

# 延长油田西部区域水平井固井水泥浆体系优化技术

刘云

(延长油田勘探开发技术研究中心, 陕西延安 716000)

**摘要:**分析了目前延长油田西部区域固井现状及造成固井质量差的原因,据此提出了适合延长油田西部地区水平井固井水泥浆性能的要求,优选出了适合该地区水平井固井的水泥浆体系。该水泥浆体系具有低滤失、零自由液、高沉降稳定性、好流变性,有利于提高浆液顶替效率。形成的水泥石具有不收缩、微膨胀、早强的特点,满足水平井射孔、后期压裂改造等工程施工的要求。最终形成了一整套适合延长油田西部地区水平井固井的水泥浆体系。

**关键词:**水平井;固井;水泥浆性能;延长油田

中图分类号:TE256+.6 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2017)02-0017-06

**Optimization Technology of Cement Slurry System for Horizontal Well Cementing in Western Area of Yanchang Oilfield/LIU Yun** (Yanchang Oilfield Exploration and Development Research Center, Yan'an Shaanxi 716000, China)

**Abstract:** In this article, the analysis is made on the current cementing status and the causes of poor cementing quality in the western region of Yanchang oilfield. Based on the analysis, the slurry performance requirements for horizontal well cementing in this area are put forward. The optimized cement slurry system suitable for this area is selected, which has low filtration, zero-free liquid and high sedimentation stability, and its rheology is beneficial to improve the displacement efficiency; and efficiency; the formed cement stone has no shrinkage, micro-expansion and early strength characteristics, which can meet the requirements of horizontal well perforation post-fracturing and other projects construction. By all the above, a complete set of cement slurry system suitable for horizontal well cementing in the western area of Yanchang oilfield is formed.

**Key words:** horizontal well; cementing; slurry performance; Yanchang oilfield

## 1 延长油田西部区域水平井固井现状

延长油田的西部区块地层属于低压、低渗、致密性油气田,特别是上部地层的压力更低,存在易发生漏失的洛河组地层,且存在多个出水层,其封固特点为含油气段长,温差变化大,层间水活跃,上部地层承压能力低,裸眼段长,跨度近1000 m,存在严重的漏失风险,固井过程中发生漏失造成水泥浆低返封固质量差的现象非常普遍<sup>[1-2]</sup>。而目的层段岩性多,垮塌严重,井径大且不规则,水泥环一、二界面胶结质量难以保证。固井质量直接影响油气井的生产和后期压裂等增产措施的实施。

目前,延长油田西部地区开发水平井一般采用二级井身结构,表层使用 $\varnothing 311.5$  mm钻头钻至井深200 m左右,下入 $\varnothing 244.5$  mm套管;二开使用 $\varnothing 215.9$  mm钻头完钻井深为2800 m左右,垂深1800 m左右,下入 $\varnothing 139.7$  mm套管。基于延长油田西部地区地质条件和钻井情况,该区域水平井固井的主要特点有:

- (1) 水平段较长,套管下入困难,如果井眼准备不充分,易发生卡套事故;
- (2) 水平段、斜井段套管居中困难,套管易贴井壁;
- (3) 井壁泥饼、斜井段环空岩屑不易被清除干净;
- (4) 在钻井液顶替水泥浆过程中,水泥浆易沿宽边推进,将与钻井液混窜,造成窜槽;
- (5) 水平段环空间隙小,易形成沙床,导致固井施工压力高或者环空憋堵;
- (6) 为提高顶替效率而增大排量造成的循环压力升高和固井防漏所需的环空低压之间的矛盾突出;
- (7) 井斜段、水平段因重力作用水泥颗粒下降,井眼顶部自由水析出形成横向通道,形成窜流,同时,固相颗粒沉降导致上部水泥胶结疏松,强度下降,导致封固失败;
- (8) 水平井后期普遍采用射孔、分段压裂的方式增产,要求水泥石具有一定的韧性以抵抗微裂缝

收稿日期:2016-04-20;修回日期:2016-11-21

基金项目:延长油田公司项目“水平井开发配套技术研究与应用——固井工艺技术”(编号:ycsy2014xjs-B-2)

