

新型防漏水泥浆体系研制与性能评价

苑春洋^{1,2}

(1. 大庆钻探工程有限公司工程技术研究院, 黑龙江 大庆 163413; 2. 油气钻完井技术国家工程研究中心, 黑龙江 大庆 163413)

摘要: 针对固井过程中水泥浆漏失低返的技术难题, 本文以提高水泥浆自身防漏能力为出发点, 开展了新型防漏水泥浆体系的研究。首先研制了一套基于 API 失水仪改造的全密封式堵漏性能评价装置, 并建立了相应的评价方法。基于“刚性架桥、弹性填充、纤维网捕”的协同防漏机制, 通过系统筛选与正交试验, 优化研制出由刚性颗粒、温控可变形颗粒及复合纤维复配而成的新型堵漏材料 ZJY-1。室内评价表明: ZJY-1 与常规及抗高温水泥浆体系均具有良好的配伍性; 其在有效维持水泥浆流变性、游离液及抗压强度等关键工程性能的同时, 可将 1 mm 孔隙与裂缝的封堵承压能力提高至 7 MPa, 且稠化时间可通过缓凝剂进行灵活调控, 综合性能优于对比的商用材料。本研究为实现固井过程中的动态堵漏、简化固井工艺、提高复杂地层固井质量提供了有效的技术支持。

关键词: 固井水泥浆; 堵漏材料; 协同堵漏; 防漏水泥浆体系; ZJY-1; 承压能力; 可泵性

中图分类号: TE256; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)01-0073-06

Development and performance evaluation of a novel anti-leakage cement slurry system

YUAN Chunyang^{1,2}

(1. Engineering Technology Research Institute, Daqing Drilling Engineering Company Limited, Daqing Heilongjiang 163413, China; 2. National Engineering Research Center of Oil & Gas Drilling and Completion Technology, Daqing Heilongjiang 163413, China)

Abstract: To address the technical challenge of cement slurry lost circulation and low return during cementing operations, this study focuses on enhancing the self-sealing capability of the cement slurry itself. A novel anti-leakage cement slurry system was developed in this work. Initially, a fully sealed leakage evaluation apparatus was developed based on the modification of the API fluid loss tester, and a corresponding evaluation methodology was established. Guided by a synergistic anti-leakage mechanism of "rigid bridging, elastic filling, and fiber network capturing", a novel lost circulation material, ZJY-1, was optimized through systematic material selection and orthogonal experiments. ZJY-1 is a composite of rigid particles, temperature-sensitive deformable particles, and composite fibers. Laboratory evaluations demonstrate that ZJY-1 exhibits excellent compatibility with both conventional and high-temperature cement slurry systems. While effectively maintaining key engineering properties such as rheology, free fluid, and compressive strength of the set cement, this material enhances the sealing pressure-bearing capacity for 1 mm pores and fractures to 7 MPa. Its thickening time can be flexibly adjusted by using retarders, and its overall performance surpasses that of the commercial materials used for comparison. This research provides effective technical support for achieving dynamic leak sealing during cementing, simplifying the cementing process, and improving cementing quality in complex formations.

Key words: cementing slurry; plugging material; synergistic plugging; anti-leakage cement slurry system; ZJY-1; pressure bearing capacity; pumpability

收稿日期: 2025-07-31; 修回日期: 2025-10-04 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.01.011

作者简介: 苑春洋, 男, 汉族, 1992年生, 工程师, 石油工程专业, 主要从事固井外加剂的研发工作, 黑龙江省大庆市红岗区八百垅南路 37 号, yuanchunyang001@cnpc.com.cn。

引用格式: 苑春洋. 新型防漏水泥浆体系研制与性能评价[J]. 钻探工程, 2026, 53(1): 73-78.

YUAN Chunyang. Development and performance evaluation of a novel anti-leakage cement slurry system [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(1): 73-78.

