



页岩气小井眼水平井纳米增韧水泥浆固井技术

王涛 申峰 展转盈 窦倩 郭庆

Ductile Nano-Cement Slurry Cementing for Slim-Hole Horizontal Shale Gas Wells

WANG Tao, SHEN Feng, ZHAN Zhuanying, DOU Qian, GUO Qing

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023059>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长庆油田小井眼超长水平段水平井钻井技术

Drilling Technologies for Horizontal Wells with Ultra-Long Horizontal Section and Slim Hole in Changqing Oilfield

石油钻探技术. 2021, 49(5): 14-18 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021060>

冀东油田浅层小井眼侧钻水平井钻井完井关键技术

Key Technologies for Drilling and Completing Shallow Slim Hole Sidetracking Horizontal Wells in the Jidong Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(6): 8-14 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020090>

盐池区块深层页岩气水平井钻井关键技术研究

Research on Key Drilling Technology for Horizontal Wells in the Deep Shale Gas Reservoirs in Yanchi Block

石油钻探技术. 2021, 49(6): 23-28 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021007>

低渗透油藏侧钻水平井小井眼分段多簇压裂技术

Segmented Multi-Cluster Fracturing Technology for Sidetrack Horizontal Well with Slim Holes in Low Permeability Reservoir

石油钻探技术. 2020, 48(6): 94-98 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020112>

苏北盆地小井眼侧钻井关键技术研究与应用

Research and Application of Key Technologies for Slim Hole Sidetracking Wells in the Subei Basin

石油钻探技术. 2019, 47(5): 22-27 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019102>

苏桥储气库SU7井深井小井眼套管段铣技术

The Deep and Slim Casing Milling Technology of Well SU7 in Suqiao Gas Storage

石油钻探技术. 2017, 45(3): 38-41 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201703007>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2023059

引用格式: 王涛, 申峰, 展转盈, 等. 页岩气小井眼水平井纳米增韧水泥浆固井技术 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(3): 51-57.

WANG Tao, SHEN Feng, ZHAN Zhuanying, et al. Ductile nano-cement slurry cementing for slim-hole horizontal shale gas wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(3): 51-57.

页岩气小井眼水平井纳米增韧水泥浆固井技术

王 涛^{1,2}, 申 峰¹, 展转盈³, 窦 倩¹, 郭 庆¹

(1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西西安 710075; 2. 陕西省陆相页岩气成藏与开发重点实验室, 陕西西安 710075; 3. 西安石油大学化学化工学院, 陕西西安 710065)

摘 要: 为了提高页岩气小井眼水平井固井质量, 保证水泥环压裂封隔效果及压裂后的完整性, 研究了纳米增韧水泥浆及其配套技术。采用纤维复配碳纳米管, 研制了纳米增韧水泥浆, 其形成的水泥石具有低模量、高抗拉的特点。与常规水泥石相比, 纳米增韧水泥石的弹性模量降低 50.9%, 抗压强度提高 28.1%, 抗拉强度最高可达 5.2 MPa。同时, 研究了配套的碳纳米管三级混配工艺, 解决了大剂量纳米材料易缠绕、难分散的问题, 首次实现了碳纳米管水泥浆的现场应用。纳米增韧水泥浆固井试验结果表明, 水平段固井质量合格率达 98%; 采用微地震井中监测技术评价了纳米增韧水泥环封隔效果, 压裂过程中设计外区域的微地震事件为 0, 表明纳米增韧水泥环封隔良好。研究表明, 纳米增韧水泥浆可为页岩气高效低成本开发提供技术支撑。

关键词: 页岩气; 小井眼; 固井; 碳纳米管; 纳米增韧水泥浆; 三级混配

中图分类号: TE256⁺.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)03-0051-07

Ductile Nano-Cement Slurry Cementing for Slim-Hole Horizontal Shale Gas Wells

WANG Tao^{1,2}, SHEN Feng¹, ZHAN Zhuanying³, DOU Qian¹, GUO Qing¹

(1. Research Institute of Yanchang Petroleum (Group) Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710075, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Lacustrine Shale Gas Accumulation and Exploitation(under planning), Xi'an, Shaanxi, 710075, China; 3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi, 710065, China)