作者简介:刘云,男,汉族,1984年生,工程师,从事石油工程方面的研究工作,陕西省延安市宝塔区李渠镇,liuyun211321@163.com。

的产生。

基于以上延长西部油田水平井固井的特点,该区域水平井固井要求水泥浆体系具有低的析水和失水、较好的流变性能防窜性能、具有抵抗反复载荷的韧性。

## 2 固井水泥浆体系优化研究

### 2.1 在用水泥浆体系性能评价

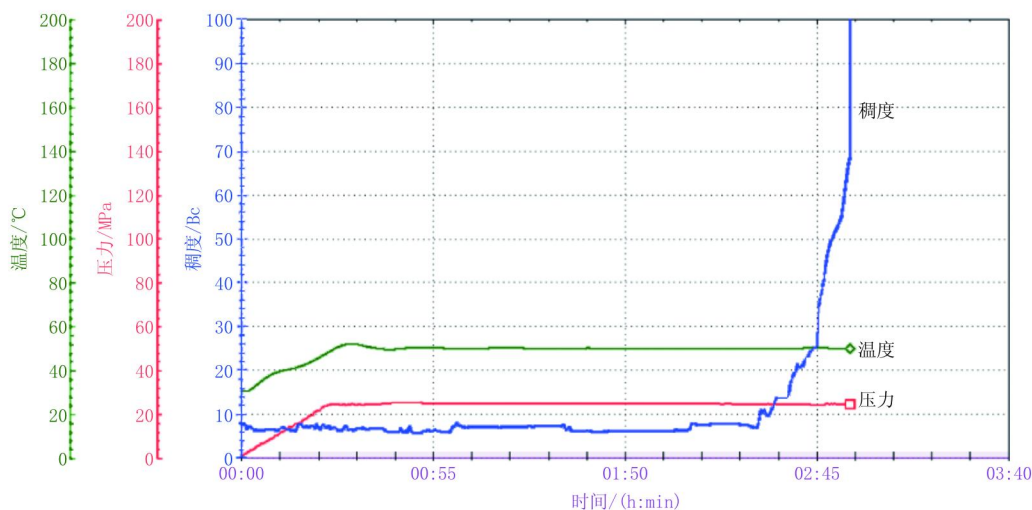
由于固井漏失普遍存在,延长西部油田主要采用双密度水泥浆体系固井,按照 API 标准,对目前水平井固井在用的 2 种水泥浆体系性能进行了检测,水泥浆实验温度为 50 °C,结果见表 1 及图 1、图 2。

结合延长西部油田水平井固井对水泥浆体系的要求对以上测试结果进行分析,得出以下几点认识。

(1) 稠化时间:为减少气窜的可能性,要求稠化过渡时间 < 10 min<sup>[3]</sup>,以上水泥浆高密度尚能满足

表 1 在用的水泥浆体系性能检测实验数据

配方 序号	密度/(g· cm <sup>-3</sup> )	剪切应力读数						n 值	K 值	抗压强度(72 °C)/ MPa	稠化时间/min(50 °C ×25 MPa ×25 min)	API 失水 量/mL	析水 量/mL	备注
		600	300	200	100	6	3							
1	1.90	137	80	56	34	9	5	0.77	0.32	5.2/24 h,11/48 h	173	40	0	气泡量大,水泥浆膨胀溢出
2	1.37	39	26	20	16	8	7	0.44	0.85	6.0/24 h,2.9/48 h	255	30	0	浆体比较稳定



实验名称			样品编号	实验日期	2015-06-05	初始稠度开始	15.0 min
初始温度	°C	初始压力	MPa	初始稠度	7.8 Bc	报警稠度	100.0 Bc
目标温度	°C	目标压力	MPa	30Bc稠化时间	02:45:30	稠化时间	02:54:30
40Bc稠化时间	02:46:59	50Bc稠化时间	02:49:29	60Bc稠化时间	02:53:00	70Bc稠化时间	00:00:00
实验配方	A公司*44%						

