

GY5-1-4H 页岩油水平井提高固井质量 关键技术研究与实践

吴 华¹, 刘连恺², 王 磊¹, 赵殊勋², 倪 帅²,
李 娟¹, 唐世忠¹, 吕照鹏¹, 苏东华³

(1. 大港油田公司采油工艺研究院, 天津 300280; 2. 中国石油集团渤海钻探公司第二固井公司, 天津 300280;
3. 西南石油大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 四川 成都 610500)

摘要:针对页岩油水平井水平段长、井眼条件复杂、套管居中难度大、顶替效率低、水泥体系性能要求高等制约固井质量提高的难题,开展钻井参数与钻具组合协同优化技术研究,优化钻具组合,满足提高固井质量对井眼清洁的要求,通过顶替效率模拟研究设计了理想套管居中度,并以此优选了整体冲压螺旋半刚性扶正器和清水顶替预应力固井技术,基于韧性化改造技术提高水泥石强度,降低杨氏模量,改性水泥石可以满足页岩油井水力压裂要求。使用上述页岩油水平井固井工艺配套技术,确保了GY5-1-4H井固井质量合格,为长水平段水平井固井提供了一套可借鉴的固井关键技术。

关键词:页岩油水平井;固井质量;井眼清洁;半刚性扶正器;清水顶替;韧性水泥浆

中图分类号:TE256 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)04-0135-07

Study and application of key technology enhancement of shale oil horizontal well cementing quality for Well GY5-1-4H

WU Hua¹, LIU Liankai², WANG Lei¹, ZHAO Shuxun², NI Shuai²,
LI Juan¹, TANG Shizhong¹, LÜ Zhaopeng¹, SU Donghua³

(1. PetroChina Dagang Oilfield Company Oil Production Technology Research Institute, Tianjin 300282, China;
2. No.2 Cementing Company of CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Tianjin 300282, China;
3. National Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China)

Abstract: Aiming at the problems of long horizontal section, complex wellbore conditions, difficulty in casing centralization, low displacement efficiency, and high performance requirements of cement system which restrict the improvement of cementing quality in shale oil horizontal wells, research on the collaborative optimization technology of drilling parameters and drill string assembly was carried out to meet the requirements of improving cementing quality for wellbore cleaning. In addition, the ideal casing centralization is designed by the simulation of displacement efficiency, and the integral stamping screw semi-rigid centralizer and the water displacement prestressed cementing technology are also optimized. Furthermore, the strength of cement paste is improved based on the toughness modification technology. The hydraulic fracturing requirements of shale oil wells can be met through reducing the Young's modulus and using the improved cement paste. All these work ensured the cementing quality of Well GY5-1-4H, so as to provide a worth considering key technology for long horizontal well cementing.

收稿日期:2022-11-11; 修回日期:2023-04-04 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.04.018

第一作者:吴华,女,汉族,1981年生,高级工程师,硕士,主要从事钻完井工艺研究与应用工作,天津市滨海新区幸福路1278号, dg_wuhua@petrochina.com.cn。

引用格式:吴华,刘连恺,王磊,等.GY5-1-4H页岩油水平井提高固井质量关键技术研究与实践[J].钻探工程,2023,50(4):135-141.

WU Hua, LIU Liankai, WANG Lei, et al. Study and application of key technology enhancement of shale oil horizontal well cementing quality for Well GY5-1-4H[J]. Drilling Engineering, 2023,50(4):135-141.

Key words: shale oil horizontal well; cementing quality; wellbore cleaning; semi-rigid centralizer; clear water replacement; resilient cement slurry

0 引言

GY5-1-4H页岩油水平井井深6126 m,水平段长2091 m,是官东地区页岩油勘探开发以来水平段长最长的水平井。已完钻的深层大斜度井及水平井受井斜大、套管不易居中、钻井液性能差、泥饼虚厚以及压力系统复杂、封固段长等因素的影响,普遍存在固井质量差的问题^[1-6],第一界面固井质量优质率是54.09%,固井合格率81.29%,在水平段长度大幅度增加的情况下^[7-8],有必要开展页岩油水平井固井技术研究与实践,提高页岩油水平井的固井质量,为后期长水平段水平井固井提供技术支撑。

