



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2303756

引用格式:王跃鹏,高永伟,杨赞.鄂尔多斯盆地西缘冲断带深井井壁稳定性研究[J].科学技术与工程,2024,24(16):6691-6700.

Wang Yuepeng, Gao Yongwei, Yang Yun. Wellbore stability of deep well in western margin thrust belt of Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(16): 6691-6700.

# 鄂尔多斯盆地西缘冲断带深井井壁稳定性研究

王跃鹏<sup>1</sup>, 高永伟<sup>2</sup>, 杨赞<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学建设工程学院, 大连 116024; 2. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院, 西安 710018)

**摘要** 鄂尔多斯盆地西缘冲断带深层页岩气井钻井工程中垮塌、漏失、卡钻等复杂情况频发。为保障安全高效钻井,降低勘探开发成本,早日实现该区深层海相页岩气资源的经济高效开发,基于地应力、岩石力学等室内物理实验,结合现场工程参数及塌漏信息,考虑力学弱面影响,建立西缘冲断带深井全井段地层力学参数、全井段四压力剖面模型,评价不同岩性地层力学参数分布规律,揭示了西缘冲断带深井井壁坍塌、漏失等失稳机理。结果表明:羊虎沟组以上砂泥岩地层强度较低,为20~100 MPa,拉什仲组至桌子山组灰岩强度较高,超过100 MPa。较大的水平主应力差,发育的裂缝带、煤层是诱发井壁失稳的主要原因。建立的西缘冲断带深井岩石力学性能及四压力剖面预测,可为该地区井身结构优化设计,关键工程参数选取提供科学依据。

**关键词** 鄂尔多斯盆地; 西缘冲断带; 深井; 全井段地层; 力学性能; 井壁稳定

**中图分类号** TE28; **文献标志码** A

## Wellbore Stability of Deep Well in Western Margin Thrust Belt of Ordos Basin

WANG Yue-peng<sup>1</sup>, GAO Yong-wei<sup>2</sup>, YANG Yun<sup>2</sup>

(1. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Drilling & Production Engineering Technology Research Institute, CNPC Chuanqing

Drilling Engineering Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

**[Abstract]** In the drilling engineering of deep shale gas well in thrust belt of the western margin of Ordos Basin, complex cases such as collapse, leakage and stuck drilling are frequent. In order to ensure safe and efficient drilling, reduce exploration and development costs, and realize the economic and efficient development of deep marine shale gas resources in this area as soon as possible, based on indoor physical experiments of *in-situ* stress and rock mechanics, combined with field engineering parameters and collapse/leakage information, and considering the influence of weak surface of mechanics, formation mechanical parameter and four-pressure profile models for the whole well section of deep well in the western thrust belt were established. The distribution law of mechanical parameters of different lithologic strata was evaluated, and the instability mechanism of deep well wellbore collapse and leakage in the thrust belt of western margin was revealed. The results show that the strength of sand-mudstone strata above Yanghugou Formation is low, 20 ~ 100 MPa, while the strength of limestones from Lashizhong formation to Zhuozishan formation is higher, over 100 MPa. Large horizontal principal stress difference, developed fracture zone and coal seam are the main causes of wellbore instability. The established rock mechanical properties and four pressure profiles of deep wells in the western margin thrust belt can provide scientific basis for optimization design of well structure and the selection of key engineering parameters.

**[Keywords]** Ordos Basin; western margin thrust belt; deep well; whole well section; mechanical properties; wellbore stability

中国页岩气资源丰富,发育有海相、海陆过渡相和陆相3种富有机质页岩<sup>[1]</sup>。目前已建成长宁-威远、昭通、涪陵国家级海相页岩气示范区和延安国家级陆相页岩气示范区<sup>[2]</sup>。其中延安勘探开发区位于鄂尔多斯盆地中部,目的层为三叠系延长组

及上古生界山西组、本溪组富有机质页岩。

在此背景下,鄂尔多斯盆地中东部延长组等陆相页岩气储层沉积特征<sup>[3]</sup>、下限参数评价<sup>[4]</sup>、岩石力学特征、地应力分析<sup>[5]</sup>及井壁稳定<sup>[6-7]</sup>等相关研究也相继开展。而对于鄂尔多斯盆地西部,长期以

收稿日期:2023-05-22 修订日期:2024-03-11

基金项目:中国石油集团川庆钻探工程有限公司科研项目(CQ2020B-7-7-3)

第一作者:王跃鹏(1991—),男,汉族,陕西渭南人,博士,助理研究员。研究方向:非常规油气井壁稳定、水力压裂及隧道开挖。E-mail:wanyuepeng91@126.com。

来主要以常规天然气勘探为主,克里摩里组作为勘探的关键目标层并未取得重大突破,导致该区页岩气勘探成果相对薄弱。近年来,在盆地西部下古生界天然气勘探过程中,多口探井在钻探乌拉力克组时发现较好的气测异常显示。如忠4井在中途测试获 $4.18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流。为此,中石油长庆油田公司提出“向源勘探”的战略思维,并优选2口水平井(忠平1井和那平1井)开展先导试验。结合储层改造工艺及排采技术,忠平1井试气获 $26.48 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 高产气流,标志着盆地西部乌拉力克组海相页岩气勘探获得重大突破<sup>[8]</sup>。

但鄂尔多斯盆地西部地区构造较为复杂,具有分区性,其中西缘冲断带为几大构造单元的结合部位,构造活动更强,构造面貌更复杂<sup>[9]</sup>,断裂非常发育,地层变化大,呈南北展布,以逆断层为主,钻进过程中常常出现卡钻、漏失、坍塌、同层溢漏等复杂情况,延长钻井周期,增加钻井成本。目前在盆地西部的研究多集中在地球化学特征<sup>[10]</sup>、裂缝填充识别、测井响应特征<sup>[11]</sup>、地层精细划分<sup>[12]</sup>等,针对鄂尔多斯盆地西缘冲断带复杂地质条件的岩石力学参数和四压力剖面的预测模型仍比较欠缺,有必要开展相关研究<sup>[6-7]</sup>。

基于工程地质一体化支持非常规油气藏等低品位资源有效开发的思路<sup>[13-14]</sup>,有助于开展西缘冲断带钻井过程中的井壁失稳机理研究,在实现高效安全钻井,降低钻井成本的同时,也可为后期储层改造提供优良的压裂条件。因此,结合声波、密度、成像等测井资料和现场实际钻进资料,开展关键层段岩石矿物组分、扫描电镜、岩石力学物理实验,建立适用于西缘冲断带的地质力学模型,绘制西缘冲断带深井地应力、岩石力学和全井段四压力剖面,揭示关键层段井壁失稳机理,并提出相应的解决/预防井壁失稳的对策建议。

