

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2020084

多尺度纤维韧性水泥浆体系研究与应用

邹双^{1,2,3}, 冯明慧^{1,2,3}, 张天意^{1,2,3}, 邹建龙^{1,2,3}, 曾建国^{1,2,3}, 赵宝辉^{1,2,3}

(1. 天津中油渤星工程科技有限公司, 天津 300451; 2. CNPC 钻井工程重点实验室固井技术研究室, 天津 300451; 3. 油气钻井技术国家工程实验室固井技术研究室, 天津 300451)

摘要: 针对油井水泥石脆性大、抗拉强度低、抗冲击和抗破裂性能差等问题, 优选了3种不同尺度的无机纤维, 并通过正交试验进行复配, 形成了多尺度纤维增韧剂 BCE-230S。考察了 BCE-230S 加量对水泥浆性能及对应水泥石力学性能的影响, 确定了其最佳加量, 形成了多尺度纤维韧性水泥浆体系。性能评价试验结果显示, 与普通水泥石相比, 多尺度纤维韧性水泥石的劈裂抗拉强度、抗压强度及抗冲击功显著提高, 杨氏模量显著下降, 且水泥浆性能良好。多尺度纤维韧性水泥浆体系在冀东油田低渗透油藏应用了10余井次, 2个胶结面的胶结质量较邻井显著提高, 后期压裂顺利, 试油未见层间窜流。研究结果表明, 多尺度纤维韧性水泥浆体系能够解决油井水泥石易脆裂的问题, 可以保障井筒密封完整性和固井长期封固质量, 具有广泛的应用前景。

关键词: 低渗透油气藏; 固井; 多尺度纤维; 增韧剂; 水泥浆; 力学性能

中图分类号: TE256⁺.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2020)06-0040-07

Research and Application of Tough Cement Slurry Systems with Multi-Scale Fiber

ZOU Shuang^{1,2,3}, FENG Minghui^{1,2,3}, ZHANG Tianyi^{1,2,3}, ZOU Jianlong^{1,2,3}, ZENG Jianguo^{1,2,3}, ZHAO Baohui^{1,2,3}

(1. CNPC Tianjin Boxing Engineering Science & Technology Co., Ltd., Tianjin, 300451, China; 2. Laboratory of Cementing Technology, CNPC Key Laboratory of Drilling Engineering, Tianjin, 300451, China; 3. Laboratory of Cementing Technology, National Engineering Laboratory of Petroleum Drilling Technology, Tianjin, 300451, China)

Abstract: To solve the problems of high brittleness, low tensile strength, poor impact resistance and fracture resistance of the cement stone in oil wells, a multi-scale fiber toughener BCE-230S was formed by selecting inorganic fibers in three different scales and conducting orthogonal tests for compound. In addition, the effects of the dosage of BCE-230S on the construction performance of cement slurry and the mechanical properties of cement were investigated, the optimal dosage was determined, by which a tough cement slurry system with multi-scale fiber was formed. The results showed that the splitting tensile strength, compressive strength and impact resistance of the cement stone were significantly improved when compared with common cement. Young's modulus decreased significantly and the construction performance was ideal. The tough cement slurry system with multi-scale fiber was applied in the low permeability reservoir in the Jidong Oilfield for more than 10 times in the well, and the cementing quality of the two cementing surfaces was measurably improved compared with that of adjacent wells. Fracturing in later stage was successful, and no fluid channeling was observed during well testing. The results indicated that the tough cement slurry system with multi-scale fiber can effectively solve the problem of brittleness of cement stone in oil well, so as to ensure the integrity of the wellbore and the long-term cementing quality, with a potential for wide application.

Key words: low permeability reservoir; cementing; multi-scale fiber; toughener; cement slurry; mechanical property

水泥环具有长久有效的层间封隔能力是实现油气田开发增产的前提, 是油气井长寿命开采的保障^[1-2]。然而, 固井水泥石属于有先天微观缺陷的脆性材料, 存在形变能力差、抗拉强度低、抗冲击和抗破裂性能差等固有缺陷^[3-6], 在后续施工(如试压、射孔、压裂及开采等)过程中, 受温度压力变化、冲击和震动等因素影响, 易发生破裂, 导致水泥