0 引言

水泥浆漏失低返作为固井过程中长期存在且尚未完全解决的技术难题,严重影响了油田勘探开发战略的实施^[1]。目前,针对漏失地层通常采取固井前承压堵漏、低密度水泥浆固井及配套隔离液等技术措施,但实际固井质量仍不理想,漏失低返现象依然频发。近年来,国内外对水泥浆防漏材料的研究主要集中在纤维材料、温敏记忆材料和凝胶材料等方向^[2-4]。鉴于纤维水泥材料展现出的优异性能,纤维类防漏材料研究仍是重要发展趋势之一^[5]。同时,随着材料科学与工程技术的不断进步,新型高效防漏材料的开发与应用也将成为解决该问题的重要方向^[6]。在此背景下,本文从提高固井液体系自身防漏能力出发,系统研选多种堵漏材料,构建具有良好堵漏性能的水泥浆体系,以满足复杂地层条件下的现场施工要求^[7]。

1 水泥浆堵漏性能评价装置及评价方法

1.1 水泥浆堵漏性能评价装置

本文所选用的实验装置是在 API 水泥浆失水仪的基础上改造而成,如图 1 所示,采用上下 2 个浆筒卡套密封连接,是一种全密封型安全便捷的水泥浆堵漏性能评价装置^[8]。该评价装置具有以下优点:(1)漏失浆筒和积液罐密封连接,确保实验安全;(2)通过压力变化判断水泥浆漏失情况;(3)可模拟不同尺寸孔缝漏失地层,操作简单。

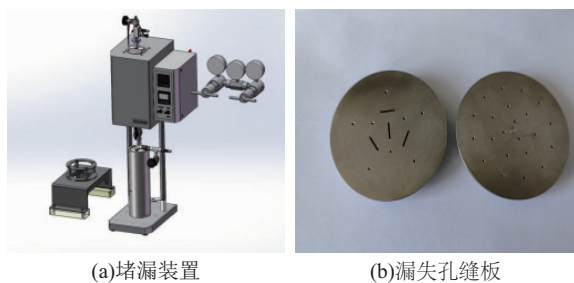


图 1 水泥浆堵漏实验装置

Fig.1 Diagram of the cement slurry leakage sealing experiment device

1.2 水泥浆堵漏性能评价方法

1.2.1 参考标准

水泥浆堵漏性能评价方法^[9]参考了石油天然气行业标准《钻井液用桥接堵漏材料室内试验方法》(SY/T 5840—2007)和 API 水泥浆性能测试规范。

1.2.2 水泥浆堵漏是否成功的判断依据

初始条件是低压管线压力表示数为 0 MPa,高压管线压力以 1 MPa/min 的速率升至 7 MPa。在高压管线压力增加的过程中,若低压管线压力表示数基本保持不变,则堵漏成功;若高压管线压力增加到某一值时,低压表示数迅速上升,且与高压管线压力一致,则堵漏失败。

1.2.3 判断水泥浆堵漏效果的评价指标

封堵层所能承受的最大压力越大,水泥浆的堵漏效果越好;相同承压条件下,漏失水泥浆的质量越小,水泥浆的堵漏效果越好;在承压和漏失水泥浆质量一致的情况下,封堵成功所持续的时间越长,水泥浆的堵漏效果越好^[10]。

2 固井用防漏材料研选

为满足更高标准的防漏堵漏需求,解决现有材料应用局限,新型堵漏材料的研发已成为行业发展趋势^[11],本文重点介绍 ZJY-1 新型堵漏材料。

2.1 研制 ZJY-1 的基本思路

ZJY-1 新型堵漏材料由刚性颗粒、温控可形变颗粒、纤维复合而成^[12],其堵漏机理如图 2 所示,刚性颗粒进入孔隙中迅速占位,进行架桥,提高封堵层的承压能力;温控可形变颗粒有一定韧性,能够适应不同形状和尺寸的孔隙或裂缝,具有架桥和填充的双重功效,在压差作用下进入孔缝,桥堵剩余孔隙;加入纤维后,水泥浆发生滤失时在滤饼上形成纤维网,能够阻止水泥浆进一步漏失,同时增强水泥石的韧性^[13]。

2.2 刚性颗粒研选

通过调研,选择耐高温、稳定性好的聚丙烯颗粒^[14]。刚性颗粒级配的主要目的是通过对原料粒度的合理配合,提高堵漏材料的密实度,提高堵漏的强度。根据缝宽,按照 1/3 架桥理论,确定目数分别为 30 目、40 目、50 目^[15],加量为 0.18%,评价 3 种粒径聚丙烯不同配比时的封堵效果(表 1),最优配比为 2:2:1。

