

东胜气田刘家沟组易漏地层随钻防漏技术研究

李德红¹, 罗宏志¹, 李明忠¹, 王翔², 张军义¹, 王健², 张辉²

(1. 中石化华北石油工程有限公司, 河南 郑州 450006;

2. 中国石油化工股份有限公司华北油气分公司石油工程技术研究院, 河南 郑州 450006)

摘要: 东胜气田刘家沟组钻井井漏频发, 钻井液漏失量大, 井漏治理效率低, 导致钻井周期长。借助地质和测井资料、电镜扫描等方法, 分析刘家沟组裂缝宽度, 明确裂缝型井漏机理。统计刘家沟组漏失数据, 基于漏失速率与压差关联性, 经数据拟合建立漏失压力预测模型, 绘制东胜气田漏失压力横向分布剖面, 为钻井防漏技术优化提供定量依据。基于循环压耗、激动压力计算模型, 形成井筒压力预测方法, 分析循环排量、机械钻速、下钻速度和钻井液性能对井筒压力影响规律, 进而优化钻井参数。优选刚性颗粒、纤维材料和片状变形材料, 优化粒径级配和组分配比, 开发随钻预承压堵漏体系, 砂床承压能力可以达到7 MPa以上。经现场应用, 东胜气田水平井漏失率由57%降至25.7%, 平均单井钻井液漏失量减少80.6%, 平均单井漏失次数减少88.1%, 助力钻井周期缩短。

关键词: 钻井井漏; 诱导裂缝; 漏失压力; 井筒压力; 随钻防漏; 刘家沟组; 东胜气田

中图分类号: TE28; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2022)05-0111-07

Technology of prevention leak while drilling for leaky formation in Liujiagou Formation in Dongsheng Gas Field

LI Dehong¹, LUO Hongzhi¹, LI Mingzhong¹, WANG Xiang², ZHANG Junyi¹, WANG Jian², ZHANG Hui²

(1. Sinopec Huabei Oilfield Service Corporation, Zhengzhou Henan 450006, China;

2. Research Institute of Engineering Technology, North Branch Sinopec, Zhengzhou Henan 450006, China)

Abstract: Circulation loss in Liujiagou formation in Dongsheng Gas Field occurs frequently with large leakage amount and low treatment efficiency, resulting in long drilling periods. With geological data, logging data and electron microscope scanning, the fracture width of Liujiagou Formation was analyzed to determine the mechanism of fracture type leakage. The leakage data of Liujiagou Formation was summarized, the prediction model of leakage pressure was established through data fitting with the help of the correlation between leakage rate and differential pressure, and the transverse distribution profile of leakage pressure in Dongsheng Gas Field was drawn so as to provide quantitative basis for the optimization of circulation loss prevention technology. The calculation model of circulating pressure consumption and induced pressure is used to develop the wellbore pressure prediction method, and the influence laws of pumping rate, drilling speed, tripping-down speed and drilling fluid properties on wellbore pressure were analyzed to optimize drilling parameters. Rigid particles, fiber materials and sheet deformation materials were selected with optimized particle size gradation and component make-up ratio to develop the pre-pressure plugging-while-drilling system which provided sand bed pressure bearing capacity exceeding 7MPa. Field application showed that the circulation loss in horizontal wells was reduced from 57% to 25.7%, the average circulation loss per well was reduced by 80.6%, the average leakage times per well was reduced by 88.1%, shortening the drilling periods.

Key words: lost circulation; induced fracture; leakage pressure; wellbore pressure; circulation loss prevention while drilling; Liujiagou Formation; Dongsheng Gas Field

收稿日期: 2022-02-11; 修回日期: 2022-07-15 DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.05.016

基金项目: 中国石油化工股份有限公司项目“鄂北致密气提速提效提产技术集成推广应用研究”(编号: P20001)

第一作者: 李德红, 男, 汉族, 1968年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 主要从事钻完井工程技术研究与工程管理工作, 河南省郑州市中原区中原西路188号1402室, petroleumupc@163.com。

引用格式: 李德红, 罗宏志, 李明忠, 等. 东胜气田刘家沟组易漏地层随钻防漏技术研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(5): 111-117.

LI Dehong, LUO Hongzhi, LI Mingzhong, et al. Technology of prevention leak while drilling for leaky formation in Liujiagou Formation in Dongsheng Gas Field[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5): 111-117.