图 1 高密度水泥浆(1.90 g/cm<sup>3</sup>)稠化曲线

要求,但低密度的稠化过渡时间偏长,大于 17 min,不利于提高固井质量。

(2) 流变性能:好的流变性能有助于提高顶替效率,清除虚泥饼,改善胶结质量。上述高密度、低密度水泥浆体系的流变性能测定结果均能满足要求。

(3) 失水性能:通过控制失水,减少对地层的伤害,防止因脱水而导致桥堵。以上评价试验结果中,高密度、低密度水泥浆能有效控制失水,且失水量较小,均控制在 30 mL 以内。

(4) 水泥石抗压强度:水泥石的强度是有效封固隔离地层、支撑套管的基本保证,对固井质量有决定性的意义<sup>[4]</sup>。从表 1 中可以看出 2 种水泥浆体系

均未达到技术要求。

(5) 水泥浆自由水性能:对于水平井,要严格控制自由水量,必须为 0,因为若存在自由水,在顶部会形成空水泥段,导致密封失败,上述 2 种水泥浆测定均满足要求。

因此,需通过外加剂优选提高 2 种水泥浆体系的抗压强度、缩短低密度水泥浆的稠化过渡时间,同时优选增韧剂,以改善水泥石的脆性,增加其韧性。

### 2.2 水平井固井水泥浆配方优化

#### 2.2.1 水泥石的弹韧性要求及改善脆性的方法

由于射孔压裂的需要,延长油田水平井固井不仅要求水泥环有一定的强度,而且还要具备较好的

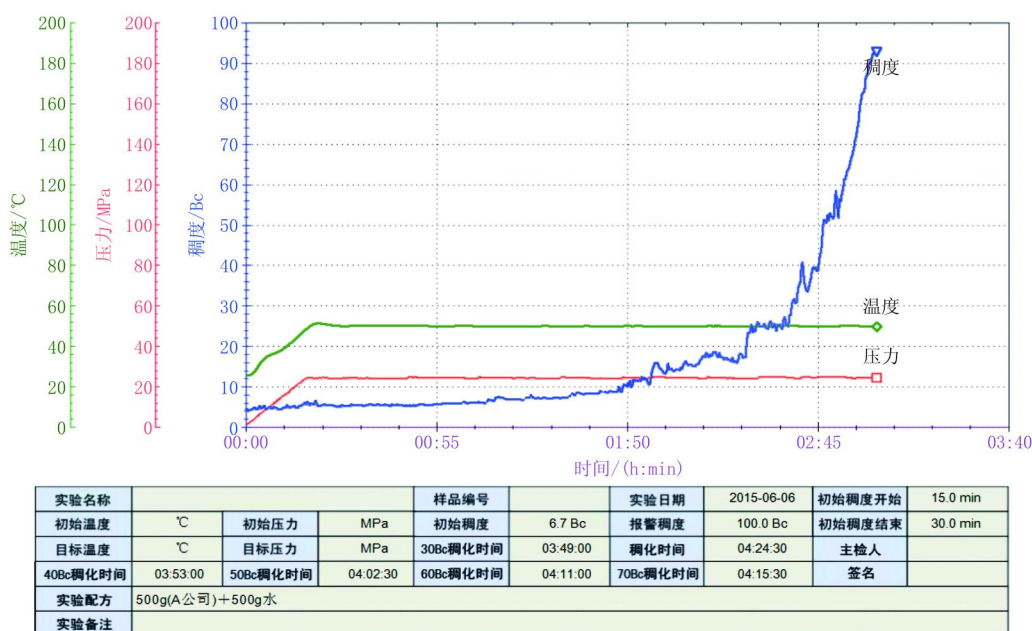


图 2 低密度水泥浆 (1.37 g/cm<sup>3</sup>) 稠化曲线

抗冲击能力和耐久性<sup>[5-6]</sup>。根据这个需求,研制开发了具有较高强度和弹塑性的弹韧性低密度水泥浆体系,满足水平井固井技术需求。

改善水泥石的脆性要从两方面入手,第一要控制宏观裂缝的产生,第二通过提高水泥石的抗压、抗折强度,改善其脆性。通过调整处理剂配比并控制凝结时间即可消除水泥水化过程中由于固化物内部某一部位产生高应力导致其产生宏观裂缝的现象。提高抗折强度是脆性研究中的关键问题,因为裂缝对抗折强度的影响最大。在水泥浆水化产物颗粒之间存在孔隙且有的孔隙较大,即使没有宏观裂缝的产生,也不能排除微孔隙造成的微裂缝。因此通过添加某些成分,使其形成网络结构和填充微孔隙,从而减少裂纹的发生,提高强度,尤其是抗折强度。