1 固井技术难点

GY5-1-4H井目的层为孔店组孔二段,斜深6126 m,垂深3883 m,4035~6126 m为水平段,最大井斜角为96.95°,固井施工难度大;采用三开井身结构,各层套管尺寸及下深为:Ø339.7 mm表层套管×825.45 m+Ø244.5 mm技术套管×3497.53 m+Ø139.7 mm油层套管×6119.5 m(见图1)。后期采用套管压裂改造,对固井质量的要求高,主要存在3方面固井技术难点。

(1)井眼准备与清洁难度大。长水平段水平井

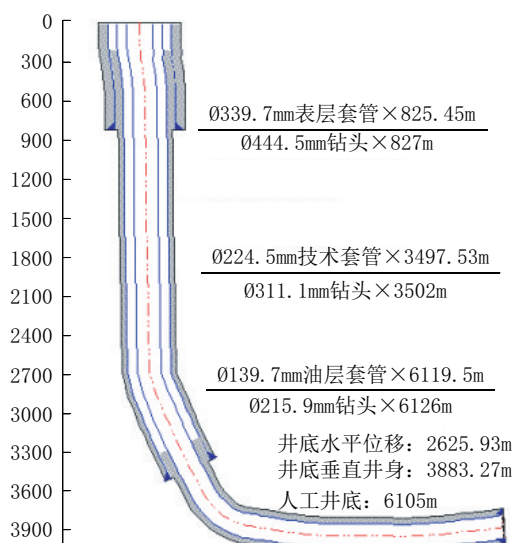


图1 GY5-1-4H井身结构

Fig.1 Diagram of GY5-1-4H wellbore structure

钻井过程中面临的一大难题是保证水平井段钻进时井眼的清洁,如果井眼清洁不充分,会导致许多钻井问题,如卡钻、托压、掩埋井眼等问题,因此目前井眼清洁主要是从钻井安全角度出发,如李琪等^[5]设定岩屑床的相对厚度临界值为10%,但对于固井施工而言,为了保障良好的界面胶结质量,需要进一步提高井筒的清洁程度。

(2)水平段长,套管居中度不易保证^[6,8]。GY5-1-4H井最大井斜角为96.95°,井眼轨迹呈抬头趋势,水平段长度达到2091 m,套管下入难度大,且套管由于自重易贴边,套管居中度难以保证,偏心使液体向着受阻力最小的方向即间隙最宽的部分流动,钻井液顶替效率不易保证。

(3)水泥浆性能要求高^[8-9]。页岩油井需要大规模水力压裂来进行增产改造提高单井产能,水泥浆性能要兼顾固井时防窜及后期进行分段压裂改造的需求,若不能满足多次交变荷载下力学性能要求^[10],则会发生密封失效。

2 固井技术对策

2.1 井眼清洁技术

2.1.1 钻井参数与钻具组合协同优化提高清洁效率
在影响井眼清洁的诸多因素中,转速、排量是两个关键因素,目前主要通过提高转速及排量进行井眼清洁,但由于设备原因,不可能无限地提高转速和排量,需要结合现有条件计算优化最佳钻井参数。

根据国内外研究及现场实践的经验, $P-HAR$ (井眼面积比率) $=\frac{\text{井眼直径}^2}{\text{钻杆直径}^2}$,当 $P-HAR > 3.25$ 时,井眼清洁适用“大井眼”规则,即转速 $> 120 \text{ r/min}$ (见表1)。目前复杂结构井主体应用的是Ø215.9 mm的钻头,Ø127 mm的钻杆,以近5年完钻的复杂结构井的平均井径扩大率8.07%作为该井的井径扩大率(见图2),计算 $P-HAR$ 值为3.95,应该遵循“大井眼”规则^[11]。

GY5-1-4H井采用ZJ70型钻机顶驱施工,转速80~95 r/min,难以达到120 r/min以上,因此目前常用的钻井参数不能满足井眼清洁的要求。

为了提高钻井过程中井眼清洁能力,钻具组合

表 1 井眼清洁对转速的要求

Table 1 Requirements of wellbore cleaning on rotating speed

井眼面积比率 P-HAR	大小井眼	转速要求(r/min)
>6.50	超大井眼	≤120,180 为佳
3.25~6.50	大井眼	≤120
<3.25	小井眼	≤60,120 为佳

