

温敏堵漏水泥浆体系研究与应用

刘学鹏

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 102206)

摘要:温敏形状记忆聚合物是形状记忆材料的一种,其结构中存在记忆起始形状的固定相和随温度变化能可逆地固化和软化的可逆相。本文将这种材料性能应用于石油工程的固井领域,利用温敏聚合物温敏形变的特点,在井下温度升高时激发粒子形变形成大形变体,为封堵漏失层提供架桥结构,解决固井水泥浆防漏堵漏效果差、水泥车不能泵送较大尺寸颗粒的难题。研制的温敏堵漏材料初始粒径1 mm,达到温敏点后体积形变膨胀,应用温度60~140℃,加量0~2% BWOC;据此构建的温敏堵漏水泥浆体系,能有效封堵2 mm的缝隙板,承压7 MPa。温敏堵漏水泥浆先后在东北分公司北209井、北8井、北213-1井等的尾管或油层固井中进行了现场应用,尤其在北213-1井的固井堵漏过程中有效解决了固井漏失难题。

关键词:形状记忆;温敏材料;水泥浆;固井;堵漏

中图分类号: TE256 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2022)02-0110-07

Research and application of the temperature sensitive plugging cement slurry system

LIU Xuepeng

(SINOPEC Petroleum Engineering Research Institute, Beijing 102206, China)

Abstract: Temperature sensitive shape memory polymer is a kind of shape memory material. In its structure, there are fixed phases that remember the initial shape and reversible phases that can be cured and softened reversibly with temperature. In this paper, these properties of materials are applied to the cementing field of petroleum engineering. The temperature sensitive deformation characteristics of temperature sensitive polymer allows the particle deformation to be excited at high downhole temperature to form a large deformation, which provides a bridge structure for sealing and plugging the lost circulation layer; thus, solving the problems of poor leakage prevention and plugging effect of cementing slurry, and inability of the cement truck to pump large particles. The initial particle size of the temperature sensitive plugging material is 1mm. After reaching the temperature sensitive point, it deforms and expands in volume. The application temperature is 60 to 140°C, and the dosage is 0 to 2% BWOC; The temperature sensitive plugging cement slurry system prepared on these conditions can effectively seal the 2mm slotted plate at 7MPa. The temperature sensitive plugging cement slurry has been applied in North-209 well, North-8 well and North-213-1 well for cementing of the liner or oil bearing layers by the Northeast oil and gas branch company successively, especially in North 213-1 well where it effectively solved the problem of cementing leakage.

Key words: shape memory; temperature sensitive materials; cement slurry; cementing; plugging

目前,固井漏失现象普遍,严重影响固井质 四川页岩气井等都普遍存在固井漏失问题。塔河量^[1-2]。中石化的西北和东北油田部分区块、鄂北、 油田的顺北区块,井深>8000 m,一次封固段达近

收稿日期: 2021-08-27; **修回日期:** 2022-01-26 **DOI:** 10.12143/j.ztgc.2022.02.015

基金项目: 国家科技重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(编号:2016ZX05061);中石化科技攻关项目“温敏堵漏水泥浆体系研究与应用”(编号:P17002-5)

作者简介: 刘学鹏,男,汉族,1982年生,高级工程师,化学与材料专业,博士,主要从事油田化学品和材料开发工作,北京市昌平区百沙路197号中国石化科学技术研究中心5号科研楼401室, lxpj@tju.edu.cn。

引用格式: 刘学鹏. 温敏堵漏水泥浆体系研究与应用[J]. 钻探工程, 2022, 49(2): 110-116.

LIU Xuepeng. Research and application of the temperature sensitive plugging cement slurry system[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2): 110-116.