### 2.2.2 水泥浆外掺料及外加剂的优选

(1)低密度减轻材料的优选。经过大量的室内研究,优选出了新型复合低密度水泥浆体系的减轻剂 TJLW, TJLW 主要由改性粉煤灰、微硅、膨胀性材料、稳定剂等按照一定的比例复配而成。

(2)非渗透降失水剂 TJFS 优选。基于前期对水平井固井水泥浆降失水性能的要求,室内优选了非渗透防窜型降失水剂 TJFS,不仅使水泥浆具有较好的防窜效果,而且所形成的水泥石具有一定的弹性,可提高水泥石抗拉强度,从而降低射孔时水泥石的破裂度,在低应力作用下增加弹性形变恢复能力,

其弹性模量低于原浆水泥石<sup>[7-8]</sup>。

(3)膨胀剂 TJP 的优选。在水泥浆中加入刚性膨胀剂,能够补偿水泥石收缩所造成的影响,降低气窜的危险性,提高胶结质量。

(4)早强剂的优选。早强剂 DZC 的加入不仅可提高水泥石的早期强度,还可用来调节水泥浆的稠化时间,以满足施工的安全要求。

(5)增韧剂的优选。在保证水泥浆体系具有较好的流变性能情况下,水泥石的抗折强度和抗压强度随着纤维的增加而变大,通过添加一定比例纤维,以提高水泥石的弹韧性。

### 2.2.3 固井水泥浆体系综合性能

(1)常规性能。经过前期大量优选试验后,依据水泥浆性能试验标准,开展了水泥浆基本性能的评价,通过改变加量和配方,对水泥浆的流变、失水、强度等进行了调配与评价<sup>[3]</sup>。其水泥浆综合性能见表 2。

表 2 优选的水泥浆基本性能

配方序号	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	流变性能	防窜系数	API 失水量/mL	抗压强度/MPa	抗折强度(24 h)/MPa
1	1.40	130/83/71/54/19/16	1.35	15	14.5	2.2
2	1.45	125/79/61/46/15/14	1.45	14	15.5	2.3
3	1.50	121/70/57/38/18/16	1.21	13	17.2	3.3
4	1.60	125/66/40/25/8/7	0.93	16	18.7	3.7
5	1.90	235/141/102/77/39/36	0.76	19	24.5	4.2
6	1.88	230/135/98/75/38/35	0.62	22	23.1	3.1
7	1.85	200/110/78/54/25/22	1.12	21	22.4	2.6

以上水泥浆配方为:

配方 1: JHG + 100% TJLW + 6.0% TJFP + 2% TJP + 8% TJFS + 2.5% TJC + 55% H<sub>2</sub>O;

配方 2: JHG + 90% TJLW + 5.0% FSFP + 2% FSP + 7% TJFS + 2.0% TJC + 50% H<sub>2</sub>O;

配方 3: JHG + 85% TJLW + 5.0% FSFP + 2% FSP + 6% TJFS + 2.0% TJC + 50% H<sub>2</sub>O;

配方 4: JHG + 85% TJLW + 4.0% FSFP + 2% FSP + 6% TJFS + 1.5% TJC + 50% H<sub>2</sub>O;

配方 5: JHG + 2.0% TJP + 2% TJS + 4% TJFS + 2.0% TJC + 42% H<sub>2</sub>O;

配方 6: JHG + 2.0% TJP + 2% TJS + 4% TJFS + 2.0% TJC + 44% H<sub>2</sub>O;

