

纤维防漏水泥浆体系的研究与应用

王治国, 周鹏成

(中国石化西北油田分公司石油工程监督中心, 新疆 轮台 841600)

摘要:为解决塔河油田在固井期间存在的碳酸盐岩孔洞、裂缝性漏失, 通过对堵漏机理和堵漏材料的优选, 研制了纤维防漏水泥浆体系。通过对 5, 10, 19 mm 的堵漏纤维 ALF-1 水泥浆进行实验评价, 结果表明 5 mm 的堵漏纤维 ALF-1 加量在 0.2%~0.3% 的范围最为适宜, 对 1 mm 的裂缝和孔洞具有较好的封堵效果, 承压能力高于 7 MPa。在塔河油田 TP337X 井尾管固井中, 采用该纤维防漏水泥浆在施工过程中全程无漏失, 声幅测井显示固井质量良好。

关键词:纤维; 水泥浆; 漏失; 固井; 塔河油田

中图分类号: TE256

文献标识码: A

Research and application of fiber leakproof cement slurry system

Wang Zhiguo, Zhou Pengcheng

(Petroleum Engineering Supervision Center, SINOPEC Northwest Oilfield Company, Luntai, Xinjiang 841600, China)

Abstract: In order to solve the carbonate pore and fracture leakage in the Tahe oilfield during the cementing process, a fiber leakproof cement slurry system was developed by selecting plugging mechanism and plugging material. The cement slurry system ALF-1 with fibers of 5, 10, 19 mm, respectively, was tested. When adding the cement slurry system ALF-1 with the fibers of 5 mm by 0.2%–0.3%, the cracks and pores of 1 mm were sealed very well, and could bear a pressure higher than 7 MPa. This system was applied in the tail pipe cementing in the well TP337X of the Tahe oilfield, solving leakage successfully during the whole process of construction. Amplitude logging showed good cementing quality.

Key words: fiber; cement slurry; leakage; cementing; Tahe oilfield

目前大多防漏、堵漏水泥浆体系还处于室内研究阶段^[1-6], 相关的现场应用鲜见报道。因此, 针对塔河油田的地层特点进行了纤维防漏水泥浆体系的室内研究和现场应用工作。塔河油田油层埋藏深, 大多在 6 000 m 左右, 油层套管固井一般采用 177.8 mm 套管进行尾管或双级固井, 裸眼封固段长, 穿越地层多, 尤其二叠系、志留系、奥陶系碳酸盐岩均存在孔洞、裂缝性漏失, 导致环空水泥浆返高达不到设计要求, 多数漏失井只有进行后期挤水泥补救才能进行后续施工, 严重影响生产进度和油田经济效益。为解决固井期间的漏失问题, 对纤维堵漏水泥浆进行研究。采用堵漏模拟装置 DLM-01 进行纤维防漏水泥浆堵漏性能评价, 并对堵漏纤维 ALF-1 的规格和加量进行优选, 最终开发了该纤维防漏水泥浆体系, 并将该纤维防漏水泥浆体系应用于 TP337X 井固井施工。

1 纤维防漏水泥浆体系设计

1.1 纤维防漏水泥浆设计思路

塔河油田碳酸盐岩存在孔洞、裂缝性漏失, 尤其在固井作业过程中二叠系和志留系柯坪塔格组发生漏失, 导致返高不够, 严重影响塔河油田整体固井质量, 这就要求固井过程中水泥浆具有防漏、堵漏功能, 环空返高达到设计要求。通过对塔河油田漏失井的研究分析, 建立了纤维防漏水泥浆的设计思路^[7-9]。

(1) 选用表面改性纤维, 使其能够无序、均匀地分散在水泥浆中, 成三维网状分布, 通过纤维搭桥形成网状屏蔽防漏结构, 当堵漏纤维水泥浆进入漏层时可形成“滤网结构”, 增加水泥浆的流动阻力, 借助水泥浆的水化胶凝作用和未水化固相颗粒的填充作用, 达到提高地层承压能力的目的。