Abstract: To improve the cementing quality of slim-hole horizontal shale gas wells and ensure the sealing effect of the cement sheath while fracturing and the integrity after fracturing, a ductile nano-cement slurry (DNCS) and its associated technologies were studied. The DNCS was developed by using carbon nanotubes compounded with fibers, which had the properties of low elastic modulus and high tensile strength. Compared with conventional cement, the elastic modulus of ductile nano-cement was reduced by 50.9%; the compressive strength was increased by 28.1%; the maximum tensile strength could reach 5.2 MPa. An associated carbon nanotube three-stage mixing technology was studied, which solved the problems of entanglement and difficult dispersion of large doses of nanomaterials, and the field application of carbon nanotube cement slurry was achieved for the first time. The results of the DNCS cementing test show that the qualified ratio of cementing quality in the horizontal section reaches 98%. The sealing effect of the cement sheath was evaluated by borehole microseismic monitoring technology, and the microseismic event in the off-design area during the fracturing process is 0, indicating that the cement sheath is well sealed. The DNCS provides a technical support for the efficient and low-cost development of shale gas.

Key words: shale gas; slim hole; cementing; carbon nanotubes; ductile nano-cement slurry; three-stage mixing

近年来, 中国页岩气勘探开发取得重大突破, 页岩气探明储量已突破 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 页岩气产量已超 过 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$, 并且呈快速增长趋势^[1-5]。鄂尔多斯盆地陆相页岩气资源丰富^[6], 为进一步提高钻速、降

收稿日期: 2022-08-18; 改回日期: 2023-05-23。

作者简介: 王涛(1986—), 男, 山西闻喜人, 2010年毕业于中国石油大学(北京)石油工程专业, 2013年获西南石油大学油气井工程专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事固井水泥浆技术的研究和应用工作。E-mail: wt861104@126.com。

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目“改性碳纳米管开发功能性油井水泥浆研究”(编号: 2022KJXX-31)、“纳-微 CO_2 泡沫体系的构筑及其在纳-微多孔介质中的运移机制”(编号: 2022JM-299)部分研究内容。

低钻井成本,在目的层开展了 $\phi 152.4$ mm 钻头钻进、 $\phi 114.3$ mm 套管完井的小井眼钻井试验。与页岩气水平井常用的 $\phi 215.9$ mm 钻头、 $\phi 139.7$ mm 套管完钻组合相比,水泥环厚度减小 50%,水泥石的受力状态、破坏方式也可能发生较大的变化^[7]。同时,随着压裂技术快速发展,长水平段+细切割压裂+高强度改造已成为页岩气开发的主要技术,段间距、簇间距大幅减小(最小 4 m)^[8-9],对套管外水泥环抗破坏能力、建立簇间有效封隔能力都提出了更高的要求。此外,现有页岩气水平井开发实践表明,压裂后套管外水泥环密封失效引起的生产及安全隐患问题也应引起重视^[10]。因此,封固页岩气小井眼水平井的水泥浆需进行针对性设计。苏东华等人^[11-13]的研究表明,压裂时水泥环易发生拉伸破坏并引发力学完整性失效,水泥环厚度越小,对抗拉强度的需求越高;王涛等人^[14-18]研究认为,降低水泥石弹性模量可避免其发生塑性变形,水泥环厚度越小,要求其弹性模量越低;张成金等人^[19-21]研究发现,水泥浆中加入纤维后,可以通过裂纹桥连、偏转或纤维拔出等作用来阻止裂纹延伸,提高水泥石的变形能力,降低其弹性模量,增强其韧性,其弹性模量最大降幅可达 51.3% 以上;刘慧婷等人^[22-24]研究了碳纳米管对水泥浆性能的影响,论证了碳纳米管应用于固井水泥的可行性。笔者以纤维水泥浆为基础,复配更小尺寸的碳纳米管,研发了一种低弹性模量、高抗拉强度的纳米增韧水泥浆,通过多尺度(主要是纳米、微米级)孔洞的桥接、充填,提高了水泥环的压裂封隔效果和完整性。同时,为解决碳纳米管存在的分散性差、易团聚的问题^[25],研发了三级混配技术,国内外首次实现了碳纳米管水泥浆的现场应用。

1 纳米增韧水泥浆试验方法

1.1 技术思路

固井水泥石受到外载时变形能力差、脆性较强,添加碳纤维、水镁石纤维和聚丙烯纤维等纤维材料可以提升水泥石的应变、止裂能力,但纤维尺寸较大,对水泥石中纳微米级孔洞的桥接作用较弱。同时,纤维加量大时,泵送水泥浆易堵塞管线,造成憋泵。因此,考虑采取降低纤维加量、复配纳米级碳纳米管的方法,一方面增强纳微米级孔洞的桥接承载及充填效果,另一方面对纤维覆盖的孔洞起到强化作用,在降低弹性模量的同时,提高水泥

