

塔里木盆地顺北区块裸眼防漏固井技术

王永洪, 李 斐, 董瑞强

(中国石化 西北油田分公司 石油工程技术研究院, 乌鲁木齐 830011)

摘要:塔里木盆地顺北区块地质条件复杂, 储层埋藏深(大于7 500 m), 二叠系火成岩漏失严重, 志留系承压能力低, 上奥陶统发育辉绿岩侵入体, 坍塌应力高。优化井身结构后将193.7 mm套管直下至侵入体顶, 固井面临套管下入深(7 000 m)、固井漏失风险大的技术难题。通过优化浆柱结构、扶正器设计, 在低密度水泥浆中加入温敏记忆堵漏材料, 提高水泥浆堵漏能力, 优化防漏固井工艺, 井口反挤低密度水泥浆等措施, 有效保障了长裸眼固井质量。顺北区块长裸眼双级固井实施5口井, 固井质量均达到良好及以上。

关键词:漏失; 固井; 温敏记忆堵漏材料; 低密度水泥浆; 超深井; 顺北区块; 塔里木盆地

中图分类号: TE256

文献标识码: A

Cementation of long open hole in Shunbei block, Tarim Basin

Wang Yonghong, Li Fei, Dong Ruiqiang

(Research Institute of Engineering Technology, SINOPEC Northwest Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The Shunbei block in the Tarim Basin has complicated geologic conditions, and reservoirs are deep buried, usually over 7 500 m. Pyrolyth in Permian leaks seriously. The Silurian formation has a poor pressure resistivity. The Upper Ordovician develops diabase intrusion body, and has a strong collapse stress. To optimize well structure, we used 193.7 mm casing down to the top of intrusion body, facing some difficulties such as deep setting depth (7 000 m) and cementing leakage. We improved cementing slurry column structure and centralizer design, added temperature-sensitive memory plugging material into light-weight cement slurry, optimized leak-proof cementing technology, and injected light-weight cement slurry from well hole. In this way, the cementation of long open hole was optimized. This technique was applied and proved effective in 5 wells by two-stage cementation in Shunbei block.

Key words: leakage; cementing; temperature-sensitive memory material; light-weight cement slurry; ultra-deep well; Shunbei block; Tarim Basin

1 研究概况

顺北区块构造位置上位于塔里木盆地北部拗陷的中西部, 总面积3 126 km², 从上自下发育第四系、新近系、古近系、白垩系、侏罗系、三叠系、二叠系、石炭系、泥盆系、志留系和奥陶系地层。其中二叠系(4 500~5 000 m)发育以凝灰岩和英安岩为主的火成岩, 部分区域上奥陶统发育辉绿岩侵入体, 目的层为中下奥陶统一间房组和鹰山组灰岩地层, 其余均为砂泥岩地层。

奥陶系辉绿岩侵入体坍塌应力高, 钻井液密度需大于1.80 g/cm³才能稳定井眼, 上部古生界地层承压能力低, 堵漏封堵后承压能力≤1.45 g/cm³, 难以同开次揭示, 火成岩侵入体需高密度钻井液专

打专封。

顺北区块奥陶系灰岩储层油气活跃, 资源丰富, 单井稳产量高, 显示了该区良好的勘探开发前景。该区前期仅部署2口探评井, 获得油气突破后, 为降低钻井投资, 含辉绿岩侵入体的井优化井身结构, 将侵入体以上由三级结构优化为二级结构(表1, 2)^[1]。

优化井身结构后, 固井难点集中在二开193.7 mm套管固井中, 封固段含二叠系火成岩易漏层, 下部志留系承压能力低和井壁稳定性差, 固井防漏和提高顶替效率难度大。二开采用钾胺基聚磺钻井液体系, 密度1.30 g/cm³±, 黏度55 s, 动切6 Pa, 塑性黏度22 mPa·s, 高温高压失水9.6 mL。固井方式采用193.7 mm双级固井工艺。

表 1 含侵入体优化前井身结构

Table 1 Well structure with intrusions before optimization

开次	井眼尺寸/ mm	井深/m	套管尺寸/ mm	井深/m	工程目的
导管	914.4	20	720	20	
一开	660.4	300	508	300	封闭新近系上部疏松地层
二开	444.5	2 600	339.7	2 598.9	封闭上部疏松易缩径地层
三开	311.2	4 798	273.1 (直连型)	5 082	封闭二叠系漏层。先悬挂后回接,尾管与上层套管重叠 100 m
四开	241.3	6 943.7	193.7	6 893.5	封闭桑塔木组火成岩侵入体以上地层,尾管与上层套管重叠 150 m±
五开	165.1	7 271	139.7	7 269.54	封隔火成岩侵入体和储层顶部泥岩,尾管与上层套管重叠 50 m
六开	120.6	7 446		裸眼完井	持续钻进至完钻层位或井深