## 1 区域已钻井塌、漏情况分析

西缘冲断带存在多个区域性易漏失层位(纸坊组、刘家沟组、克里摩里组等),下部山西、太原等地层有煤层,羊虎沟底部有铁铝岩层,钻井过程中漏失、垮塌、掉块严重,井眼极不规则,易卡钻,钻具受损严重。如2015年施工的古探1井在石千峰和奥陶系漏失6次,损失钻井液 $1961 \text{ m}^3$ ;2017年完井的梁探1井全井共计漏失钻井液 $1334 \text{ m}^3$ 。

对该区已钻井的现场资料进行整理,得到井塌、井漏层位信息,并对比分析同一层位下各井的井漏事件及钻速差异,如表1所示。

该区主要复杂事故为井漏,仅古探1井出现井塌,钻井液密度的变化对井漏的影响较大,且井漏层

表1 井漏层位统计

井号	地层	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	钻速/ ( $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ )	漏速/ ( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ )	漏失量/ $\text{m}^3$
古探1井	延长	1.12	2.50	—	—
	刘家沟	1.16	3.44	—	—
	石千峰	1.23	1.27	6.0~10.0	124
	三道坎	1.20	1.29	8.0~12.0	60
	王全口	1.18	0.21	4.0~15.0	100
梁探1井	纸坊组	1.01	—	32.0	730
	石盒子	1.25	3.25	1.5~2.0	366
	刘家沟	1.23	3.25	30.0	213
	桌子山	1.27	3.25	20.0	75
李34井	刘家沟	1.20	3.73	60.0	252
	石千峰	1.19	5.75	6.0~10.0	30
	石盒子	1.20	0.98	2.0~4.0	40
	桌子山	1.17	2.54	18.0	207
	三道坎	1.16	1.58	5.0~20.0	60
驿探1井	长城系	1.16	0.70	10.0	278
	延长	1.25	4.00	8.0~10.0	270
	刘家沟	1.27	3.00	12.0~18.0	60
	刘家沟	1.27	3.00	10.0~20.0	377
	石千峰	1.30	0.50	45.0~55.0	298
忠2井	石千峰	1.34	0.50	40.0~50.0	280
	石千峰	1.20	2.52	44.0	88

位钻速极低。这是由于钻井液密度与钻速关系密切,井壁失稳出现坍塌破坏后钻速较低,影响整个钻井进程。

## 2 室内物理实验及相关力学分析

### 2.1 矿物组分分析

使用研钵将研究区井下取芯岩样和返出掉块岩样研磨成100目粉末,在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下烘干12h后,对其进行编号,1为延长组,2为延长组与纸坊组互层,3~4为纸坊组,5~7为石千峰组,开展X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)衍射实验,可得全岩矿物组分如图1(a)所示,后根据静态悬浮沉淀法,得到黏土矿物组分样品,制成自然风干片(N)、乙二醇饱和片(EG)和 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 加热片(T)进行XRD衍射测试,对比3次测试结果就得到黏土矿物类型和含量,结果如图1(b)所示。

由图1可知,石千峰组、纸坊组以及延长组与纸坊组互层岩石主要由石英、斜长石、方解石、黏土矿物等矿物组成,部分岩样含有钾长石、菱铁矿、黄铁矿、褐铁矿及方沸石。其中石英、方解石等为脆性矿物,且含量较高,从微观矿物组成可知岩石发生脆性破坏的概率较大。本次测试岩样中黏土矿物含量都较高,主要由伊利石、高岭石、绿泥石和伊/蒙混层组成,其中伊利石含量最高,高岭石、伊/蒙混层次之,绿泥石最少。

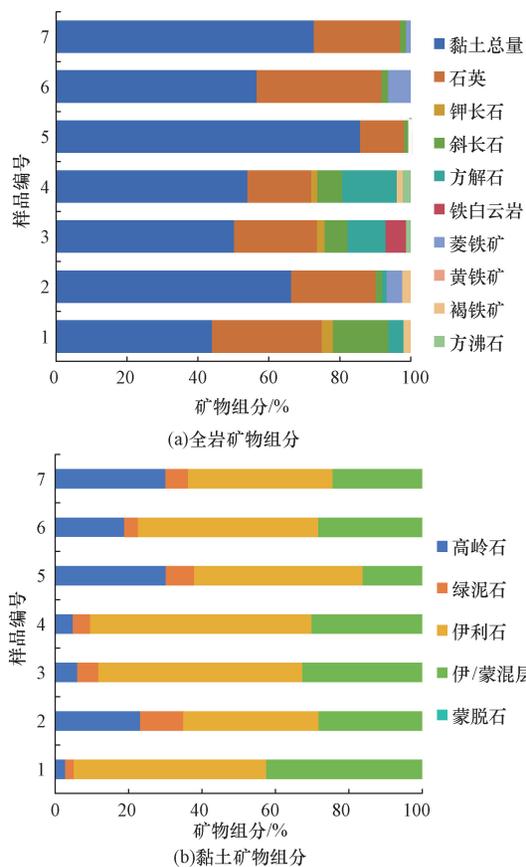


图1 矿物组分分析

Fig. 1 Analysis of mineral components

参考谭聪等<sup>[15]</sup>的研究结果可知,鄂尔多斯盆地三叠系刘家沟组、和尚沟组及其上下层位石盒子组、石千峰组、纸坊组、长10段、长7段的样品中常见非黏土矿物主要为石英、钾长石、钠长石、方解石、黄铁矿、赤铁矿;样品中黏土矿物主要为伊/蒙混层、绿泥石以及少量的伊利石、蒙脱石和高岭石。

2.2 扫描电镜

将研究区井下岩样制成薄片状,开展SEM扫描电镜实验,观察岩石内部微观结构,如孔隙、裂缝及黏土矿物的排列方式等。典型扫描电镜图如图2所示。

局部可见长石晶体颗粒堆积,矿物颗粒间有微孔隙及微裂缝。纸坊组、石千峰组岩样内部存在明显裂缝,且内部结构层状明显,岩石内部结构较疏松,岩石的微观结构特征差异较为明显,地层非均质性明显。

2.3 岩石力学特征

在实钻过程中,刘家沟组、石千峰组地层常常发生区域性漏失,因此对取自研究区刘家沟组地层(3 453.85~3 456.5 m)的18块岩样进行室内强度试验,其中用于测试抗压强度的岩样为φ25 mm×50 mm,用于测试抗拉强度的岩样为φ25 mm×5 mm。