配方 7: JHG + 2.0% TJP + 2% TJS + 4% TJFS + 2.0% TJC + 46% H<sub>2</sub>O。

一般来讲,水泥浆沉降稳定性与水泥浆自由水和水泥颗粒沉降有关,水泥浆失水越小,自由水析出量越少,其水泥浆体系愈趋向稳定。为此,利用水泥

浆沉降稳定仪,模拟在井下压力和温度条件下,测定固结后的水泥石密度分布来评价水泥浆沉降稳定性。按照 API 规范程序进行实验测试,固结后的水泥石体积基本没有收缩,该水泥浆体系具有较好的水泥浆沉降稳定性能,其水泥石上下密度差均在 0.03 g/cm<sup>3</sup> 以内。

由以上实验结果可知,优化后的水泥浆体系防窜性能好(系数普遍小于 3)、抗压强度高、流变性能好、沉降稳定性能佳,同时具有一定的抗折强度,能够满足延长西部水平井对水泥浆体系常规性能的要求。

(2)力学性能。利用美国千德乐公司的 CHANDLER 5265U 机械性能测定仪对优选的弹韧性水泥石进行了力学评价<sup>[9]</sup>,结果见表 3 及图 3、图 4。

表 3 优选的弹塑性水泥体系综合力学性能

配方序号	泊松比	弹性模量/GPa	强度/MPa	抗折强度/MPa
1	0.42	12.6	21	4.2
2	0.39	17.3	29	2.9

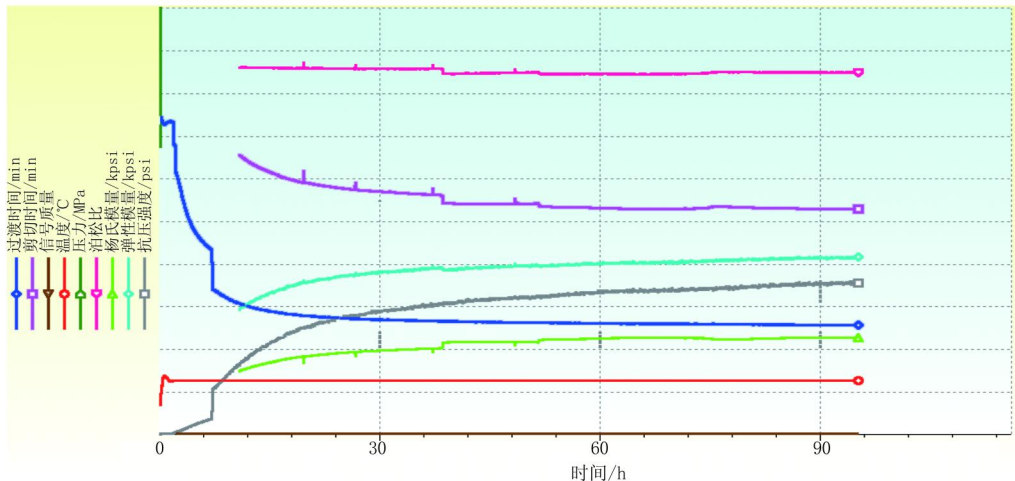


图 3 弹塑性水泥石力学性能综合测试

通过对水泥石机械性能评价试验分析可以发现,提高水泥石弹性的主要表现在泊松比的增加、弹性模量的降低。弹韧性材料的加入使水泥石的抗折强度提高了 30% 以上。

以上水泥浆配方为:

配方 1: JHG + 2.0% FSFP + 2% FSP + 4% FSTJ + 2.0% TJC + 0.2% 纤维 + 46% H<sub>2</sub>O;

配方 2: JHG + 2% TJS + 44% H<sub>2</sub>O。

此外采用德国 Toni 高精度抗折试验机进行弹塑性水泥石韧性评价<sup>[10]</sup>。从测试结果可以看出,加入优选的增加弹韧性材料后对水泥石起裂强度影响不

大,当载荷 150 N 左右时,对后期裂纹扩展影响较大。图 5 为原浆抗折试验曲线,消除自由挠度后的实际加载挠度仅为 0.3 mm 时,试件断裂,且峰值 < 250 N,后期无假塑裂纹扩展,充分反映了原浆在起裂后裂纹的快速扩展过程,以及原浆的脆性。对比图 6 可以发现,优选的弹韧性水泥石在裂纹扩展过程中挠度大、载荷高,水泥石的增韧止裂效果比较明显。