环的力学完整性受到破坏, 轻则造成环空带压、油

收稿日期: 2020-01-08; 改回日期: 2020-06-12。

作者简介: 邹双(1989—), 男, 江西丰城人, 2012年毕业于南昌大学高分子材料科学与工程专业, 2015年获天津大学材料学专业硕士学位, 工程师, 现从事油井水泥外加剂的研究工作。E-mail: zoush01@cnpc.com.cn。

基金项目: 国家重点研发计划项目“固井工程用高耐蚀高韧性水泥基材料的研究与应用”(编号: 2016YFB0303602)部分研究内容。

气水窜,重则导致油气井报废^[7-9]。因此,对油井水泥浆进行优化,改善对应水泥石的力学性能显得尤为重要。

水泥基材料是一种多相复合材料^[10],在不同尺度上具有不同的微观结构,这些微观结构又直接影响其宏观力学性能。研究发现,水泥基材料的破坏多是内部裂纹逐步发展,扩张为宏观裂缝,进而导致其失效的过程^[11-12]。目前,在固井设计和施工时,多采用纤维来改善水泥石的力学性能^[13-15]。纤维可在水泥石基体间起到“搭桥”作用,以“拉筋”的作用方式来改善油井水泥石的力学性能。水泥浆中常用的纤维材料包括无机纤维(如玻璃纤维、碳纤维等)、合成纤维(如聚酯、聚丙烯等纤维)和植物纤维(如竹、麻等纤维)。然而,这些纤维存在以下缺陷:1)密度较低,混浆后分散困难,易悬浮于浆体表面;2)表面疏水、润湿性能差,混浆时易团聚,泵送时易阻塞管线,造成憋泵,影响施工安全^[16-18]。同时,大多数研究都是从单一尺度纤维入手,并未进行基体

材料的多尺度特性研究,实现不同尺度纤维的协同增韧效果^[11-12]。

针对上述问题,笔者优选了 3 种尺度拉伸模量高、拉伸强度高且分散性好的无机纤维进行复配,形成了油井水泥用多尺度纤维增韧剂 BCE-230S,并以该增韧剂为基础配制了多尺度纤维增韧水泥浆。该水泥浆较单一尺度纤维水泥浆具有明显的协同增韧效果,且不影响施工安全性。目前该水泥浆已在冀东油田储层低渗透压裂井中累计应用 10 余井次,应用效果显著。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料及仪器

试验材料:G 级油井水泥,分散剂 CF40S,缓凝剂 BXR-200L,降滤失剂 BCG-200L,消泡剂 G603(天津中油渤星工程科技有限公司);3 种无机纤维,其基本物性参数见表 1。

表 1 无机纤维的基本物性参数
Table 1 Basic parameters of inorganic fibers

纤维种类	级别	主要成分	长度/ μm	直径/ μm	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	拉伸强度/GPa	拉伸模量/GPa
纤维A	纳米级	碳化硅、氧化铁	50~100	0.1~0.6	3.21	10.0	550
纤维B	微米级	氧化硅、氧化钙	20~90	1.0~5.0	2.80	20.0	180
纤维C	毫米级	氧化镁、氧化铝	2 000~3 000	7.0~30.0	2.80	3.5	100

试验仪器:水浴箱,六速旋转黏度计,YJ-2001 型匀加荷压力试验机,OWC-9350A 常压稠化仪,8040D 增压稠化仪,XJJY-5C 简支梁冲击试验机,TAW-2000 型三轴岩石力学试验机。

1.2 测试方法及试样尺寸

参照国家标准《油井水泥试验方法》(GB/T 19139—2012),对水泥浆进行配制、养护和测试,其中,无机纤维采用干混配料,养护条件为 80 ℃×7 d。

采用匀加荷压力试验机测定水泥石的抗压强度,试样为正方体,尺寸为 50.8 mm×50.8 mm×50.8 mm;采用三轴力学试验机测定水泥石的杨氏模量,试样为圆柱体,尺寸为 $\phi 25.0\text{ mm}\times 50.0\text{ mm}$,围压为 0;采用简支梁冲击试验机测定水泥石的抗冲击功,试样为长方体,尺寸为 120.0 mm×15.0 mm×10.0 mm;采用巴西劈裂试验测定水泥石的劈裂抗拉强度,试样为圆柱体,尺寸为 $\phi 25.0\text{ mm}\times 10.0\text{ mm}$ 。