石的宏观抗拉特性,相关作用示意图见图 1(图 1 中,CNTs 为碳纳米管)。

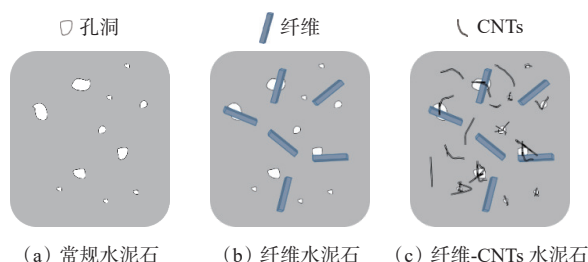


图 1 不同水泥石内部结构示意图

Fig.1 Internal structure of different cement stones

1.2 试验材料及方法

试验所用油井水泥为 G 级水泥;纤维选用长度 5 mm 的聚丙烯纤维;碳纳米管为直径 40~60 nm、长度 8~15 μm 的多壁碳纳米管;选用聚合物类降滤失剂、油井水泥分散剂。参考上述材料的研究进展^[26],确定纤维加量范围为 0~1.00%、碳纳米管加量范围为 0~0.06%。不同配方水泥浆关键材料的加量见表 1。

表 1 不同配方水泥浆关键材料的加量

Table 1 Dosage of key materials for different formulations of cement slurry

配方	纤维加量, %	CNTs加量, %	降滤失剂加量, %	油井水泥分散剂加量, %
A0	0	0	0.40	0.30
A1	0.50	0	0.40	0.32
A2	0.50	0.02	0.40	0.35
A3	0.50	0.04	0.40	0.40
A4	0.50	0.06	0.40	0.45
A5	1.00	0	0.40	0.32
A6	1.00	0.02	0.40	0.35
A7	1.00	0.04	0.40	0.40
A8	1.00	0.06	0.40	0.45

配制水泥浆前,采用超声波分散仪对碳纳米管进行分散处理,将碳纳米管水溶液经 320 W 功率超声处理 30 min。水泥浆(石)制备及水泥浆常规性能测试参考《油井水泥试验方法》(GB/T 19139—2012),水泥石弹性模量、抗拉强度测试采用《页岩气:固井工程:第 2 部分:水泥浆技术要求与评价方法》(NB/T 14004.2—2016)中所述方法,水泥石孔径测试采用压汞法,上述测试水泥石的养护条件为 80 $^{\circ}\text{C}$ ×20.7 MPa×28 d。

2 纳米增韧水泥浆性能优化

2.1 弹性模量测试

测试不同水泥石样品的弹性模量, 其应力-应变曲线如图2所示(图2中, 方框为弹性模量计算取值区域, 虚线为曲线斜率)。

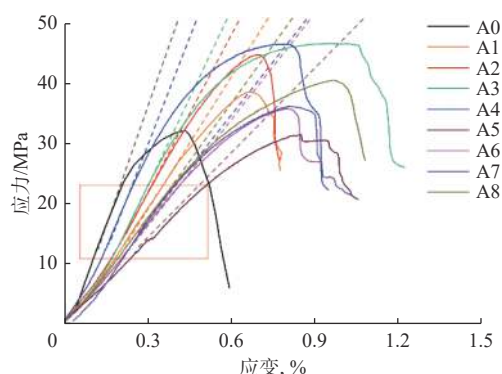


图2 不同配方水泥石的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of cement stone with different formulations

