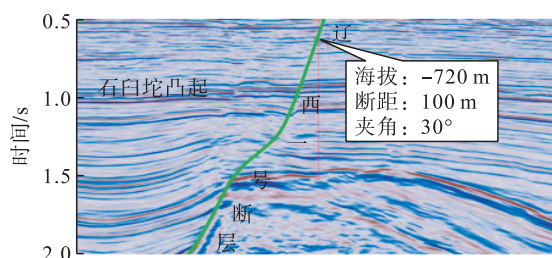
式中: p 为断面正压力,MPa; H 为断面垂直深度,m; ρ_r 为上部岩层比重,g/cm³; ρ_w 为地层水比重,g/cm³; θ 为断层倾斜角度,(°)。

断面正压力判别标准与垂深相关,研究表明在 500~1 000 m 垂深,断面正压力>3.6 MPa 时,断层垂向封闭。选取钻遇辽西一号断层的 2 口定向井,计算断点处的断面正压力。2 口井钻遇断层情况见图 1,断面正压力计算结果见表 2。由表 2 可以看出,2 口井断面正压力均>3.6 MPa,表明辽西一号断层在垂向上也具有较好的封闭性。



a) 过 A 井剖面

a) The profile passing through well A



b) 过 B 井剖面

b) The profile passing through well B

图 1 2 口定向井钻遇辽西一号断层情况图

Fig. 1 Situation of two directional wells drilling into Liaoxi No. 1 Fault

表 2 2 口定向井断点处断面正压力表

Tab. 2 Fault plane normal pressure of two directional wells breakpoints

井名	过断层 垂深 / m	断面 倾角 / (°)	地层水 密度 / (g·cm ⁻³)	上覆岩层 平均密度 / (g·cm ⁻³)	断面正 压力 / MPa
A	1 530	70	1. 03	1. 935	8. 66
B	720	70	1. 03	1. 926	4. 03

1. 3 实钻情况评价

选取实际钻井过程中钻遇辽西一号断层的 11 口井并统计钻遇断层断点处的复杂情况,见表 3。结果表明,11 口井在垂深 530~1 750 m 穿过辽西一号断层,在断点处并未出现井漏等复杂情况,通过实钻情况进一步证明辽西一号断层具有良好的封闭性。

表 3 钻遇辽西一号断层井断点处复杂情况统计表

Tab. 3 Drilling complications at breakpoints of wells drilling into Liaoxi No. 1 fault

井名	深度 / m	断距 / m	层位	层位钻遇辽西一 号断层复杂情况
A42	741	80~90	明化镇组	无
A30H	908	100~110	明化镇组	无
1D	785	80~90	明化镇组	无
2	560	50~60	明化镇组	无
A31	1 264	100~110	东二上段	无
A8	1 750	180~200	东二下段	无
J24M	530	20~30	平原组	无
B10	1 498	140~150	东二下段	无
B11	1 530	260~270	馆陶组	无
4	720	90~100	明化镇组	无
D1	1 493	140~150	东二下段	无

2 过断层钻井关键技术研究

2. 1 过断层坍塌压力计算模型

断层在力学上表现为弱面或弱夹层,必须考虑各向

异性和非均匀强度的影响^[16]。将过断层地层视为横观各向同性地层,认为断层截面上的弹性模量与泊松比有别于垂直断层方向地层,由此求得过断层井壁应力分布,从而建立坍塌压力计算模型。

首先建立由大地坐标系到斜井笛卡尔坐标系下的坐标转换公式模型^[17],见图 2。

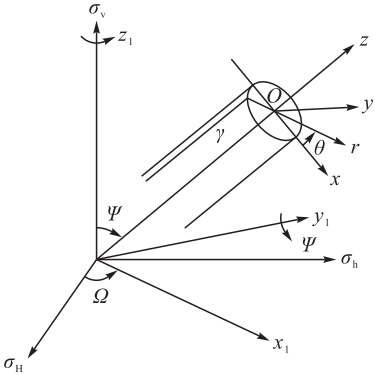


图 2 斜井井轴的坐标变换图

Fig. 2 Coordinate transform of inclined shaft well

图 2 中 σ_H 、 σ_h 、 σ_v 即为大地地应力坐标系,依次以 σ_v 、 y_1 为轴按右手定则旋转角 Ω 、 Ψ ,转化成斜井笛卡尔坐标系,得到斜井远场地应力分布表达式^[6]。