6000 m,地层复杂、井漏严重,固井前后采取多种措施,依然难以达到要求。固井漏失会造成水泥返高不足,严重时会影响安全。

1 固井漏失解决方法及存在问题

针对固井漏失问题,现有解决方法主要有:

(1)固井前承压堵漏^[3-4]。即固井下套管前,钻井液承压堵漏。东北龙凤山气田井漏严重,一般采用注水泥前钻井液承压堵漏。承压堵漏效果明显,但周期长,费用高(具体数据如表1所示);且在固井下套管过程中的刮碰以及“激动”压力等影响仍不能避免固井漏失。

表1 东北龙凤山气田承压周期及费用

Table 1 Pressure bearing period and cost of Northeast Longfengshan Gas Field

井号	时间/h	材料费/万元	钻机日费/万元	合计/万元
北202	74	22.18	24.67	46.85
北203	168	41.98	56	97.98
北204	112	6.2	37.33	43.53
北201-3	36	14.56	12	26.56
北201-2HF	230	16.6	76.8	93.4
平均	124	20.3	41.36	61.66

(2)固井采用低密度水泥浆^[5]。超低密度水泥浆固井具有局限性,主要是:密度调节范围有限;水泥石强度发展慢且低,渗透率很高;减轻材料价格高,加量大。低密度水泥浆仅是防漏作用,固井过程仍然经常有漏失发生。

(3)固井采用堵漏水泥浆,如斯伦贝谢 Cem-NET 纤维水泥浆、中石油 BCE-200S 纤维水泥浆。国内外主要采用在水泥浆中加入纤维和极小颗粒物进行固井防漏堵漏^[5-6]。纤维固井水泥浆具有如下缺点:①纤维尺寸有限制,封堵效果有限;②粒径级配不好,缺乏结构;③需人工在水泥车上添加,加量及均匀性差。存在这些问题的原因是,固井施工设备限制水泥浆堵漏材料的尺寸和浓度。固井过程中水泥浆需经过水泥车柱塞泵,大尺寸材料容易堵塞泵车;高浓度堵漏材料,导致水泥浆增稠,不易泵送。所以目前固井堵漏水泥浆,堵漏能力不强,不能完全满足固井防漏堵漏。

从上面的分析可以看出,固井漏失现象普遍存

在,目前固井过程中水泥浆堵漏的手段单一,效果有限,不能保证易漏井的固井质量。采用新的技术措施,开发有效的堵漏水泥浆体系非常必要。

2 温敏堵漏水泥浆体系

本文利用温敏形变材料^[7-8],解决固井过程中不能泵送大的堵漏颗粒材料,无法形成有效架桥和支撑结构,堵漏效果差的问题;开发出温敏堵漏水泥浆体系进行现场应用,解决固井漏失难题。

2.1 温敏堵漏材料

温敏堵漏水泥浆体系的设计思路是:常温下小颗粒的温敏形状记忆材料(便于混配、泵送);井下升温到达材料温敏点后体积变大(大骨架、长纤维等结构),实现架桥,结合水泥浆封堵^[9-16]。

温敏形变材料为合成的形状记忆聚氨酯(SMPU)^[7-8],其具有两相结构,即固定相和可逆相。聚氨酯的硬段部分通过氢键或结晶形成固定相,其作用是对于制品原始形状的记忆与回复;软段部分作为可逆相吸收施加到聚合物的应力,其作用是使制品产生变形并固定该形状。其形状记忆过程如图1所示,图中 T 为实际温度, T_g 为 SMPU 的温敏变形温度点。SMPU 的优势是成本低、质量轻,并且具有宽广的形状回复温度、高的形状回复率、良好的加工特性以及生物相容性。与其他形状记忆高分子相比, SMPU 具有分子结构设计多样性、形状回复温度易于调整,且分子结构中含有极性基团,与水泥浆相容性好,材料综合性能优越。