由图2可知: 配方A0水泥浆未加入纤维和纳米管, 其形成水泥石的弹性模量最大, 为12.9 GPa, 从弹性阶段发展到屈服阶段的时间最短, 破裂后应力下降也较快, 呈现脆性较大的特点。配方A5水泥浆中的纤维加量最大、无碳纳米管, 其形成水泥石的弹性模量最小, 且达到屈服强度后仍然有一定的变形能力。配方A1—A4水泥浆形成水泥石的弹性模量分别为7.2、8.8、9.6和11.6 GPa, 表明当纤维加量为0.50%时, 混入碳纳米管后水泥石的弹性模量增大、弹性降低, 但基体的极限承载能力也随之增大, 屈服强度增大; 配方A5—A8水泥浆中纤维加量为1.00%, 其形成水泥石的弹性模量分别为4.7、6.1、6.2和6.5 GPa, 与低纤维加量水泥石相比弹性模量显著降低, 这与郭小阳等人^[27-28]的研究结论一致, 纤维可在基体内起到“搭桥”作用, 以“拉筋”的方式提高应变, 在受力过程中起到传递和消散应力的作用, 延缓了裂纹的延伸速度, 受外载时应力应变曲线变缓, 弹性模量降低。在水泥浆中纤维加量高时混入碳纳米管, 形成水泥石弹性模量的增幅较小, 其显著优势是大幅提升了水泥石的差应力(被破坏时的极限承载力)。纤维加量越大, 与碳纳米管的协同作用越好, 水泥石差应力的提升效果越明显。参考NB/T 14004.2—2016中页岩气压裂水平井水泥石弹性模量应小于8 GPa的要求, 配方

A1、A5、A6、A7和A8能够满足要求。

2.2 配方优选

测试配方A1、A5、A6、A7和A8水泥浆形成水泥石的抗压强度、抗拉强度, 并与常规水泥石(配方A0)进行对比, 结果如图3所示。

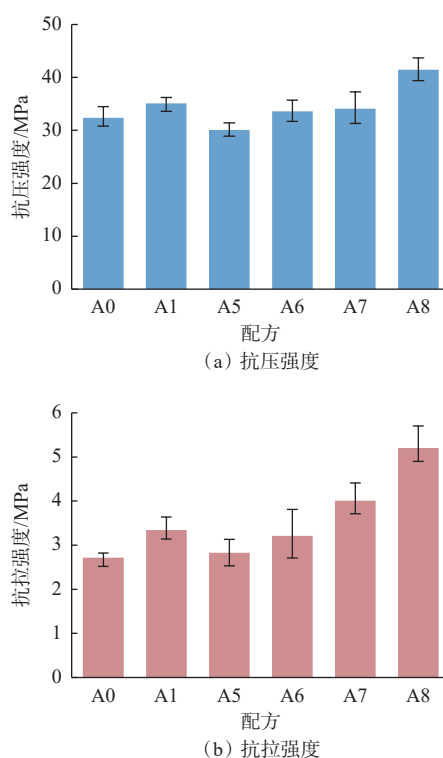


图3 不同配方水泥石的抗压强度和抗拉强度测试结果

Fig.3 Compressive strength and tensile strength of cement in different cement slurries

由图3可知: 纤维加量为0.50%、无碳纳米管时(配方A1), 水泥石的抗压强度较高, 但其抗拉强度较低, 不利于增韧止裂; 纤维加量提高至1.00%、无碳纳米管(配方A5)和碳纳米管低加量(配方A6和A7)时, 水泥石的抗拉强度较低, 存在一定的拉伸破坏风险; 0.06%碳纳米管与1.00%纤维复配(配方A8)后, 其抗拉强度较高。分析认为, 这主要是因为纤维与碳纳米管在更细微尺度方面的联合作用, 裂纹桥连的尺度从微米级细化至纳米级, 实现了2种材料的优势互补, 提高了水泥石的韧性, 这是碳纳米管与纤维复配的巨大优势。因此, 选择配方A8的水泥浆作为该区域小井眼水平井固井水泥浆, 与常规水泥石相比, 该水泥浆水泥石的抗压强度提高28.1%, 抗拉强度达到了5.2 MPa。

2.3 机理分析

水泥石是一种多孔材料, 含有大量孔隙, 这对其机械性能提升非常不利, 探究其孔径分布, 可以

从机理上解释其强度提高的内在原因^[29]。分别测试水泥浆配方 A0、A5 和 A8 的水泥石孔径分布, 结果见图 4(图 4 中, 无害孔、少害孔、有害孔和多害孔的分类标准和分类方法参考文献 [30])。

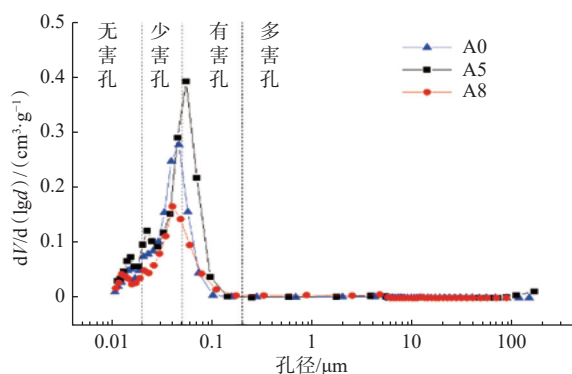


图 4 不同配方水泥石的孔径分布

Fig.4 Pore size distribution of cement stone with different formulations

由图 4 可知: 配方 A0 水泥浆未加入纤维和纳米管, 其形成水泥石的孔径分布范围较广, 甚至存在一定数量的多害孔, 孔径大于 100 μm, 测试结果与水泥浆的设计思路吻合度较高。配方 A5 水泥浆