表 2 含侵入体优化后井身结构

Table 2 Well structure with intrusions after optimization

序号	钻头尺寸/ mm	井深/m	套管尺寸/ mm	下深/m	工程目的
导管	660.4	150	508	150	
一开	346.1	2 000	273.1	1 999	封闭新近系上部疏松地层
二开	250.88	7 060	193.7	7 058	封闭侵入体以上地层,含二叠系易漏层,双级固井
三开	165.1	7 430	139.7	7 427	封隔火成岩侵入体和储层顶部泥岩,尾管与上层套管重叠 30~150 m
四开	120.65	7 755.25(斜深)/ 7 532(垂深)		裸眼完井	

表 3 钻井中二叠系漏失情况

Table 3 Leakage in Permian during drilling

序号	井号	二叠系 深度/m	厚度/ m	钻井液 密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	钻井漏失
1	XX1-6H	4 475~4 885	410	1.30	无
2	XX1-3	4 543~4 963	420	1.30	无
3	XX1-2H	4 393~4 845	452	1.28	3 次,漏 284.5 m^3
4	XX1-4H	4 420~4 870	450	1.30	5 次,漏 647.8 m^3
5	XX1-5H	4 408~4 858	450	1.29	无

2 固井难点

2.1 套管下入深

顺北区块奥陶系一间房、鹰山组储层埋藏深。优化井身结构后,193.7 mm 套管直接下至火成岩侵入体之上,套管下深超过 7 000 m,井底温度高,测井温度达 148 $^{\circ}C$,增加套管下放到位和低密度水泥浆调配难度。

2.2 封固段长

193.7 mm 套管使用双级固井,一级封固段 3 000 m 左右,二级封固段 4 000 m 左右,封固段长,上下温差较大,影响水泥浆顶部强度发育时间。

2.3 二叠系漏失风险大

二叠系层厚 410~480 m,英安岩(厚约 200 m)与凝灰岩互层微裂缝发育,地层易漏易塌。XX1-1H 井二叠系井漏 25 次,钻井漏失 2 245.4 m^3 ,固井漏失 260.8 m^3 ,处理复杂耽误钻井周期 45.96 d。

二叠系为原生裂缝、诱导裂缝漏失,漏失量大,属于特大漏失(表 3)^[2],套管到位和固井期间,井口可见液面,泵入泥浆井口失返,固井替浆排量 $\geq 2.5 m^3/min$,漏失速率达 156 m^3/h 。邻区为了提高

水泥浆有效充填率,均采用正注反挤固井工艺^[3],但上层管鞋至二叠系井段固井质量均差。

2.4 古生界承压能力低

XX1 井古生界地层实钻过程中,通过 18 次漏失情况和 6 次堵漏效果分析,证实石炭系、泥盆系地层最低承压能力为 1.45 g/cm^3 ,志留系地层最低承压能力为 1.38 g/cm^3 ,承压能力低(表 4)。

2.5 一级封固段井径不规则

志留系黏土矿物含量 6%~29%,以伊/蒙混层和伊利石为主,裂缝发育(缝宽 1.188~1.836 μm),属硬脆性泥岩,易坍塌掉块,XX1 井志留系平均井径扩大率 23.14%。第二轮部署井实钻过程中,二叠系及以下地层井径扩大率大,均大于 15%,志留

表 4 古生界地层承压能力

Table 4 Pressure bearing capacity of Paleozoic

地层	深度/m	承压值下限/ ($g \cdot cm^{-3}$)	承压值上限/ ($g \cdot cm^{-3}$)
C_{1kl}	5 082~5 134	1.45~1.47, 位于套管鞋	1.56~1.58
C_{1b}	5 134~5 296		1.56~1.58
D_3d	5 296~5 374		1.56~1.58
S_1t	5 374~5 740		1.66~1.69
S_1t	5 740~6 100		1.45~1.48
S_1k	6 100~6 440	1.38	1.47~1.50
O_3s	6 440~6 630		1.81
O_3s	6 630~6 943		1.81

表 5 一级封固段井径扩大率

Table 5 Diameter enlargement rate during first-stage cementation

项目	井号				
	XX1-6H	XX1-3	XX1-2H	XX1-4H	XX1-5H
一级井径扩大率/%	15.19	15.18	17.19	19.20	26.64
平均井径/mm	288.99	288.95	294.01	299.05	317.71