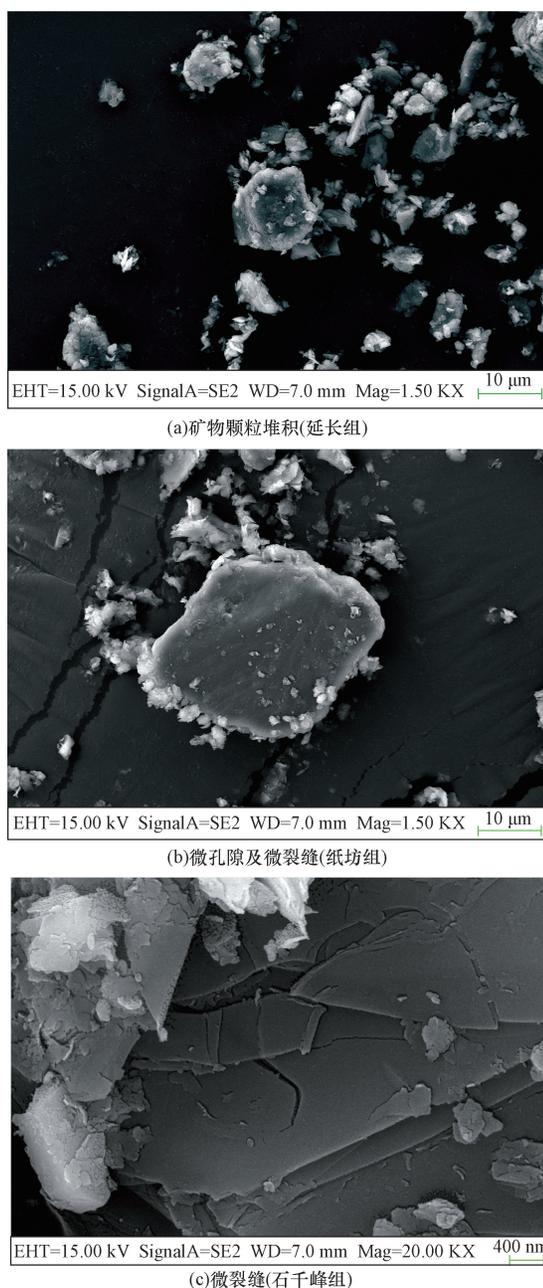


图2 井下岩样微观结构

Fig. 2 Microstructure of underground rock sample

由图3可知,钻井液浸泡后,岩石抗压强度和弹性模量逐渐降低,而泊松比逐渐增加。相同浸泡时间下,相比于油基钻井液,水基钻井液浸泡后抗压强度和弹性模量降低更多,说明水基钻井液对岩石弱化作用影响更强;随着浸泡时间增加,岩石弱化程度表现出增强趋势。这是由于水基/油基钻井液中的水相介质,在毛细管力、势能差、压力差作用下,通过微孔隙及微裂进入岩石内部,与内部黏土矿物颗粒发生表面水化作用,加之不同类型黏土矿物间水化作用程度存在差异,产生水化应力,引发水力劈裂效应,加剧岩石内部结构破坏<sup>[16-17]</sup>,而水

基钻井液中含水量大于油基钻井液,同时黏土矿物含量高的岩石,其润湿性具有两面性,相对于亲油,其更偏向于亲水。因此,水进入岩石内部并发生水化损伤的严重程度更大,导致岩石力学强度降低更多。

由图4可知,随着围压增加,岩石抗压强度和弹性模量逐渐增加,而泊松比逐渐降低,说明随着钻井井深增加,井下岩石抵抗外部作用的能力逐渐增加,因此井壁稳定性分析时需进一步考虑地层条件及其对岩石力学特征的影响。

岩石压缩试验后岩样整体破碎度较低,基本保持原来圆柱形状,偶有贯穿裂纹产生。该地层岩石应力应变曲线属于I型,前期应力与应变的关系近似直线,屈服点和破坏点几乎重合无法区分,岩样达到峰值强度后陡然降低,表现为脆性破坏,与矿物组分分析中含有较多的石英和方解石等脆性矿物的结论一致。

采用巴西劈裂法测试岩石的抗拉强度,由图5可知,研究区岩石抗拉强度都小于7 MPa,个别岩样接触后就破碎,无法得到相应数值,这可能与其内部含有较大的微裂纹、微孔隙有关。

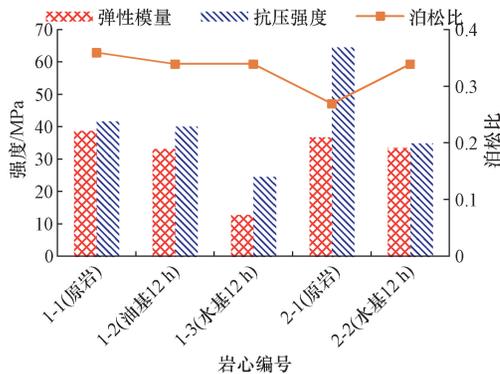


图3 钻井液浸泡对岩石力学特征的影响  
Fig. 3 Influence of drilling fluid immersion on rock mechanical characteristics

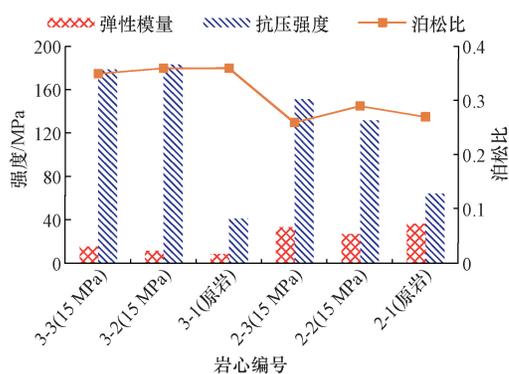


图4 围压对岩石力学特征的影响  
Fig. 4 Influence of confining pressure on rock mechanical characteristics

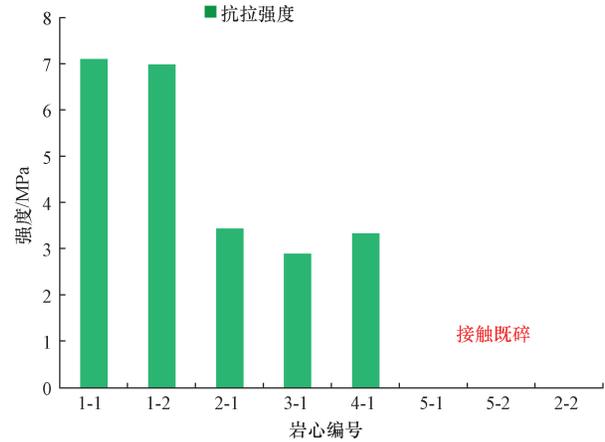


图5 研究区典型岩样的抗拉强度  
Fig. 5 Tensile strength of typical rock samples in the study area