2 多尺度纤维增韧剂 BCE-230S 的制备

目前常用的增韧剂在降低水泥石杨氏模量的同时,会大幅降低水泥石的抗压强度。为了评价增韧剂对水泥石抗压强度和杨氏模量的综合影响,定义了抗压强度与杨氏模量比这一测试指标。该指标值越大,说明水泥石不仅具有较高的抗压强度,还具有较低的杨氏模量,即增韧剂的增韧效果更佳。

首先配制了水泥浆基浆,配方为 100.0 g 胜潍 G 级水泥+3.5 g 降滤失剂 BCG-200L+40.5 g 水;然后将基浆在 80 ℃ 下养护 7 d 后,得到水泥石空白样,其抗压强度为 45.3 MPa,杨氏模量为 9.06 GPa,抗拉强度为 1.81 MPa,抗冲击功为 1.75 kJ/m²。

2.1 纤维的基本性能

将 3 种无机纤维(记为纤维 A、纤维 B 和纤维 C)加入到水泥浆基浆中,评价其对水泥石力学性能

的影响,结果见表2。评价结果表明:纤维A在提高水泥石抗冲击功和抗压强度方面具有较大优势,最佳加量为1.0%;纤维B在降低水泥石杨氏模量方面

具有较大优势,最佳加量为5.0%;纤维C在提高水泥石抗拉强度和抗冲击功方面具有较大优势,最佳加量为1.0%。

表2 3种纤维对水泥石力学性能的影响

Table 2 Effects of three kinds of fibers on mechanical properties of cement

纤维种类	最佳加量, %	抗拉强度提高程度, %	抗冲击功提高程度, %	抗压强度提高程度, %	杨氏模量下降程度, %	抗压强度/杨氏模量提高程度, %
纤维A	1.0	11.71	20.47	7.14	8.71	17.28
纤维B	5.0	17.14	17.29	2.06	16.90	22.87
纤维C	1.0	24.76	20.51	4.28	10.83	16.87

2.2 3种纤维的配比研究

2.2.1 正交试验

为了提高不同尺度纤维的协同增韧效果,以3种纤维为因素,纤维的配比为水平,以3种纤维各自最佳加量为中心,上下浮动0.5%进行配比,以水泥石养护7d后的抗拉强度提高程度、抗冲击功提高程度及抗压强度与杨氏模量比值的提高程度为考察指标,设计了3因素3水平的正交试验方案(见表3),通过正交试验确定3种纤维的最佳配比。水泥浆配方为水泥浆基浆+5.0%无机纤维,其中,3种纤维按设计方案配比搅拌均匀形成多尺度纤维,再取加入5.0%多尺度纤维的水泥石进行测试,养护条件为80℃。

表3 正交试验设计方案及结果

Table 3 Design scheme and results of the orthogonal test

序号	纤维A加量, %	纤维B加量, %	纤维C加量, %	抗拉强度提高程度, %	抗冲击功提高程度, %	抗压强度/杨氏模量提高程度, %
1	0.5	4.5	0.5	15.51	19.33	14.23
2	0.5	5.0	1.0	22.35	22.46	21.21
3	0.5	5.5	1.5	17.55	24.16	18.36
4	1.0	4.5	1.0	21.07	22.36	19.21
5	1.0	5.0	1.5	15.55	24.27	21.49
6	1.0	5.5	0.5	13.17	19.78	18.16
7	1.5	4.5	1.5	14.22	23.65	17.15
8	1.5	5.0	0.5	13.29	19.26	20.44
9	1.5	5.5	1.0	23.16	22.21	19.11

不同方案的试验结果见表4—表6。

从表4可以看出:从水泥石的抗拉强度提高程度来看,纤维C的极差R为8.20,远大于纤维A和纤维B的极差R,说明纤维C对水泥石抗拉强度提高的影响远大于纤维A和纤维B。为使水泥石的抗

表4 抗拉强度极差分析

Table 4 Range analysis of tensile strength

因素	抗拉强度提高程度, %			极差R	最优方案
	K ₁	K ₂	K ₃		
纤维A	18.47	16.60	16.89	1.87	A1
纤维B	16.93	17.06	17.96	1.03	B3
纤维C	13.99	22.19	15.77	8.20	C2