基于上述原理开发了3种温敏材料,分别是 SCQ-1、SCQ-2、SCQ-3 和支撑材料 SCQ-4(如图2所示)。材料特点:温敏材料粒径 1 mm,达到温敏点

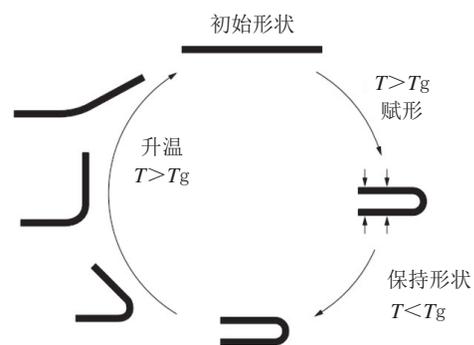
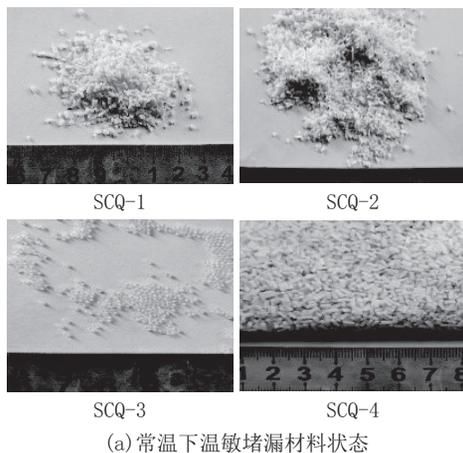


图1 温敏形状记忆材料工作原理

Fig.1 Working principle of temperature sensitive shape memory material

后体积膨胀3~15倍,温敏点60~110℃可调,材料应用温度60~140℃。其中:SCQ-1粒径1mm,达到温敏点后体积变成10~15mm的立体网状结构;SCQ-2粒径1mm,达到温敏点后分散成3~6mm的20~30根纤维;SCQ-3粒径1mm的圆球,达到温敏点后体积变成3~6mm。



(a) 常温下温敏堵漏材料状态



(b) 温敏点以上材料状态

图2 温敏堵漏材料常温及温敏点以上的状态

Fig.2 State of temperature sensitive plugging material at ambient temperature and temperature above the sensitive point

2.2 温敏堵漏体系

采用上述4种材料与其他材料搭配在固井水泥浆中使用,形成温敏堵漏水泥浆体系。

2.2.1 堵漏试验方法及材料

堵漏试验方法:采用DLM-01型堵漏材料试验仪,按《钻井用桥接堵漏材料室内试验方法》(SY/T 5840—2007)标准,用1~2mm的缝隙板评价堵漏剂对裂缝型地层的堵漏效果。

试验仪器:DLM-01型堵漏材料试验仪、高速搅拌器、常压稠化仪等。

2.2.2 堵漏材料评价

2.2.2.1 纤维堵漏评价试验

聚丙烯纤维是固井水泥浆堵漏中用量最多的纤维之一,材料易得。试验选用丙纶材料,长为3mm,加量为0.5%~2.0%。加有纤维的水泥浆在90℃下养护20min后,观察聚丙烯纤维的分布情况,并进行1mm缝隙板堵漏剂相应的堵漏试验,结果见表2。

表2 聚丙烯纤维堵漏评价试验

Table 2 Polypropylene fiber plugging evaluation test

丙烯纤维 加量/%	承压强度/ MPa	总漏失量/ mL	现象与结论
2	0.1	全部漏失	养护后纤维结团明显
1	0.1	全部漏失	养护后纤维结团明显
0.5	0.1	全部漏失	养护后纤维结团较轻

试验中,聚丙烯纤维在水泥浆中的加入量达极限时(2%,一般现场应用加量 $\leq 2\%$),最大承压不足0.1MPa,且此时加入到水泥浆中的纤维养护后极易结团。试验表明单纯的纤维水泥浆无法满足1mm裂缝的堵漏需求,不能满足大缝隙的固井堵漏。

