

龙凤山区块低压易漏井固井技术

谢海涛 (中石化华北石油工程有限公司井下作业分公司, 河南 郑州 450042)

摘要: 针对龙凤山区块固井中存在的漏失严重、油气层活跃, 易发生气窜、井底温度高、井径不规则等一系列问题, 进行了研究分析, 提出了龙凤山区块低压易漏失井尾管固井技术。通过在北 208 井及北 201-14 井现场应用, 使固井质量明显得到提高, 为龙凤山区块尾管固井施工提供了一定的技术参考。

关键词: 龙凤山区块; 低压; 易漏失; 尾管固井技术

0 引言

龙凤山圈闭位于长岭断陷北正镇断阶带东南端, 预测天然气储量 $234.32 \times 10^8 \text{ m}^3$, 含气面积 64.87 km^2 , 是目前东北油气分公司重要的天然气储量接替区。龙凤山区块地层裂缝发育, 气层相对活跃, 三开 $\Phi 139.7 \text{ mm}$ 油层套管下深为多为 3500m 以上, 主要封固营城组、沙河子组及以上地层。由于固井中存在着地层裂缝发育, 漏失严重、气层活跃, 易发生气窜、井底温度高, 上下温差大、井径不规则, 井眼条件差等一系列问题, 针对此进行研究分析, 提出了龙凤山区块低压易漏失井尾管固井技术。

1 龙凤山区块固井技术难点

1.1 裂缝发育, 漏失问题突出

龙凤山区块属于低压易漏地层, 地层孔隙压力中低。钻遇青山口组、泉头组、登娄库组、营城组地层均存在不同程度的漏失, 虽经随钻堵漏以及地层承压, 但固井中发生漏失情况仍有发生。从地层压力剖面看, 登娄库组 - 营城组漏失压力较低, 当量密度最低达到 1.20 g/cm^3 以下。

1.2 油气层活跃, 易发生气窜

该区块气层活跃且分布段长, 固井施工结束, 水泥浆失重, 不能有效平衡地层压力, 造成油气上窜, 影响一二界面胶结质量。北 2 井、北 202 井、203 井、北 201-4 井分别出现了不同程度的油气上窜情况, 北 201-4 井油气上窜速度如表 1 所示。

1.3 井底温度高, 上下温差大

龙凤山构造地温梯度一般在 $3.35\text{--}3.55 \text{ }^\circ\text{C}/100\text{m}$ 左右, 井深通常在 3500m 以上, 井底静止温度在 $115 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 最高可达 $132 \text{ }^\circ\text{C}$ 。高温给固井水泥浆体系、固井工具、附件以及现场施工带来了一系列的影响。水泥浆体系既要满足在高温条件下的安全施工, 又要满足在顶部较低温度条件下较快的强度发展过程。当井底温度超过 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 以后, 浆体的稳定性和水泥石的热稳定性会受到进一步的影响, 出现浆体分层、强度发展慢或水泥强度下降等问题; 对固井工具、附件抗高温性能的要求, 特别是对密封件的抗高温性能的要求更高。

1.4 井径不规则, 井眼条件差

龙凤山构造泉头组下部至登娄库组上部和营城组上

部稳定性差, 井径不规则, 扩大严重, 井壁失稳现象突出。其中, 北 203 井该组地层井径平均为 278 mm , 扩大率为 29%。井径扩大率大, 套管的居中度和水泥浆的流型变差, 影响水泥浆的顶替效率。根据井径与声幅的对比, 井径不规则处声幅明显增大, “糖葫芦”井眼、“大肚子”井段内滞留大量的泥浆, 顶替过程中形成大段泥浆窜槽, 影响水泥浆顶替效率和施工安全。

2 尾管固井工艺技术

2.1 水泥浆体系设计

在低压易漏长裸眼段固井中, 用常规密度水泥浆会压漏地层, 造成水泥浆返高不够, 固井质量难以保证, 往往采用低密度水泥浆。而低密度水泥浆由于水灰比、外掺料较大, 一般具有较低的抗压强度和较高的渗透性, 难以压稳油气层^[1]。因此, 需要设计合理的水泥浆浆体结构, 优选合适的水泥浆外掺料, 达到相应的强度。

