

# 龙凤山气田易漏失井固井工艺技术研究与应用

马艳超

(中石化东北油气分公司石油工程技术研究院,吉林 长春 130062)

**摘要:**龙凤山气田属于典型的裂缝性储层,钻井过程中漏失问题突出。该气田地层压力系数低、气层活跃、井壁稳定性差,固井难度较大。针对本区块特点,强化固井工艺措施,做好钻完井过程的防漏、承压堵漏工作,优选完井方法,采用变排量顶替工艺技术,开展低密度水泥浆体系优选研究,合理设计浆柱结构,有效地解决了固井过程中的漏失和候凝期间气窜等问题,保证了固井质量,实现了油层的有效封固,现场应用效果良好。

**关键词:**漏失;固井;平衡压力;低密度水泥浆;承压堵漏;气窜;中空玻璃微珠

**中图分类号:**TE256 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2017)06-0058-04

**Research and Application of Cementing Technology for Absorption Well of Longfengshan Gas Field/MA Yan-chao**  
(Oil Engineering Technology Research Institute, Northeast Oil and Gas Branch, Sinopec, Changchun Jilin 130062, China)

**Abstract:** Longfengshan gas field is a typical fractured reservoir with outstanding absorption. In the process of drilling, cementing operation has difficulties of low formation pressure coefficient, active gas and borehole wall stability. According to the characteristics of this block, through cementing measures strengthening, leakage prevention in drilling and completion processes, mud loss control under pressures, well completion method optimization, variable displacement fluid technology, low density slurry system optimization and rational design of structure, the cementing leakage and gas channeling during cement curing have been effectively solved to ensure the cementing quality for effective oil reservoir cementing.

**Key words:** lost circulation; cementing; balanced pressure; low density cement slurry; mud loss control under pressures; gas tunneling; hollow glass bead

龙凤山气田是中石化东北油气分公司部署在长岭断陷北正镇断阶带的重点探区,预测天然气储量 $234.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,含气面积 $64.87 \text{ km}^2$ 。北2井、北201井的发现证实了长岭断陷仍然具有较大的资源基础,是东北油气分公司重要的天然气储量接替区。

龙凤山气田位于北正镇断阶带东南端,目的层为登娄库组、营城组、沙河子组,为火山岩和碎屑岩储层,构造断裂活动时间长,存在切穿多套地层单元的断裂和层间断裂发育,且发育复杂;层间不整合接触较多,地质条件复杂多变、属于典型的裂缝性储层,钻完井过程中井漏问题突出,同时油气显示非常活跃且分布段长,全井封固、压稳和漏失的矛盾突出。

针对龙凤山气田大部分井在钻完井期间发生不同程度的漏失,通过对承压堵漏工艺的不断改进,完善完井方式以及优化顶替工艺,优选固井水泥浆体系,形成了一套解决龙凤山气田漏失井固井质量问题的工艺技术。

## 1 固井难点分析

### 1.1 固井封固段长

龙凤山气田的主要目的层位为营城组,井深全部在3500 m以深,最深达4381 m,长裸眼段固井施工具有很大的难度。首先,长裸眼段水泥浆注替量大,施工时间长,对固井设备要求高;其次,长裸眼段可能存在几个压力系统,可能同时存在多个低压易漏的漏失层,压稳防漏矛盾突出;第三,封固段上下温差大,井底静止温度均在115℃以上,最高达到130.98℃,水泥浆顶部强度发展缓慢,水泥环强度发展不均匀,同时,后续要进行压裂施工等作业,对水泥浆弹性等性能要求高<sup>[1]</sup>。

### 1.2 井眼条件差

一方面龙凤山构造泉头组及以上地层井壁稳定性差,井壁失稳现象严重,井径扩大率较大且不规则;另一方面,钻井周期长,频繁地起下钻、堵漏,处理各种复杂情况使井况复杂,井径扩大率严重超标。以北201-1井为例,井径扩大率最大处达到