2.2.2.2 常规颗粒材料堵漏试验

所选用的颗粒材料为约1mm蛭石堵漏剂、珍珠岩堵漏剂(见图3、图4)。试验颗粒匹配按表3配制。采用1mm缝隙板,水泥浆在90℃下养护20min。评价试验结果见表3。



图3 蛭石堵漏剂

Fig.3 Vermiculite plugging agent

试验发现,单纯颗粒堵漏在加量达到水泥浆中上限时(此时水泥浆增稠,性能已无法满足施工需求),还是无法堵住1mm缝隙板。且在配合加入纤维的情况下堵漏效果依然没有明显改善。

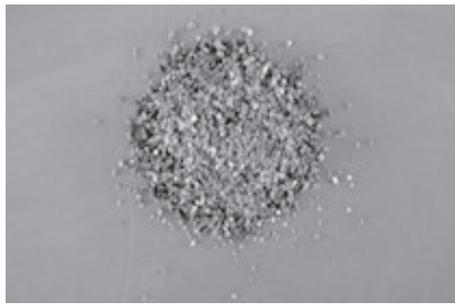


图4 珍珠岩堵漏剂

Fig.4 Perlite plugging agent

2.2.2.3 温敏形状记忆材料堵漏试验

温敏形状记忆颗粒堵漏体系包括1 mm的温敏形状记忆堵漏粒子SCQ-1、SCQ-2、SCQ-3,支撑颗粒SCQ-4,温敏点80℃±3℃,在应用时混入水泥浆

中使用。堵漏垫床类型采用1、2 mm 缝隙板,水泥浆在90℃下养护20 min。评价试验结果表4。

试验发现,单纯堵漏纤维颗粒SCQ-2在加量达到上限2% BWOC(BWOC为占水泥的质量比)时,还是无法堵住1 mm 缝隙板,单纯堵漏颗粒SCQ-1在加量达到上限1.5%时,只能在承压1 MPa下勉强堵住1 mm 缝隙板,但已不具备应用条件。将堵漏纤维颗粒SCQ-2和堵漏颗粒SCQ-1配合使用,能有效封堵1 mm 缝隙板。SCQ-1、SCQ-2、SCQ-3和支撑颗粒SCQ-4配合使用,加量2% BWOC,能有效封堵2 mm的缝隙板,承压7 MPa。

2.2.2.4 堵漏水泥浆性能评价

根据表4中的试验数据,选取“1.5% SCQ-1+0.1% SCQ-2+0.2% SCQ-3+0.2% SCQ-4”作为

表3 常规颗粒堵漏材料试验结果

Table 3 Test results of conventional particle plugging materials

堵漏液配方	承压能力/MPa	总漏失量/mL	现象与结论
1% 蛭石堵漏剂	0.5	全部漏失	水泥浆良好
1% 蛭石堵漏剂+0.2% 纤维	0.5	全部漏失	水泥浆良好
1% 珍珠岩堵漏剂	0.5	全部漏失	水泥浆良好
1% 珍珠岩堵漏剂+0.2% 纤维	0.5	全部漏失	水泥浆良好
6% 蛭石堵漏剂	0.5	全部漏失	水泥浆增稠,蛭石易碎
6% 蛭石堵漏剂+0.2% 纤维	0.5	全部漏失	水泥浆增稠,蛭石易碎
6% 珍珠岩堵漏剂	0.5	全部漏失	水泥浆增稠,有沉淀
6% 珍珠岩堵漏剂+0.2% 纤维	0.5	全部漏失	水泥浆增稠,有沉淀

表4 温敏形状记忆颗粒堵漏体系试验结果

Table 4 Test results of the temperature sensitive shape memory particle plugging system