注:钻头尺寸 250.88 mm。

系存在“大肚子”井眼,影响水泥浆顶替效率(表 5)。

3 固井技术措施

3.1 中完处理

下套管前通井钻具组合:250.88 mm 牙轮+5"浮阀+7"钻铤 2 根+248 mm 扶正器+7"钻铤 9 根+5"加重钻杆 14 根+5"钻杆(非标)+5 $\frac{1}{2}$ "钻杆。

裸眼段全部泵入封闭浆,二叠系以上加入树脂、沥青,以稳定井壁为主;二叠系井段及上下 200 m 为堵漏浆防漏;二叠系以下井段加入高温稳定剂、沥青等,实现高温泥浆性能和井壁稳定,同时封闭浆加入润滑剂和石墨,降低下套管摩擦阻。

钻井队地面组织高架罐,储备 2 倍井筒容积钻井液,若固井发生漏失,漏失量大,避免固井替浆量不够。

3.2 下套管技术措施

一是控制 193.7 mm 套管下放速度,避免激动

压力压漏地层^[4]。XX1-2H 井在重叠段内速度控制在 30 s/根,进入裸眼后 60 s/根,过二叠系后 90 s/根,最后 800 m 左右下放速度控制在 120 s/根。该井套管下放控制平稳,下放过程中井口均返浆,整个套管下放过程中,激动压力均在 1.5 MPa 以内,有效降低了下套管漏失风险(表 6)。

二是使用下卡盘下套管,避免接箍变形,确保上扣到位,最后 800 m 掏空,降低下套管负荷。

三是中途循环,降低套管到位顶通难度。中完后裸眼段封闭浆长时间未参与循环,流动性变差,凝胶结构增强,套管到位顶通摩阻大,易造成井筒漏失。

3.3 浆柱结构设计

为了提高顶替效率和降低水泥浆漏失量,提高水泥浆返高,对钻井过程中发生多次漏失的井,固井前注入堵漏钻井液预封堵,再注入前置液和水泥浆实施固井。钻井中未发生漏失井,注入密度低于原钻井液 0.05 g/cm^3 的新配钻井液作为先导浆,对井筒钻井液老浆进行预顶替,降低固井循环摩阻和提高顶替效率。

前置液设计 6 m^3 冲洗液和 12 m^3 隔离液,替浆排量下均为紊流顶替。一级水泥浆领浆设计 1.50 g/cm^3 低密度水泥浆,加入 0.2% 纤维堵漏;水泥浆尾浆设计 1.88 g/cm^3 抗高温短候凝水泥浆,封固管鞋 800 m;二级固井使用约 8 m^3 密度 1.05 g/cm^3 紊流前置液,设计 1.60 g/cm^3 粉煤灰低密度水泥浆。

一级水泥浆领浆返至双级箍位置,不附加水泥浆量,二级附加 20 m^3 水泥浆量。一级替浆过程中,在双级箍上下各 150 m 井段替入打开液,便于后期安全开孔。

3.4 管柱结构设计

套管下入深,设计双级固井工艺,分级箍位置设计在二叠系火成岩顶部以上 500 m,设计井深在 4 000 m 左右。二叠系以下设计树脂旋流刚性扶正器,最大外径 243.5 mm,减少对井壁的破坏。为了保障双级箍居中,分级箍上下 2 个套管各加 1 个弹

表 6 XX1-2H 井 193.7 mm 套管下放激动压力

Table 6 Pressure caused by 193.7 mm casing in well XX1-2H

井段	段长/m	井径扩大率/%	激动压力/MPa			
			30 s/根	60 s/根	90 s/根	120 s/根
重叠段	1 999		1.275	0.76	0.560	0.452
二叠系以上裸眼段	2 845	7.85		0.64	0.472	0.381
二叠系以下裸眼段	2 215	11.34		0.27	0.197	0.159
二叠系处			1.275	1.40	1.032	0.833
井底			1.275	1.67	1.229	0.992

性扶正器。井口设计 250.83 mm 外径的刚性扶正器,套管头以下 2 个套管接箍各加 1 个,保障井口套管居中,降低套管偏磨风险。

管柱组合:浮鞋+2 根套管+浮箍+2 根套管+浮箍+2 根套管+碰压短节+套管串+分级箍+套管串。

3.5 水泥浆技术

针对二叠系漏失、封隔段埋藏深、井底温度高的难题,顺北区块一级固井使用了 1.50 g/cm^3 纤维防漏水泥浆和 1.88 g/cm^3 抗高温短候凝水泥浆。二级使用 1.60 g/cm^3 粉煤灰低密度水泥浆,二级漏失井井口反挤 1.70 g/cm^3 水泥浆补救。优选智能缓凝剂,适用大温差固井,温度敏感性弱,同时优选降失水剂、弹塑剂,提高水泥浆高温稳定性和水泥石机械性能,保障长期封固质量。

