

文章编号:1673-5005(2009)04-0081-04

# 无渗透桥堵技术在长岭深层气井完井中的应用

李祖光<sup>1</sup>, 翟应虎<sup>1</sup>, 史海民<sup>2</sup>, 赵剑龙<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 中石油吉林油田公司 钻井工艺研究院, 吉林 松原 138003)

**摘要:**在分析长岭地区深层储层裂缝发育规律的基础上,提出无渗透桥堵技术。通过桥堵剂粒级配比优选和封堵裂缝试验得出:堵漏剂的最优浓度为30 g/L,颗粒状、片状、纤维状材料的最优粒级配比为6:3:2,4 L井浆+1%DCM+2%桥塞剂+1%木粉(0.9 mm以下)+1%胶粒(0.9 mm以下)为最优桥堵配方;井浆中加入非渗透处理剂后,可以形成超低渗透钻井液滤饼,可有效阻挡清水和气体的滤失。现场应用结果表明,该技术在提高地层承压能力、预防固井钻井液漏失和降低固井过程发生气、水窜方面显示了良好的效果,平均固井合格率达到98.1%,固井优质率达到87.35%,具有较高的推广价值。

**关键词:**无渗透;桥堵;完井液;深层气井  
**中图分类号:**TE 257 **文献标识码:**A

## Application of non-filtration and bridge blinding technology to deep gas well completion in Changling region

LI Zu-guang<sup>1</sup>, ZHAI Ying-hu<sup>1</sup>, SHI Hai-min<sup>2</sup>, ZHAO Jian-long<sup>2</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;  
2. Research Institute of Well Drilling Technology, Jilin Oilfield Company, PetroChina, Songyuan 138003, China)

**Abstract:** On the basis of analyzing the regularity of fracture development in deep reservoir of Changling region, the technology of non-filtration and bridge blinding was proposed. Tests of optimizing of size fraction match of bridging material and plugging fracture were carried out. The following are the main conclusions: The optimum concentration of lost circulation material is 30 g/L, the optimum size fraction match of particulate, sheet and fibrous bridging material is 6:3:2, and the optimum bridging formulas is slurry(4 L) + 1% DCM + 2% bridging particle + 1% woodflour(0.9 mm below) + 1% colloid (0.9 mm below). A ultra-low permeability drilling fluid cake could be generated by adding no penetrative treating agent in slurry, which can effectively resist the filtration of clear water and gas. The field application indicated a favorable effect of this technology in raising the bearing capacity, preventing the drilling fluid leaking, and decreasing the gas and water breakthrough in well cementation. The mean qualification rate and quality rate of well cementation are 98.1% and 87.35% respectively. The technology has high popularization value.

**Key words:** non-filtration; bridge blinding; completion fluid; deep gas well

吉林油田松辽盆地南部长岭断陷深部火山岩储层中存在不同程度的裂缝,5700成像测井解释该地层发育1~2 mm裂缝。储层裂缝发育导致地层承压能力低,大部分井在固井过程中出现水泥浆漏失情况:长深1-1井漏失超过200 m<sup>3</sup>;长深103井测井通井时漏失约20 m<sup>3</sup>。固井过程中水泥浆的漏失,会造成水泥浆低返、不能按设计要求封隔地层、影响顶替效率和胶结质量,导致气窜、水窜、油气层污染

等严重危害。提高地层承压能力是解决裂缝性储层钻井和完井过程中漏失问题的主要手段<sup>[1]</sup>。因此研究一套提高地层承压能力的技术、方法,对于提高该地区钻井完井质量、减少因井漏带来的经济损失、降低储层损害具有重要的意义。结合松辽盆地南部长岭断陷深部火山岩储层的裂缝特征,提出一种无渗透桥堵技术并进行现场应用研究。