利用相似原理,建立模拟井筒开展分段压裂条件下水泥石密封性能分析。通过建立  $\varnothing 215.9 \text{ mm} \times \varnothing 139.7 \text{ mm}$  的套管环空,并在环空中填充水泥,固化后开展模拟压裂水泥环损失及密封失效分析<sup>[11-12]</sup>。

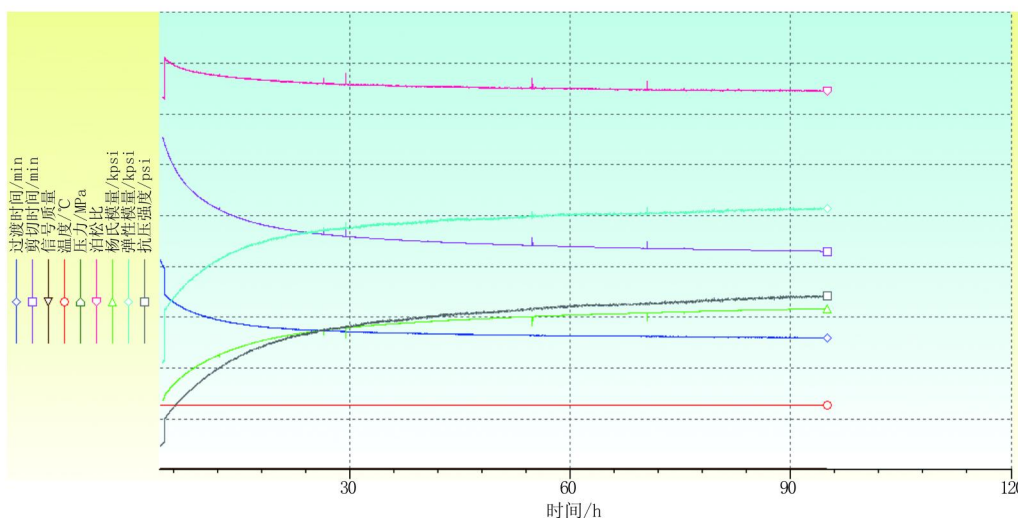


图 4 纯水泥石力学性能测试

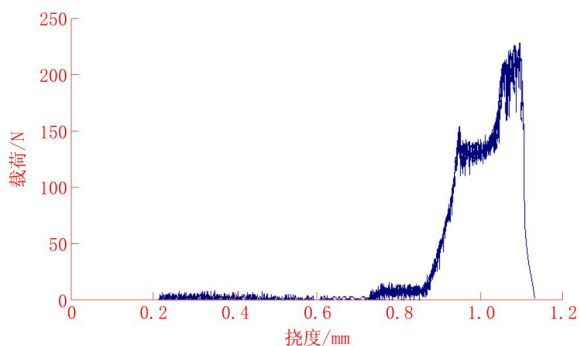


图 5 原浆挠度 - 载荷曲线

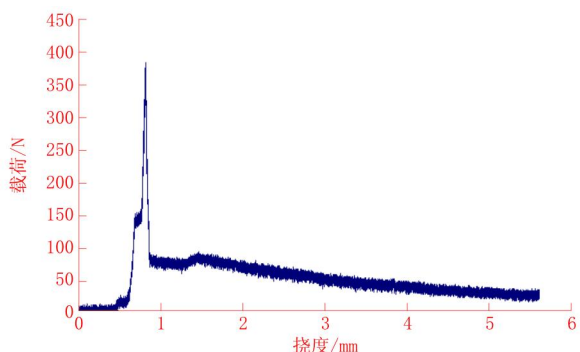


图 6 配方 2 挠度 - 载荷曲线

通常情况水泥环密封失效的形态分为 3 类:轴向拉伸破坏、径向压缩破坏、塑性屈服微环隙(见图 7)。3 种破坏形态均为套管传递内压导致水泥环密封失效。针对水泥环开展分段压裂水泥环破坏试验(见图 8 所示)。在试验压力 35 MPa 时,常规水泥环出现裂纹,而相同试验条件下弹韧性水泥环未见宏观裂纹,在 1 MPa 条件下开展导流测试,未见窜漏。试验表明,通过改善水泥石弹性变形能力和抗拉强度,能够有效提高水泥环在分段压裂条件下的密封完整性。