## 2.4 地应力反演

以位于西缘冲断构造前缘带的梁探1井为例,上覆岩层压力依据岩石的密度和孔隙度积分获取,水平最大、最小主应力采用构造应力系数法计算得到,同时依据地破实验和实钻数据进行校核。水平地层主应力是确定钻井液安全密度窗口以及水力压裂施工的重要参考<sup>[5]</sup>。梁探1井的地应力分析结果如图6所示,水平最小主应力系数为1.20~1.94 g/cm<sup>3</sup>,水平最大主应力系数为1.30~2.74 g/cm<sup>3</sup>,上覆岩层压力系数为1.70~2.51 g/cm<sup>3</sup>。

根据微电阻率成像测井图像(FMI)统计钻井诱导裂缝的延伸方向,利用钻井诱导缝,最终确定最大水平主地应力方位为N50°E~N65°E。

## 2.5 岩石力学参数剖面预测

基于室内强度测试结果,结合中外已有岩石力学计算反演模型,得到适用于该区的岩石力学参数计算模型为

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (1)$$

$$\mu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (2)$$

式中: $E_d$ 为动态弹性模量,MPa; $\mu_d$ 为动态泊松比; $\rho$ 为地层体积密度,g/cm<sup>3</sup>; $V_s$ 、 $V_p$ 分别为地层横波速度、地层纵波速度,m/ $\mu$ s。

$$C = A_1 (1 - 2\mu_d) \left( \frac{1 + \mu_d}{1 - \mu_d} \right)^2 \rho^2 V_p^4 (1 + 0.78V_{cl}) \quad (3)$$

$$\varphi = A_2 - A_3 C \quad (4)$$

式中: $C$ 为黏聚力,MPa; $V_{cl}$ 为泥质含量系数,小数; $\varphi$ 为内摩擦角,(°); $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 为经验系数。

$$P = 2C \tan \left( 45 + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (5)$$

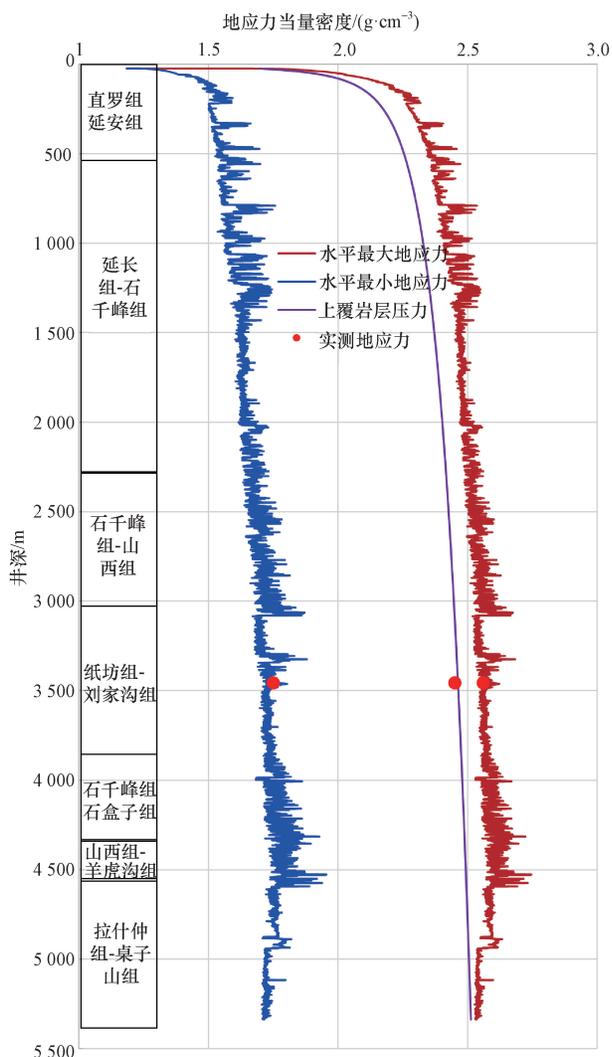


图6 梁探1井的地应力分析结果  
Fig.6 In-situ stress analysis results of LT1 well

$$S_t = \frac{(0.0045 + 0.0035V_{cl})E_d}{k} \quad (6)$$

式中: $P$ 为单轴抗压强度,MPa; $S_t$ 为抗拉强度,MPa; $k$ 为压拉比。

根据研究区力学参数的计算模型获得梁探1井的岩石力学剖面,具体数值范围如表2所示。可以看出,随井深增加,抗压强度、弹性模量、黏聚力等呈现逐渐增大的趋势。同层间或非同层间的岩石力学参数波动较大:直罗组~延安组的抗压强度较低,平均为20MPa;延长组-石千峰组,石千峰组-山西组,纸坊组-刘家沟组,石千峰组、石盒子组,山西组-羊虎沟组地层抗压强度的平均值分别为40、50、55、70、80MPa;而拉什仲组-桌子山组地层抗压强度的平均值为100MPa,因此拉什仲组等下部地层属中-中硬地层。

以羊虎沟组为界限,其下地层的黏聚力较大,

表2 岩石力学参数统计

Table 2 Statistics of rock mechanics parameter

地层	$P$ /MPa	$E$ /GPa	$\mu$	$C$ /MPa	$\varphi$ (°)
a	取值范围 2~60 统计平均值 20	1~12 5	0.35~0.45 0.4	1~10 5	46~49 47.5
b	取值范围 5~90 统计平均值 40	5~22 15	0.28~0.38 0.32	2~20 10	44~49 46
c	取值范围 10~100 统计平均值 50	8~25 18	0.28~0.35 0.3	2~20 10	44~48.2 46.3
d	取值范围 20~110 统计平均值 55	10~25 22	0.25~0.35 0.28	5~25 12	44~48 45.8
e	取值范围 5~120 统计平均值 70	10~28 20	0.26~0.32 0.27	2~25 13	42~48.3 46
f	取值范围 5~120 统计平均值 80	8~28 20	0.26~0.36 0.3	2~26 15	42.5~48.5 45.3
g	取值范围 60~140 统计平均值 100	30~50 42	0.23~0.28 0.25	17~30 22	41~46 44

注:a为直罗组-延安组;b为延长组-石千峰组;c为石千峰组-山西组;d为纸坊组-刘家沟组;e为石千峰组、石盒子组;f为山西组-羊虎沟组;g为拉什仲组-桌子山组; $P$ 为单轴抗压强度; $E$ 为弹性模量; $\mu$ 为泊松比; $C$ 为黏聚力; $\varphi$ 为内摩擦角。

平均大于15MPa,其上地层的黏聚力平均小于13MPa。根据莫尔-库伦强度破坏准则,黏聚力小,岩石发生破坏的剪应力越小,由剪切破坏而导致的井壁坍塌风险越高,加之西缘冲断带地区的岩性复杂、裂缝发育,易增大坍塌压力和降低漏失压力,对井壁稳定产生不利影响。