2.1.1 浆体结构设计方法

水泥浆浆体结构设计是在满足固井施工的基础上, 保证井下安全和封固质量, 主要考虑注替过程与水泥浆候凝过程的防漏与压稳^[2]。以地层“三压力剖面”(地层孔隙压力、坍塌压力、破裂压力)为基本依据, 考虑地层漏失压力^[3], 浆体结构应满足以下条件:

$$\begin{cases} \max(P_c, P_p) < P_a \\ P_a + P_f < \min(P_l, P_f) \end{cases} \quad (1)$$

考虑油气层的气层压力, 浆体结构应满足以下条件:

$$\begin{cases} \max(P_c, P_p, P_g) < P_a \\ P_a + P_f < \min(P_l, P_f) \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_c 为地层坍塌压力, MPa; P_p 为地层孔隙压力, MPa; P_a 为环空静液柱压力, MPa; P_{fa} 为环空摩擦阻力, MPa; P_l 为地层漏失压力, MPa; P_f 为地层破裂压力, MPa; P_g 为气层压力, MPa。

2.1.2 水泥浆材料优选及配方

解决低压易漏井固井过程中漏失的有效方法是使用与钻井液相一致的低密度水泥浆, 实现近平衡、平衡压力固井^[4]。空心玻璃微珠属硅酸盐材料, 是一种惰性材料, 本身不水化, 只是表面润湿和空隙需要水, 相容性较好, 密度可达到 0.6 g/cm^3 , 堆积密度 0.39, 抗压强度 82MPa, 漂浮率 92%。加入细小且耐压的中空玻璃微珠

或硅质微珠，水泥浆密度可达到 1.20–1.50g/cm³。根据颗粒级配原理，利用油井水泥、空心玻璃微珠、微硅三者进行颗粒级配，优选防气窜剂等水泥浆添加剂，通过室内实验，调配出性能稳定的双凝水泥浆体系，满足水泥浆密度和强度要求（如表 2 所示）。

2.1.3 先导泥浆及前置液设计

悬挂器完成坐挂后，泥浆循环正常后，注入密度为 1.10–1.20g/cm³ 性能良好的泥浆降低环空压力，并对井眼进行清洁。

前置液包括冲洗液和隔离液，固井施工前要求注入与钻井液、水泥浆相容性好，具有稀释、隔离和驱替作用的前置液，延长接触时间，提高顶替效率。

2.2 注浆及驱替工艺优化

采用前置液紊流，后期尾浆塞流的复合注浆工艺。在保证施工安全的前提下，采用紊流 + 塞流的驱替方法，控制替浆排量，初期采用紊流进行替浆作业，原则上控制替浆泵压不超过悬挂器坐挂后循环泵压，起压以后即降低排量，最后 10–15m³ 采用小排量塞流顶替。

2.3 地层承压堵漏

龙凤山地区三开钻井液密度较低，控制了井漏的发生，但地层承压能力不能满足固井施工要求，因此在下

套管施工前，进行地层承压能力试验及堵漏，提高地层承压能力，很有必要。主要方法有静承压和动态承压^[5]。静态承压值、动态承压值的大小根据浆体结构计算确定。

根据现场地层的实际承压能力，调整水泥浆密度，优化现场注浆、替浆排量，最终浆体结构应满足以下条件：

$$\begin{cases} \max(P_c, P_p, P_g) < P_a \\ P_a + P_{\beta} < \min(P_l, P_f, P_r) \end{cases} \quad (3)$$

式中，P_r 为地层实际承压压力，MPa。

2.4 水泥浆失重与压力补偿

水泥浆失重时，液柱压力会降低，最低降为水柱的压力。水泥浆失重后环空液柱压力 P_s 为^[6]：

$$P_s = 0.01 (H_n \cdot \rho_n + H_g \cdot \rho_g + H_s \cdot \rho_s) \quad (4)$$

式中，P_s 为失重后环空液柱压力，MPa；H_n 为环空钻井液高度，m；ρ_n 为环空钻井液密度，g/cm³；H_g 为环空隔离液高度，m；ρ_g 为环空隔离液密度，g/cm³；H_s 为环空失重水泥注高度，m；ρ_s 为水的密度，1g/cm³。