东胜气田位于鄂尔多斯盆地北缘,致密砂岩气探明储量1892.8亿 m^3 ,天然气增储上产潜力大。受地壳运动影响,3条大断裂带构成的雁阵式断裂系统,断层、裂缝发育,钻井井漏尤其突出,漏失井占比57%,漏失井平均钻井液漏失量597 m^3 ,平均单井堵漏次数20.5次,平均单井堵漏治理时间22.3 d,导致平均钻井周期长达100.5 d,严重制约东胜气田高效勘探与开发。为此深入开展东胜气田漏失机理分析,建立漏失压力剖面,系统优化设计钻井参数,配套微裂缝预封堵承压技术,达到钻井防漏的目的。

1 井漏机理分析

东胜气田在构造应力作用下,产生大量高角度纵向裂缝,贯穿多套层位,漏点多;砂岩段水平层理较为发育,连通性强。借助电成像测井分析

J58P13H井裂缝宽度,测得的裂隙最大宽度9.39 mm,最小1.322 mm。在断裂和褶皱的构造作用下,泥岩破碎产生大量的不规则碎裂裂隙。钻遇时,当钻井液液柱压力 $>$ 漏失压力即发生漏失,严重漏失层集中在刘家沟组。

由于地质构造复杂,褶皱背斜发育,在背斜顶部受到拉张,产生大量的复合构造缝和局部构造缝,裂缝宽度10~150 μm ,如图1所示。钻遇时不会直接引发漏失,但液柱压力通过水力尖劈作用使裂缝开启、扩大,扩大到致漏程度后即发生漏失,井筒压力波动将加速微裂缝扩大,即发生诱导裂缝漏失。诱导裂缝产生后,不及时采取措施便会导致裂缝逐渐扩大形成恶性漏失^[1-3]。刘家沟组多发生诱导裂缝漏失,漏点频繁改变,高效堵漏难度大,堵漏后极易复漏。

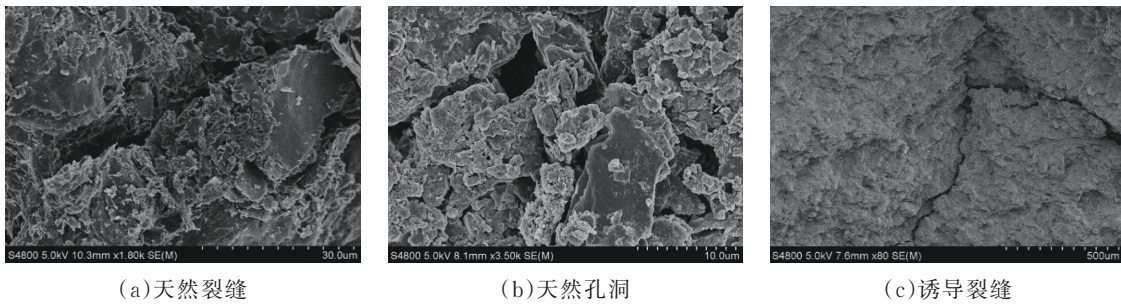


图1 地层岩心电镜扫描分析

Fig.1 Scanning electron microscope analysis of formation core

2 漏失压力预测

漏失压力是地层发生漏失时的最高承压临界值,确定漏失压力是提高防漏成功率的关键^[4-6]。统计分析多孔隙地层的漏失速率,发现压差与漏失速率存在较好关联性。其表达形式为:

$$Q = K\Delta P^n \quad (1)$$

$$P_L = P_p + \Delta P \quad (2)$$

式中:Q——漏失速率, m^3/h ;K——漏失系数,无量纲; ΔP ——漏失压差,MPa; n ——钻井液漏失状态的系数,无量纲; P_p ——地层孔隙压力,MPa; P_L ——液柱压力,MPa。

不同井深处漏失系数K不是常数,裂缝性地层

的漏失状态与裂缝几何性质密切相关,利用裂缝孔隙度 Φ_f 修正漏失系数K。

即式(1)修正为:

$$Q = K_1 \Phi_f \Delta P^n \quad (3)$$

式中: K_1 ——裂缝性漏失系数K关联裂缝孔隙度 Φ_f 后的修正值。

将式(2)代入式(3)中可得:

$$P_L = P_p + \left(\frac{1}{K_1 \Phi_f} \right)^{\frac{1}{n}} Q_{crit}^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