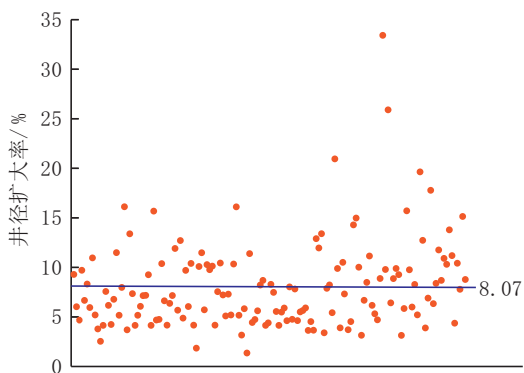


图 2 复杂结构井井径扩大率

Fig.2 Diameter enlargement rate of complex structure well

中加入清砂接头,并优化清砂接头的安放位置及数量,钻进过程钻具组合带 2 只清砂接头,间距 240 m 下钻冲划清砂,表 2 为优化前后钻具组合。

2.1.2 通井洗井技术

通井的主要目的是扩划井壁、破除台肩、消除井壁阻点。通井钻具结构应充分考虑所钻井井眼轨迹和入井管柱的特殊性,通过计算下部钻柱和入井套管的刚性,对比分析其尺寸、刚性和长度因素,模拟套管刚度通井,综合考虑该井的井眼准备情况,设计通井钻具结构进行通井作业。

钻具组合加入 $\varnothing 212$ mm 的微扩眼器、 $\varnothing 210$ mm 和 $\varnothing 208$ mm 两个稳定器,同时设计 3 只清砂接头,

间距 100 m,管串组合为: $\varnothing 215.9$ mm 牙轮钻头+430/410 接头+ $\varnothing 165$ mm 浮阀+ $\varnothing 212$ mm 微扩眼器+ $\varnothing 127$ mm 加重钻杆 2 根+ $\varnothing 210$ mm 稳定器+ $\varnothing 127$ mm 加重钻杆 2 根+ $\varnothing 208$ mm 稳定器+ $\varnothing 127$ mm 加重钻杆 3 根+ $\varnothing 170$ mm 随钻震击器+ $\varnothing 127$ mm 加重钻杆 6 根+ $\varnothing 170$ mm 清砂接头+ $\varnothing 127$ mm 加重钻杆 8 根+ $\varnothing 170$ mm 清砂接头+ $\varnothing 127$ mm 加重钻杆 8 根+ $\varnothing 170$ mm 清砂接头+411/NC52 接头+ $\varnothing 127$ mm NC52 钻杆+ $\varnothing 139.7$ mm 钻杆,通井到底后,在存在挂卡、遇阻井段进行短起、反复拉划通井;重点在井眼沉砂多、掉块多井段,通阻卡严重井段,并根据通井情况分段采取重浆举砂。

下套管前对井斜变化大和水平井段进行划眼,双扶+三扶两趟通井,为顺利下入套管做好准备。通井到底采用大排量(排量不能低于钻进时最大排量)循环泥浆,循环时间不低于 2 个循环,确保井下无沉砂,井壁稳定,井眼干净。

套管下到位后,小排量开泵顶通,后大排量 $2.0\sim 2.1\text{ m}^3/\text{min}$ (环空返速 $1.15\sim 1.2\text{ m/s}$),循环洗井不少于 2 个循环,充分循环将井底岩屑和沉砂携带干净。

2.2 水平井固井高效顶替技术

2.2.1 水平井固井顶替效率模型

水平井套管不易居中,偏心条件下环空窄间隙处流体难替净,通过建立环空四相流顶替效率模型,分析套管偏心度对顶替效率影响机制,为扶正器优选及下放工艺提供理论指导^[1,12]。