表5 抗冲击功极差分析

Table 5 Range analysis of impact resistance

因素	抗冲击功提高程度, %			极差R	最优方案
	K ₁	K ₂	K ₃		
纤维A	21.98	22.14	21.71	0.43	A2
纤维B	21.78	22.00	22.05	0.27	B3
纤维C	19.46	22.34	24.03	4.57	C3

表6 抗压强度/杨氏模量极差分析

Table 6 Range analysis of compressive strength/Young's modulus

因素	抗压强度/杨氏模量提高程度, %			极差R	最优方案
	K ₁	K ₂	K ₃		
纤维A	17.93	19.62	18.90	1.69	A2
纤维B	16.86	21.05	18.54	4.18	B2
纤维C	17.61	19.84	19.00	2.23	C2

拉强度提高程度最大,3种纤维的最优配比方案为A1B3C2,即纤维A:纤维B:纤维C=1:11:2。

从表5可以看出:从水泥石的抗冲击功提高程度来看,纤维C的极差R为4.57,大于纤维A和纤维B的极差R,说明纤维C对水泥石抗冲击功的影响大于纤维A和纤维B。为使水泥石的抗冲击功提高程度最大,3种纤维的最优配比方案为A2B3C3,

即纤维 A:纤维 B:纤维 C=2:11:3。

从表 6 可以看出:从水泥石抗压强度与杨氏模量比值的提高程度来看,纤维 B 的极差 R 为 4.18,大于纤维 C 和纤维 A 的极差 R ,说明纤维 B 对水泥石抗压强度与杨氏模量比值的影响较大。为使水泥石的抗压强度提高程度更大,杨氏模量降低程度更大,即水泥石抗压强度与杨氏模量的比值最大,3 种纤维的最优配比方案为 A2B2C2,即纤维 A:纤维 B:纤维 C=1:5:1。

2.2.2 最优配比

水泥浆配方为水泥浆基浆+5.0% 无机纤维,3 种

配比方案的水泥石在 80 ℃ 条件下养护 7 d 后测其力学性能,结果如表 7 所示。从表 7 可以看出:配比方案 1,水泥石抗拉强度的提高程度最大,但抗冲击功及抗压强度与杨氏模量比值的提高程度相对较小;配比方案 2,水泥石抗冲击功的提高程度最大,但抗拉强度及抗压强度与杨氏模量比值的提高程度相对较小;配比方案 3,水泥石各项力学性能的提高程度较为均衡,均能提高 20% 以上。综合考虑,确定配比方案 3 为最优配比,即纤维 A:纤维 B:纤维 C=1:5:1,3 种纤维按该配比复配,制备得到多尺度纤维增韧剂 BCE-230S。

表 7 不同配比方案下的水泥石力学性能试验结果

Table 7 Experimental results of mechanical properties of cement with different proportion schemes

配比方案	纤维配比	抗拉强度提高程度, %	抗冲击功提高程度, %	抗压强度/杨氏模量提高程度, %
1	纤维A:纤维B:纤维C=1:11:2	24.33	19.77	19.23
2	纤维A:纤维B:纤维C=2:11:3	18.39	23.37	17.05
3	纤维A:纤维B:纤维C=1:5:1	23.17	22.57	22.71

3 BCE-230S 加量对水泥浆及水泥石性能的影响

以多尺度纤维增韧剂 BCE-230S 为主剂,优选配套的缓凝剂、降滤失剂等处理剂,初步形成了多尺度纤维韧性水泥浆体系,配方为水泥浆基浆+0.1 g 缓凝剂 BXR-200L+增韧剂 BCE-230S。为使多尺寸纤维韧性水泥浆体系的性能达到最优,综合考察了增韧剂 BCE-230S 的加量对水泥浆性能(流变性能、稠化性能和滤失性能等)和对应水泥石力学性能(抗压强度、抗冲击功、抗拉强度和杨氏模量等)的影响,流变试验温度为 25 ℃,稠化试验条件为 80 ℃×40 MPa×40 min,滤失量试验条件为 80 ℃×6.9 MPa,水泥石养护条件为 80 ℃×21 MPa。