式中: Φ_f ——某井深处的裂缝孔隙度; Q_{crit} ——临界漏失速度, m^3/h 。

裂缝孔隙度可采用深、浅侧向电阻率测井资料计算。

$$\Phi_i = \begin{cases} \left(\frac{1}{R_{LLS}^2} - \frac{1}{R_{LLD}^2} \right) \times R_{mf} \times R_{LLD} \times 200\% & R_{LLD} > R_{LLS} \\ \left(\frac{1}{R_{LLD}^2} - \frac{1}{R_{LLS}^2} \right) \times R_{mf} \times R_{LLD} \times 100\% & R_{LLD} < R_{LLS} \end{cases} \quad (5)$$

式中: R_{LLD}, R_{LLS} ——分别为深、浅侧向电阻率, $\Omega \cdot m$;
 R_{mf} ——泥浆滤液电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

东胜气田锦 58 井区钻井以中漏和失返性漏失为主, 渗漏次数较少, 见表 1。以 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 作为临界漏失速率, 超过临界漏失速率时认为钻井发生漏失。统计东胜气田漏失井的漏失速度、漏失压差以及裂缝孔隙度, 非线性拟合确定漏失系数 K 和漏失状态系数 n 。

表 1 锦 58 井区已钻井漏失速度统计
Table 1 Summary of circulation loss rate in Jin-58 well block

漏失级别	漏速/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	程度描述	漏失次数比例/%
1	<2	渗漏	1.8
2	2~10	失返	11.01
3	10~20	小漏	16.36
4	20~50	中漏	26.36
5	>50	大漏	8.18
6	失返	严重井漏	36.36

基于上述方法, 建立了东胜气田锦 58 井区的漏失压力模型:

$$P_L = P_p + \left(\frac{1}{0.02639 \Phi_f} \right)^{\frac{1}{2.7118}} Q_{\text{crit}}^{\frac{1}{2.7118}} \quad (6)$$

分别计算锦 58 井区的锦 108、J58P13H 和 J58P14H 等井的漏失压力 P_L , 经漏失点数据检验, 模型的符合率 88.2%。并分别采用伊顿法、Mohr-Coulomb 准则和最大拉应力准则预测地层压力 P_p 、坍塌压力 P_c 和破裂压力 P_r 。图 2 为 J58P13H 井“四压力”剖面, 其中刘家沟组(井深 2500~2700 m)漏失压力当量密度仅为 $1.15 \text{ g}/\text{cm}^3$, 且刘家沟组漏失压力与下部是石千峰组(井深 2700~2900 m)坍塌压力窗口窄。提高刘家沟组漏失压力, 是解决同裸眼段漏塌复杂并发的关键技术。

基于收集的锦 58 井区、锦 72 井区测井数据, 计算各井在刘家沟组的平均漏失压力, 然后插值得到刘家沟组漏失压力横向分布剖面, 见图 3。预测结果能够较精确地预测地层漏失情况, 统计的漏失井