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = [L] \begin{bmatrix} \sigma_H \\ \sigma_h \\ \sigma_v \end{bmatrix} [L]^T \quad (3)$$

$$L = \begin{bmatrix} \cos \Psi \cos \Omega & \cos \Psi \sin \Omega & -\sin \Psi \\ -\sin \Omega & \cos \Omega & 0 \\ \sin \Psi \cos \Omega & \sin \Psi \sin \Omega & \cos \Psi \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: σ_H 、 σ_h 、 σ_v 分别为最大、最小水平地应力及上覆岩层压力,MPa; σ_{xx} 、 σ_{xy} 、 σ_{xz} 、 σ_{yy} 、 σ_{yz} 、 σ_{zz} 为斜井的 6 个地应力分量,MPa; Ω 为方位角,(°); Ψ 为井斜角,(°)。

横观各向同性地层本构方程表达式如下。

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu'}{E\nu} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu'}{E'} & \frac{1}{E'} & -\frac{\nu'}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu'}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{E} + \frac{1}{E'} + 2\frac{\nu'}{E'} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\frac{(1+\nu)}{E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{E} + \frac{1}{E'} + 2\frac{\nu'}{E'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$k = \frac{E}{E'} \quad (6)$$

式中: E 为各向同性面的弹性模量, MPa; ν 为各向同性面的泊松比; E' 为垂直于各向同性面的弹性模量, MPa; ν' 为垂直于各向同性面的泊松比。

平面应变条件下井周地层的平衡方程见式(7), 几何方程见式(8), 边界条件见式(9)~(10):

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0 \quad (7)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (8)$$

$$\sigma_r = P_w \quad (9)$$

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha P_p \delta_{ij} \quad (10)$$

式中: σ_{ij} 为井壁周围基岩应力分量, MPa; f_i 为岩石受到的体积力, MPa; ε_{ij} 为地层的应变分量; $u_{i,j}$ 、 $u_{j,i}$ 为位移分量, m; σ_r 为井壁岩石径向应力, MPa; P_w 为液柱产生的压力, MPa; σ'_{ij} 为有效应力分量, MPa; α 为有效应力系数; P_p 为地层孔隙压力, MPa; δ_{ij} 为 Kronecker 系数。

断层弱面破坏遵循弱面破坏准则^[18-19], 见式(11)。

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = \frac{2(C_w + u_w \sigma'_3)}{(1 - u_w \cot \beta) \sin 2\beta} \quad (11)$$

式中: σ'_1 、 σ'_3 分别为最大、最小主应力, MPa; C_w 为黏聚力, MPa; u_w 为内摩擦系数; β 为弱面的法向与 σ'_1 夹角, (°)。

根据上述模型, 对于断层深度任意井斜角与方位角下的井眼可分别计算各个周向角的应力分布, 并将计算结果代入式(11)中, 选取能够发生破坏的最小泥浆密度作为该井斜与方位角下的坍塌压力值, 继而能够得到该深度下井斜 0~90° 和方位 0~360° 各点处的坍塌压力, 从而为过断层面泥浆比重设计提供参考。

2.2 过断层防漏堵漏技术

钻遇断层破碎带产生的井漏是典型的裂缝—孔隙性漏失。通过研究攻关及现场作业实践, 针对该类型井漏形成的防漏堵漏技术主要包括以下 3 种。

1) 井身结构优化技术。调整中间套管下深至钻穿危险断层 10~20 m, 及时封固薄弱层防止发生漏失情况。

2) 强化钻井液封堵能力。提前在泥浆中加入封堵材料, 封堵剂中同时包括颗粒性物质与凝胶状物质, 在形成低渗泥饼的同时提升井周地层胶结强度, 提高地层承压能力; 并且及时降低泥浆中的固相含量, 提高钻井液的润滑性, 保证泥浆与地层水有良好的配伍性。

3) 采取合适的堵漏措施。发生漏失后及时配置堵漏浆, 包括快速堵漏剂、单封、随钻堵漏剂及高效封堵剂等材料, 堵漏浆浓度保持在 30% 或 40% 之上。对于断层破碎带漏失, 目前常用的堵漏方法包括随钻堵漏法、桥

塞堵漏法、水泥堵漏法等, 基于现场经验来看随钻堵漏成功率更高^[20-21]。

3 过断层井眼轨迹优化设计

辽西一号断层在垂深 800~1 000 m 处断层倾角为 75°, 断层走向为 30°。利用本文建立的过断层坍塌压力计算模型, 在垂深 1 000 m 处进行断层各倾角与走向的坍塌压力计算, 并绘制成坍塌压力风险云图, 见图 3。结合辽西一号断层倾角与走向情况, 综合判断辽西一号大断层垂深 1 000 m 处原始坍塌压力为 1.30 g/cm³。