收稿日期:2016-09-26;修回日期:2017-04-18

作者简介:马艳超,女,汉族,1983年生,化学工程专业,硕士,从事固井技术研究工作,吉林省长春市绿园区和平大街660号,37621327@qq.com。

65.41%,全井平均井径扩大率16.30%,同时存在多处缩径井段,井径不规则。井径扩大率大,套管的居中和水泥浆的流型变差,影响水泥浆的顶替效率<sup>[2]</sup>;井径不规则,在大井眼处存在“死泥浆”和沉砂,驱替干净“大肚子”井眼的泥浆非常困难,影响水泥浆顶替效率和施工安全。

### 1.3 漏失

龙凤山气田在钻井过程中井漏情况经常发生,在登娄库组、营城组、沙河子组等不同层位均发生过井漏,且漏失的性质和程度存在较大的差异。其中,北201全井共发生井漏15次,进行堵漏作业20次,共漏失钻井液1022.85 m<sup>3</sup>;北2井在不同层位共发生井漏5次,漏速7.9~60 m<sup>3</sup>/h,全井共漏失钻井液837.2 m<sup>3</sup>,与此同时,泥浆中存在大量的堵漏材料,固井前无法完全筛除、冲洗干净影响固井质量,影响水泥环的胶结。

根据北2、北201井岩心观察及成像测井显示,地层天然裂隙发育,裂缝以纵向裂缝、网状裂缝为主,裂缝宽度1~5 mm不等,且多为诱导裂缝和应力释放裂缝,是造成该地区钻井漏失和固井低返的主要原因。

### 1.4 气层活跃

龙凤山气田登娄库组、营城组以及沙河子组地层普遍含气且分布段长,属于裂缝性凝析气藏,气层活跃,水泥浆密度降低后,存在较大的气窜风险,影响水泥石胶结质量。

### 1.5 承压堵漏难度大

龙凤山气田三开钻井液密度较低,防止钻井过程中井漏的发生,但地层承压能力不能满足固井施工要求,固井前需提高地层承压能力,提高当量密度,承压堵漏具有一定难度。

北203井通过多次循环加重承压来提高地层承压能力,在承压堵漏过程中多次发生漏失,承压堵漏共用时14 d,造成损失104余万元。

## 2 固井工艺技术措施

龙凤山气田,前期采用两级井身结构,钻井过程中漏失较为严重,固井难度大。通过对地层压力剖面及地层压力分布规律的分析,优化为三级井身结构,技术套管封固易垮塌泉头组及以上地层,三开采用近平衡钻井,降低漏失风险;由于地层坍塌、掉块以及处理漏失等情况,井径不规则,缩径或者扩径等

问题都有发生,如在北202井和北203井均出现了卡钻情况,北201-1井三开平均井径扩大率16.3%。针对以上情况进一步完善了通井措施,调整泥浆性能提高了洗井效果,优化了井眼条件,并采用软件根据实际测井数据优化扶正器安放,模拟注水泥施工流程,优化施工过程;采用动态承压方式提高地层承压能力,以及进一步提升水泥浆综合性能及浆体结构,采用了尾管悬挂方式,优化了施工工艺等一系列措施。取得了良好的效果。

### 2.1 井眼准备

漏失井固井,确保套管顺利安全下入和良好固井的关键是清除岩屑床;干净的井眼以及井壁上形成薄而致密的泥饼,不但能提高固井质量,也能减少工程事故的发生;良好的套管居中度,可以提高钻井液顶替效率和水泥环胶结质量<sup>[3]</sup>。

主要技术措施:(1)先采用原钻具通井,生产套管采用单扶、双扶钻具组合进行通井;(2)对起钻遇阻、遇卡井段、缩径井段和井眼曲率变化大的井段反复划眼或进行短起下;(3)调整钻井液性能,大排量洗井,洗井时间不少于2个循环周,确保井眼干净,无漏失;(4)为减少下套管摩阻,保证套管顺利下入,下入套管前应在井眼底部打入润滑钻井液;(5)根据井眼情况合理使用、安放扶正器,井径不规则井段加入树脂旋流扶正器进行驱替、居中优化。