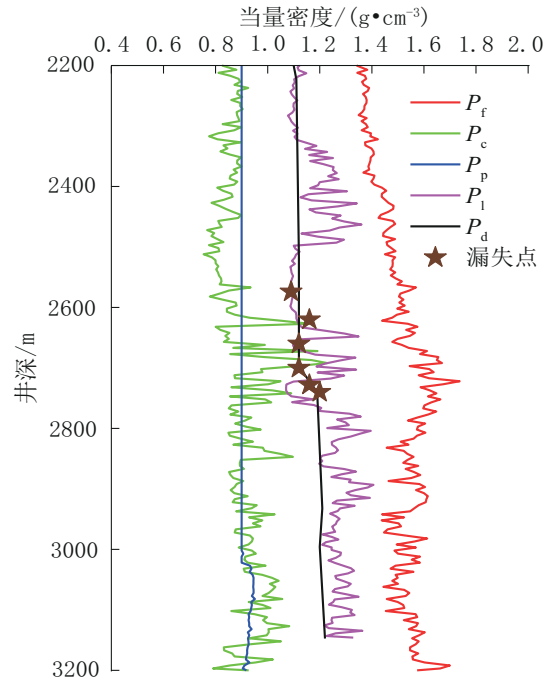


图 2 J58P13H 井四压力剖面

Fig.2 Four pressure profiles of Well J58P13H

大多位于漏失压力较低的区域。锦 58 井区刘家沟组漏失压力当量密度在 $1.06 \sim 1.28 \text{ g}/\text{cm}^3$, 部分地区小于 $1.10 \text{ g}/\text{cm}^3$, 为漏失高风险区, 极易钻井井漏; 锦 72 井区漏失压力总体高于锦 58 井区, 但部分地区漏失压力在 $1.11 \text{ g}/\text{cm}^3$ 左右, 为漏失中等风险区。锦 58 井区地质构造复杂, 北部发育东西走向的泊尔江海子断裂带, 西北部发育近东西向乌兰吉林庙断裂, 断裂带附近地层较为破碎; 而锦 72 井区易漏地区位于泊尔江海子断裂带附近。

3 井筒压力预测

3.1 循环压耗计算

钻井循环排量或钻井液密度变化均会引起井底动液柱压力变化, 钻井液符合宾汉流体, 满足层流流动, 作用在刘家沟组的循环压耗包括以下 2 部分^[7-8]。

3.1.1 钻井液层流压耗

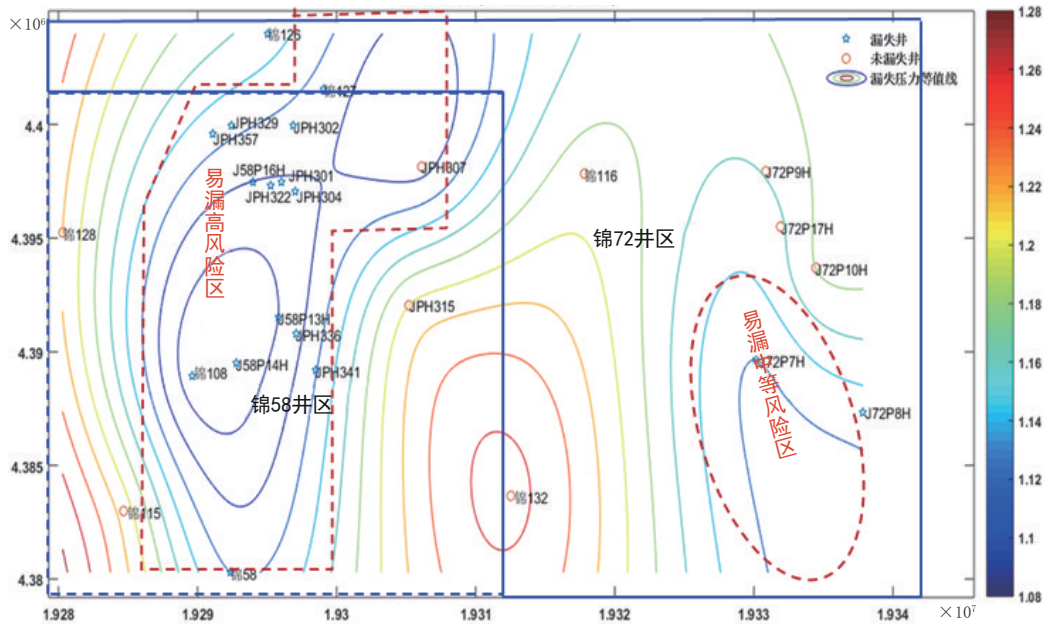


图3 刘家沟组漏失压力当量密度横向分布

Fig.3 Lateral distribution of equivalent density of leakage pressure in Liujiagou Formation

$$p_{a11} = \frac{48\mu_p LQ}{(D_o - D_i)^2} + \frac{6\tau_o L}{D_o - D_i} \quad (7)$$

式中： L ——计算压耗的环空段长度，m； Q ——循环排量， m^3/s ； D_o ——井眼直径，m； D_i ——钻杆外径，m； μ_p ——钻井液屈服应力， $Pa \cdot s$ ； τ_o ——钻井液动切力， Pa 。

3.1.2 岩屑固相颗粒产生压耗

$$p_{a12} = (\rho_s - \rho) g L C_a \quad (8)$$

式中： ρ_s, ρ ——分别为岩屑、钻井液的密度， g/cm^3 ； C_a ——环空岩屑浓度，无量纲。

岩屑滑落速度采用 Moore 公式，环空岩屑浓度计算公式为：

$$C_a = \frac{D_b^2 R}{3600(D_o^2 - D_i^2)(V_f - 0.00942K' \sqrt{\frac{d_s(\rho_s - \rho)g}{\rho}})} \quad (9)$$