### 2.6 四压力剖面预测

西缘冲断带研究区孔隙压力、坍塌压力、漏失压力和破裂压力的计算模型为

$$P_p = \sigma_v - (\sigma_v - P_w) \left( \frac{\Delta t_n}{\Delta t_p} \right)^{C_p} \quad (7)$$

$$P_b = \frac{3\sigma_H - \sigma_h - 2C\text{ctg}(45^\circ - \frac{\varphi}{2})}{\left[ \text{ctg}(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \right]^2 - (1 - 2\mu)/(1 - \mu) + 1} + \frac{\left\{ \left[ \text{ctg}(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \right]^2 - (1 - 2\mu)/(1 - \mu) - 1 \right\} \alpha P_p}{\left[ \text{ctg}(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \right]^2 - (1 - 2\mu)/(1 - \mu) + 1} \quad (8)$$

$$P_L = P_p + \Delta P \quad (9)$$

$$P_r = \left( \frac{2\mu}{1 - \mu} - \beta \right) (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + S_t \quad (10)$$

式中: $P_p$ 为地层孔隙压力,MPa; $\sigma_v$ 为垂向应力,MPa; $P_w$ 为井底压力,MPa; $\Delta t_n$ 为任意深度的声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$ ;  $\Delta t_p$ 为孔隙流体的声波时差  $\text{m}/\mu\text{s}$ ;  $C_p$ 为压缩系数, $1/\text{MPa}$ ;  $P_b$ 为坍塌压力,MPa;  $\sigma_H$ 为最大水平主应力,MPa;  $\sigma_h$ 为最小水平主应力,MPa;  $\alpha$

为有效应力系数;  $P_L$  为地层漏失压力, MPa;  $\Delta P$  为漏失压差, MPa;  $P_f$  为地层破裂压力, MPa;  $\beta$  为构造应力系数。

以梁探 1 井为例, 得到全井段的孔隙压力、坍塌压力、漏失压力和破裂压力的压力剖面如图 7 所示, 相对应的预测值如表 3 所示。

梁探 1 井所钻遇的地层中大部分层段的坍塌压力较高, 由井壁坍塌导致的扩径现象严重, 共出现 3 次卡钻事故。实钻过程中漏失段对应地层多为裂缝性地层, 其漏失压力仅略高于孔隙压力, 即使使用低密度钻井液, 仍会发生持续漏失。受钻遇地层裂缝发育与岩性变化大的影响, 地层坍塌压力较高, 而漏失压力较低且波动极大, 导致钻进过程中井壁坍塌和漏失都比较严重。部分层段漏失压力与坍塌压力相差不大(如纸坊组), 甚至比坍塌压力还要小(如桌子山组), 使得防止或抑制坍塌和漏失难以兼得, 给正常钻进造成极大困难。

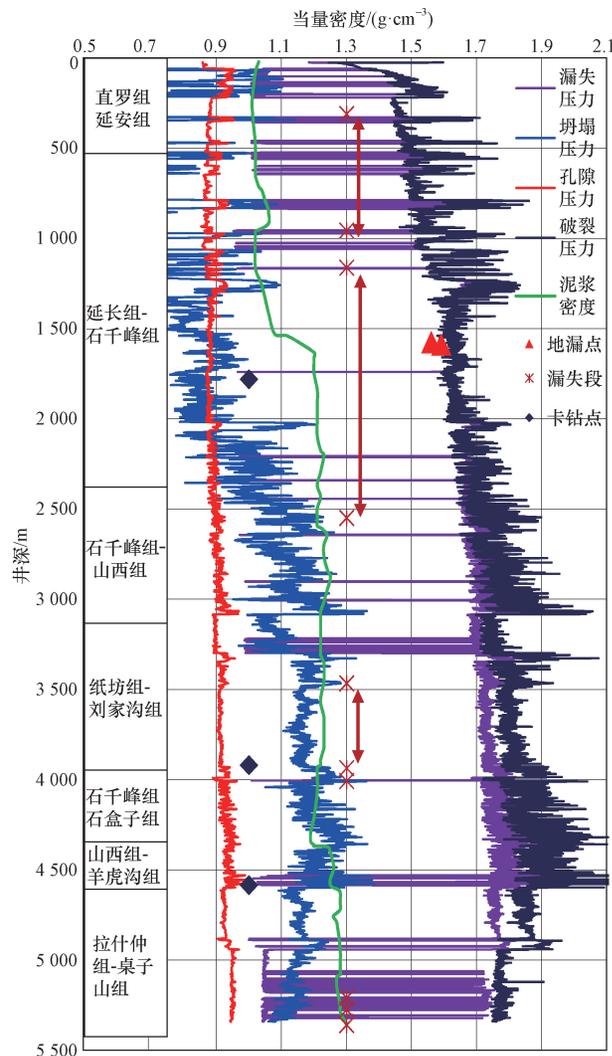


图 7 梁探 1 井四压力剖面

Fig. 7 Four pressure profile of LT1 well

表 3 梁探 1 井四压力预测值

Table 3 The predicted pressure value of LT1 well

地层	$P_p /$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	$\rho_m /$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	$\rho_L /$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	$\rho_f /$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )
a 取值范围	0.86 ~ 0.97	0.5 ~ 1.3	1.3	1.5
a 统计平均值	0.95	1.0	1 ~ 1.6	1.25 ~ 1.75
b 取值范围	0.86 ~ 0.97	0.9	1.4	1.6
b 统计平均值	0.9	0.5 ~ 1.3	0.95 ~ 1.74	1.45 ~ 1.85
c 取值范围	0.88 ~ 0.96	1.1	1.7	1.8
c 统计平均值	0.93	0.9 ~ 1.32	0.98 ~ 1.82	1.65 ~ 2
d 取值范围	0.9 ~ 0.98	0.9 ~ 1.3	1.75	1.8
d 统计平均值	0.95	1.2	0.98 ~ 1.8	1.7 ~ 2
e 取值范围	0.9 ~ 1.0	1.3	1.8	1.9
e 统计平均值	0.92	1.0 ~ 1.4	1 ~ 1.9	1.7 ~ 2.1
f 取值范围	0.91 ~ 1.01	1.22	1.8	2
f 统计平均值	0.95	1.08 ~ 1.32	1 ~ 1.95	1.8 ~ 2.2
g 取值范围	0.9 ~ 1.0	1.15	1.4	1.78
g 统计平均值	0.95	1.08 ~ 1.28	1 ~ 1.75	1.75 ~ 1.95