工作液流变性能分析发现,环空流体普遍处于层流状态,使用层流守恒方程建立数学模型(式 1、式 2),并引入相函数输运方程(式 3)来捕捉自由界

表 2 优化前后钻具组合

Table 2 Drill assembly before and after optimization

类别	钻 具 组 合
常规钻具组合	$\varnothing 215.9$ mm 钻头 $\times 0.25$ m+ $\varnothing 203$ mm 旋转导向 $\times 4.50$ m+ $\varnothing 178$ mm LWD $\times 10.43$ m+ $\varnothing 127$ mm 无磁加重 $\times 9.28$ m+ $\varnothing 165$ mm 浮阀 $\times 0.49$ m+ $\varnothing 127$ mm 加重 $\times 177.09$ m+ $\varnothing 156$ mm 随钻震击器 $\times 5.48$ m+ $\varnothing 127$ mm 加重 $\times 102.11$ m+411/NC52 $\times 0.47$ m+ $\varnothing 127$ mm 钻杆
本井优化后钻具组合	$\varnothing 215.9$ mm PDC 钻头 $\times 0.25$ m+ $\varnothing 172$ mm 螺杆 $1.5^\circ \times 7.78$ m+ $\varnothing 165$ mm 浮阀 $\times 0.5$ m+ $\varnothing 208$ mm 稳定器 $\times 1.54$ m+ $\varnothing 170$ mm LWD $\times 13.21$ m+ $\varnothing 127$ mm 无磁抗压缩 $\times 9.29$ m+ $\varnothing 127$ mm 加重钻杆 2 根+ $\varnothing 170$ mm 清砂接头 $\times 1.19$ m+ $\varnothing 127$ mm 加重钻杆 2 根+ $\varnothing 165$ mm 随钻震击器+ $\varnothing 127$ mm 加重钻杆 22 根+ $\varnothing 170$ mm 清砂接头 $\times 1.19$ m+ $\varnothing 127$ mm 加重钻杆 3 根+ $\varnothing 170$ mm 水力振荡器 $\times 3.85$ m+ $\varnothing 127$ mm 加重钻杆 1 根+411/NC52 接头 $\times 0.798$ m+ $\varnothing 127$ mm NC52 钻杆+ $\varnothing 139.7$ mm 钻杆

面的运动变化。模型考虑了隔离液、钻井液、水泥浆及井壁泥饼等工作液参数,模拟段长10 m,改变套管偏心度分析井壁泥饼及钻井液、隔离液滞留情况,模型基本参数如图3所示。

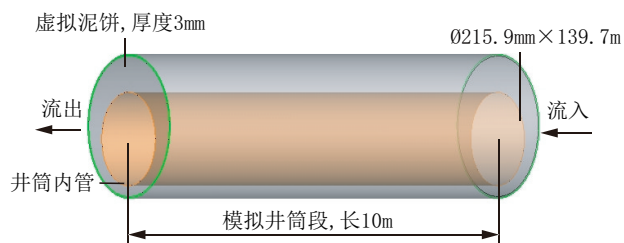


图3 环空四相流顶替效率模型基本参数

Fig.3 Basic parameters of annular four phase flow displacement efficiency model

连续方程:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{D(\rho \vec{V})}{Dt} = \vec{F} + \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

相函数运输方程:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla) F = 0 \quad (3)$$