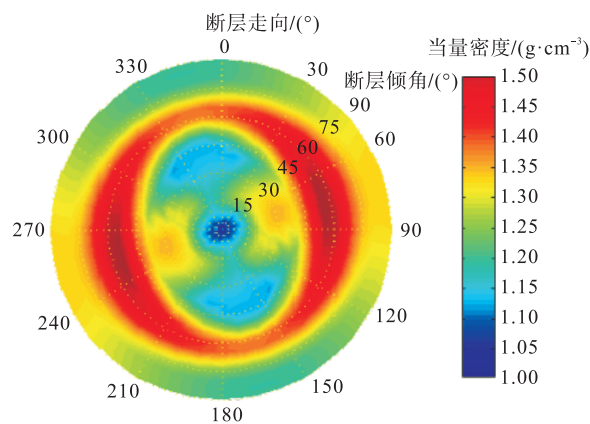


图3 辽西一号断层垂深 1 000 m 处坍塌压力风险云图

Fig.3 Risk cloud map of collapse pressure of Liaoxi No. 1 fault with vertical depth of 1 000 m

统计旅大某油田钻遇断层的 14 口井断点处的井斜、方位、垂深等情况, 并根据井斜和方位投影到坍塌压力风险云图, 得到 14 口井断点处的坍塌压力, 见表 4。结果表明, C57、C58、C59 这 3 口井过断层处坍塌压力值高于辽西一号地层原始坍塌压力, 意味着需要使用更高的泥浆比重, 更不利于断层钻进, 因此尝试调整钻遇断层时的井斜和方位以降低坍塌压力。

C57、C58、C59 井调整井斜前后坍塌压力情况见图 4。

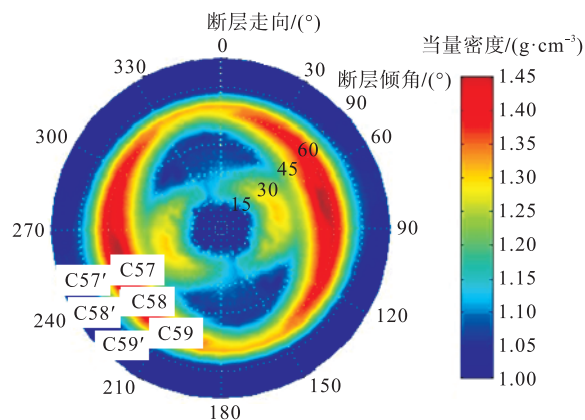


图4 C57、C58、C59 井调整井斜前后坍塌压力情况图

Fig.4 Collapse pressure before and after well deviation adjustment of well C57、C58、C59

表 4 旅大某油田 14 口过断层井坍塌压力情况表

Tab.4 Collapse pressure of 14 fault passing wells in LD oilfield

井名	过断层位置 井斜 / (°)	过断层位置 方位 / (°)	过断层 垂深 /m	过断层垂直 断距 /m	狗腿度 /[(°)·30 ⁻¹ m ⁻¹]	坍塌压力 /(g·cm ⁻³)	风险 情况
C22	68.60	252.14	895	45	4.0	1.28	较低
C23	74.05	249.56	912	45	3.2	1.16	较低
C24	68.37	257.10	887	50	3.0	1.22	较低
C25	78.24	247.54	872	55	3.0	1.10	较低
C26	83.67	238.16	888	60	3.0	1.08	较低
C52	71.58	248.14	1 003	50	3.5	1.15	较低
C53	72.57	253.95	1 008	50	3.0	1.15	较低
C54	75.44	255.69	1 018	60	3.0	1.15	较低
C55	71.67	247.43	872	55	3.0	1.15	较低
C56	74.10	244.30	891	60	3.0	1.15	较低
C57	68.76	241.39	902	55	3.0	1.31	较高
C58	65.46	238.30	917	55	3.0	1.35	较高
C59	67.49	236.24	929	60	3.0	1.32	较高
C60	68.95	233.99	883	60	3.0	1.28	较低

从图 4 可知,3 口井目前钻遇断层坍塌压力如 C57、C58、C59 所示,若适当增加钻遇断层井斜即调整至 C57'、C58'、C59',坍塌压力可大幅度降低。