2.3 温控可形变颗粒研选

对聚氨酯、聚乙烯醇、环氧树脂等封堵材料进行评价^[16],研选出可抗 180 °C 高温的温敏性高分子材料 DL-1。DL-1 在常温下是直径为 1 mm 左右的小颗粒(图 3a),便于混配、泵送,达到温敏点(50 °C)后,形状恢复为初始的长方体网状结构(图

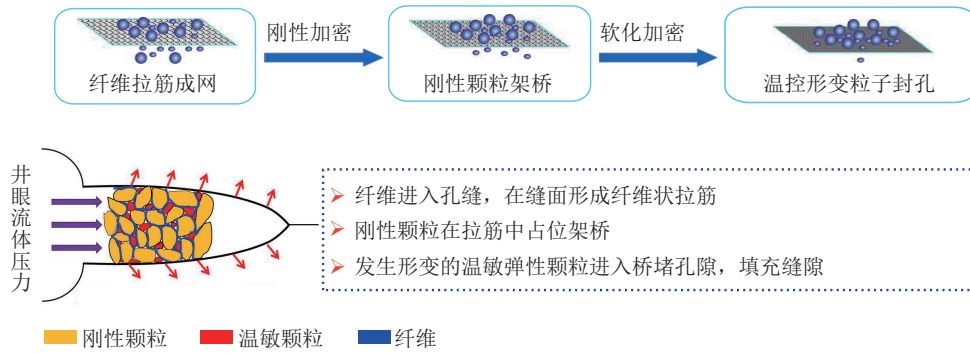


图2 研制ZJY-1基本思路

Fig.2 Basic concept diagram for the development of ZJY-1

表1 刚性架桥颗粒配比优选

Table 1 Optimization of rigid frame bridge granules

序号	缝宽/mm	30目:40目:50目	出液量/g
1	1	0:0:0	完全漏失
2	1	1:1:1	100
3	1	2:1:1	50
4	1	2:2:1	45
5	1	2:2:3	110
6	1	2:3:1	50
7	1	2:3:2	60
8	1	3:1:1	150
9	1	1:1:0	200
10	1	0:1:1	70
11	1	1:0:1	80

3b),结合水泥浆封堵漏失层,效果显著^[17]。



(a)常温时状态 (b)达到温敏点后状态

图3 DL-1状态

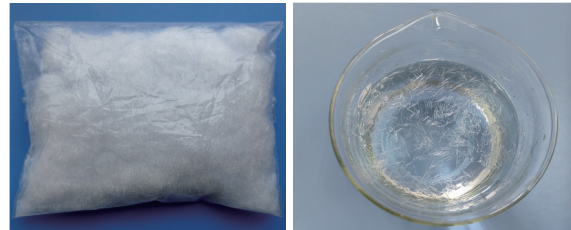
Fig.3 Status of DL-1

2.4 纤维材料研选

纤维材料可在水泥浆中良好分散,对于渗透型地层可起到良好的堵漏效果。纤维材料与水泥浆混合后形成“滤网结构”,进入漏层后,以水泥颗粒为节点的网状聚集体可增加水泥浆的流动阻力,阻止水泥浆向地层中漏失^[18]。

通过调研和大量实验,最终选择分散性良好、

可抗高温、长度为5 mm的复合纤维(图4),该复合纤维由碳纤维、聚丙烯纤维等构成。



(a)复合纤维 (b)在水中的分散效果

图4 复合纤维及其在水中的分散效果

Fig.4 Composite fibers and the dispersion effect in water

2.5 ZJY-1配方的确定

将刚性颗粒、复合纤维和温控可形变颗粒按一定比例复配,设计正交试验(表2),通过极差分析和方差分析,确定各组分影响的主次顺序。结果表明,当3组分比值为3:1:3时(即第4组),水泥浆的堵漏效果最优^[19]。