收稿日期:2009-04-13

作者简介:李祖光(1983-),男(汉族),吉林松原人,博士研究生,主要从事油气井岩石力学及完井工程研究。

## 1 无渗透桥堵技术

桥堵技术是利用不同形状、不同尺寸的惰性材料以不同的配方混合于钻井液中,直接注入井内漏层位置进行封堵裂隙的一种方法,其材料主要包括颗粒状材料(架桥剂)、纤维状材料(悬浮拉筋剂)和片状材料(填充剂)等<sup>[2]</sup>。桥接堵漏技术是目前应用最广泛、成本较低的一种堵漏方法,在钻井完井工程中已得到了广泛应用<sup>[3-6]</sup>。

无渗透技术则是近年来国外在钻井液完井液领域的一大突破,在油层保护、井壁稳定、环保等方面具有明显的优势<sup>[7-10]</sup>。无渗透桥堵技术的基本原理是利用与地层裂缝匹配的架桥颗粒组合在地层裂缝处形成桥堵,同时利用无渗透处理剂在井壁岩石表面浓集形成胶束,依靠胶束或胶粒界面吸力及其可变形性,自适应封堵岩石表面较大范围的孔喉,桥浆堵漏形成的高渗透率的滤饼在井壁岩石表面形成致密无渗透封堵薄膜,有效封堵不同渗透性地层和微裂缝地层,提高漏失压力和破裂压力梯度,防止地层理裂隙的扩大和井下复杂情况的发生。

无渗透桥堵技术是无渗透技术与桥堵技术的结合。首先应用桥堵技术对地层微裂缝进行桥堵架桥,同时利用级配不同颗粒进行逐级充填;其次应用无渗透技术对桥堵后的地层裂缝进一步充填并形成泥饼,这样可有效封堵地层裂缝、提高地层承压能力。

## 2 室内试验

### 2.1 三颗粒、四颗粒架桥理论的应用

日本学者针对渗透性漏失,提出了三颗粒相接和四颗粒的架桥模型理论<sup>[11-12]</sup>。根据三球相接架桥理论,有效孔隙直径计算公式为

$$d_k = 0.15d.$$

式中, $d_k$ 和 $d$ 分别为有效孔隙和颗粒(模型球)的直径。

因此,对于三球相接架桥理论来说,形成最佳桥堵的粒径比是1:0.15。3个大颗粒级别的颗粒材料相接形成架桥后,较小粒径级别的颗粒材料充填其中,使封堵效果更好。四球相接架桥理论是指4种不同粒径级别的颗粒材料配合使用,4个较大粒径级别的颗粒材料相接后,再由3个较小的不同粒径级别的颗粒材料分别填充在其中,以达到更好的封堵效果。四颗粒架桥理论中的4种不同粒径级别颗粒的粒径比应满足1:0.4:0.1:0.05。

应用三颗粒、四颗粒架桥理论,结合长岭断陷深

部火山岩地层裂缝发育情况,可以优选架桥充填颗粒。根据测井解释的裂缝宽度2 mm,若形成三颗粒架桥,颗粒粒径必须大于0.94 mm,若形成四颗粒架桥,架桥颗粒粒径必须大于1.0 mm。大颗粒在裂缝处是三颗粒架桥还是四颗粒架桥,完全是随机行为,因此为保证架桥,大颗粒粒径必须大于1 mm。在试验中选择的主架桥颗粒是核桃壳,其粒径是1~2 mm,这样可以保证在裂缝处形成架桥,保证现场堵漏成功率。

### 2.2 桥堵剂粒级配比优选

在30 g/L的桥浆浓度下,根据三、四颗粒架桥理论推选出4种颗粒状材料,材料以橡胶为原料加工成不同粒径,同时与片状材料(云母)、纤维状材料(木粉)进行配比,测得不同裂缝宽度、不同压力下的堵漏浆漏失量(表1)。

表1 粒级配比优选试验数据

Table 1 Test data of size fraction match optimizing test

胶粒:云母:木粉	缝宽 H/mm	堵漏浆漏失量 V/ml		
		0 MPa	0.7 MPa	6.9 MPa
5:2:1	1	25	0	50
	2	20	50	90
	3	150	全漏	全漏
3:2:1	1	20	25	50
	2	25	50	160
	3	100	全漏	全漏
2:1:1	1	20	25	30
	2	15	40	90
	3	40	350	全漏
6:3:2	1	35	25	60
	2	20	60	80
	3	200	150	3500