式中： R ——机械钻速， m/h ； K' ——速度修正系数； V_f ——钻井液环空返速， m/s ； D_b ——钻头直径， cm ； D_o ——井眼直径， cm ； D_i ——钻杆外径， cm ； d_s ——岩屑直径， cm ； g ——重力加速度， $980 g/cm^3$ 。

3.2 激动压力计算

由于管柱顶替作用，起下钻、下套管和通井等作业时将会导致井内产生附加激动压力。

3.2.1 起下钻激动压力

在钻杆或套管下部装有单向阀，属于堵口管情况。激动压力计算公式为：

$$\Delta p = \frac{48\mu_p L}{(D_o - D_i)^2} \left[1.5v_p \left(\frac{D_i^2}{D_o^2 - D_i^2} + 0.5 \right) + \frac{6\tau_o L}{D_o - D_i} \right] \quad (10)$$

式中： v_p ——套管或单根钻杆平均下放速度， m/s ； D_i

——钻杆或套管外径，m； D_o ——井眼直径，m； μ_p ——钻井液塑性粘度， $Pa \cdot s$ ； τ_o ——钻井液动切力， Pa ； L ——钻杆段长，m。

3.2.2 通井时激动压力

在通井时，钻井液在环空上返速度由钻柱底面积顶替流动引起的流速、钻柱粘附引起的流速、泵循环引起的流速组成。激动压力计算公式为：

$$\Delta p = \frac{48\mu_p L}{(D_o - D_i)^2} \left[1.5v_p \left(\frac{D_i^2 - D_{ii}^2}{D_o^2 - D_i^2} + 0.5 \right) + \frac{Q_i}{\frac{\pi}{4}(D_o^2 - D_i^2)} \right] + \frac{6\tau_o L}{D_o - D_i} \quad (11)$$

式中: D_{ii} ——钻杆或套管内径,m。

3.3 钻井参数优化

根据东胜气田常规井况,优化设计钻井参数:刘家沟组井深2500 m,地层漏失压力按 1.15 g/cm^3 计算,钻至刘家沟组时钻井液密度 1.08 g/cm^3 ,钻头外径222 mm,钻柱外径127 mm,井眼内径240 mm,钻井液动切力6 Pa、塑性粘度 $40 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,岩屑密度 2.4 g/cm^3 、平均直径0.85 cm。为满足地层防漏,作用在刘家沟组的循环压耗与激动压力之和应不超过1.72 MPa。

钻井液排量影响岩屑效率和环空压耗,作用在刘家沟组上的总压耗、循环压耗和岩屑产生压耗如图4所示,确定以 $20\sim 23 \text{ L/s}$ 的排量钻进时有效预防井漏。机械钻速增加,钻井液岩屑浓度增大,增大作用于刘家沟组的当量密度,易诱发井漏,如图5所示,控制刘家沟组的机械钻速 $< 8 \text{ m/h}$ 。下钻速度越快,激动压力越大。塑性粘度、动切力越大,下钻速度极值越低,如图6所示。若塑性粘度 $\mu_p=60 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、动切力 $\tau_0=12 \text{ Pa}$,下钻速度应小于 0.15 m/s ;若塑性粘度 $\mu_p=40 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、动切力 $\tau_0=12 \text{ Pa}$,下钻速度应小于 0.25 m/s 。东胜气田二开 $8\frac{3}{4} \text{ in}$ ($1 \text{ in}=25.4 \text{ mm}$,下同)井眼下7 in套管,环空间隙小,下套管时的激动压力高于下钻,井漏频发。

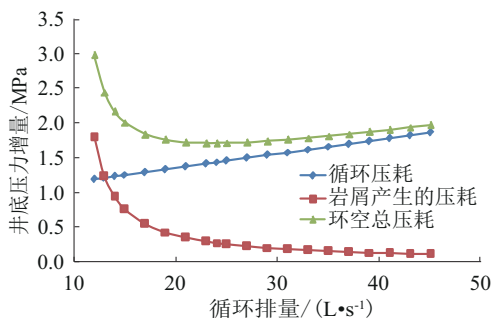


图4 循环排量对井底压力的影响

Fig.4 Effect of circulation displacement on bottom hole pressure

4 随钻预承压防漏技术

东胜气田刘家沟组微裂缝宽度 $10\sim 150 \mu\text{m}$,多为诱导性井漏,实施随钻防漏意义重大。随钻预承压防漏技术在于诱导裂缝开启到很小的时候,随钻防漏剂进入裂缝,逐级架桥变缝为孔,然后逐级填充,在漏失量很少的情况下堵死裂缝,使堵塞段具有