### 2.2 优化承压堵漏技术

承压堵漏,首先需要在漏失通道中按照一定的规律形成架桥,架桥形成后,需要小颗粒材料填充架桥形成的空隙,加入一定的纤维材料,在封堵层中形成“拉筋”,加强封堵层的强度,在架桥和填充的基础上,为了彻底提高地层的承压能力,避免渗漏等的发生,需要可变形和细小的纤维类材料进一步封堵小的孔隙,在填充孔隙的同时,在封堵层表面形成一层致密的隔层,最终实现承压的目的<sup>[4]</sup>。

通过前期承压堵漏施工,优化龙凤山气田承压堵漏配方,选择市场货源充足、抗温、抗压性能良好的核桃壳作为架桥颗粒,逐渐形成了以“刚性颗粒三级架桥,纤维材料+坂土粉填充”的承压堵漏配方。

固井施工前进行动态承压堵漏试验,同静态承压堵漏相比,动态承压工艺全井筒均匀承压,成功率高,采用循环加重的方式,避免“封门”,数据真实有效,同时,动态循环的方式,可以模拟固井水泥浆的

注替参数,指导固井施工。

先堵漏。北201-13井,井深3694 m打入密度 $1.19\text{ g/cm}^3$ 堵漏浆 $7.2\text{ m}^3$ ,泵压缓慢上升至 $3.5\text{ MPa}$ 时出口返浆,1 h后,排量 $20\text{ L/s}$ ,泵压 $5.9\text{ MPa}$ ,泵入堵漏浆 $60\text{ m}^3$ ,循环5.5 h后出口密度为 $1.18\text{ g/cm}^3$ ,排量 $30\text{ L/s}$ ,泵压 $8.3\text{ MPa}$ ,循环期间返吐钻井液 $30\text{ m}^3$ ;继续循环4 h后出现渗漏,排量 $32\text{ L/s}$ ,泵压 $8.5\text{ MPa}$ ,漏速 $1.6\text{ m}^3/\text{h}$ ,出口密度 $1.19\text{ g/cm}^3$ ,1 h共漏失钻井液 $0.4\text{ m}^3$ ,此时排量 $32\text{ L/s}$ ,泵压 $8.2\text{ MPa}$ ,循环观察不漏。

再承压。密度 $1.19\text{ g/cm}^3$ 的堵漏浆继续循环20 h后,加重钻井液密度至 $1.31\text{ g/cm}^3$ ,漏失 $1.5\text{ m}^3$ ,1 h后漏失停止,再循环1.5 h加重钻井液密度至 $1.33\text{ g/cm}^3$ ,循环不漏;持续循环5 h,排量 $32\text{ L/s}$ 未发生漏失,停泵关井;关井3 h压力 $1.58\text{ MPa}$ ,总泵入量 $4.05\text{ m}^3$ ,压力不降;排量 $32\text{ L/s}$ 继续循环1 h观察不漏,动态承压成功。

### 2.3 尾管悬挂固井工艺

易漏失井完井套管采用尾管固井工艺,对尾管井段进行油、气、水层封固,实现分层开采。

采用变排量顶替工艺技术,控制安全压力窗口。注替水泥浆过程产生的总环空水泥浆设计的压力(静液柱压力加流动阻力)应小于最薄弱地层的破裂压力。驱替水泥浆到设计位置后,在凝固失重条件下不受油气侵窜,其静液柱压力梯度值大于地层孔隙压力梯度值,在已知环空各类液体的流变参数的情况下,确定流态,模拟计算施工过程的动压力变化,从而逐步优化施工各项参数:排量、压力、密度等以及流体的流变参数,以达到平衡压力固井的目的<sup>[5]</sup>。

优化水泥浆流变性能,现场采用高-低返速结合,实现紊流加塞流复合顶替。先采用泥浆泵替浆。为确保大小胶塞吻合平稳,降低替浆排量,恢复顶替排量后,为防止井漏,注意观察实际施工泵压,根据泵压调整排量。

通过以上技术措施的实施和应用,保证了固井质量,大大提高了龙凤山气田的固井成功率和优良率。2016年,龙凤山气田固井质量优良率 $66.7\%$ ,较2015年提高了 $19.7\%$ 。