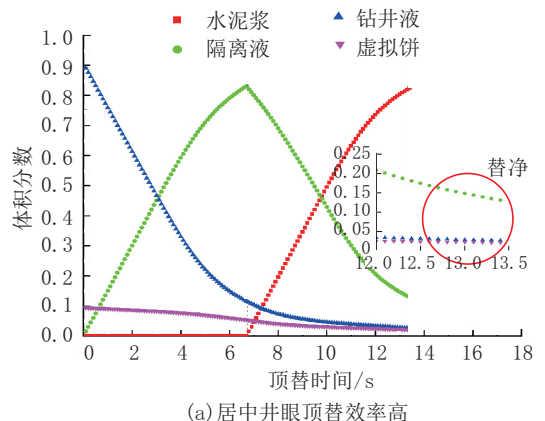
$$\vec{U} = (u, v, w)$$

计算结果如图4所示,随着偏心度增加,顶替结束时水泥浆体积占比减小,钻井液及虚拟饼滞留量增大;当偏心度达到0.35时,顶替效率高于85%,满足固井高效顶替要求。

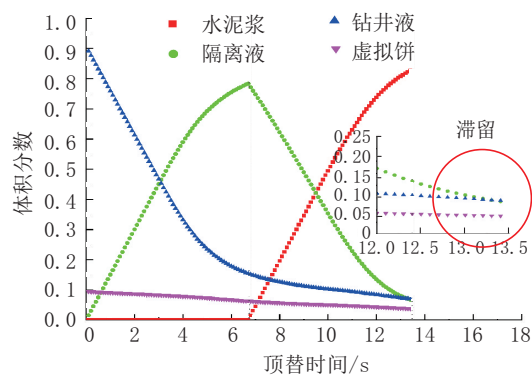
2.2.2 扶正器类型及安装间距优选

研究发现,降低偏心度有利于提高顶替效率,以往大斜度井、水平井主要采用刚性扶正器和双弓套管扶正器,但其扶正力难以满足长水平段套管居中要求。整体式冲压半刚性螺旋扶正器^[13-14]是由优质弹簧钢钢板冲压而成,比常规弹性扶正器扶正力强,可以承受更大的外挤载荷。应用PVI & Cempro Plus固井设计软件,对安放不同扶正器时的套管居中度进行模拟(见图5),可以看出,整体式冲压半刚性螺旋扶正器在跨度中点处套管居中度>70%,高于安放双弓扶正器+刚性扶正器时套管的居中度,更能满足顶替效率要求。

设计采用整体冲压式螺旋半刚性扶正器和滚轮



(a) 居中井眼顶替效率高



(b) 偏心井眼难顶替

图4 顶替效率模拟计算结果

Fig.4 Simulated calculation results of displacement efficiency

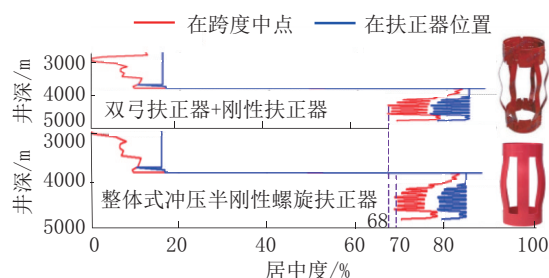


图5 扶正器类型对套管居中度的影响

Fig.5 Influence of centralizer type on casing centering

式刚性扶正器,底部安装滚轮刚性扶正器一只,确保套管“抬头”,水平段、造斜井段和直井段采用外径为208 mm的整体式冲压半刚性螺旋扶正器,其中,水平段每两根套管加一只扶正器,造斜段每根套管加一只扶正器,直井段每5根套管加一只扶正器,保证套管居中,保持环空流动区域的均匀性,提高顶替效率。

2.2.3 清水顶替技术

为进一步提高套管居中度,同时避免过高的内

外压差和施工泵压,优选低密度流体作为顶替流体,使得套管内外产生更高的密度差,套管在井眼内实现漂浮,提高居中度,改善顶替效率,减少因套管内外密度差引起的应力变化,提高水泥封隔质量,减少水平井测声幅遇阻的风险^[15]。

GY5-1-4H井固井过程采用压裂车清水替浆,应用固井设计软件对不同的顶替介质对套管居中度的影响开展模拟(见图6),可以看出,清水+钻井液顶替时在跨度中点处套管居中度>78%,套管居中度有明显的提升,满足高效固井高效顶替要求。

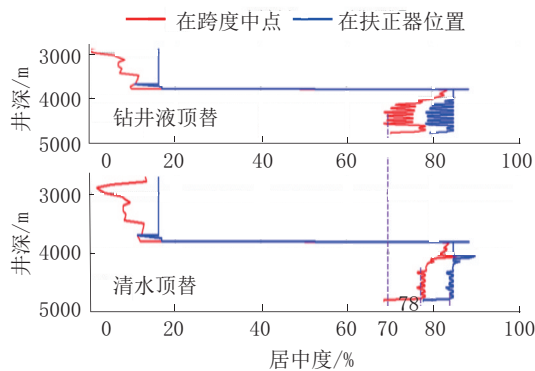


图6 顶替介质对套管居中度的影响

Fig.6 Influence of displacement medium on casing centering

2.3 高强度韧性防窜水泥浆技术

页岩油作为重要的非常规能源,其增产改造时需要大规模的水力压裂,水泥石完整性^[16]作为固井长效密封技术的核心,水泥石能否保持良好的力学性能,是页岩油井能否高效生产开发的关键。