旅大某油田钻遇断层井轨迹情况见表 5,井深共计 7 445.8 m,过断层时坍塌压力范围为 1.30~1.35 g/cm³。旅大某油田钻遇断层井轨迹调整后情况见表 6,井深共计 7 608.38 m,总井深增加 162.58 m。但过断层时坍塌压力范围为 1.18~1.21 g/cm³,坍塌压力下降,有利于钻安全。

表 5 旅大某油田钻遇断层井轨迹情况表

Tab.5 Trajectory of wells drilling into a fault of LD oilfield

井名	井深 / m	井斜 / (°)	方位 / (°)	狗腿度 /[(°)· 30 ⁻¹ m ⁻¹]	坍塌压力 / (g·cm ⁻³)
C57	2 396.80	68.76	241.39	3	1.30
C58	2 488.00	65.46	238.30	3	1.35
C59	2 561.00	67.49	236.24	3	1.30

表 6 旅大某油田钻遇断层井轨迹调整后情况表

Tab.6 Trajectory after adjustment of wells drilling into a fault of LD oilfield

井名	井深 / m	井斜 / (°)	方位 / (°)	狗腿度 /[(°)· 30 ⁻¹ m ⁻¹]	坍塌压力 / (g·cm ⁻³)
C57	2 444.38	72.30	241.62	3	1.18
C58	2 551.00	71.68	238.72	3	1.21
C59	2 613.00	72.03	236.53	3	1.20

4 结论

1) 利用泥岩涂抹程度法、断面正压力法及实际钻井

情况评价了辽西一号断层垂深 800~1 000 m 的封闭性,计算得到该层段泥岩涂抹因子 <3、断面正压力 >3.6 MPa,且实钻过程中未出现漏失等事故,说明辽西一号在该层段封闭性较好,钻井可实施。

2) 依据断层弱面破坏准则,提出了过断层井轨迹优化设计的过断层坍塌压力计算方法,结合辽西一号断层倾角与走向情况,综合判断辽西一号大断层垂深 1 000 m 处原始坍塌压力为 1.30 g/cm³。

3) 调整钻遇辽西一号断层风险较高的 3 口井井眼轨迹,发现平均增加井斜 4.7°即可降低坍塌压力 0.12 g/cm³,有利于降低钻遇断层风险,提高钻完井安全,为类似钻遇断层井轨迹调整提供了思路。

参考文献:

[1] 李潍莲,刘震,代春萌,等.辽东湾 JZS 油气田西侧边界断层输导性能分析[J].现代地质,2009,23(2):112-118.
LI Weilian, LIU Zhen, DAI Chunmeng, et al. The carrying capability of western margin faults of JZS oilfield and their controls on hydrocarbon accumulation in Liaodong Bay [J]. Geoscience, 2009, 23 (2): 112-118.

[2] 邓运华.渤海大中型潜山油气田形成机理与勘探实践[J].石油学报,2015,36(3):253-261.
DENG Yunhua. Formation mechanism and exploration practice of large-medium buried-hill oil fields in Bohai Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36 (3): 253-261.

[3] 赵永光,王维,李战伟,等.南堡 3 号构造复杂水平井钻井技术研究与应用[J].钻采工艺,2016,39(5):5-7.