堵漏液配方	承压能力/MPa	总漏失量/mL	现象与结论
1 mm 缝隙板			
1.5% SCQ-1	1	354	水泥浆流动性一般,漏失过大,不能满足要求
2% SCQ-2	0.5	全部漏失	水泥浆良好
2 mm 缝隙板			
1.5% SCQ-1	0.5	全部漏失	水泥浆流动性一般
2% SCQ-2	0.5	全部漏失	水泥浆良好
0.5% SCQ-1+0.5% SCQ-2	1	漏失过大	流动性一般,不能满足要求
1.5% SCQ-1+0.5% SCQ-2	1	漏失过大	流动性一般,不能满足要求
1% SCQ-1+0.3% SCQ-3+0.5% SCQ-2	7	231	流动性一般
1.5% SCQ-1+0.3% SCQ-4+0.5% SCQ-2	7	168	流动性一般
1.5% SCQ-1+0.3% SCQ-4+0.2% SCQ-2	7	171	流动性一般
1.5% SCQ-1+0.2% SCQ-3+0.2% SCQ-4+0.1% SCQ-2	7	143	流动性一般

堵漏试验的标准体系 SCQ 进行水泥浆性能试验。(GB/T 19139—2012) 进行, 试验结果见表 5~7, 分别评价了常规水泥浆、粉煤灰水泥浆、高密度水泥浆的相关性能。依据国家标准《油井水泥试验方法》1.88 g/cm³ 常规密度 SCQ 水泥体系稠化曲线见图 5。

表 5 高密度水泥浆体系应用考察 (130 °C × 120 MPa × 90 min)

Table 5 Application Investigation of high density cement slurry systems (130°C × 120MPa × 90min)

密度/(g·cm ⁻³)	沉降稳定性/(g·cm ⁻³)	流变(93 °C)	SCQ	稠化时间/min	90 °C/48 h 强度/MPa
2.30	2.30/2.30/2.30	150/80/53/33/11/9	未加	240	19.1
2.30	2.30/2.30/2.30	193/97/72/40/13/9	加 2%	251	16.2

注:(1) 配方为阿克苏 G 级水泥 + 100% 铁矿 + 30% 硅粉 + 5% 微硅 + 10% 胶乳 + 1.5% 稳定剂 + 8% 降失水剂 + 1.5% 分散剂 + 0.8% 缓凝剂 + 46% 水 + 2% 温敏堵漏材料 SCQ; (2) 流变数据为旋转六速流变仪 6 个转速下的读数

表 6 常规水泥体系应用考察 (120 °C × 60 min × 60 MPa)

Table 6 Application Investigation of conventional cement systems (120°C × 60 min × 60 MPa)

密度/(g·cm ⁻³)	沉降稳定性/(g·cm ⁻³)	流变(93 °C)	SCQ	稠化时间/min	90 °C/48 h 强度/MPa
1.88	1.88/1.88/1.88	182/105/78/46/6/4	未加	327	22.3
1.88	1.88/1.88/1.88	201/125/98/57/11/7	加 2%	310(图 5)	17.5

注:(1) 配方为阿克苏 G 级水泥 + 35% 硅粉 + 4% 降失水剂 + 0.2% 分散剂 + 3% 缓凝剂 + 43% H₂O + 2% 温敏堵漏材料 SCQ; (2) 流变数据为旋转六速流变仪 6 个转速下的读数

表 7 低密度水泥体系应用考察 (110 °C × 70 min × 80 MPa)

Table 7 Application Investigation of low density cement systems (110°C × 70min × 80MPa)

密度/(g·cm ⁻³)	沉降稳定性/(g·cm ⁻³)	流变(93 °C)	SCQ	稠化时间/min	90 °C/48 h 强度/MPa
1.50	1.50/1.50/1.50	117/68/51/31/6/4	未加	304	7.3
1.50	1.50/1.50/1.50	129/77/63/39/9/6	加 2%	310	5.4

注:(1) 配方为阿克苏 G 级水泥 + 140% 粉煤灰 + 6% 膨胀剂 + 2% 悬浮剂 + 22% 降失水剂 + 3% H₂O + 4% 氯化钠 + 3.5% 缓凝剂 + 195% H₂O + 2% 温敏堵漏材料 SCQ; (2) 流变数据为旋转六速流变仪 6 个转速下的读数