3.1 BCE-230S 加量对水泥浆性能的影响

3.1.1 水泥浆流变性能

采用六速旋转黏度计,测试了 BCE-230S 的加量对水泥浆流变性能的影响,结果见表 8。从表 8 可以看出,随着 BCE-230S 的加量增大,水泥浆稠度随之增大;BCE-230S 加量为 7.0% 时,六速旋转黏度计 300 r/min 转速下的读数为 290,即将达到仪器测量读数上限 300,说明此时水泥浆稠度相对较高,不宜继续增大 BCE-230S 的加量。

3.1.2 水泥浆滤失及稠化性能

考察了 BCE-230S 的加量对水泥浆滤失及稠化

表 8 BCE-230S 加量对水泥浆流变性能的影响

Table 8 Effect of BCE-230S dosage on rheological properties of cement slurry

BCE-230S加量, %	六速旋转黏度计读数				
	φ3	φ6	φ100	φ200	φ300
0	3	5	58	105	148
3.0	5	8	63	121	182
5.0	7	13	92	151	209
7.0	7	13	129	216	290

性能的影响,结果见表 9;BCE-230S 加量为 5.0% 时的水泥浆稠化曲线如图 1 所示。由表 9 可知,随着 BCE-230S 的加量增大,水泥浆的 API 滤失量相差不大,说明 BCE-230S 对水泥浆的滤失性能无不利影响。由表 9 和图 1 可知,随着 BCE-230S 的加量增大,水泥浆的稠化时间基本不变,说明 BCE-230S 对水泥浆的稠化时间基本无影响;且稠化曲线未出现“鼓包”和“包心”等异常现象,说明 BCE-230S 对水

表 9 BCE-230S 加量对水泥浆滤失量及稠化性能的影响

Table 9 Effect of BCE-230S dosage on fluid loss and the thickening properties of cement slurry

BCE-230S加量, %	稠化时间/min	API滤失量/mL
0	175	46
3.0	176	44
5.0	167	46
7.0	173	44

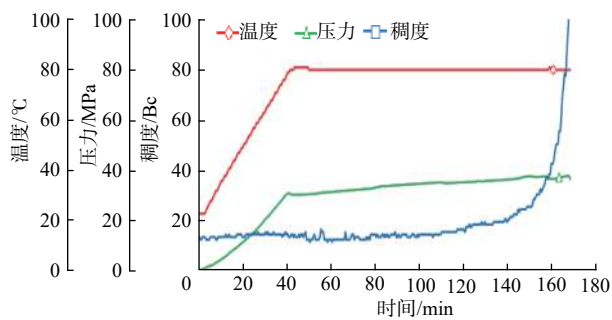


图1 BCE-230S加量为5.0%时的水泥浆稠化曲线

Fig.1 Cement slurry thickening curve when the BCE-230S dosage is 5.0%

泥浆的稠化性能无不利影响。

以上研究结果表明,增稠剂BCE-230S对水泥浆性能无明显不利影响,满足现场施工要求,但考虑水泥浆的流变性能,其加量不宜超过7.0%。

3.2 BCE-230S加量对水泥石力学性能的影响

3.2.1 水泥石的抗拉强度

通过巴西劈裂试验,考察了BCE-230S加量对水泥石抗拉强度的影响,结果如图2所示。由图2可知,水泥石的抗拉强度随着养护时间增长而增大,随着BCE-230S加量增大而增大。养护时间为7 d、BCE-230S加量为5.0%时,水泥石的抗拉强度相对于空白样提高了23.2%;BCE-230S加量为7.0%时,其抗拉强度相对于空白样提高了24.4%。

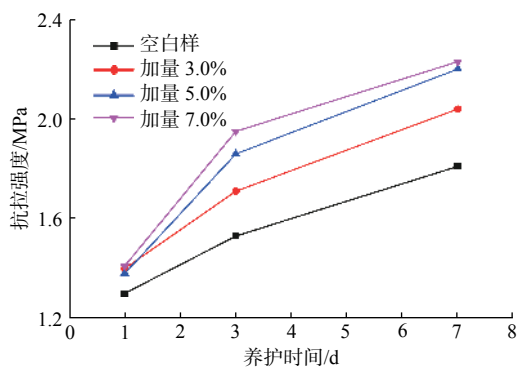


图2 BCE-230S加量对水泥石抗拉强度的影响

Fig.2 Effect of BCE-230S dosage on the tensile strength of cement

3.2.2 水泥石的抗冲击功性能

采用简支梁冲击试验机,考察了BCE-230S加量对水泥石抗冲击功的影响,结果如图3所示。由图3可知,随着BCE-230S加量增大,水泥石的抗冲击功能力呈现逐渐增强的趋势。养护7 d条件下,BCE-230S加量为5.0%时,水泥石的抗冲击功能力与空白样相比提高了22.6%;BCE-230S加量为