2.3.1 水泥石力学完整性预测

水力压裂时恶劣工况与地层应力会对水泥石造成的一定的载荷,通过弹性力学基本理论,结合GY5-1-4H井井径与相关力学参数,建立了分析模型,研究了水泥石力学性能对其自身应力分布影响规律,根据分析结果开展固井水泥石韧性化改造。

假设套管、水泥环、地层为弹性、均质且各向同性体,水泥环承受地层与套管内应力时,三者之间不存在轴向滑动,所以可假设套管-水泥环-地层为平面模型^[2],如图7所示。

通过拉梅公式(4)与位移公式(5)^[3-4],引入连续性条件、边界条件,套管、水泥环、地层参数见表3,联立求解后可得压裂工况下套管、水泥环应力分布。其中,拉应力为正应力,压应力为负应力。

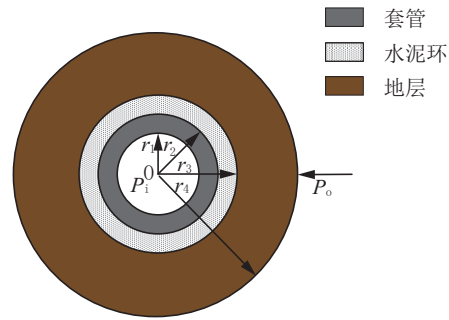


图7 套管-水泥环-地层平面模型

Fig.7 Plane model of casing, cement sheath and formation

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{R_i^2 p_i - R_o^2 p_o}{R_o^2 - R_i^2} - \frac{R_i^2 R_o^2 (p_i - p_o)}{(R_o^2 - R_i^2) r^2} \\ \sigma_\theta &= \frac{R_i^2 p_i - R_o^2 p_o}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{R_i^2 R_o^2 (p_i - p_o)}{(R_o^2 - R_i^2) r^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} u_r &= \frac{1}{(r_2^2 - r_1^2) E_s} \left[-(1 + \nu_s) r_1^2 r_2^2 (p' - p_i) \frac{1}{r} + \right. \\ &\quad \left. (1 - \nu_s) (p_i r_1^2 - p' r_2^2) r \right] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

表3 套管、水泥石、地层参数

Table 3 Parameters of casing, cement paste and formation

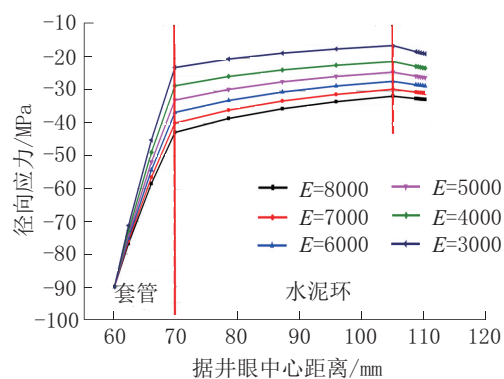
	(内径/外径)/mm	杨氏模量/MPa	泊松比
套管	59.31/69.85	208150	0.3
水泥环	69.85/107.95	/	0.3
地层	107.95/1079.5	60000	0.2

研究发现,相同工况下随着水泥石杨氏模量降低,水泥石界面间差应力降低,有利于避免水泥石在承受来自套管与地层应力时发生应力破坏;水泥石抗压强度达到25 MPa即可满足井下工况对水泥石要求(见图8)。

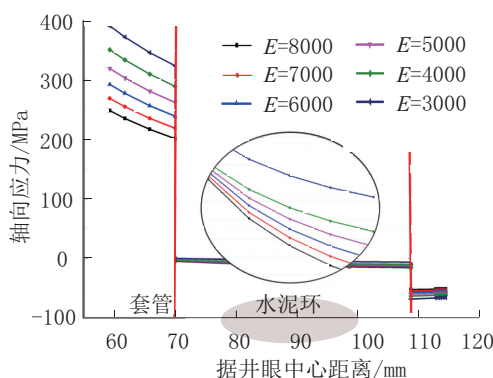
2.3.2 韧性防窜水泥浆体系

依据固井水泥石力学性能要求,优选了高强度韧性防窜水泥浆体系,该体系在普通水泥体系中加入增韧材料^[17-20],韧性材料在水泥石中充填水泥颗粒间缝隙,当水泥石承受应力作用产生微裂纹并逐渐扩散时,其受到韧性材料的阻止而耗散冲击能量,使裂纹终止继续扩展;同时,韧性材料在水泥基体相中产生了三维静张力并导致体积膨胀,致使基体自由体积增加,水泥石变形能力增加,韧性提高^[5-6]。