表2 ZJY-1正交试验数据

Table 2 ZJY-1 orthogonal experiment data

序号	刚性颗粒/%	复合纤维/%	温控可形变颗粒/%	出液量/g
1	0.1875	0.125	0.375	135
2	0.1875	0.25	0.75	80
3	0.1875	0.5	1.5	45
4	0.375	0.125	0.375	40
5	0.375	0.25	0.75	60
6	0.375	0.5	1.5	102
7	0.75	0.125	0.375	85
8	0.75	0.25	0.75	70
9	0.75	0.5	1.5	80

3 ZJY-1防漏水泥浆体系

防漏水泥浆是在水泥浆中加入一定量的封堵材料,提高水泥浆对漏层的封堵能力。对于固井前已发生过漏失的井,在水泥浆中加入堵漏材料,可降低水泥浆漏失的风险;对于固井前未发生过漏失、密度窗口窄的井,在水泥浆中加入堵漏材料,可增强水泥浆的抗漏失能力,从而允许使用更高密度的水泥浆进行固井,有效封漏并保证环空水泥浆柱的静液压力,提高固井质量^[20]。

实验选取了DSJ和DHL 2套体系开展ZJY-1对水泥浆性能影响评价实验^[21]。DSJ水泥浆体系基本配方:大连G级水泥+降失水剂+缓凝剂+清水,DHL水泥浆体系基本配方:大连G级水泥+抗高温降失水剂+抗高温缓凝剂+清水。

3.1 ZJY-1对水泥浆稠化时间的影响

在不同温度、不同ZJY-1加量条件下,研究新型封堵材料ZJY-1对水泥浆稠化时间的影响规律,稠化曲线如图5所示,实验数据见表3。

由表3可知:加入ZJY-1后,水泥浆的稠化时间普遍缩短,随着ZJY-1加量的增加,稠化时间缩短的幅度越来越小;在ZJY-1加量不变的前提下,增加缓凝剂的加量可延长稠化时间,且对水泥浆的其他性能无影响,可满足现场施工对稠化时间的要求。

3.2 ZJY-1对水泥浆其他性能的影响

评价了ZJY-1对水泥浆的抗压强度、游离液、

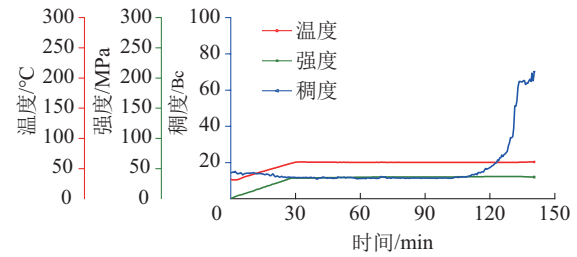


图5 ZJY-1稠化曲线

Fig.5 ZJY-1 thickening curve diagram

表3 ZJY-1对水泥浆稠化时间的影响实验结果

Table 3 Experimental results on the effect of ZJY-1 on the thickening time of cement paste

序号	实验温度/°C	基浆	ZJY-1加量/%	稠化时间/min
1			0	125
2	90	DSJ	0.6	80
3				135
4				1.2
5	90	DHL	0.6	152
6				113
7				1.2
8	110	DSJ	0.6	133
9				100
10				1.2

注:序号3实验在序号2基础上额外添加0.02%缓凝剂。

滤失量、沉降稳定性、流动度等的影响,实验数据如表4所示。

表4 ZJY-1对不同水泥浆体系其他性能的影响

Table 4 Effect of ZJY-1 on other properties of different cement slurry

序号	实验温度/°C	基浆	ZJY-1加量/%	API滤失量/[mL·(30 min) ⁻¹]	抗压强度/MPa	沉降稳定性/(g·cm ⁻³)	游离液/mL	流动度/cm
1			0	27	20	0.012	0	25
2	90	DSJ	0.6	27	21.2	0.017	0	24
3				28	22.1	0.019	0	24
4				30	22.3	0.013	0	25
5	90	DHL	0.6	31	24.2	0.013	0	24
6				30	23.7	0.019	0	23
7				33	20.5	0.014	0	24
8	110	DSJ	0.6	34	23.4	0.017	0	23
9				34	24.1	0.018	0	22