7.0%时,水泥石的抗冲击功能力与空白样相比提高了26.2%。

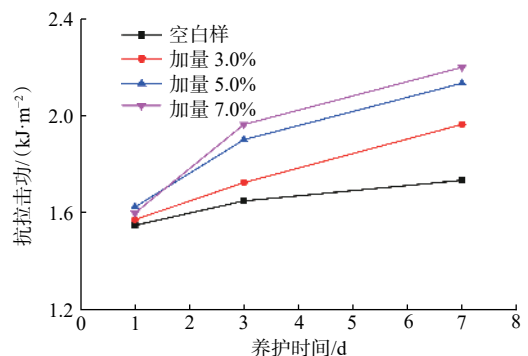


图3 BCE-230S加量对水泥石抗冲击功的影响

Fig.3 Effect of BCE-230S dosage on the impact resistance of cement

3.2.3 水泥石的抗压强度

BCE-230S加量对水泥石抗压强度的影响如图4所示。从图4可以看出,养护时间为1 d时,水泥石的抗压强度基本不变;养护时间为7 d时,随着BCE-230S加量增大,水泥石强度呈逐渐增高的趋势。BCE-230S加量为5.0%时,水泥石的抗压强度相对于空白样提高了2.4%;BCE-230S加量为7.0%时,水泥石的抗压强度相对于空白样提高了3.3%。

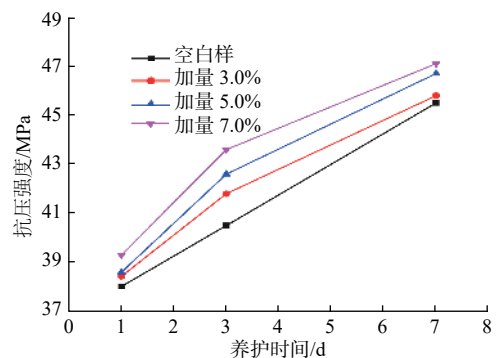


图4 BCE-230S加量对水泥石抗压强度的影响

Fig.4 Effect of BCE-230S dosage on the compressive strength of cement

3.2.4 水泥石的杨氏模量

BCE-230S加量对水泥石杨氏模量的影响如图5所示。从图5可以看出,加入BCE-230S水泥石的杨氏模量与空白样相比均呈下降趋势,且随着BCE-230S的加量增大,水泥石的杨氏模量呈逐渐降低的变化趋势。养护时间为7 d、BCE-230S加量为5.0%时,水泥石的杨氏模量为7.56 GPa,相对于空白样下降16.5%;BCE-230S加量为7.0%时,水泥石的杨氏模量为7.33 GPa,相对于空白样下降19.2%。

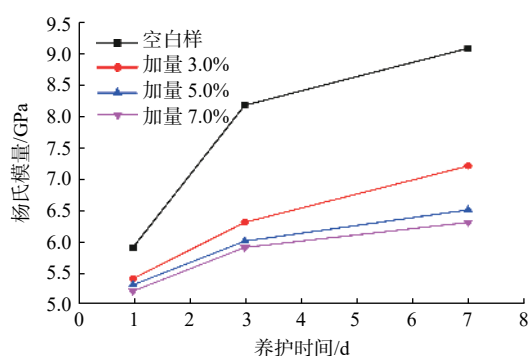


图 5 BCE-230S 加量对水泥杨氏模量的影响

Fig.5 The effect of BCE-230S dosage on Young's modulus of cement

综合考虑水泥浆体系性能和对应水泥石的力学性能,确定 BCE-230S 的最佳加量为 5.0%。最终得到的多尺度纤维韧性水泥浆体系的配方为:胜潍 G 级水泥+3.5% 降滤失剂 BCG-200L+0.1% 缓凝剂 BXR-200L+5.0% 增韧剂 BCE-230S+42.5% 水。