中加入了纤维, 由于纤维的尺寸较大, 与水泥水化产物结合后反而增加了水泥石有害孔的数量, 孔径峰值处于有害孔区域。配方 A8 水泥浆中加入了碳纳米管, 其自身的高长径比可以桥联纤维与水泥石连接的空隙, 形成的空间网状结构填充在水化产物的凝胶孔和水泥基体的纳微米孔中; 同时, 纳米材料在一定程度上可以促进生成的水化产物进一步填充毛细孔和大孔^[31], 使孔径峰值远离有害孔区, 水泥石也更为致密。因此, 配方 A8 的水泥石不仅多害孔为 0, 有害孔和少害孔也大幅减少, 有利于水泥石抵抗破坏, 也有利于防止地层流体的侵蚀。

2.4 常规性能室内评价

按配方 A0 和 A8 配制水泥浆, 分别测试其游离液含量、滤失量、流变参数和稠化时间, 并进行对比, 结果见表 2。由表 2 可知, 配方 A8 中复合材料与外加剂的配伍性较好, 按其所配水泥浆的游离液、稠化时间均能满足施工需求, 稳定性和滤失量均优于按配方 A0 配制的水泥浆, 这主要是因为纳米材料和纤维材料在浆体中形成了多尺度网状结构, 可有效阻止颗粒沉降, 并在进行滤失量测试时快速形成致密的薄滤饼, 降低滤失量。总体来说, 纳米增韧水泥浆可用于固井施工。

表 2 水泥浆综合性能测试结果

Table 2 Comprehensive performance test results of cement slurries

水泥浆配方	滤失量/mL	游离液含量, %	上下层密度差/(kg·L ⁻¹)	稠度系数	流性指数/(Pa·s ⁿ)	稠化时间/min
A0	52	0	0.002	0.79	0.27	134
A8	42	0	0	0.89	0.20	131

2.5 配套混配工艺

纳米增韧水泥浆体系中的纤维可在混灰站与水泥等固相充分混合。但碳纳米管尺寸较小, 又极易缠绕难以分散, 在混灰站内无法与灰料均匀混合。目前室内主要采用超声分散技术解决该问题^[32-33], 但没有可以实现现场连续混配的超大规模超声分散设备。因此, 虽然国内外对碳纳米管水泥浆进行了很多研究, 尚无现场应用实例。针对该问题, 研究设计了室内超声分散制作浓缩液、现场配液车搅拌二次分散和水泥车再次搅拌配浆的三级混配法, 显著提高了大剂量碳纳米管在浆体中的分散性, 首次在固井中实现了碳纳米管的现场应用。

3 现场试验

YYP-10 井是鄂尔多斯盆地东南部一口页岩气

勘探水平井, 该井水平段采用 φ152.4 mm 钻头钻进, 完钻井深 3 760 m, 垂深 2 532 m, 水平段长 1 010 m, 采用 φ114.3 mm 生产套管一次上返固井工艺。因该区上部存在薄弱地层^[34-35], 采用低密度水泥浆封固上部、纳米增韧水泥浆封固下部的双密度水泥浆固井技术。该井共计注入密度 1.35 kg/L 的低密度水泥浆 60 m³、密度 1.90 kg/L 的纳米增韧水泥浆 50 m³, 固井施工过程安全顺利。测井结果表明, 该井水平段固井质量合格率为 98%, 优良率达 86%。

虽然国内外专家针对水泥环完整性及封隔能力开展了大量评价研究^[36-40], 但目前尚无可参考的、直观的井下封隔效果评价方法, 本文采用间接方法进行判断。由于体积压裂是由趾端到跟端进行分段先后改造的, 因此, 监测压裂段裂缝的延伸方向和各个裂缝网络形成的时间, 可对段间、簇间水泥环的封隔效果进行定性评价。采用微地震监测方法对