由表4可得出以下结论:加入ZJY-1封堵材料对水泥浆的游离液没有影响,可以提高水泥石的抗压强度,水泥浆的沉降稳定性良好,上下密度差均

小于0.02 g/cm³,水泥浆的流动状态良好,可以满足现场施工要求。

3.3 ZJY-1水泥浆堵漏能力评价

在基浆中加入研制的ZJY-1封堵材料形成防漏水泥浆体系,进行防漏能力评价,对1 mm孔隙与裂缝的堵漏效果见图6、表5。为突出ZJY-1的综合性能优势,同步开展了与现有商用堵漏材料的对比实验。结果表明,在相同条件下,ZJY-1表现出更优的封堵效率和抗压能力,有效提升了水泥浆体系的堵漏性能。

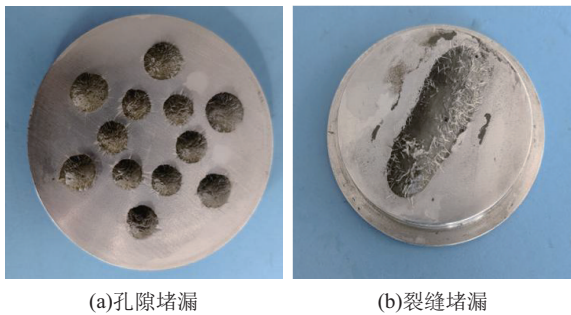


图6 堵漏效果

Fig.6 Sealing effect

表5 ZJY-1水泥浆的堵漏能力实验数据

Table 5 Experimental results of the leak sealing capacity of ZJY-1 cement slurry

配方编号	水泥浆密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙类别	ZJY-1加量/%	总漏失量/g	承压能力/MPa	流动度/cm
1	1.65	孔隙	0.5	110	3	25
2		孔隙	0.6	95	3.5	25
3		孔隙	0.8	50	≥7	24
4		孔隙	1.0	49	≥7	23
5		裂缝	0.5	140	2	25
6	1.92	裂缝	0.6	105	3.3	25
7		裂缝	1.0	55	≥7	24
8		裂缝	1.3	52	≥7	22
9		孔隙	0.5	103	3.5	24
10		孔隙	0.6	84	5	24
11		孔隙	0.75	45	≥7	23
12		孔隙	1.0	43	≥7	23
13		裂缝	0.5	132	2.5	24
14		裂缝	0.6	89	4	23
15		裂缝	0.95	57	≥7	23
16		裂缝	1.2	55	≥7	22

由表5可知,ZJY-1防漏水泥浆体系的堵漏能力与承压强度(最高承压7 MPa,可有效封堵1 mm

孔隙与裂缝)随材料加量增加而提升,且增长趋势在加量达到一定阈值后趋于平缓,表明存在经济最优加量。综合评估,该材料不仅性能优异,更具备显著的成本效益与良好的环境适应性,其配方与现场工艺兼容性好,具备大规模推广的前景。

4 结论与认识

(1)本研究研发了一套全密封型安全便捷的防漏水泥浆性能评价装置,并制定了评价方法。

(2)本研究研选出纤维、刚性颗粒、温控可形变材料3种材料,并按一定比例复配形成新型堵漏材料ZJY-1。

(3)研制的防漏水泥浆体系的稠化时间、抗压强度等性能指标均满足现场施工要求,可有效封堵1 mm孔隙和裂缝,承压达7 MPa。

参考文献(References):

[1] 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.
ZOU Jianlong, QU Jiansheng, LV Guangming, et al. Laboratory evaluation of fiber cement in resuming lost circulation [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2007, 24(2): 42-44.

[2] 崔曦月,谭慧静,陈瑶,等.PVA改性PLA纤维复合地热暂堵水泥的研制及性能表征[J].钻探工程,2025,52(2):125-133.
CUI Xiyue, TAN Huijing, CHEN Yao, et al. Development and performance characterization of PVA modified PLA fiber composite geothermal temporary sealing cement [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2): 125-133.

[3] 高元,李小江,刘仍光.超高温井固井水泥浆体系研究与应用[J].钻探工程,2025,52(1):109-114.
GAO Yuan, LI Xiaojiang, LIU Rengguang. Study on cement slurry system in ultra-high temperature well [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 109-114.

[4] 陈家旭.高效纤维防漏堵漏技术实验研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2019.
CHEN Jiaxu. The experimental study on efficient fiber-based preventive and curing lost circulation technology [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.