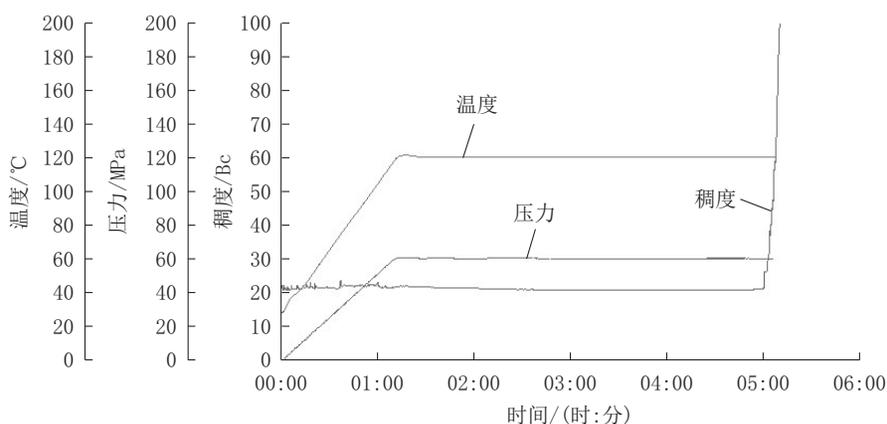


图 5 1.88 g/cm³ 常规密度 SCQ 水泥体系稠化曲线

Fig.5 Thickening curve of the SCQ cement system with 1.88g/cm³ conventional density

试验发现,加入 2% SCQ 堵漏体系的水泥浆和未加入的水泥浆前后性能没有明显差距,满足固井施工需求。将表 5~7 中的堵漏水泥浆体系进行 2

mm 缝隙板堵漏试验,结果见表 8。结果表明,SCQ 水泥浆体系能有效封堵 2 mm 的缝隙板。

表8 堵漏水泥浆试验结果

Table 8 Test results of plugging cement slurry			
堵漏液配方	承压能力/ MPa	总漏失量/ mL	现象与结论
2.30堵漏水泥浆 (SCQ2%)	7	186	水泥浆良好
1.88堵漏水泥浆 (SCQ2%)	7	131	水泥浆良好
1.50堵漏水泥浆 (SCQ2%)	7	225	水泥浆良好

2.3 小结

利用温敏形状记忆聚合物温敏形变的特点,在井下温度升高时激发粒子形变,形成大形变体,为封堵漏失层提供架桥结构,解决固井水泥浆防漏堵漏效果差、水泥车不能泵送较大尺寸颗粒的难题。试验结果表明,温敏形状记忆堵漏粒子制备的堵漏水泥浆主要特点在于其掺量小(2.0% BWOC),模拟堵漏效果显著,能有效封堵2 mm的缝隙板,且承压7 MPa。形成的防漏堵漏水泥浆体系,其滤失量小、流变性能好、综合性能优良。

温敏堵漏水泥浆堵漏防漏作用机理:温敏形状记忆堵漏粒子制备的堵漏水泥浆一开始由于温度低未引发变形,材料易混、易泵送,水泥浆注入井中后,随着地层温度升高,当到达形变温度点时,材料发生形变,形成堵漏水泥浆体系。其中立体网状颗粒材料SCQ-1提供骨架结构,为封堵漏失层提供架桥基础结构;纤维材料SCQ-2和其他材料具有搭桥成网和填充特性。当温敏形状记忆堵漏材料与水泥浆体进入漏层时,可相互形成“滤网结构”,增加水泥浆体的流动阻力,借助于水泥浆的水化胶凝作用和未水化水泥颗粒的填充作用,达到堵漏和提高易漏地层承压能力的目的(如图6所示)。