注: a 为直罗组~延安组; b 为延长组-石千峰组; c 为石千峰组-山西组; d 为纸坊组-刘家沟组; e 为石千峰组、石盒子组; f 为山西组-羊虎沟组; g 为拉什仲组-桌子山组;  $\rho_m$  为坍塌压力;  $\rho_L$  为漏失压力;  $\rho_f$  为破裂压力。

### 3 井壁失稳原因分析及对策建议

梁探 1 井采用三开结构, 完钻井深 5 355 m, 平均机械钻速 4.15 m/h, 钻井周期 140.75 d。钻井过程中主要采用堵漏浆承压堵漏和注水泥堵漏, 但直至二开完钻前该井仍发生漏失, 漏失 1 ~ 2 m<sup>3</sup>/h, 未能彻底解决并漏问题。因此对钻井复杂情况进行了详细统计, 分析了井壁失稳的原因, 并提出了相应的对策建议。

#### 3.1 钻井复杂情况分析

结合梁探 1 井的实钻资料, 该井在纸坊组 (1 234 m)、和尚沟/石盒子组 (1 591 ~ 2 517 m)、刘家沟组 (3 830 m)、桌子山组 (5 204 m) 发生失返性漏失, 漏失量分别为 730、366、213、75 m<sup>3</sup>, 现场分别通过正常钻进、随钻堵漏、挤水泥堵漏等措施进行处理。在刘家沟组 (1 702 m) 和羊虎沟组 (4 578 m) 附近地层发生卡钻现象, 主要是由砂砾岩、煤层及泥岩地层的掉块所导致, 通过注酸、循环活动钻具解卡。

#### 3.2 井壁失稳原因分析

结合坍塌压力剖面、井径剖面、伽马剖面、电阻率剖面和地层密度曲线, 对梁探 1 井的坍塌机理、漏失机理进行分析, 结果如图 8 和图 9 所示。

结合 2.4 节地应力分析结果可知, 该井所钻遇地层的水平主应力差较大, 地应力场的非均匀性强, 井眼处发生应力集中后易引发井壁坍塌。钻井施工刚好穿过断裂带, 地层泥砂互层、煤层和裂缝发育, 地层强度偏低, 致使地层坍塌压力和漏失压力均较低; 同时钻井液流体易侵入围岩, 导致井壁坍塌