## 3 水泥浆体系优选研究

固井水泥浆体系设计是保证固井施工安全以及

固井质量的关键。龙凤山地层承压能力低,漏层较多,为了降低环空液注压力,减小固井井漏风险,同时保证对油气层的封严、压稳,优选了低密度防漏水泥浆体系。

### 3.1 减轻材料优选

在低密度水泥浆中,主体胶凝材料——水泥所占比重下降,仅靠水泥很难获得相对高的强度,采用具有活性的矿物材料作为减轻材料,降低水泥浆密度的同时,参与水泥的水化,降低水泥石的渗透率,提高水泥浆的强度。

中空玻璃微珠是中空的圆球微小球体,化学惰性强,受热不变形<sup>[6]</sup>,具有滚珠轴承效应,能改善体系流动性能,有效控制水泥浆密度,显著提高凝固后的水泥石抗压和抗折性能。采用颗粒级配原理优化水泥、中空玻璃微珠与微硅之间的粒度分布,使材料之间的堆积比例达到最大,减少材料颗粒之间的空隙,从而降低水灰比,提高水泥体系的整体性能<sup>[7]</sup>。

中空玻璃微珠密度 $0.15\sim 0.70\text{ g/cm}^3$ ,粒径 $5\sim 250\text{ }\mu\text{m}$ ,最大承压能力可达 $75\text{ MPa}$ ,可以有效保证固井后续的压裂施工作业。采用中空玻璃微珠,水泥浆密度可以降低至 $1.35\text{ g/cm}^3$ ,防止漏失的同时,具有较强的抗压能力,水泥浆浆体稳定性良好,保持了水泥浆的良好性能。2016年,在龙凤山气田9口井油层套管固井采用中空玻璃微珠作为水泥浆减轻材料,固井质量良好。

### 3.2 水泥外加剂优选

具有增粘作用的降失水剂G301与高分子聚合物非渗透降失水剂G306配合使用,通过相互交联桥接作用形成具有韧性的非渗透性薄膜,从而起到控制了水泥浆失水和防止气窜的作用;防气窜剂FQ,增加了水泥浆候凝期间气体的流动阻力,进一步提高了水泥浆体系的防气窜性能。

抗温型分散剂USZ,能有效降低水泥浆粘度,改善浆体流动性的同时可削弱其他外加剂的综合作用结果对浆体稳定性所产生的影响;为增强稳定性、缩短候凝时间,提高水泥石的早期强度,选用早强剂CW-1;低敏感度的宽温带缓凝剂GH-9调节水泥浆的稠化时间。

防漏增韧剂BCE,有效提高了水泥浆的防漏、堵漏效果,预防井漏的同时使水泥石内部缺陷的应力集中减小,增加水泥石受压后的弹性变形能力和抗冲击能力,防止产层污染,提高产层的封固质量,

满足固井后续压裂作业要求。

### 3.3 水泥浆体系综合性能(见表1)

表1 水泥浆体系综合性能

密度/ (g· cm <sup>-3</sup> )	可泵 时间/ min	稠化 时间/ min	失水 量/ mL	游离 液/ mL	抗压强 度/MPa (24/48 h)	流动 度/ cm	水泥浆防 窜性能系 数 SPN 值
1.35	321	326	30	0	14.1/14.3	22	2.19
1.40	198	201	30	0	14.3/14.7	22	2.27
1.45	179	185	35	0.2	14.2/14.5	23	2.53
1.50	173	180	44	0.2	13.7/14.2	23	2.12
1.55	146	156	36	0.3	14.8/19.7	24	2.11
1.65	118	125	44	0.2	14.5/17.0	20	2.55

低密度防漏水泥浆体系综合性能良好,水泥浆体具有流变性能好、低失水、抗压强度随时间增加呈增加趋势;稠化时间易调,水泥浆防窜性能系数小于3,能够很好解决固井漏失及环空气窜的问题,有效保证了产层的固井质量。

分段设计水泥浆稠化时间,采用双凝或者三凝水泥浆体系,以减少环空水泥浆候凝过程中失重压力,在尾浆发生失重的情况下,保证上部水泥浆对地层流体的静态压稳<sup>[8]</sup>,从而达到防止油水窜的目的。