3 现场应用

温敏堵漏水泥浆先后在东北分公司北209井、北8井、北213-1井等的尾管或油层固井中进行了现场应用,尤其在北213-1井的固井堵漏过程中解决了现场漏失难题。

东北区块的北213-1井,三开钻进过程,在2300~4000 m的6个层位发生漏失,期间进行了6次停钻堵漏,1次随钻堵漏,泥浆总漏失量1000余立

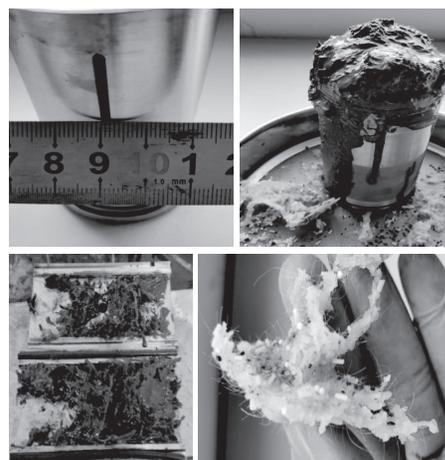


图6 水泥浆堵漏试验(2 mm的缝隙板,承压7 MPa)

Fig.6 Cement slurry plugging test
(2mm-slotted plate at 7MPa)

方米。

三开固井封固段多层漏失,承压堵漏难以满足 1.38 g/cm^3 的固井要求(1.35 g/cm^3 领浆+ 1.40 g/cm^3 尾浆),水泥浆引起的静液柱压力高等可发生井漏导致水泥浆低返,下套管及固井过程中容易发生漏失。

为了达到固井施工要求。2018年8月28日—9月4日,井队循环提密度配堵漏材料承压堵漏,期间进行了4次承压堵漏,泥浆密度 1.23 g/cm^3 提至 1.26 g/cm^3 ,期间累计漏失 117 m^3 ,常规堵漏无法有效提高承压能力。井队请示批复后聘请专业公司进行承压堵漏,9月5日开始,按照专家的方案逐步加入堵漏材料分段承压,逐步提高钻井液密度,到9月10日1:00密度提高至 1.33 g/cm^3 时,发现漏失,且漏速逐渐增大,密度 1.32 g/cm^3 时循环不漏。至此,决定不再进行承压堵漏,采用温敏堵漏水泥浆体系固井。设计漂珠微硅水泥浆体系:领浆 1.35 g/cm^3 加2%温敏材料,封固2200~3140 m主要漏失井段,尾浆 1.40 g/cm^3 加0.2%纤维材料。

9月15日进行固井施工,水泥浆顺利返出井口,测井结果显示固井质量优质,温敏水泥浆封固段无漏失。

4 结论

(1)针对普遍存在的固井漏失现象,提出了利用温敏形状记忆材料,解决固井过程中不能泵送大的堵漏颗粒材料,无法形成有效架桥和支撑结构,堵漏

效果差的问题。

(2)设计并研制了温敏材料,粒径1 mm;达到温敏点后体积膨胀3~15倍;温敏点60~110℃可调;材料应用温度60~140℃;加量2% BWOC,能有效封堵2 mm的缝隙板,承压7 MPa。

(3)形成的温敏堵漏水泥浆成功进行了现场应用,在北213-1井的固井过程中解决了现场漏失难题。

参考文献(References):