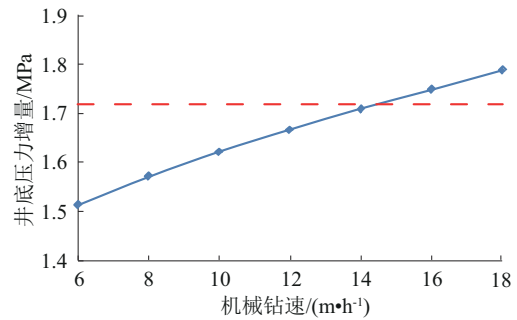


图5 机械钻速对井底压力的影响

Fig.5 Effect of ROP on bottom hole pressure

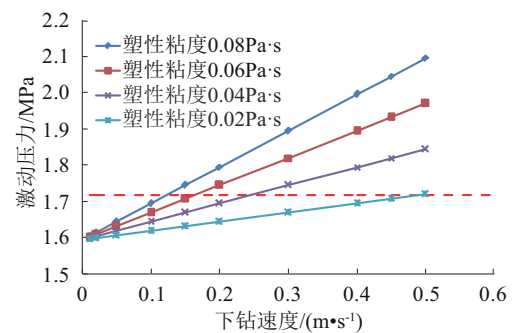


图6 下钻速度对激动压力的影响

Fig.6 Effect of tripping-down speed on induced pressure

一定的承压能力^[9-12]。提高泥饼致密性及其在裂缝中的驻留堵塞作用,阻滞液相压力在天然裂缝中的传递^[13-15]。为适应复杂且受压多变的地层天然裂缝尺寸,优选纤维材料、片状材料及变形材料,开发随钻预承压堵漏体系。超细碳酸钙作为刚性架桥粒子,借助粒径级配理论,一级架桥粒子的最大尺寸约为 $85 \mu\text{m}$,二级架桥粒子最大尺寸约为 $20.7 \mu\text{m}$,三级架桥粒子的最大尺寸约为 $5.1 \mu\text{m}$,配比约为75:20:5(质量比)。优选木质纤维或竹纤维作为拉筋封堵材料,通过多点吸附和缠绕作用提高微裂缝成网封堵效果。优选可变形片状合成石墨,在裂缝中具有良好封堵和桥接能力。在钻进至刘家沟组前,钻井液中加入随钻预承压堵漏体系;控制刘家沟组钻时 $< 6 \text{ min/m}$,预防裂缝诱导开启,保证有效封堵微裂缝和形成致密泥饼,提高承压能力。

由图7、图8所示,加入优选的随钻堵漏材料后,泥饼薄而致密,纤维材料、柔性片状材料等分散在滤饼中,参与泥饼形成,有效改善了泥饼质量、降低滤饼渗透率。利用自制高温高压动态模拟评价装置,在石英粒径范围 $250\sim 375 \mu\text{m}$ 、厚度20 cm的沙床中进行封堵承压实验。当加量达到4%后,砂床承压