水泥浆技术^[5-8]重点在一级封固段,优化难度主要在一级领浆低密度水泥浆调配中。XX1-2H 井首次使用温敏记忆堵漏材料,温敏记忆堵漏材料由温敏堵漏骨架材料和温敏堵漏纤维材料组成,温敏堵漏骨架材料原始粒径 1 mm,70 °C 后膨胀可达 15~20 mm,骨架架构相互间也能搭桥,恢复形状后的软弹体也能填塞裂缝,温敏温度前几乎不膨胀,达到温敏温度后,可较快地膨胀,膨胀后形成堵漏骨架网,能变形填塞裂缝,温度敏感点可调整。温敏堵漏纤维材料原始粒径 1 mm,膨胀后可达 3~5 mm,搭桥阻滞,与水泥颗粒紧密填充骨架之中,与温敏堵漏骨架材料形成立体封堵层,温度敏感点可调整(表 7,8)。

加入温敏堵漏材料后,对水泥浆常规性能不影响,XX1-2H 井低密度水泥浆加入 2% 温敏堵漏材料后,水泥浆性能如表 9 所示。低密度配方:G 级水泥+140% 减轻剂+4% 膨胀剂+2% 温敏堵漏材料+22% 降失水剂+0.8% 复合早强剂+3% 分散剂+

0.7% 智能缓凝剂+3% 盐+200% 水。

3.6 固井工艺措施

为了提高顶替效率和降低二级固井漏失风险,固井采用变排量顶替、优化开孔候凝时间、二级固井漏失井井口反挤补救等措施^[9-10],保障固井质量。

二叠系裂缝性火成岩漏失层位于一级固井封固段顶部,为了保障一级封固段整体固井质量,固井注替水泥浆过程中即使失返性漏失,也采用大排量顶替,前置液紊流顶替,提高顶替效率和固井质量;水泥浆过二叠系底界后,降排量塞流顶替,降低循环摩阻,降低裂缝漏失宽度,提高水泥浆在二叠系中的返高,便于降低二级固井漏失风险。

一级固井投分级箍开孔塞开孔后,小排量顶通,若井口失返或漏失严重,待一级水泥浆达到终凝后,再实施二级固井,期间间隙顶通,控制顶通量,避免钻井液重新沟通二叠系裂缝,一级固井结束候凝 20 h 以后实施二级固井。

若二级固井漏失,候凝 24 h 后,井口反挤 1.70 g/cm^3 水泥浆,提高重叠段和上部裸眼段水泥环填充率,实现提高整体固井质量的目的。

4 现场应用

顺北区块完成 5 口 193.7 mm 长裸眼双级固井,采用相同的固井注替工艺,钻井液密度 1.28~

表 7 温敏堵漏材料水泥浆封堵能力评价

Table 7 Plugging ability evaluation of cement slurry with temperature-sensitive memory material

缝宽/mm	滤失量/mL	承压/MPa
1	130	>6
2	160	>6
3	210	>6

注:配方为 G 级水泥+0.4% 堵漏材料+0.2% 缓凝剂+0.2% 分散剂+44% 水。

表 8 温敏记忆堵漏材料对水泥浆性能的影响评价

Table 8 Influence of temperature-sensitive memory plugging material on cement slurry performance

温敏材料加量/%	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	试验温度/°C	API 失水/mL	自由液/mL	初始稠度/Bc	流动度/cm	24 h 强度/MPa	稠化时间/min
0	1.88	100	44	0	10.2	22	16.2	210
0.3	1.88	100	40	0	13.2	20	15.8	200
0.5	1.88	100	42	0	12.8	19	14.7	195

注:配方为 G 级水泥+3.5% 降失水剂+0.2% 缓凝剂+1.0% 分散剂+45% 水。

表 9 井温敏记忆堵漏低密度水泥浆性能

Table 9 Performance of light-weight cement slurry with temperature-sensitive memory material in well XX1-2H

密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	剪切应力读数 (93 °C×20 min)	API 失水(120 °C× 7.0 MPa×30 min)/mL	自由液/mL	初始稠度/Bc	流动度/cm	稠化时间/min	过渡时间 (30~100 Bc)/min
1.50	132/81/60/36/6/4	40	0	10	21	450	3