(2) 将水化材料、架桥材料和堵漏材料进行组

合优化,利用纤维架桥,堵漏材料填充,再以水化材料加固,以达到堵漏和提高承压能力的目的。

(3)在水泥浆中加入能够防止水泥石收缩产生微间隙及串流通道的 FLOK-1 和 FLOK-2,防止较大水灰比下的低密度水泥浆在凝固时候收缩,优化水泥石弹性模量、抗折强度。

1.2 纤维防漏水泥浆堵漏评价方法

采用堵漏模拟装置(DLM-01)进行防漏水泥浆堵漏能力评价。堵漏模拟装置主要以承压釜体和各种缝、孔模具组成,另外还附带加温装置和加压装置。实验时用不同孔径的孔隙试件和不同宽度的缝隙试件,分别模拟孔隙性地层和裂缝性地层。

①首先在浆筒中放入裂缝板,然后将 100 mL 堵漏水泥浆倒入浆筒中,接着把浆筒安装在堵漏实验仪的下部,从堵漏实验仪上部倒入 500 mL 堵漏水泥浆,打开出口开关,观察无压力情况下水泥浆的自流情况,记录滤失量。

②盖上堵漏实验仪的顶盖,并通过氮气瓶分别加压 0.5,0.7,1,3,5,7 MPa,每次稳压 10 min,观察各压力下水泥浆的自流情况,记录滤失量。

③模拟地层孔洞性实验:去掉裂缝板,在浆筒中放入孔洞板,其他实验步骤同①和②。

实验完成后测量被挤出液体的总滤失体积,以考查纤维水泥浆的堵漏能力;滤失量越小,堵漏效果越好。

1.3 堵漏纤维的优选

1.3.1 不同规格堵漏纤维对水泥浆堵漏性能的影响

通过采用堵漏模拟装置模拟不同缝宽、形式的裂缝和孔洞条件下水泥浆的滤失情况,得出各种规格堵漏纤维的水泥浆的滤失结果。具体做法是:通过加入 3 种不同规格(5,10,19 mm)的堵漏纤维 ALF-1,其加量占水泥浆体积的 0.2%,以此考查常规密度堵漏水泥浆的封堵承压能力,并与未加入堵漏纤维的水泥浆进行对比分析。试验结果表明,未

加入堵漏纤维的水泥浆无承压能力,而加入堵漏纤维后,水泥浆的承压能力显著提高。对于 1 mm 的裂缝和孔洞,3 种规格的堵漏纤维水泥浆承压能力均可达到 7 MPa,表明 3 种规格的堵漏纤维 ALF-1 对 1 mm 的裂缝和孔洞均具有良好的封堵效果。

1.3.2 不同规格堵漏纤维对水泥浆流变性能的影响

水泥浆的流变性直接关系到水泥浆能否安全泵入井内,流变性好则可泵性高,流变性差则不易泵送,增加安全施工风险^[10]。为了检测不同长度纤维防漏水泥浆的流变性,通过配制 3 组 1.88 g/cm³ 密度水泥浆,加入 3 种不同规格(5,10,19 mm)的堵漏纤维 ALF-1,其加量占水泥浆体积的 0.2%,将其放入常压稠化仪养护 20 min 后,测定其流变性,实验结果见表 1。

通过对不同规格堵漏纤维加量的水泥浆流变值的比较可看出,加入堵漏纤维后的水泥浆稠度增加,而且堵漏纤维的长度越长,其稠度值增加越明显。这是因为虽然堵漏纤维不参与水泥浆水化反应,不会放热或吸热,但是堵漏纤维的加入会使水泥浆中的分散相比例降低,减少水泥浆中游离水的含量、增大摩阻,所以表现为稠度增加。同时,堵漏纤维 ALF-1 的长度也会影响水泥混灰过程中外掺料的均匀程度,从而影响水泥浆的性能;堵漏纤维长度越长,越易造成水泥浆在泵送过程中堵塞设备及管线。综上分析,选择 5 mm 的堵漏纤维 ALF-1 较为适宜。