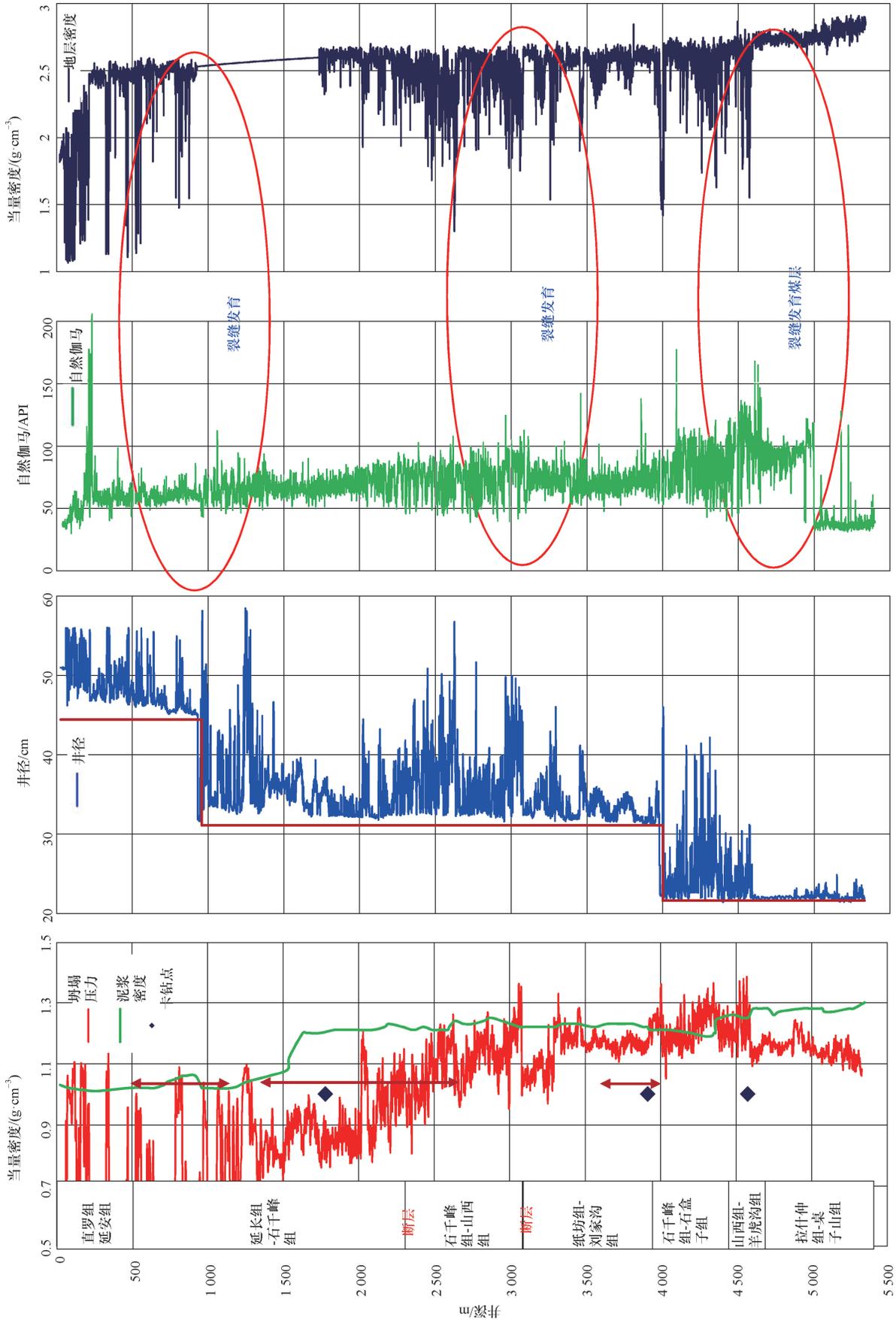


图 8 梁探 1 井的坍塌原因分析

Fig.8 Failure cause analysis of LT1 well

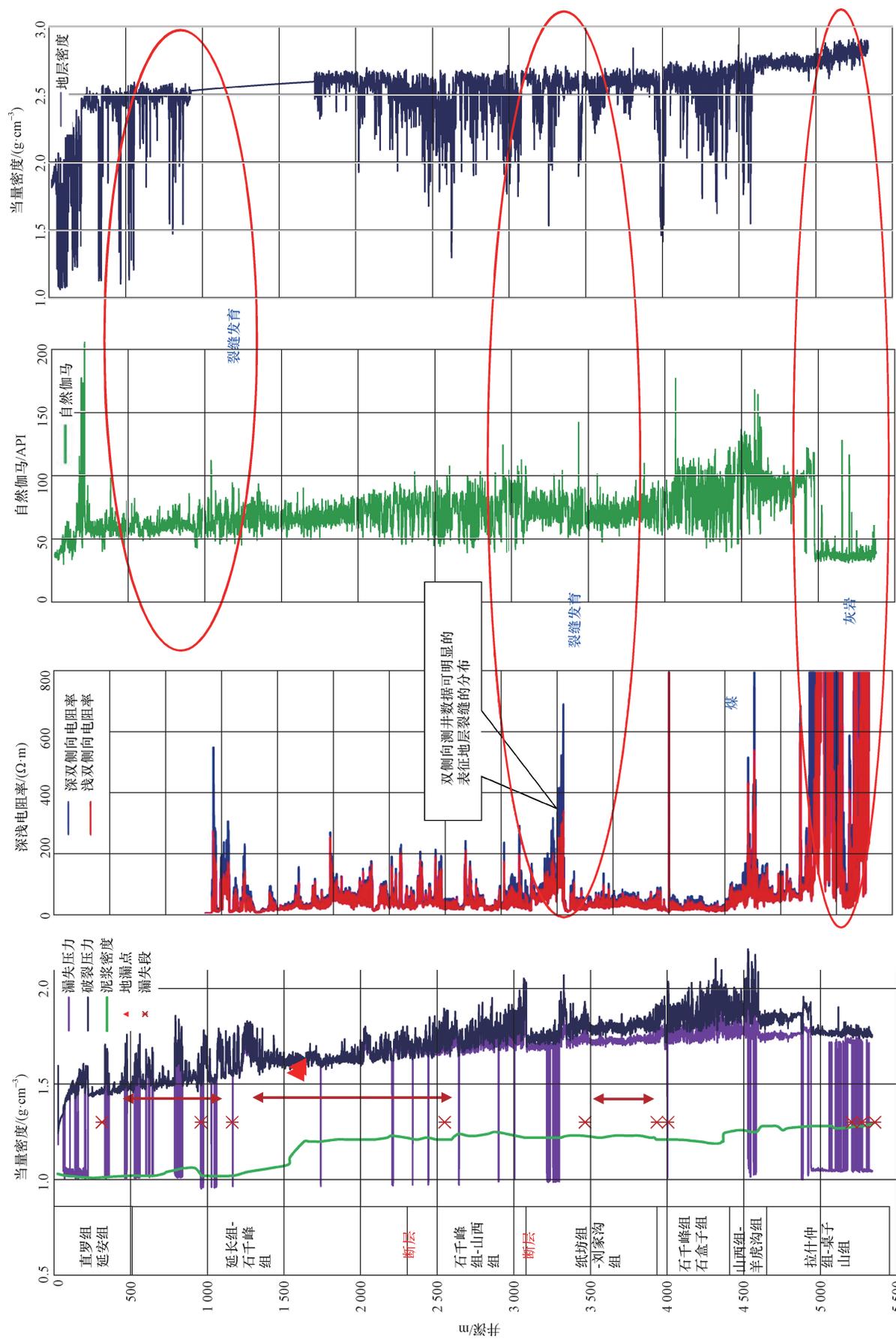


图9 梁探1井的漏失原因分析  
Fig.9 Analysis of leakage causes in LTI1 well

塌。部分层段地层较低的坍塌压力和漏失压力使地层无安全窗口,钻井液密度无法同时克服地层的坍塌与漏失问题。此外,深井较高的温度可使岩石中黏土矿物水化作用程度增强。

### 3.3 井壁失稳对策建议

#### 3.3.1 优化井身结构

梁探1井处于西缘冲断带于家梁背斜构造,地层存在2个断层,地层倾角较大,由于井深较大,为了保护油气层,保证钻井安全,梁探1井钻井过程中采用“三开”井身结构。结合实钻数据将井身结构进行优化,优化后即可很好封固渗漏层,又可尽可能地减少套管长度。

井身结构优化细节:①一开使用 $\Phi 444.5$  mm钻头、低固相聚合物钻井液,将使用表层套管( $\Phi 339.70$  mm)进入纸坊组,封固延长组以上渗漏层,优化为使用表层套管( $\Phi 339.70$  mm)进入和尚沟组,封固纸坊组以上渗漏层;②二开使用 $\Phi 311.1$  mm钻头、高坂土含量聚合物钻井液体系,使用技术套管( $\Phi 244.47$  mm)封固断层、刘家沟组(下盘)等以上地层,进入石千峰组,下入井深为3 999 m,优化为使用技术套管( $\Phi 244.47$  mm)进入纸坊组,封固断层、刘家沟组(下盘)等以上地层;③三开使用 $\Phi 245.9$  mm钻头、使用二开钻井液体系上添加复合盐水体系,油层套管( $\Phi 177.8$  mm)+尾管( $\Phi 139.7$  mm)下入深度5 354 m,在桌子山组完钻。因羊虎沟组、太原组、山西组煤层较发育,单层厚1~10 m,易坍塌,因此优化为在拉什仲组顶部进行回接,在桌子山组完钻。

#### 3.3.2 优选钻头类型

依据《石油天然气钻井工程岩石可钻性测定与分级》(SY/T 5436—2016),将延长组露头制备成高度为30~80 mm,直径为50 mm的圆柱体试样,试样两端面的平行度公差值 $\leq 0.2$  mm,借助西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室研制的高温高压岩石可钻性试验装置开展室内可钻性物理实验,按照行业标准测试钻至有效深度所需时间,并量化为岩石可钻性极值,结果显示:岩石的可钻性极值都在 $K_d$ 都在8以上( $K_d < 4$ ,硬度为软; $5 < K_d < 8$ ,硬度为中; $K_d > 8$ ,硬度为硬),属于硬级别。牙轮钻头相比于聚晶金刚石复合片(polycrystalline diamond compact, PDC)钻头的破岩效率更高,施加30 MPa围压后,可钻性极值有降低的趋势,这可能与液体在切削过程起到降温和润滑的作用有关。

#### 3.3.3 优选钻井液体系

由于在钻井过程中会钻遇洛河组、刘家沟组等易漏层,石千峰组、山西组、富县组等易塌层。结合

前面矿物组分和微观结构的研究结果,岩石含有较多的黏土矿物和微裂隙,黏土矿物在遇水后会发生水化作用,产生水化应力,在微裂缝产生尖端劈裂效应,造成岩石的损伤破坏。因此以强化微裂隙封堵、抑制滤液侵入、降低压力传递为技术核心,研发适用于储层安全钻进的CQ-NANOSEAL纳米封堵防塌高性能水基钻井液技术,可用于解决不同组构页岩储层井壁稳定及长水平段降摩减阻技术难题。