注:稠化时间实验条件:120 °C×90 MPa×90 min。

表 10 顺北区块固井施工概况

Table 10 Overview of cementing in Shunbei block

序号	井号	套管 下深/m	分级箍 位置/m	下套管漏失	一级漏失	二级漏失	反挤补救	固井质量/%		
								优秀率	良好率	合格率
1	XX1-6H	6 467.1	4 204.7		未漏失	未漏失		62.7	16.2	95.5
2	XX1-3	6 828.5	3 999.7	下至 6 150 m 漏失, 下至 6 190 m 失返; 漏失 55.14 m ³	失返, 漏失 303 m ³	漏失 20 m ³		68.2	4.16	79.8
3	XX1-2H	7 058	3 998.9	下至 7 050.8 m 失返	失返, 漏失 306.5 m ³	失返, 漏失 239 m ³	1.70 g/cm ³ × 80 m ³ 水泥浆	38.2	25.2	78.2
4	XX1-4H	6 838.5	3 958.1	下至 3 360 m 漏失, 下至 3 946 m 失返; 漏失 36.4 m ³	失返, 漏失 299.3 m ³	漏失 151.7 m ³	1.70 g/cm ³ × 60 m ³ 水泥浆	75.4	2.9	98.7
5	XX1-5H	6 848.5	3 902	未漏失	未漏失	未漏失		81.8	8.2	99.9

1.30 g/cm³, 固井前注入 20 m³ 密度为 1.25 g/cm³ 新配钻井液先导浆, 注入 1.03 g/cm³ 冲洗液 6~8 m³, 1.40 g/cm³ 隔离液 12~15 m³, 1.50 g/cm³ 低密度水泥浆(加 0.2% 的 5 mm 纤维), 1.88 g/cm³ 抗高温短候凝尾浆, 领浆封隔分级箍至志留系地层, 尾浆封固管鞋 800 m 左右井段。初期紊流排量替浆, 排量 ≥ 2.6 m³/min, 水泥浆过二叠系后降排量塞流顶替, 替浆排量 ≤ 0.8 m³/min。XX1-3 和 XX1-4H 井固井前泵入 20 m³、密度为 1.30 g/cm³ 堵漏浆。其中 3 口井一级固井失返性漏失, 2 口井二级固井漏失, 固井质量均在良好及以上(表 10)。

5 结论

二叠系位于长裸眼固井中下部, 严重影响全井段封固质量, 邻区采用正注反挤固井工艺, 二叠系以上反挤井段顶替效率差, 固井质量差。为了提高全井筒固井质量, 通过优选大温差智能缓凝剂, 采用温敏堵漏低密度水泥浆和弹塑性抗高温短候凝水泥浆, 配套堵漏钻井液、先导浆技术, 变排量替浆、井口反挤补救等措施, 有效保障了长裸眼固井

质量, 现场实施 5 口井, 固井质量均在良好及以上。

参考文献:

- [1] 刘彪, 潘丽娟, 易浩, 等. 顺北含辉绿岩超深井井身结构优化设计[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(3): 296-301.
- [2] 姚晓, 周保中, 赵元才, 等. 国内油气田漏失性地层固井防漏技术研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(6): 45-48.
- [3] 郭文猛, 宋元洪, 刘振通, 等. 正、反注水泥固井工艺在塔中油田的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2013, (4): 10-12.
- [4] 李早元, 支亚靓, 邓智中, 等. 库车山前井防漏固井方法技术研究[J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(3): 55-58.
- [5] 桑来玉, 黄李荣, 张红为. 油井水泥降水剂现状与室内评价[J]. 钻采工艺, 2002, 25(4): 76-80, 86.
- [6] 桑来玉, 王其春, 赵艳. 油井水泥高温缓凝剂 DZH-2 室内评价与应用[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(6): 47-49.
- [7] 刘学鹏, 张明昌, 冯明慧, 等. 复合空心微珠低密度水泥浆的研究与应用[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(6): 39-41.
- [8] 程小伟, 张明亮, 杨永胜, 等. 玄武岩纤维对铝酸盐水泥石性能的影响[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(1): 42-47.
- [9] 王东. 塔深 1 井固井技术[J]. 石油钻采工艺, 2007, 29(4): 23-27.
- [10] 刘振通, 李冬, 黄志刚, 等. 哈萨克斯坦哈德油田低压易漏层防气窜固井工艺[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(增刊 2): 23-26.

(编辑 韩 彧)