1.3.3 堵漏纤维加量对流变性能影响

为了使堵漏纤维水泥浆形成致密的“网架结构”从而达到防漏堵漏的效果,希望堵漏纤维的加量越多越好。但实际情况是堵漏纤维的加量会影响水泥浆的流变性从而影响水泥浆的性能,这就需要选用合适的堵漏纤维加量。前面通过试验得出 5 mm 堵漏纤维 ALF-1 对水泥浆的堵漏效果和流变性最为适宜,为了认识纤维加量对水泥浆流变性

表 1 不同规格纤维加量的水泥浆流变值

Table 1 Rheological values of cement slurry with different fibers

纤维添加情况	纤维规格						备注
	Φ600	Φ300	Φ200	Φ100	Φ6	Φ3	
不加纤维	148	86	57	32	8	7	常温
	217	146	79	68	26	21	93 ℃
5mm 纤维	159	89	60	34	9	8	常温
	224	147	84	69	13	12	93 ℃
10mm 纤维	173	107	71	39	10	9	常温
	240	158	91	78	13	12	93 ℃
19mm 纤维	218	163	135	90	15	14	常温
	273	206	148	109	24	23	93 ℃

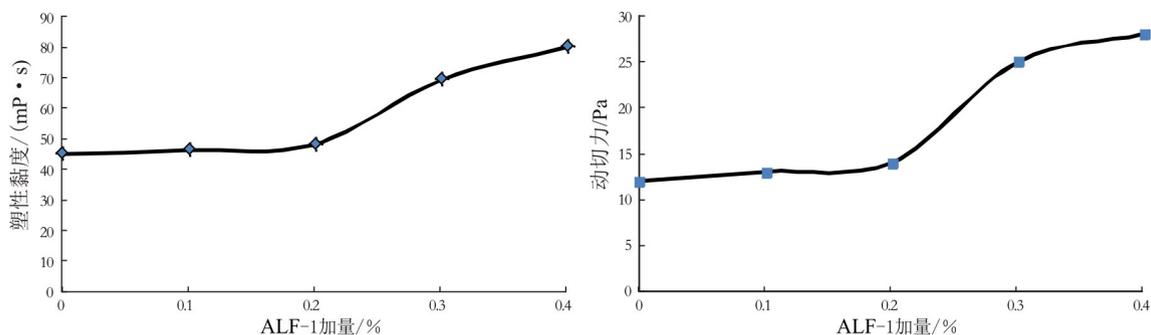


图 1 5 mm 堵漏纤维 ALF-1 加量对水泥浆流变性的影响

Fig.1 Influence of rheological properties of cement slurry with different amounts of ALF-1

的影响,对 5 mm 堵漏纤维 ALF-1 加量分别为体积占比的 0.1%,0.2%,0.3%,0.4% 进行比较。具体做法是配制 1.88 g/cm^3 水泥浆若干,加入不同体积占比的 5 mm 堵漏纤维 ALF-1,将其放入常压稠化仪养护 20 min 后,测定其流变性,试验结果见图 1。

由图 1 可知,随着堵漏纤维 ALF-1 加量的增加,水泥浆的塑性黏度 PV 和动切力 YP 值均增加,当堵漏纤维 ALF-1 的加量在 0.2% 左右时,水泥浆的 PV 值和 YP 值增加幅度较小。为了使水泥浆具有较好的流动性和可泵送性,选择堵漏纤维 ALF-1 的加量为 0.2%~0.3% 最为适宜。