4 现场应用

多尺度纤维韧性水泥浆体系已在冀东油田南堡、高尚堡等低渗透储层区块应用 10 余井次,固井质量优质,固井第一、二界面平均合格率分别为 95.3% 和 85.4%。与该区块应用常用水泥浆的井相比,2 个胶结面的胶结质量均显著提高,分别提高了 15.0 和 32.0 百分点;后期压裂改造顺利,压裂过程中井口压力稳定;试油阶段均未发现层间窜流。

以南堡 XX-XX 井为例介绍多尺度纤维韧性水泥浆体系的具体应用情况。该井是南堡油田 X 号构造南堡 XX 断块构造较高部位的一口开发井(采油井),为定向井,其钻探目的是压裂开发南堡 XX 断块 Ed₂、Ed₃ 低渗透油藏。该井固井作业存在以下技术难点:1)后期压裂开发对井筒的长期密封完整性要求较高;2)馆陶组底部易坍塌、易井漏,固井施工过程中(起钻、下套管)应保持井内压力平衡;3)井斜角大于 40.0°,属于大斜度井,下套管困难,且套管居中度难以保障,易发生偏心。

为保障后期压裂开发,采用多尺度纤维韧性水泥浆封固储层。水泥浆配方为 100.0% 胜潍水泥+3.5% 降滤失剂 BCG-200L+5.0% 增韧剂 BCE-230S+42.5% 水,密度为 1.92 kg/L,85 °C 滤失量为 40 mL,85 °C 稠度系数为 1.14 Pa·sⁿ,流性指数 n=0.68,游离液为 0,上下密度差为 0.01 kg/L;85 °C 下的稠化时间为 96 min,88 °C 下的温度高点稠化时间为 91 min,

密度 1.95 kg/L 时的温度高点稠化时间为 98 min,各项性能均满足现场施工要求。

现场水泥浆大样在 85 °C 下养护 3 d 的力学性能:杨氏模量 6.6 GPa,泊松比 0.18,平均抗压强度 38.3 MPa,平均抗拉强度 2.05 MPa,满足后期压裂及生产需求。

该井现场固井施工顺利,3 d 后测井合格率为 100%,优质率为 80.3%;后期压裂施工顺利,试油时未见层间窜流。

5 结 论

1)采用 3 种尺度的无机纤维复配得到了多尺度纤维增韧剂 BCE-230S。与单一尺度纤维相比,该增韧剂具有更好的增韧效果,可协同作用提高水泥石的抗拉强度、抗压强度及抗冲击功的能力,并降低其杨氏模量。

2)现场应用结果表明,多尺度纤维韧性水泥浆体系性能稳定,各项性能参数均能满足固井施工要求,固井施工成功率高,能够提高低渗透储层的固井质量,能够有效进行层间封隔。

3)多尺度纤维韧性水泥浆体系不仅可以用于低渗透油气藏的固井施工,还可以满足储气库井、页岩气井等对水泥环韧性要求较高的井的固井要求。

参 考 文 献

References

- [1] 路保平,丁士东.中国石化页岩气工程技术新进展与发展展望[J].石油钻探技术,2018,46(1):1-9.
LU Baoping, DING Shidong. New progress and development prospect in shale gas engineering technologies of Sinopec[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(1): 1-9.
- [2] 刘硕琼,齐奉忠.中国石油固井面临的挑战及攻关方向[J].石油钻探技术,2013,41(6):6-11.
LIU Shuoqiong, QI Fengzhong. Challenges and development trends of cementing technology in CNPC[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(6): 6-11.
- [3] 刘仍光,周仕明,陶谦,等.掺橡胶乳液和弹性粒子柔性油井水泥石的微结构[J].硅酸盐学报,2015,43(10):1475-1482.
LIU Rengguang, ZHOU Shiming, TAO Qian, et al. Microstructure of flexible oil-well cement stone mixed with latex and elastic particle[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(10): 1475-1482.
- [4] 邹双,邹建龙,赵宝辉,等.一种高抗压强度、低杨氏模量固井韧性水泥组合物:CN201611089455.0[P]. 2017-05-31.
ZOU Shuang, ZOU Jianlong, ZHAO Baohui, et al. A toughness cement matrix composites with high compressive strength and low Young's modulus: CN201611089455.0[P]. 2017-05-31.