- [1] 吴天乾,李明忠,蒋新立,等.鄂尔多斯杭锦旗区块低漏失压力井固井工艺技术[J].复杂油气藏,2018,11(4):69-73.
WU Tianqian, LI Mingzhong, JIANG Xinli, et al. Cementing technology for low leakage pressure wells in Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2018, 11(4): 69-73.
- [2] 孙威威.海坨区块高效堵漏体系的优化与应用[J].钻探工程,2021,48(12):72-78.
SUN Weiwei. Optimization and application of the efficient plugging system in the Haituo block[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(12):72-78.
- [3] 杨现禹,蔡记华,蒋国盛,等.维持页岩井壁稳定的物理封堵模拟和化学抑制实验研究[J].钻探工程,2021,48(4):37-46.
YANG Xianyu, CAI Jihua, JIANG Guosheng, et al. Physical plugging simulation and chemical inhibition experiment for wellbore stability in shale[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(4): 37-46.
- [4] 吕斌,侯力伟,王克诚.新型承压堵漏水泥浆体系的室内研究[J].钻井液与完井液,2011,28(4):51-53.
LÜ Bin, HOU Liwei, WANG Kecheng. Laboratory research of new sealing under pressure cement slurry system [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2011, 28(4):51-53.
- [5] 李波,魏周胜,周兵,等.防渗漏水泥浆体系的研究与应用[J].钻井液与完井液,2012,29(1):60-62.
LI Bo, WEI Zhousheng, ZHOU Bing, et al. Research and application on anti-leakage cement slurry system[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2012, 29(1):60-62.
- [6] 余婷婷,邓建民,李键,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.
YU Tingting, DENG Jianmin, LI Jian, et al. Laboratory research on use of fiber cement slurry to prevent lost circulation [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007, 29(4):89-91.
- [7] Shuai Li, Jun Zhang, Jianjun Chen, et al. Biodegradable body temperature-responsive shape memory polyurethanes with self-healing behavior[J]. Applied Polymers, 2019, 59(2):E310-E316.
- [8] Shuai Li, Jun Zhang, Jianjun Chen, et al. Self-healing polycarbonate-based polyurethane with shape memory behavior [J]. Macromol. Res., 2019, 27(7):649-656.
- [9] Héloïse Thérien-Aubin, Julien E. Gautrot, Yu Shao, et al. Shape memory properties of main chain bile acids polymers[J]. Polymer, 2010, 51(1):22-25.
- [10] Heng Zhang, Haitao Wang, Wei Zhong, et al. A novel type of shape memory polymer blend and the shape memory mechanism [J]. Polymer, 2009, 50(6):1596-1601.
- [11] Devatha P. Nair, Neil B. Cramer, Timothy F. Scott, et al. Photopolymerized thiol-ene systems as shape memory polymers [J]. Polymer, 2010, 51(19):4383-4389.
- [12] 郑一泉,任少平,凌有道,等.热感应型形状记忆高分子材料[J].高分子通报,2006(4):70-75,92.
ZHENG Yiquan, REN Shaoping, LING Youdao, et al. Thermally stimulative shape memory polymer [J]. Chinese Polymer Bulletin, 2006(4):70-75,92.
- [13] 张晟,罗海亚,余志军,等.热致型形状记忆高分子材料的研究进展[J].高分子材料科学与工程,2008,24(8):27-31.
ZHANG Sheng, LUO Haiya, YU Zhijun, et al. Thermal induced shape memory polymers[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2008, 24(8):27-31.
- [14] 周成飞.形状记忆聚合物泡沫材料的研究进展[J].橡塑技术与装备,2016,42(20):4-8.
ZHOU Chengfei. Research progress of shape memory polymer foam materials [J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment (Plastics), 2016, 42(20):4-8.
- [15] 童征,裴晓含,沈泽俊,等.橡胶基增强型热致形状记忆复合材料体系[J].石油勘探与开发,2016,43(6):1005-1013.
TONG Zheng, PEI Xiaohan, SHEN Zejun, et al. An enhanced thermo-actuated shape memory polymer composite coupled with elastomer [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6):1005-1013.
- [16] Baker Hughes,李世毅,唐山.形状记忆材料成就贝克休斯防砂系统[J].石油知识,2016(2):43.
Baker Hughes, LI Shiyi, TANG Shan. Shape memory material makes Baker Hughes sand control system [J]. Petroleum Knowledge, 2016(2):43.

(编辑 荐华)