为保证水泥浆失重后油气水不上窜，必须满足以下条件：

$$P_s > P_k \quad (5)$$

表 1 北 201-4 井油气后效情况表

序号	井深 (m)	钻头下深 (m)	油气异常井段 (m)	泥浆密度 (g/cm ³)	最大全烃值 (%)	上窜速度 (m/h)	上窜高度 (m)
1	2620.75	3067	2372-2378	1.10	0.3663	1.25	18.74
2	3353.91	3352	3266-3268	1.13 ↓ 1.12	61.662	16.50	288.94
3	3667.10	3660	3452-3456	1.14 ↓ 1.13	80.549	117.06	1062.92
4	3667.10	3666	3452-3456	1.22 ↓ 1.20	99.999	174.40	523.20
5	3667.10	3652	3452-3456	1.24 ↓ 1.23	64.070	107.59	376.56
6	3667.10	3666	3452-3456	1.26 ↓ 1.25	20.828	13.10	347.87
7	3667.10	3666	3452-3456	1.24 ↓ 1.23	30.816	40.56	365.06
8	3667.10	3665.28	3452-3456	1.22	55.877	21.96	658.81
9	3667.10	3666	3452-3456	1.22	5.150	19.29	969.24

表 2 低密度水泥浆主要配方及强度

固井级别	浆体类型	密度 (g/cm ³)	主要配方	稠化时间 / 可泵时间 (min)	24h 强度 (MPa)	48h 强度 (MPa)
尾管固井	领浆	1.35	100% 华银 G 级水泥 +29% 中空玻璃微珠 +10% 微硅	267/250	8.4	14.7
	领浆	1.40	100% 华银 G 级水泥 +24% 中空玻璃微珠 +9% 微硅	271/257	14.9	16.5
	尾浆	1.40	100% 华银 G 级水泥 +23% 中空玻璃微珠 +7% 微硅	162/140	15.6	16.9

表 3 北 208 井三开油气显示表

序号	层位	井段 (m)	厚度 (m)	岩性	全烃 (%)	油气解释
1	营城组	3255.00-3259.84	4.84	浅灰色荧光砂砾岩	10.075 ↑ 1.152	气层
2	营城组	3272.00-3275.00	3.00	灰色含气砂砾岩	13.656 ↑ 0.601	气层
3	营城组	3277.00-3285.00	8.00	灰色含气砂砾岩	24.269 ↑ 0.405	气层

表 4 北 208 井尾管固井水泥浆性能

项目	领浆		尾浆	
性能	小样	大样	小样	大样
密度 (g/cm ³)	1.40	1.40	1.40	1.40
流动度 (mm)	220	220	220	220
流变性 (93℃ × 20min)	276/157/113/63/8/5	217/151/101/64/7/4	282/161/117/63/9/6	211/168/121/75/12/10
API 失水 mL (6.9MPa × 30min)	36	38	40	40
析水 mL (250mL × 2h)	0	0	0	0
稠化时间 (95℃ × 50MPa × 55min)	257	267	155	162

式中, P_k 为高压油气水层孔隙压力, MPa。

可采用井口施加回压或者动态循环钻井液的方法补偿水泥浆失重后的压力损失, 补偿压力大小由公式(3)、(4)、(5)可得:

$$\Delta P = P_a - P_s \quad (6)$$

式中, ΔP 为补偿压力, MPa。

3 现场应用

3.1 北 208 井概况

北 208 井位于吉林省松原市长岭县新安镇, 是部署在松辽盆地长岭断陷北正镇断阶带龙凤山圈闭的一口探井。该井二开采用 244.5mm 套管, 下深 2227.16m, 三开 $\Phi 215.9$ mm 钻头钻深 3700m, 完钻层位沙河子组, 井径较规则, 裸眼段平均井径 229.13mm (扩大率 6.13%)。固井采用 139.7mm 尾管悬挂方式, 悬挂器位置 2082.51–2076.72m。

地破试验: 试验井深 2152m, 泥浆当量密度 1.38g/cm³ 时地层破裂。油气显示情况详见表 3。

3.2 固井难点

①该井为低压易漏井固井, 下套管、循环顶通、固井注替、水泥候凝均存在漏失可能, 造成地层漏封及油气水层层间封隔失败, 防止固井漏失是固井主要难点;

②地层漏失压力与油气水层压稳安全窗口窄, 同时兼顾难度较大, 驱替效率与全过程防漏存在突出矛盾;

③裸眼段长 1472.84m, 套管下入易发生阻卡, 为悬挂器坐挂带来一定困难;