- [5] 武治强, 刘书杰, 耿亚楠, 等. 高温高压高含硫气井固井水泥环封隔能力评价技术[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(6): 787-790.
WU Zhiqiang, LIU Shujie, GENG Ya'nan, et al. Evaluation technology for isolation capacity of cement sheath in HTHP high-sulfur gas wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(6): 787-790.
- [6] 王秀玲, 任文亮, 周战云, 等. 储气库固井用油井水泥增韧材料的优选与应用[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(3): 89-93, 98.
WANG Xiuling, REN Wenliang, ZHOU Zhanyun, et al. Selection and application of toughening agent used in cementing gas storage well[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2017, 34(3): 89-93, 98.
- [7] 谭春勤, 刘伟, 丁士东, 等. SFP 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.
TAN Chunqin, LIU Wei, DING Shidong, et al. Application of SFP elastotoughness slurry in shale gas well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 53-56.
- [8] 滕兆健, 郭文猛, 饶辰威, 等. 低渗透油气藏水平井固井用增韧防窜剂的研发和应用[J]. 钻采工艺, 2019, 42(3): 101-103.
TENG Zhaojian, GUO Wenmeng, RAO Chenwei, et al. Development and application of anti-channeling agent for horizontal well cementing in low permeability oil and gas reservoirs[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(3): 101-103.
- [9] 严思明, 严圣东, 吴亚楠, 等. 功能材料对固井水泥石力学性能的影响[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(2): 174-178.
YAN Siming, YAN Shengdong, WU Yanan, et al. Effect of functional materials on mechanical properties of hardened cement paste[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(2): 174-178.
- [10] 张聪, 曹明莉, 许玲. 混凝土多尺度特征与多尺度纤维增强理论研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(3): 44-48.
ZHANG Cong, CAO Mingli, XU Ling. Research progress of multi-scale characteristic and multi-scale fiber reinforcing theory for concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2014(3): 44-48.
- [11] 张聪, 曹明莉. 多尺度纤维增强水泥基复合材料力学性能试验[J]. 复合材料学报, 2014, 31(3): 661-668.
ZHANG Cong, CAO Mingli. Mechanical property test of multi-scale fiber reinforced cementitious composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(3): 661-668.
- [12] PEREIRA E B, FISCHER G, BARROS J A O. Effect of hybrid fiber reinforcement on the cracking process in fiber reinforced cementitious composites[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(10): 1114-1123.
- [13] 邹双, 邹建龙, 赵宝辉, 等. 一种固井水泥浆用纤维增韧剂及其制备方法: CN201611089451.2[P]. 2017-05-17.
ZOU Shuang, ZOU Jianlong, ZHAO Baohui, et al. A fiber toughening agent for oil well cement slurry and its preparation method: CN 201611089451.2 [P]. 2017-05-17.
- [14] 李明, 杨雨佳, 郭小阳. 碳纤维增强油井水泥石的力学性能[J]. 复合材料学报, 2015, 32(3): 782-788.
LI Ming, YANG Yujia, GUO Xiaoyang. Mechanical properties of carbon fiber reinforced oil well cement composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(3): 782-788.
- [15] 穆海朋, 步玉环, 程荣超. 纤维水泥的发展及应用[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(2): 36-36.
MU Haipeng, BU Yuhuan, CHENG Rongchao. The development and application of fiber cement[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(2): 36-36.
- [16] 程小伟, 秦丹, 赵殊勋, 等. 动态冲击下纤维素固井水泥石力学性能及增韧机理研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(6): 1918-1922, 1928.
CHENG Xiaowei, QIN Dan, ZHAO Shuxun, et al. Mechanical properties and toughening mechanism of cellulose cement under dynamic impact[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(6): 1918-1922, 1928.
- [17] 华苏东, 姚晓. 复合纤维提高油井水泥石韧性的研究[J]. 钻井液与完井液, 2007, 24(4): 40-42.
HUA Sudong, YAO Xiao. Composite fiber improves the toughness of oil-well set cement[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2007, 24(4): 40-42.
- [18] 楼晨阳, 姚晓, 何德清, 等. 钙质晶须在高温加砂水泥中的增强性能研究[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(4): 91-95.
LOU Chenyang, YAO Xiao, HE Deqing, et al. The reinforcing effect of calcium-based whisker in high-temperature sand-cement mixtures[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(4): 91-95.

[编辑 滕春鸣]