[5] 陈瑶,谭慧静,王胜,等.地热井固井中硅酸盐水泥体系的技术现状及发展趋势[J].钻探工程,2025,52(3):1-11.
CHEN Yao, TAN Huijing, WANG Sheng, et al. Technical status and trends of Portland cement system in geothermal well cementing [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3): 1-11.

[6] 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.

[7] 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.
- [8] 陈欣彤,杨远光,庞茂安,等.一种新型水泥浆防漏评价装置:CN201821117637.9[P].2018-07-16.
- CHEN Xintong, YANG Yuanguang, Pang Maoan, et al. A novel evaluation device for cement slurry leakage prevention: CN201821117637.9[P].2018-07-16.
- [9] 杨远光,付家文,袁彬,等.一种模拟孔缝漏失的固井水泥浆防漏性能评价装置及方法:CN201711362544.2[P].2017-12-18.
- YANG Yuanguang, FU Jiawen, YUAN Bin, et al. A device and method for evaluating the leakage prevention performance of cement slurry in simulating loss of circulation through perforations: CN201711362544.2[P].2017-12-18.
- [10] 庞茂安.适用于孔缝漏失地层防漏水泥浆体系研究[D].成都:西南石油大学,2018.
- PANG Maoan. Study on antileakage cement slurry for porosity-fracture type leak formation[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [11] 闫晶,张坤,郭栋,等.弹性体型胶粘材料在大庆油田裂缝性漏失中的应用研究[J].钻探工程,2024,51(2):133-139.
- YAN Jing, ZHANG Kun, GUO Dong, et al. Application of elastic adhesive material in drilling fluid plugging of fractured formation in Daqing Oilfield[J]. Drilling Engineering, 2024,51(2):133-139.
- [12] 刘慧婷,刘硕琼,齐奉忠.紧密堆积优化固井水泥浆体系研究进展[J].硅酸盐通报,2014,33(9):2269-2274,2279.
- LIU Huiting, LIU Shuoqiong, QI Fengzhong. Research progress of cement slurry system optimized by dense packing theory [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(9): 2269-2274,2279.
- [13] 高元,杨广国,彭金龙,等.一种基于温敏记忆聚合物的固井防漏堵漏水泥浆体系及其制法和应用:CN202011099856.0[P].2020-10-14.
- GAO Yuan, YANG Guangguo, PENG Jinlong, et al. A cementing anti-leakage and plugging cement slurry system based on temperature-sensitive memory polymer and its preparation method and application: CN202011099856.0[P].2020-10-14.
- [14] 董洪栋.松科2井抗高温随钻堵漏材料优选及封堵效果评价[D].成都:成都理工大学,2017.
- DONG Hongdong. Selection of high temperature resistant plugging material and its plugging effect evaluation for SK2[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [15] 张凤英,鄢捷年,李志勇.钻井过程中暂堵剂颗粒尺寸优选研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(3):130-132.
- ZHANG Fengying, YAN Jienian, LI Zhiyong. The application of optimizing particle size of grain blocking agents in the drilling process[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011,33(3):130-132.
- [16] 于小龙.新型复合堵漏材料的研制及效果评价[J].油气田地面工程,2015(1):89-90.
- YU Xiaolong. Development and performance evaluation of new composite sealing materials[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2015(1):89-90.
- [17] 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, 2016,42(20):4-8.
- [18] 杨铁柱.纤维堵漏固井技术研究[J].石化技术,2022,29(9):101-103.
- YANG Tiezhu. Study on fiber plugging and cementing technology [J]. Petrochemical Industry Technology, 2022, 29(9): 101-103.
- [19] 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.
- LV Bin, HOU Liwei, WANG Kecheng. Indoor study of a new type of pressurized sealant cement slurry system [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2011,28(4):51-53.
- [20] 刘学鹏.温敏堵漏水泥浆体系研究与应用[J].石化技术,2022,49(2):110-116.
- LIU Xuepeng. Research and application of temperature-sensitive plugging cement slurry system [J]. Petrochemical Technology, 2022,49(2):110-116.
- [21] 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 of Water-Resistant cement grout systems [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2012,29(1):60-62.

(编辑 王跃伟)