1.4 纤维防漏水泥浆外掺料及外加剂的优选

在水泥浆的配制过程中除了对堵漏纤维进行优选外,还需对水泥浆外掺料和外加剂进行优选确定。实验分别对硅粉、填充剂、防窜剂等外掺料和降失水剂、缓凝剂、分散剂等外加剂的配比进行优选,最终确定硅粉的适宜加量在 25%~30%,填充剂 CEA-1 的适宜加量在 2.0%~3.0%,防窜剂 FLOK-1 的适宜加量在 2%~2.5%,防窜剂 FLOK-2 的适宜加量在 3%;降失水剂 FS-23L 适宜加量在 5%~8%,缓凝剂 HX-36L 的适宜加量在 0.6%~0.7%,分散剂 FS-13L 的适宜加量在 1.5%~2.0%。

1.5 纤维防漏水泥浆性能评价

根据对纤维防漏水泥浆体系外掺料和外加剂的优选,确定 1.88 g/cm^3 的纤维防漏水泥浆体系基本配方为:AG+30%硅粉+2%CEA-1+2%FLOK-1+3%FLOK-2+0.2%ALF-1+5%FS-23L+0.6%HX-36L。按照水泥浆各性能评价方法的要求进行评价,实验结果见表 2。

由表 2 可知,纤维防漏水泥浆体系在 $130 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下的底部抗压强度可以达到 28.6 MPa,满足水泥浆体系 24 h 底部抗压强度大于 14 MPa 指标要求。同时,水泥浆上下密度差为 0.008 g/cm^3 ,满足水泥浆上下密度差不大于 0.02 g/cm^3 的性能要求。

表 2 纤维防漏水泥浆性能

Table 2 Performance of fiber cement slurry

项目	测试结果	备注
密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.88	
剪切应力读数	235/150/112/75/26/24	常压 $93 \text{ }^\circ\text{C}$ 养护 20 min
API 失水/mL	36	
自由液/mL	0	
流动度/cm	21	
初始稠度/Bc	17	
强度/ Pa	28.60	养护条件: $130 \text{ }^\circ\text{C} \times 24 \text{ h} \times 20.7 \text{ MPa}$
30Bc 用时/min	160	
70Bc 用时/min	185	初始稠度 17 Bc
100Bc 用时/min	196	
上层水泥浆 (稳定性)/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.877	
中层水泥浆 (稳定性)/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.885	常压 $93 \text{ }^\circ\text{C}$ 养护 20 min 后 静置 2 h
下层水泥浆 (稳定性)/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.885	

2 纤维防漏水泥浆体系的应用

2.1 TP337X 井的基本情况

TP337X 井是中国石化西北油田分公司部署在新疆塔里木盆地阿克库勒凸起西南部斜坡部位的一口开发井。该井三开中完井深为 6 796 m,采用 177.8 mm 套管进行尾管悬挂固井,在钻进过程中曾先后发生三次失返性漏失。

第一次漏失发生在井深 5 918 m,循环洗井下放距井底 0.3 m 时,井口失返,漏失泥浆 5.6 m^3 ,漏失层位为柯坪塔格组;采用中小颗粒为主、大颗粒为辅、浓度 30% 左右的堵漏浆进行承压堵漏。

第二次漏失发生在井深 5 923.98 m,在下钻过程中发生井漏,漏速 $58.2 \text{ m}^3/\text{h}$,漏失层位为柯坪塔格组;采用纤维堵漏剂和小颗粒为主、中颗粒为辅、中等浓度的 3H 堵漏浆封堵地层进行承压堵漏。

第三次漏失发生在井深 5 927.67 m,在钻进至

该深度时,立压下降,出口槽流量减小,漏速 28.2 m³/h,采取堵漏措施后继续恢复钻进。

2.2 纤维防漏水泥浆体系在 TP337X 井的应用效果

由于本井柯坪塔格组(5 918~5 927 m)在钻井过程中发生严重漏失,虽然对该井段进行了多次承压堵漏施工并堵住漏失层,但在固井过程中再次发生漏失的风险非常大,这就需要水泥浆具有防漏堵漏功能。结合室内对纤维防漏水泥浆体系的研究结果,通过利用纤维防漏水泥浆体系中纤维的架桥,充填和嵌入形成的网架结构,当水泥浆进入到漏失层的裂缝中时,可以有效地形成致密的滤饼,在压差的作用下慢慢压实,形成堵塞隔墙,从而达到封堵漏失通道、提高液柱承压能力的目的。表 3 为 TP337X 井 177.8 mm 套管固井施工流程。