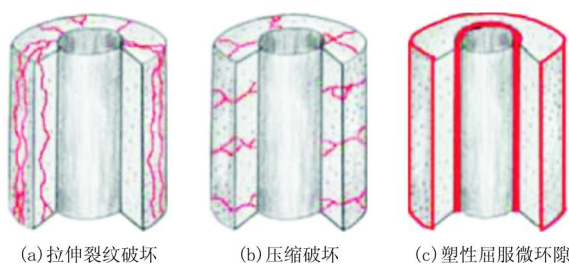


图 7 模拟分段压裂水泥环密封失效形态

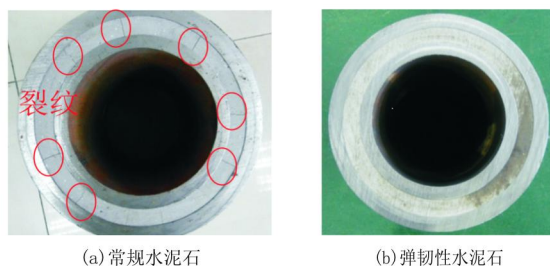


图 8 压裂环境下水泥石破坏形态分析

### 3 现场应用

通过室内研究与评价后,该弹韧性水泥浆体系先后应用于吴平 34、托平 17、永 238 平 1、杏 218 平 44 等 10 余口井,固井成功率 100%,固井质量合格率达 98%。

周平 2 井采用二开井身结构,水平段长 1400 m,靶前位移达 300 m,裸眼段达 3300 m。该井上部地层承压能力低,且裸眼井段较长,因此采用双密度固井,低速度用 1.40 g/cm<sup>3</sup>,高密度用 1.90 g/cm<sup>3</sup>弹韧性水泥浆体系,综合性能良好。整个施工过程顺利,48 h 声波测井固井质量优质(见图 9)。