### 4 现场应用与评价

北206井是东北油气分公司在长岭断陷龙凤山次凹龙凤山圈闭部署的一口评价井,井型为直井,完钻井深为3570 m,采用三级井身结构 $\varnothing 444.5\text{ mm} \times 302\text{ m} + \varnothing 311.2\text{ mm} \times 2190\text{ m} + \varnothing 215.9\text{ mm} \times 3570\text{ m}$ ,套管结构 $\varnothing 339.7\text{ mm} \times 301\text{ m} + \varnothing 244.5\text{ mm} \times 2187.51\text{ m} + \varnothing 139.7\text{ mm} \times 3559.56\text{ m}$ 。表层套管和技术套管采用常规固井方式,完井套管固井采用尾管悬挂固井工艺,悬挂器坐挂位置2026.37 m。

该井钻进至2333 m登娄库组发生漏失,平均漏速 $4\text{ m}^3/\text{h}$ ,总计漏失钻井液 $40\text{ m}^3$ 。本井完钻钻井液密度 $1.15\text{ g}/\text{cm}^3$ ,固井前采用动态承压方式将井内钻井液密度提高到 $1.32\text{ g}/\text{cm}^3$ ,以不低于 $30\text{ L}/\text{s}$ 的排量正常循环5 h无漏失。

固井采用双凝低密高强防气窜水泥浆体系,1926.37~2900 m井段采用密度 $1.35\text{ g}/\text{cm}^3$ 水泥浆封固;2900~3508 m井段采用 $1.40\text{ g}/\text{cm}^3$ 密度水泥浆封固。采用平衡压力固井,保持施工的排量和压力稳定、确保施工及候凝整个过程的压力平衡,防止

井漏、坍塌、溢流等复杂情况的发生。本井固井施工顺利,未发生漏失,固井质量良好。

北206井固井基本数据:井深3570 m,封固段长1926.37~3508 m,井径扩大率11.57%,钻井液密度 $1.15\text{ g}/\text{cm}^3$ ,隔离液密度 $1.05\text{ g}/\text{cm}^3$ ,循环温度 $93\text{ }^\circ\text{C}$ ,井底温度 $133\text{ }^\circ\text{C}$ ,试验压力40 MPa。

北206井固井水泥浆性能见表2。

表2 北206井水泥浆性能

密度/(g· cm <sup>-3</sup> )	流动 度/cm	24/48 h 强 度/MPa	可泵时 间/min	稠化时 间/min	API 失水 量/mL	自由 水/mL
1.35	22.2	14.3/17.1	225	236	34.0	0.10
1.40	22.7	15.8/18.1	154	162	30.0	0.05

### 5 结语

(1) 固井前做好地层承压试验,提供良好的井眼条件是保证施工安全、提高固井质量的前提条件。

(2) 选择合理的固井工艺,是保证有效封固油气层的关键。

(3) 优选水泥浆体系,合理设计浆柱结构,保证在窄安全密度窗口条件下达到既能防漏,又能防窜的目的。

(4) 由于龙凤山构造地层承压能力低,承压堵漏时间长,可将开展密度低于 $1.30\text{ g}/\text{cm}^3$ 超低密度水泥浆体系研究作为下一步研究方向,保证封固的同时可以降低漏失带来的损失。

### 参考文献:

- [1] 谭春勤,刘伟,丁士东,等. SPF 弹性水泥浆体系在页岩气井中的应用[J]. 石油钻探技术,2011,39(3):53-56.
- [2] 步玉环,张大千,郭权庆,等. 大位移井顶替效率最优的套管居中度设计方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(2):53-57.
- [3] 张明昌. 固井工艺技术[M]. 北京:中国石化出版社,2007.
- [4] 刘金华,刘四海,陈小峰,等. 承压堵漏技术研究及其在断块油气田中的应用[J]. 断块油气田,2011,18(1):116-118.
- [5] 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.
- [6] 刘亚辉,冯建林,许传华,等. 高性能空心玻璃微珠的应用研究[J]. 化学工程与装备,2011,(5):33-35.
- [7] 周仕明. 优质高强度低密度水泥浆体系的设计与应用[J]. 钻井液与完井液,2004,21(6):33-36.
- [8] 许明标,宋建建,王晓亮,等. 水平井全井段封固双凝防漏水泥浆技术[J]. 石油天然气学报,2014,(12):131-136.