施工过程中冲洗液、隔离液、水泥浆和重浆量的实际注入量与设计量相同,总共替浆量的实际用量略小于设计量,替浆到位后顺利碰压,整个施工过程未出现漏失情况。上水泥塞和下水泥塞的实际长度均比设计长度大,水泥浆实际返高大于设计高度,固井施工过程中没有发生因水泥浆漏失造成返高不足的情况,测井声幅显示固井质量良好。综上所述,纤维防漏水泥浆在固井施工过程中起到了良好的防漏、堵漏效果。

表 3 塔河油田 TP337X 井固井施工流程

Table 3 Cementing operation of well TP337X, Tahe oilfield

项目	设计值	实际值
冲洗液/m ³	6	6
隔离液/m ³	12	12
水泥领浆量/m ³	40	40
水泥尾浆量/m ³	18	18
平均密度(领浆)/(g·cm ⁻³)	1.50	1.52
平均密度(尾浆)/(g·cm ⁻³)	1.88	1.89
替浆量/m ³	85.0	83.0
碰压/MPa	-	23~26

3 结论

(1)通过对堵漏纤维 ALF-1 水泥浆进行试验评价,优选出 5 mm 的堵漏纤维 ALF-1 加量在 0.2%~0.3%的范围最为适宜,对 1 mm 的裂缝和孔洞具有较好的封堵效果,承压能力高于 7 MPa。

(2)堵漏纤维不参与水泥浆水化反应,不会放热或吸热,但是纤维的加入会使水泥浆中的分散相比比例降低,减少水泥浆中游离水的含量,增大摩擦阻力,所以表现为稠度增加,加入的纤维长度越长其稠度增加越大。

(3)室内试验和现场应用表明,堵漏纤维 ALF-1 具有较好的堵漏能力,能增加水泥浆在裂缝处的流动阻力。

(4)通过对该纤维防漏水泥浆体系在 TP337X 井的应用,达到了防漏、堵漏的目的,取得了较好的成效,说明该体系具有一定的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 刘铮,张宏军,刘传仁,等.复合纤维水泥浆在川东北钻井承压堵漏中的应用[J].钻采工艺,2007,30(6):116-118.
- [2] 郭小阳,张玉隆,刘硕琼,等.低压易漏长裸眼注水泥工艺研究[J].天然气工业,1998,9,18(5):40-44.
- [3] 邹建龙,屈建省,吕光明,等.纤维水泥堵漏性能评价研究[J].钻井液与完井液,2007,24(2):42-44.
- [4] 杨振杰,武星星,王晓军,等.HMXW 网状纤维承压堵漏试验[J].钻井液与完井液,2014,31(6):36-38.
- [5] 何德清,罗云,赵金清,等.纤维水泥防漏试验研究[J].钻井液与完井液,2006,23(3):34-36.
- [6] 余婷婷,邓建民,李健,等.高密度纤维堵漏水泥浆的试验研究[J].钻井液与完井液,2008,25(2):40-42.
- [7] 余婷婷,邓建民,李健,等.纤维堵漏水泥浆的室内研究[J].石油钻采工艺,2007,29(4):89-91.
- [8] 刘崇建,黄柏宗,徐同台.油气井注水泥理论与应用[M].北京:石油工业出版社,2001:126-139.
- [9] 黄进军,罗平亚,李家学,等.提高地层承压能力技术[J].钻井液与完井液,2009,26(2):69-71.
- [10] 王治国,陈超,潘少敏,等.深井注水泥小间隙环空流动计算方法研究与应用[J].石油地质与工程,2014,28(3):103-105.

(编辑 徐文明)