由表1可以看出,在30 g/L的桥浆浓度下,胶粒、云母、木粉最佳的粒级配比为6:3:2。同时证明了根据2 mm裂缝宽度设计的架桥颗粒可以满足2 mm裂缝宽度的堵漏需要,裂缝宽度增大,其堵漏效果明显降低,如果需要封堵较大裂缝漏失,须增大架桥颗粒的粒径。

### 2.3 堵漏浆浓度优选

根据6:3:2桥堵配方配制了4种不同堵漏浆浓度的井浆进行室内试验。测量不同裂缝宽度、不同压力下的堵漏浆漏失量,试验结果见表2。

分析表2的试验数据可以看出:①在一定堵漏浆范围内,随着堵漏浆浓度的增加,尺寸相同的缝隙漏失量逐渐减少,但当堵漏浓度超一定值后由于架桥粒子的堆积,堵漏能力将不稳或下降,因此实现桥堵必须优选架桥粒子的浓度;②同一配方在相同尺

寸缝宽条件下,随着压力的增大,漏失量逐渐增大,表明架桥粒子实现封堵作用需要桥塞具有一定的强度;③随着堵漏浆浓度的增加、缝宽的增大以及试验压力的增大,漏失量增大,表明这一粒级配比只有一个最优选择点,对比试验数据可知堵漏浆浓度 40 g/L 最佳,但堵漏浆浓度增加,相应的经济成本也增加,本试验中最佳经济比例的堵漏浆浓度为 30 g/L;④随着裂缝尺寸的增大,仅仅提高堵漏浆浓度不能实现封堵。

表2 堵漏浆浓度优选

Table 2 Optimization of lost circulation pill concentration

堵漏浆浓度 C/(g·L <sup>-1</sup> )	缝宽 H/mm	堵漏浆漏失量 V/mL		
		0 MPa	0.7 MPa	6.9 MPa
20	1	30	200	2020
	2	50	320	全漏
	3	70	750	全漏
30	1	15	40	55
	2	7	50	57
	3	35	300	全漏
40	1	10	30	48
	2	5	34	54
	3	25	260	全漏
50	1	15	72	85
	2	10	45	55
	3	200	550	全漏

针对 3~4 mm 宽度的裂缝,按三、四颗粒理论设计架桥颗粒粒径,分别按如下两种配方进行封堵试验,封堵效果如表 3 所示。配方 a:4 L 井浆 + 1% DCM + 2% 桥塞剂 + 1% 木粉(0.9 mm 以下) + 1% 胶粒(0.9 mm 以下);配方 b:4 L 井浆 + 2% DCM + 2% 桥塞剂 + 1% 木粉(0.9 mm 以下) + 1% 胶粒(0.9 mm 以下)。

表3 3~4 mm 桥堵配方评价

Table 3 Evaluation of 3~4 mm bridge blinding formula

配方	缝宽 H/mm	堵漏浆漏失量 V/mL		
		0 MPa	0.7 MPa	6.9 MPa
a	3	120	30	150
b	4	15	50	45

对比分析表 2 和表 3 可知,在一定堵漏浆浓度条件下,增大架桥粒子的粒径可以实现封堵 3~4 mm 的裂缝。

## 2.4 非渗透剂封堵效果试验

### 2.4.1 中压砂床封堵试验

在可视式砂床中压滤失仪的圆柱筒中加入 350 cm<sup>3</sup> 粒径为 0.45~0.90 mm 经清水洗净后烘干的砂粒,压实铺平,慢慢加入 500 mL 钻井液,按测试 API 滤失量的同样方法加压测试 30 min 滤失量或测量滤液进入砂床的深度。井浆加入不同量的非渗透剂

后砂床滤失量的测试结果见表 4。

表4 加入非渗透剂的钻井液中压砂床封堵试验结果

Table 4 Plugging result of moderate pressure bed while non-penetrant adding in drilling fluid