能力可以达到7 MPa以上。

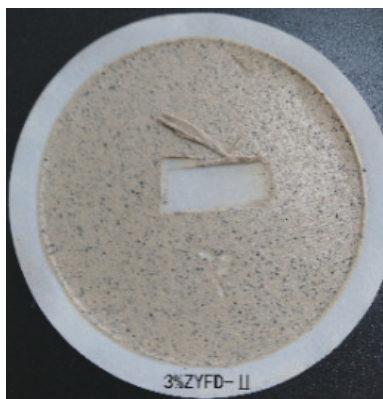


图7 实验滤饼

Fig.7 Experimental filter cake

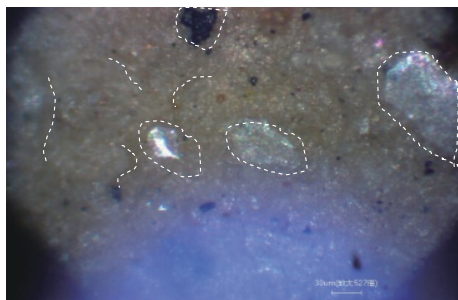


图8 滤饼显微镜分析

Fig.8 Microscopic analysis of the filter cake

5 现场应用

基于东胜气田刘家沟组井漏机理与漏失压力预测结果,并保证水平井斜段井壁稳定,优化钻井防漏技术措施。保持钻井液密度 $1.05\sim 1.08\text{ g/cm}^3$ 钻穿刘家沟组,通过随钻预承压堵漏体系,提高刘家沟组承压能力。井斜角 $0\sim 30^\circ$ 时,钻井液密度控制在 $1.08\sim 1.10\text{ g/cm}^3$;井斜角 $30^\circ\sim 45^\circ$ 时,钻井液密度控制在 $1.10\sim 1.12\text{ g/cm}^3$;井斜角 $45^\circ\sim 60^\circ$ 时,钻井液密度控制在 $1.12\sim 1.14\text{ g/cm}^3$;井斜角 $60^\circ\sim 90^\circ$ 时,钻井液密度控制在 $1.14\sim 1.16\text{ g/cm}^3$ 、粘度 $55\sim 65\text{ s}$,静切 $(2\sim 5)/(8\sim 15)\text{ Pa}$,中压滤失量 $<5\text{ mL}$,坂土含量 $50\sim 55\text{ g/L}$,固相含量 $<8\%$,塑性粘度 $15\sim 25\text{ mPa}\cdot\text{s}$,动切 $8\sim 12\text{ Pa}$ 。

钻至刘家沟组前采用 $32\sim 40\text{ L/s}$ 的大排量高效携岩钻进,进入刘家沟组后降低排量至 $20\sim 23\text{ L/s}$,机械钻速控制在 8 m/h 以内。钻穿刘家沟组以深 50 m 后,逐步提高排量至 $28\sim 30\text{ L/s}$ 。如发生漏失,及时降低排量。下钻至刘家沟组时控制下放速度 $<$

0.25 m/s ,每 300 m 分段循环钻井液降低粘切,开泵操作平稳,减少激动压力。下套管前井内注入封闭浆,封闭井段不得高于刘家沟组,井深 1200 m 以下套管速度控制在 0.4 m/s 以内, 1200 m 至刘家沟底部下套管速度控制在 0.15 m/s 以内,刘家沟底部至井底下套管速度控制在 0.3 m/s 以内。井深 1000 m 之后每 300 m 分段循环一次,降低上部钻井液的塑性粘度与动切力,减少激动压力。

以此为基础,制定东胜气田刘家沟组钻井防漏堵漏技术推荐做法,累计推广应用 197 口井。东胜气田水平井漏失率由 57% 降至 25.7% ,平均单井钻井液漏失量减少 80.6% ,钻井周期缩短 32.3% 。助力东胜气田钻井周期缩短,为致密天然气高效勘探与效益开发奠定基础。

6 结论

(1)东胜气田刘家沟组发育天然裂缝和微裂缝,井漏类型属于裂缝性井漏,且以诱导裂缝漏失为主,造成漏点频繁改变,高效堵漏难度大,堵漏后极易复漏。建立了东胜气田漏失压力预测模型,绘制漏失压力横向分布剖面,为钻井防漏技术优化提供定量依据。

(2)建立井筒压力预测方法,满足刘家沟组防漏需要,优化了循环排量、机械钻速、下钻及下套管速度和钻井液塑性粘度、动切力等。开发随钻预承压堵漏体系,提高泥饼致密性及其在裂缝中的驻留堵塞作用,阻滞液相压力在裂缝中传递,砂床承压能力可以达到 7 MPa 以上。

(3)经现场应用,东胜气田漏失率、单井钻井液漏失量与漏失次数均显著降低。优选随钻堵漏材料及优化粒径级配、组分配比,进一步提高刘家沟组承压能力,将有效预防东胜气田钻井井漏。

参考文献(References):