高强度韧性防窜水泥浆体系形成的水泥石具有“高强度、低弹模”的力学性能特点,其水泥浆配方为:G级水泥+石英砂+增韧材料DRE-2S+降失



(a) 套管水泥环地层径向应力分布



(b) 套管水泥环地层轴向应力分布

图8 压裂工况下套管-水泥环-地层应力分布

Fig.8 Stress distribution of casing, cement sheath and formation under fracturing operation

水剂 DRF-1S+稳定剂 DRK-3S+分散剂 DRS-1S+消泡剂 DRX-1L+抑泡剂 DRX-2L+水,基本性能参数见表4。该体系杨氏模型为6.85 GPa,抗压强度达到28.6 MPa,其力学性能能够满足大规模水力压裂时套管内恶劣工况载荷对水泥石的性能要求,水泥石能够在增产改造时保持完整性。

表4 高强度韧性水泥浆性能

Table4 Properties of cement slurry with high strength and toughness

密度/(g·cm ⁻³)	1.92
失水/[mL·(6.9MPa) ⁻¹ ·(30min) ⁻¹]	40
游离液量/%	0
上下密度差/(g/cm ⁻³)	0.01
杨氏模量/GPa	6.85
抗压强度/[MPa·(48h) ⁻¹]	28.6
稠化时间/120℃×55 MPa×45 min	127
[min·(70Bc) ⁻¹]	140
125℃×55 MPa×45 min	104

3 应用效果

该井应用了上述技术顺利固井,通井、下套管及固井施工全过程未发生复杂,保障了固井质量。技术措施包括:

- (1)使用“ $\varnothing 215.9$ mm 钻头+ $\varnothing 139.7$ mm 钻杆”钻具组合,配套使用2只清砂接头;
- (2)采用双扶+微扩眼器通井,大排量循环;
- (3)扶正器优选,清水顶替,保障套管居中;
- (4)优选高强度韧性防窜水泥浆体系。

固井结束候凝48 h后,通过小钻杆输送测声幅,固井质量合格率达到72.05%,水泥返高返至技术套管内200 m,固井质量合格。

4 结论及建议

(1)现场应用表明,使用钻井参数与钻具组合协同优化技术和固井前双稳定器通井有助于形成光滑井壁,为提高固井界面胶结质量提供了保障。

(2)套管居中是提高水平井固井质量的关键,通过顶替效率模拟与扶正器类型优选、安放优化,并使用低密度流体顶替技术能有效提高套管居中度,提高水泥浆顶替效率。

(3)高强度韧性水泥浆体系能够满足页岩油井水力压裂对水泥石性能要求,实现环空层间封隔,保障井筒密封完整性。

GY5-1-4H井的成功经验可为长水平段页岩油井固井提供良好的借鉴与理论、方法指导。

参考文献(References):

- [1] 李娟.不同流态的顶替效率的数值模拟研究[D].北京:中国石油大学(北京),2009.
LI Juan. Numerical simulation of displacement efficiency in different flow regimes[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2009.
- [2] 王智峰.复杂结构井岩屑床清除技术[J].石油钻采工艺,2009,31(1):102.
WANG Zhifeng. Cutting bed removal technology for complex structure wells[J]. Petroleum drilling and production technology, 2009,31(1):102.
- [3] 王建龙.大斜度井井眼清洁影响因素及对策研究[J].钻采工艺,2020,43(6):28-30.
WANG Jianlong. Study on influencing factors and countermeasures of wellbore cleaning in highly deviated wells[J]. Drilling & Production Technology, 2020,43(6):28-30.
- [4] 王建龙,郑锋.井眼清洁工具研究进展及展望[J].钻采工艺,