钻井液体系	封堵剂加量	砂床中压滤失量 V <sub>0.7</sub> /mL	滤饼 + 清水	滤饼 + 空气
	0	30 s 全失		
井浆	5 g/L 非渗透剂	8.6 ± 0.1	无滤失	无滤失
	10 g/L 非渗透剂	5.5 ± 0.1		
	15 g/L 非渗透剂	3.6 ± 0.1		
井浆	30 g/L 桥浆	条带状轨迹	漏失 3.0 mL	瞬间滤饼 无阻挡通气
井浆	30 g/L 桥浆 + 15 g/L 非渗透剂	2.6 ± 0.1	无滤失	无滤失

由表 4 可以看出:①井浆在砂床上没有封堵能力,加入非渗透剂后能有效阻止井浆在砂床上的漏失,同时可以形成对清水和气体具有有效阻挡作用的滤饼;②井浆加入桥堵剂后,可以缓解在砂床上的漏失,但形成的滤饼不能有效阻挡清水和气体;③井浆加入桥浆、非渗透剂后,可以形成超低渗透钻液滤饼,对清水和气体的阻挡效果更佳。

### 2.4.2 封堵裂缝试验

在配制好的基浆(4 L 井浆 + 30 g/L 桥浆)中,分别加入各种配比的非渗透剂及其他处理剂水化 3~4 h,装入 QD 型堵漏试验仪,并按照其操作规程测定钻井液封堵裂缝的试验效果,结果见表 5。

表5 加入非渗透剂的钻井液封堵裂缝试验结果

Table 5 Results of plugging fracture while non-penetrant adding in drilling fluid

配方	缝宽 H/mm	0.7 MPa 压力下的漏失量 V <sub>0.7</sub> /mL	堵漏结果
井浆 + 15 g/L 非渗透剂	1	100	成功
井浆 + 20 g/L 非渗透剂	1	150	成功
井浆 + 25 g/L 非渗透剂	1	200	成功
井浆 + 25 g/L 非渗透剂	2	全漏	失败
基浆 + 20 g/L 非渗透剂	2	15	成功
基浆 + 20 g/L 非渗透剂	3	80	成功
基浆 + 20 g/L 非渗透剂	4	全漏	失败

试验结果表明,非渗透剂可以独立封堵微小裂缝,在较大裂缝条件下必须配合桥浆使用才能获得理想的堵漏效果。结合前面试验分析,非渗透剂基本不能提高桥堵浆封堵较大裂缝的能力,但可以降低滤饼渗透率。

## 3 现场应用

开发的无渗透桥堵技术在吉林油田进行了现场应用。施工前分析钻井液中漏失位置、严重程度

和测井解释地层存在裂缝情况,根据固井压力的需要,选取合适的桥堵粒子粒径,准确计算无渗透桥堵浆的用量,替入位置要求准确,稳压达到要求。目前该项技术已经在吉林油田松辽盆地南部长岭断陷全面推广应用,无渗透桥堵技术应用前、后固井质量声幅评定情况见表6。

表6 应用无渗透桥堵技术前后固井质量对比

Table 6 Comparison of well cementation quality while using non-filtration and bridge blinding technology or not

应用状况	井号	封固段 $L_f/km$	合格段 $L_h/km$	优质段 $L_y/km$	合格率 $f_h/\%$	优质率 $f_y/\%$
应用前	长深1	3.910	3.170	2.540	81.08	64.96
	长深1-2	3.913	3.913	0.978	100	25.00
	长深103	3.858	3.484	2.461	90.3	63.8
	长深1-1	3.911	3.911	3.027	100	77.4
	长深1-3	3.875	3.875	3.650	100	94.2
应用后	长深1-3	3.875	3.875	3.650	100	94.19
	长深5	5.300	5.300	5.240	100	98.87
	长深6	4.010	4.010	3.290	100	82.05
	长深7	3.670	3.670	3.370	100	91.83
	长深8	3.290	3.290	2.680	100	81.46
	长深9	3.720	3.720	3.650	100	98.12