## 4 结论

基于矿物组分、扫描电镜、岩石力学等室内试验,结合地应力、“四压力”剖面分析结果,以梁探1井为例,对鄂尔多斯盆地西缘冲断带井壁失稳机理进行了详细研究,并提出了相应的对策建议。得出如下结论。

(1)石千峰组、纸坊组以及延长组、纸坊组互层岩石主要由石英、斜长石、方解石、黏土矿物等矿物组成。岩样内部存在明显裂缝,且内部结构层状明显,岩石内部结构较疏松,岩石的微观结构特征差异较为明显,地层非均质性明显。

(2)钻井液浸泡后,刘家沟组岩石的抗压强度和弹性模量逐渐降低,而泊松比逐渐增加。相比于油基钻井液,水基钻井液对岩石的弱化作用程度更强。西缘冲断带钻井过程中较大水平主应力差较大导致的应力集中,以及裂缝带和煤层发育易引发井壁坍塌。

(3)建议使用封易漏层的方式优化井身结构,特殊地层可考虑使用牙轮钻头增加破岩能力,使用纳米封堵防塌高性能水基钻井液技术封堵微裂缝等方式减少井壁失稳的发生,以提高钻井速度。

### 参 考 文 献

- [1] 董大忠,王玉满,李新景,等. 中国页岩气勘探开发新突破及发展前景思考[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 19-32.  
Dong Dazhong, Wang Yuman, Li Xinjing, et al. Breakthrough and prospect of shale gas exploration and development in China[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 19-32.
- [2] 邹才能,赵群,丛连铸,等. 中国页岩气开发进展、潜力及前景[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 1-14.  
Zou Caineng, Zhao Qun, Cong Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 1-14.
- [3] 申静静,张建国,葛云锦,等. 鄂尔多斯盆地延长组7-8段深水沉积特征及演化规律[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(10): 4135-4148.  
Shen Jingjing, Zhang Jianguo, Ge Yunjin, et al. Deep water sedimentary characteristics and evolution of members 7-8 of Yanchang Formation in the Fuxian-Zhidan area, Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(10): 4135-4148.

- [4] 秦子桢, 武富礼, 袁珍, 等. 致密油藏有效储层下限参数评价——以鄂尔多斯盆地中部Z区块长4+5油层组为例[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(5): 1852-1860.  
Qin Zizhen, Wu Fuli, Yuan Zhen, et al. Evaluation of effective reservoir lower limit parameters of tight reservoir: a case study of block Chang 4 + 5 in Z area of central Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(5): 1852-1860.
- [5] 俞忠宝, 庄严, 何亚斌, 等. 鄂尔多斯盆地F区力学特征及地应力分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(5): 1805-1811.  
Yu Zhongbao, Zhuang Yan, He Yabin, et al. Mechanical characteristics and crustal stress analysis of F block in Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(5): 1805-1811.
- [6] 王永炜, 李荣西, 杨全枝, 等. 鄂尔多斯盆地陆相中生界页岩气储层井壁失稳机理研究[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(2): 78-82.  
Wang Yongwei, Li Rongxi, Yang Quanzhi, et al. Research on borehole wall instability mechanism of Mesozoic shale gas reservoir in Ordos Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(2): 78-82.
- [7] 陈思伟. 鄂尔多斯盆地页岩层钻井过程中井壁稳定性机理研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2014.  
Chen Siwei. A research of well-bore stability theory in drilling process of Ordos Basin shale[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2014.
- [8] 付锁堂, 付金华, 席胜利, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相页岩气地质特征及勘探前景[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(2): 33-44.  
Fu Suotang, Fu Jinhua, Xi Shengli, et al. Geological characteristics of Ordovician marine shale gas in the Ordos Basin and its prospects[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(2): 33-44.
- [9] 赵红格, 刘池洋, 王峰, 等. 鄂尔多斯盆地西缘构造分区及其特征[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 173-179.  
Zhao Hongge, Liu Chiyang, Wang Feng, et al. Structural division and characteristics in western edge of Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(2): 173-179.
- [10] 陆雨诗, 胡勇, 侯云东, 等. 鄂尔多斯盆地西缘羊虎沟组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(28): 11999-12009.  
Lu Yushi, Hu Yong, Hou Yundong, et al. Geochemical characteristics of trace elements in Yanghugou Formation in the western margin of Ordos Basin and their implications for sedimentary environment[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(28): 11999-12009.
- [11] 苏可嘉, 秦臻, 邓呈祥, 等. 致密砂岩裂缝填充识别及其测井响应特征——以鄂尔多斯盆地镇泾油田田延长组为例[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(21): 9095-9104.  
Su Kejia, Qin Zhen, Deng Chengxiang, et al. Fracture filling identification and logging response characteristics of tight sandstone: a case study of Yanchang Formation in Zhenjing oilfield, Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(21): 9095-9104.
- [12] 董亮, 胡勇, 侯云东, 等. 鄂尔多斯盆地西缘南段羊虎沟组地层划分与对比——以下河沿剖面为例[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(36): 15925-15937.  
Dong Liang, Hu Yong, Hou Yundong, et al. Stratigraphic division and correlation of the Yanghugou Formation in the southern segment of the western margin of the Ordos Basin: the following Heyan section as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(36): 15925-15937.
- [13] 胡文瑞. 地质工程一体化是实现复杂油气藏效益勘探开发的必由之路[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1): 1-5.  
Hu Wenrui. Geology-engineering integration: a necessary way to realize profitable exploration and development of complex reservoirs[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 1-5.
- [14] 吴奇, 胡文瑞, 李岫. 地质工程一体化在复杂油气藏效益勘探开发中存在的“异化”现象及思考建议[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(2): 1-5.  
Wu Qi, Hu Wenrui, Li Xun. The phenomenon of “alienation” of geology-engineering integration in exploration and development of complicated oil and gas reservoirs, and related thoughts and suggestions[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(2): 1-5.
- [15] 谭聪, 于炳松, 袁选俊, 等. 鄂尔多斯盆地三叠统刘家沟组与和尚沟组红层成色机制[J]. 现代地质, 2020, 34(4): 769-783.  
Tan Cong, Yu Bingsong, Yuan Xuanjun, et al. Color origin of the Lower Triassic Liujiagou and Heshanggou Formations red beds in the Ordos Basin[J]. Geoscience, 2020, 34(4): 769-783.
- [16] Wang Y, Liu X, Liang L, et al. Experimental study on the damage of organic-rich shale during water-shale interaction[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 74: 103103.
- [17] 卢运虎, 陈勉, 金衍, 等. 钻井液浸泡下深部泥岩强度特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1399-1405.  
Lu Yunhu, Chen Mian, Jin Yan, et al. Experimental study of strength properties of deep mudstone under drilling fluid soaking[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1399-1405.