- 2018,46(9):18-23.
- WANG Jianlong, ZHENG Feng. Research progress and prospect of borehole cleaning tools[J]. Drilling & Production Technology, 2018,46(9):18-23.
- [5] 李琪,文亮,孙乖平,等.实用简单的大斜度井井眼清洁模型的建立与应用[J].科学技术与工程,2014,14(9):155-159.
- LI Qi, WEN Liang, SUN Guaiping, et al. Establishment and application of a practical and simple wellbore cleaning model for highly deviated wells[J]. Science Technology and Engineering, 2014,14(9):155-159.
- [6] 张弛,赵殊勋,王雅茹,等.大港油田大斜度大位移井固井技术难点及对策[J].西部探矿工程,2018,30(4):91-94.
- ZHANG Chi, ZHAO Shuxun, WANG Yaru, et al. Difficulties and countermeasures of cementing technology for high angle extended reach wells in Dagang Oilfield[J]. West-China Exploration Engineering, 2018,30(4):91-94.
- [7] 何雷,徐兆喜,祁永喜,等.吉木萨尔页岩油水平井井眼清洁技术研究与应用[J].石化技术,2022,29(6):51-53.
- HE Lei, XU Zhaoxi, QI Yongxi, et al. Research and application of borehole cleaning technology in Jimusar shale oil horizontal well[J]. Technical Study, 2022,29(6):51-53.
- [8] 何立成.胜利油田沙河街组页岩油水平井固井技术[J].石油钻探技术,2022,50(2):46-50.
- HE Licheng. Cementing technology of shale oil horizontal wells in Shahejie Formation of Shengli Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022,50(2):46-50.
- [9] 张凯.蜀南地区页岩气水平井固井水泥浆的设计及应用[J].钻井完井,2019,45(9):263-264.
- ZHANG Kai. Design and application of cementing slurry for shale gas horizontal wells in southern Sichuan[J]. Drilling Completion, 2019,45(9):263-264.
- [10] 赵军.页岩气井固井水泥浆体系研究进展[J].科技视界,2018(12):220-222.
- ZHAO Jun. Research progress on cementing mud system in shale gas Wells[J]. Science & Technology Vision, 2018(12):220-222.
- [11] 李振川,姚昌顺,胡开利,等.水平井井眼清洁技术研究与实践[J].新疆石油天然气,2022,18(1):48-53.
- LI Zhenchuan, YAO Changshun, HU Kaili, et al. Research and practice of horizontal wellbore cleaning technology[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2022,18(1):48-53.
- [12] 彭博.水平井固井顶替效率模拟及优化[J].化工管理,2021(8):92-95.
- PENG Bo. Simulation and optimization of displacement efficiency of horizontal well cementing[J]. Chemical Management, 2021(8):92-95.
- [13] 张升峰.水平井固井技术研究与应用[J].清洗世界,2021,37(6):151-152.
- ZHANG Shengfeng. Research and application of horizontal well cementing technology[J]. Cleaning World, 2021, 37(6):151-152.
- [14] 柳旭.提高页岩气水平井固井质量措施探讨[J].西部探矿工程,2020,32(3):97-98.
- LIU Xu. Discussion on measures to improve cementing quality of shale gas horizontal wells[J]. West-China Exploration Engineering, 2020,32(3):97-98.
- [15] 房皓.长宁—威远地区页岩气水平井固井技术研究[D].成都:西南石油大学,2015.
- FANG Hao. Study on cementing technology of shale gas horizontal well in Changning Weiyuan area[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [16] Torsæter M, Albawi A, Andrade J D, et al. Experimental setup for testing cement sheath integrity in arctic wells[C]. OTC Arctic Technology Conference, 2014.
- [17] Andrade J D, Torsæter M, Todorovic J, et al. Influence of casing centralization on cement sheath integrity during thermal cycling[M]. 2014.
- [18] Andrade J D, Sangesland S, Todorovic J, et al. Cement sheath integrity during thermal cycling: A novel approach for experimental tests of cement systems[C]. SPE Bergen One Day Seminar, 2015.
- [19] 张松.固体胶乳粉改善水泥石性能试验研究[D].成都:西南石油大学,2012.
- ZHANG Song. Experimental study on improving performance of cement paste with solid latex powder[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [20] Sahmaran M, Yaman I O. Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash[J]. Construction & Building Materials, 2007, 21(1):150-156.

(编辑 王文)