由表6可以看出,应用无渗透桥堵技术后,固井质量合格率平均提高了8.4%,优质率提高了42.45%,应用效果明显。

## 4 结论

(1)架桥粒子浓度足够大才能实现架桥封堵;同一配方在相同尺寸缝宽试验条件下,随着压力的增大,漏失量逐渐增大;随着桥浆浓度的增加、缝宽的增大以及试验压力的增大,漏失量增大。

(2)无渗透桥堵技术可以有效封堵裂缝性漏失,提高地层承压能力,同时可以形成超低渗透滤饼,有效阻止清水和气体通过。

### 参考文献:

[1] 王业众,康毅力,游利军,等. 裂缝性储层漏失机理及控制技术进展[J]. 钻井液与完井液,2007,24(4):74-77.  
WANG Ye-zhong, KANG Yi-li, YOU Li-jun, et al. Progresses in mechanism study and control: mud losses to fractured reservoirs [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2007,24(4):74-77.

[2] 鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 东营:石油大学出版社,2001:356-357.

[3] 冯素敏,罗向东,马光长,等. 新型抗高压堵漏剂的研究与评价[J]. 钻井液与完井液,2007,24(4):24-27.  
FENG Su-min, LUO Xiang-dong, MA Guang-chang, et al. Study and evaluation of a new high pressure lost circulation material [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid,

2007,24(4):24-27.

[4] 孙剑,崔茂荣,陈浩,等. 新型复合堵漏材料的研制[J]. 西南石油大学学报,2007,29(11):133-135.  
SUN Jian, CUI Mao-rong, CHEN Hao, et al. Development and production of a new type composite lost circulation materials [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007,29(11):133-135.

[5] 王富华,魏振禄,亢连礼,等. 一种钻井新型防漏堵漏剂的研究与应用[J]. 钻井液与完井液,2006,23(3):42-44.  
WANG Fu-hua, WEI Zhen-lu, KANG Lian-li, et al. Study and application of a new type LCM [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006,23(3):42-44.

[6] 王书琪,唐继平,张斌,等. 塔里木山前构造带高密度钻井液堵漏技术[J]. 钻井液与完井液,2006,23(1):76-77.  
WANG Shu-qi, TANG Ji-ping, ZHANG Bin, et al. Study on techniques of non-damaging solidification of waste WBM in Tarim Oilfield [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006,23(1):76-77.

[7] 孙金声,林喜斌,张斌,等. 国外超低渗透钻井液技术综述[J]. 钻井液与完井液,2005,22(1):57-59.  
SUN Jin-sheng, LIN Xi-bin, ZHANG Bin, et al. Drilling fluid technology developing tendency predicted [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005,22(1):57-59.

[8] 于永新,樊松林,代礼杨,等. 超低渗透钻井液技术研究[J]. 石油钻采工艺,2005,27(增刊):19-21.  
YU Yong-xin, FAN Song-lin, DAI Li-yang, et al. Ultra low permeability drilling fluid technique [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005,27(sup):19-21.

[9] 孙金声,苏义脑,罗平亚,等. 超低渗透钻井液提高地层承压能力机理研究[J]. 钻井液与完井液,2005,22(5):78-81.  
SUN Jin-sheng, SU Yi-nao, LUO Ping-ya, et al. Mechanism study on ultra-low invasion drilling fluid for improvement of formation pressure-bearing ability [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005,22(5):78-81.

[10] 薛玉志,刘宝锋,唐代绪,等. 非渗透钻井液体系的研究与初步应用[J]. 钻井液与完井液,2005,22(2):73-76.  
XUE Yu-zhi, LIU Bao-feng, TANG Dai-xu, et al. Study on non-invasive drilling fluids and the pilot application [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005,22(2):73-76.

[11] FAYED M E, OTTEN L. 粉体工程手册[M]. 黄长雄,译. 北京:化学工业出版社,1992:87-102.

[12] 曾凡,胡永平. 矿物加工颗粒学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1995:75-86.

(编辑 李志芬)