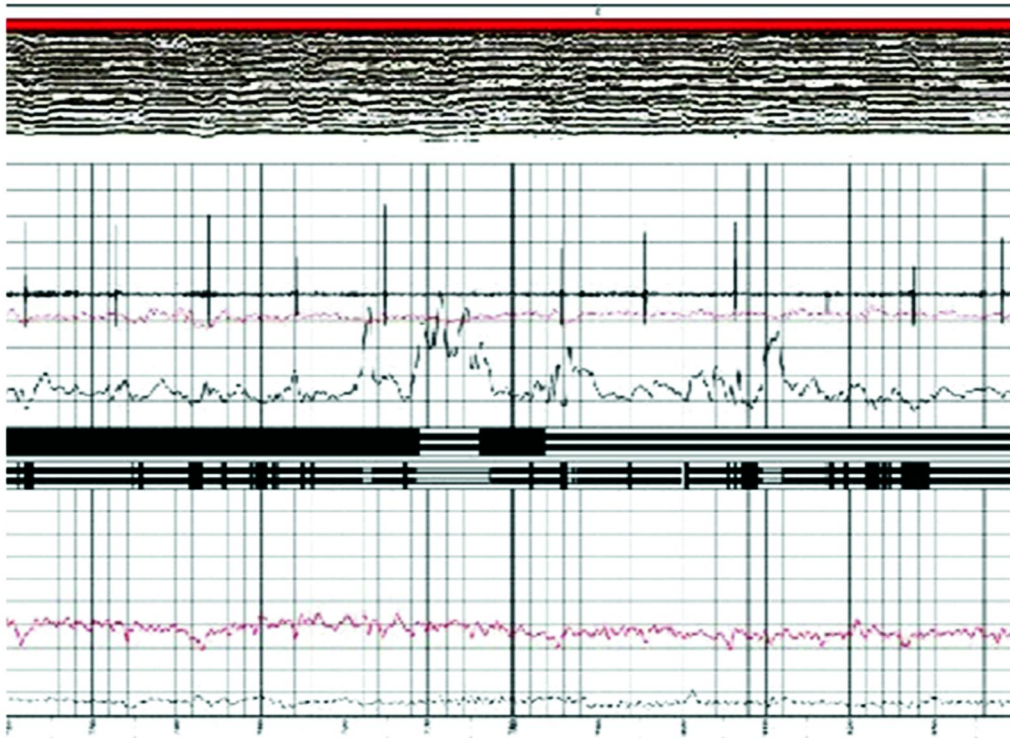


图9 周平2井油层段固井质量评价图

#### 4 结论与认识

(1)通过分析固井过程中存在的问题,并对现有的水泥浆体系进行评价测试,主要检测了稠化时间、流变性能、失水性能、水泥石抗压强度、水泥浆自由水性能及沉降稳定性测试,总体来说,水泥浆性能只有部分达到要求,整体性能不稳定。

(2)优选出新型复合低密度减轻剂 TJLW,以满足固井过程中发生漏失造成水泥浆低返封固质量不好的现象。使用非渗透防窜型降失水剂 TJFS,不仅使水泥浆具有较好的防窜效果,而且所形成的水泥石具有一定的弹性,可提高水泥石的抗拉强度,从而降低射孔时水泥石的破裂度。

(3)在水泥浆中加入刚性膨胀剂,能够补偿水泥石收缩所造成的影响,降低气窜的危险性,提高胶结质量。适量的加入早强剂,可以来调节水泥浆的稠化时间,以满足施工的安全要求。

(4)对水平井弹塑性水泥浆体系优选,并开展水泥浆基本性能评价。试验表明:通过改善水泥石弹性变形能力和抗拉强度,能够有效提高水泥环在分段压裂条件下的密封完整性。固结后的水泥石体积基本没有收缩,该水泥浆体系具有较好的水泥浆沉降稳定性能。

#### 参考文献:

- [1] 孙展利. 水泥浆的沉降失重研究[J]. 石油钻采工艺, 1997, 19(2): 31-36.
- [2] 刘崇建, 谢应权, 郭小阳, 等. 水泥浆凝结过程的气窜问题[J]. 西南石油学院学报, 1998, 20(4): 47-52.
- [3] 孙展利. 水泥浆的沉降重量、沉降-胶凝失重和水化体积收缩-胶凝失重三者的关系[J]. 中国海上油气(工程), 1999, 11(3): 51-54.
- [4] 刘崇建, 张玉隆, 谢应权. 应用水泥浆稠度阻力方法预测环空气窜的方法研究[J]. 天然气工业, 1999, 19(5): 46-50.
- [5] 刘崇建, 张玉隆. 水泥浆桥堵引起的失重和气侵研究[J]. 天然气工业, 1997, 17(1): 39-44.
- [6] 刘奎, 王宴滨, 高德利, 等. 页岩气水平井压裂对井筒完整性的影响[J]. 石油学报, 2016, 37(3): 406-414.
- [7] 李长安, 姚定文. 油井水泥缓凝剂 CT11-3 的研究与应用[J]. 油田化学, 1998, 15(3): 220-223.
- [8] 吴叶成. 易漏地层防漏增稠水泥浆体系的研究和应用[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(3): 20-26.
- [9] Tinsley J. M., Miller E. C., Sabins F. L., et al. Study of Factors Causing Annular Gas Flow Following Primary Cementing[J]. Journal of Petroleum Technology, 1980, 32(8): 1427-1437.
- [10] Hartog J. J., Davies D. R., Stewart R. B. An Integrated Approach for Successful Primary Cementations[J]. Journal of Petroleum Technology, 1983, 35(9): 1600-1610.
- [11] 赖金荣. 增韧纤维水泥浆在胜利油田小间隙井的应用研究[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(5): 59-63.
- [12] 郭辛阳, 步玉环, 李娟. 井下复杂条件下固井水泥环的失效方式及其预防措施[J]. 天然气工业, 2013, 33(11): 86-91.