④悬挂器坐挂后过流面积减小, 水泥浆携带能力强, 易在悬挂器坐挂处、重叠段、井径缩小处发生憋堵, 从而形成高泵压, 出现憋漏地层现象;

⑤该井封固段长, 上部井筒温度低, 水泥浆上下温差大, 上部水泥强度发展缓慢, 容易影响固井质量。

3.3 施工准备

该井领浆、尾浆密度设计均为 1.40g/cm³ (水泥浆性能详见表 4), 尾浆封固 2900–3700m 井段, 领浆封固 2080–2900m 井段, 设计密度为 1.05g/cm³ 的前置液填充 1880–2080m 井段, 设计密度为 1.15g/cm³ 的先导泥浆填充 0–1880m 井段, 理论计算固井过程中井底最大当量密度为 1.37g/cm³。

该井采用循环泥浆加重, 同时加入随钻和复合堵漏材料的方式进行动态承压堵漏, 泥浆密度由 1.15g/cm³ 上提至 1.30g/cm³, 排量由 25l/min 上提至 30.2l/min, 泵压 9.2MPa 上升至 12.5MPa, 循环 3.5h, 井内无漏失, 井底当量密度达到 1.38g/cm³, 满足固井施工要求。

3.4 施工过程

注入平均密度 1.37g/cm³ 的领浆 25.7m³, 平均密度 1.38g/cm³ 的尾浆 22.5m³, 排量 0.8–1.2m³/min, 压力 0–5.0MPa; 固井车替入密度为 1.02g/cm³ 的压塞液 2.3m³, 排量 0.6–1.2m³/min, 压力 0MPa; 泥浆泵替入密度 1.15g/cm³ 的原

井浆 35.2m³, 压力 0–8–9.0MPa, 碰压 9–14MPa; 共替浆 37.5m³。放回水, 井口断流, 拆水泥头; 接方钻杆, 憋压上提洗出多余水泥浆。

3.5 施工结果

北 208 井全井声幅优质段 82.00%, 良好段 5.42%, 合格段 1.60%, 自由段 10.98%, 优良率达到 87.43%。油气层段 (3202–3627m)、油气层上部井段 (2300–3202m) 及油气层下部井段 (3627–3645m) 固井质量均为优质。

3.6 北 201–14 井应用情况

北 201–14 井全井声幅优质段 59.08%, 良好段 40.92%, 合格段 0%, 优良率达到 100%。油气层段 (2835–3135m) 固井质量良好, 油气层段 (3135–3619m) 固井质量优质、油气层上部井段 (2590–2835m) 及油气层下部井段 (3619–3625m) 固井质量均为优质。

4 结论

①综合考虑龙凤山区块地层孔隙压力、坍塌压力、破裂压力、漏失压力、气层压力及地层实际承压能力, 优化现场注浆、替浆排量, 提出了该区块尾管固井低密度水泥浆浆体结构设计方法;

②针对龙凤山区块固井中存在的漏失严重、油气层活跃, 易发生气窜、井底温度高、井径不规则等一系列问题, 进行了研究分析, 提出了龙凤山区块低压易漏失井尾管固井技术;

③该尾管固井技术通过在龙凤山区块北 208 井及北 201–14 井现场应用, 固井质量优良率达到 87% 以上, 固井质量明显提高, 为该区块尾管固井施工提供了一定的技术参考。

参考文献:

- [1] 曲建省, 许树谦, 郭小阳, 等. 特殊固井技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 227, 231.
- [2] 丁保刚, 王忠福. 固井技术基础 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 107.
- [3] 李明忠, 李正国, 王亚青, 等. 低压易漏长裸眼段固井防漏工艺技术概述 [J]. 承德石油高等专科学校学报, 2014, 16(6): 9–13.
- [4] 贾永江. 平衡压力固井技术在塔河油田尾管固井中的应用 [J]. 钻采工艺, 2012, 35(4): 101–103.
- [5] 豆兆永. 双级固井工艺技术在普光气田的研究应用 [J]. 西部探矿工程, 2014(10): 25–27.
- [6] 张明昌. 固井工艺技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2007: 59.

作者简介:

谢海涛 (1983–), 男, 汉族, 陕西渭南人, 工程硕士, 工程师, 现任华北石油工程公司井下作业分公司 HB-1401 固井队副队长, 主要从事石油天然气固井技术工作。