- [1] 孙金声,刘凡,程荣超,等.机器学习在防漏堵漏中研究进展与展望[J].石油学报,2022,43(1):91-100.
SUN Jinsheng, LIU Fan, CHENG Rongchao, et al. Research progress and prospects of machine learning in lost circulation control[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022,43(1):91-100.
- [2] 樊朝斌,先齐,杨世军.准噶尔盆地复杂火成岩地层防漏堵漏控压钻井技术[J].天然气工业,2011,31(9):88-92.
FAN Chaobin, XIAN Qi, YANG Shijun. Managed pressure drilling for lost circulation control in igneous rocks at Junggar Ba-

- sin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(9):88-92.
- [3] 迟焕鹏,胡志方,王胜建,等.黔西地区表层易漏地层钻井工程技术[J]. 钻探工程, 2021, 48(4):66-72.
CHI Huanpeng, HU Zhifang, WANG Shengjian, et al. Drilling techniques for thief zones in surface formations in Western Guizhou[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(4):66-72.
- [4] 李大奇,康毅力,曾义金,等.缝洞型储层缝宽动态变化及其对钻井液漏失的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(5):76-81.
LI Daqi, KANG Yili, ZENG Yijin, et al. Dynamic variation of fracture width and its effects on drilling fluid lost circulation in fractured vuggy reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(5):76-81.
- [5] 吕开河,王晨焱,雷少飞,等.裂缝性地层钻井液漏失规律及堵漏对策[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(2):85-93.
LÜ Kaihe, WANG Chenye, LEI Shaofei, et al. Dynamic behavior and mitigation methods for drilling fluid loss in fractured formation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(2):85-93.
- [6] 邱正松,刘均一,周宝义,等.钻井液致密承压封堵裂缝机理与优化设计[J]. 石油学报, 2016, 37(S2):137-143.
QIU Zhengsong, LIU Junyi, ZHOU Baoyi, et al. Tight fracture-plugging mechanism and optimized design for plugging drilling fluid[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(S2):137-143.
- [7] 樊洪海.实用钻井流体力学[M].北京:石油工业出版社, 2001.
FANG Honghai. Practical Drilling Fluid Mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [8] 王伟志,刘庆来,郭新健,等.塔河油田防漏堵漏技术综述[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(3):42-46.
WANG Weizhi, LIU Qinglai, GUO Xinjian, et al. Review of lost circulation prevention and plugging technology in Tahe Oilfield[J]. Exploration Engineering (Rock and Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(3):42-46.
- [9] 赵洪波,单文军,朱迪斯,等.裂缝性地层漏失机理及堵漏材料新进展[J]. 油田化学, 2021, 38(4):740-746.
ZHAO Hongbo, SHAN Wenjun, ZHU Disi, et al. Advance of fractured formation lost circulation mechanism and lost circulation materials in oil and gas well[J]. Oilfield Chemistry, 2021, 38(4):740-746.
- [10] 孙威威.海坨区块高效堵漏体系的优化与应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(12):72-78.
SUN Weiwei. Optimization and application of the efficient plugging system in the Haituo block[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(12):72-78.
- [11] 王胜,吴丽钰,蒋贵,等.深孔纳米复合水泥基护壁堵漏材料研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(12):7-13.
WANG Sheng, WU Liyu, JIANG Gui, et al. Nano composite cement based wellbore protection and plugging materials for deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(12):7-13.
- [12] 李伟,白英睿,李雨桐,等.钻井液堵漏材料研究及应用现状与堵漏技术对策[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(12):4733-4743.
LI Wei, BAI Yingrui, LI Yutong, et al. Research and application progress of drilling fluid lost circulation materials and technical countermeasures for lost circulation control[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(12):4733-4743.
- [13] 李爽.钻井工程中井漏预防及堵漏技术分析[J]. 石化技术, 2019, 26(9):47-48.
LI Shuang. Analysis of well leakage prevention and plugging technology in drilling engineering[J]. Petrochemical Technology, 2019, 26(9):47-48.
- [14] 韩立国.新型随钻防漏堵漏钻井液技术研究[J]. 钻采工艺, 2015, 38(3):37-39, 42.
HAN Ligu. Study on new type of lost circulation additive ask1while drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(3):37-39, 42.
- [15] 吴天乾,李明忠,蒋新立,等.杭锦旗地区裂缝性漏失钻井堵漏技术研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(2):49-53.
WU tianqian, LI Mingzhong, JIANG Xinli, et al. Research and application of drilling plugging technology aiming at fracture leakage in Hangjinqi area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(2):49-53.

(编辑 李艺)