- ZHAO Yongguang, WANG Wei, LI Zhanwei, et al. Research on complex deep well drilling technology for Nanpu 3 structure and its application [J]. *Drilling & Production Technology*, 2016, 39 (5): 5-7.
- [4] 王 怡, 徐 江, 梅春桂. 含裂缝的硬脆性泥页岩理化及力学特性研究[J]. *石油天然气学报*, 2011, 33(6): 104-108.
- WANG Yi, XU Jiang, MEI Chungui. Chemical and mechanical properties of brittle fractured mud shale [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2011, 33 (6): 104-108.
- [5] 耿立军, 林 海, 刘海龙, 等. 渤海油田过断层井段井壁稳定性分析[J]. *非常规油气*, 2021, 8(2): 101-106.
- GENG Lijun, LIN Hai, LIU Hailong, et al. Wellbore stability analysis in cross-fault section in Bohai Oilfield [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2021, 8 (2): 101-106.
- [6] 林 海, 许 杰, 幸雪松, 等. 过断层井段井壁稳定性分析[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(1): 110-115.
- LIN Hai, XU Jie, XING Xuesong, et al. Study on wellbore stability of well sections through a fault [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29 (1): 110-115.
- [7] 邓金根, 林 海, 胡连波, 等. Kingfisher 区块过断层地应力变化规律及井壁稳定性[J]. *科技导报*, 2013, 31 (23): 53-56.
- DENG Jingen, LIN Hai, HU Lianbo, et al. Variations of in-situ stress and wellbore stability for Kingfisher block through the fault [J]. *Science & Technology Review*, 2013, 31 (23): 53-56.
- [8] 王 奎, 杨 静, 侯光宗, 等. 断层封闭性研究现状及其发展趋势[J]. *断块油气田*, 2008, 15(3): 43-45.
- WANG Kui, YANG Jing, HOU Guangzong, et al. Present status and development tendency of research on fault closure property [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2008, 15 (3): 43-45.
- [9] 付 广, 史集建, 吕延防. 断层侧向封闭性定量研究方法的改进[J]. *石油学报*, 2012, 33(3): 414-418.
- FU Guang, SHI Jijian, LYU Yanfang. An improvement in quantitatively studying lateral seal of faults [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33 (3): 414-418.
- [10] SMITH D A. Theoretical considerations of sealing and non-sealing faults [J]. *AAPG Bulletin*, 1966, 50 (2): 363-374.
- [11] SMITH D A. Sealing and nonsealing faults in Louisiana gulf coast salt basin [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1980, 64 (2): 145-172.
- [12] 赵密福. 断层封闭性研究现状[J]. *新疆石油地质*, 2004, 25(3): 333-336.
- ZHAO Mifu. A review on fault seal study [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2004, 25 (3): 333-336.
- [13] 王东晔, 查 明, 吴孔友. 有关断层封闭性若干问题的探讨[J]. *新疆石油地质*, 2007, 28(4): 513-515.
- WANG Dongye, ZHA Ming, WU Kongyou. A discussion on several issues about fault sealing [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2007, 28 (4): 513-515.
- [14] 李储华, 刘玉瑞, 王 路, 等. 泥岩涂抹定量计算的对比分析及应用[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2009, 31(1): 164-166.
- LI Chuhua, LIU Yurui, WANG Lu, et al. Comparative analysis and application of quantitative calculation of mudstone smear [J]. *Journal of Oil & Gas Technology*, 2009, 31 (1): 164-166.
- [15] 刘 震, 谭 卓, 蔡东升, 等. 用断层面正压力法分析北部湾盆地涠西南凹陷断层垂向封闭性及其演化[J]. *地质科学*, 2008, 43(4): 695-711.
- LIU Zhen, TAN Zhuo, CAI Dongsheng, et al. Analysis of fault vertical sealing and its evolution in Weixinan sag of Beibu Gulf basin using normal pressure method [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2008, 43 (4): 695-711.
- [16] 金 衍, 陈 勉. 井壁稳定力学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 36-53.
- JIN Yan, CHEN Mian. Wellbore stability mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2012: 36-53.
- [17] 闫传梁, 邓金根, 蔚宝华, 等. 页岩气储层井壁坍塌压力研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(8): 1595-1601.
- YAN Chuanliang, DENG Jingen, YU Baohua, et al. Research on collapse pressure of gas shale [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32 (8): 1595-1601.
- [18] 兰 凯, 刘明国, 晁文学. 横观各向同性水敏性地层斜井眼坍塌压力确定[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(1): 198-206.
- LAN Kai, LIU Mingguo, CHAO Wenxue. Determination of collapse for deviated wellbore in transversely isotropic water-sensitive formation [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45 (1): 198-206.
- [19] 陈峥嵘. 页岩横观各向同性储层水平井周应力预测模型[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(24): 26-30.
- CHEN Zhengrong. Prediction model of borehole stress of horizontal well in transversely isotropy shale gas formation [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17 (24): 26-30.
- [20] 张卫平. 喷漏同层井段全井高密度随钻堵漏钻井液技术[J]. *钻井液与完井液*, 2008, 25(4): 58-60.
- ZHANG Weiping. High density LCM Drilling fluid technology solved the problem of the coexistence of blowout and mud losses [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2008, 25 (4): 58-60.
- [21] 赵福祥, 孟庆立, 王 静, 等. 冀中坳陷深潜山内幕井防漏、防塌钻井技术[J]. *石油钻采工艺*, 2009, 31(2): 13-17.
- ZHAO Fuxiang, MENG Qingli, WANG Jing, et al. Hole sloughing prevention and antileakage drilling technology in deep buried hill inside well drilling in Jizhong depression of Huabei Oilfield [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2009, 31 (2): 13-17.