该井压裂裂缝进行监测, 监测器位于水平段根端附近的邻井中, 距各段的距离 292~1 350 m, 微地震事件定位误差在 0.50~2.90 m。该井水平段分 9 段进行压裂, 各段压裂微地震监测结果如图 5(a) 所示, 图中球形颗粒为监测的单个微地震事件(裂缝分布), 不同颜色代表不同时间、不同段产生的人造裂缝, 距离监测信号井越近, 监测信号越强, 监测到的

微地震事件越多。分析监测到的各段裂缝分布可知: 单段改造时套管外水泥环完整性较好, 阻碍了压裂液沿着水泥环窜入已改造段, 使其能够全部进入该段对应的目标地层, 在段内各簇之间产生了与井眼方向垂直并均匀分布的微地震事件; 各压裂段之间具有明显的分界线, 互窜微地震事件为 0, 达到了分段改造的目的。

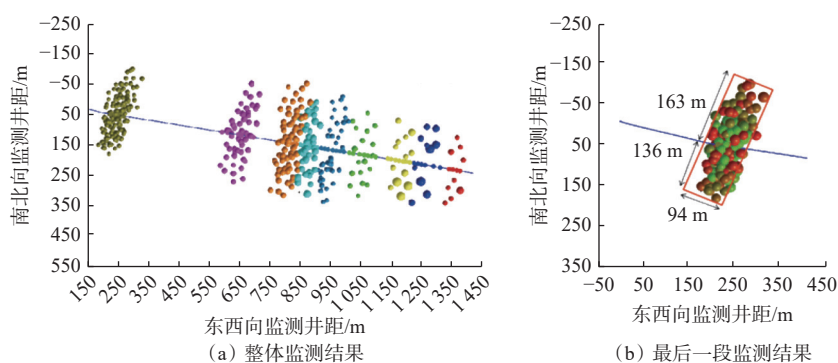


图 5 YYP-10 井压裂各段微地震事件监测结果

Fig.5 Monitoring results of microseismic events in each fracturing section of Well YYP-10

第 9 段压裂时的裂缝监测结果如图 5(b) 所示, 该段与监测井距离最近, 因此监测误差最小。由图 5(b) 可知, 压裂裂缝能够控制在沿井眼轴向设计的 94 m 范围内, 微地震事件为 143 件, 该井段外沿井眼轴向的上端和下端的微地震事件为 0 件, 表明此处水泥环在循环加载卸载 8 次后仍然具有良好的封隔能力, 地层压裂改造效果较好。

4 结论与建议

1) 通过纤维和碳纳米管的协同增效, 可以降低水泥石的弹性模量, 提高其抗拉强度, 进而开发出游离液量和滤失量低、稳定性强、更为致密的纳米增韧水泥浆, 从而满足页岩气小井眼水平井的固井需求。

2) 碳纳米管自身存在易缠绕、难分散的问题, 是制约其在油气井固井工程中大规模应用的“卡脖子”难点, 需要进一步研发大剂量碳纳米管在水泥浆中的高效分散技术及配套工艺, 利用材料的自身优势开发高性能水泥浆体系是该技术未来发展的方向。

3) 压裂时采用裂缝监测技术可以定性分析水泥环的封隔效果, 但无法对封隔能力进行定量评价, 建议进一步研究封隔能力定量评价方法。

参 考 文 献

References

- [1] 朱维耀, 陈震, 宋智勇, 等. 中国页岩气开发理论与技术研究进展 [J]. 工程科学学报, 2021, 43(10): 1397-1412.
ZHU Weiya, CHEN Zhen, SONG Zhiyong, et al. Research progress in theories and technologies of shale gas development in China [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(10): 1397-1412.
- [2] 邹才能, 赵群, 丛连铸, 等. 中国页岩气开发进展、潜力及前景 [J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 1-14.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, CONG Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 1-14.
- [3] 贾利春, 李枝林, 张继川, 等. 川南海相深层页岩气水平井钻井关键技术与实践 [J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(2): 145-152.
JIA Lichun, LI Zhilin, ZHANG Jichuan, et al. Key technology and practice of horizontal drilling for marine deep shale gas in southern Sichuan Basin [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(2): 145-152.
- [4] 张金川, 史森, 王东升, 等. 中国页岩气勘探领域和发展方向 [J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 69-80.
ZHANG Jinchuan, SHI Miao, WANG Dongsheng, et al. Fields and directions for shale gas exploration in China [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 69-80.
- [5] 周安富, 谢伟, 邱岫晰, 等. 泸州区块龙一₄ 小层页岩气勘探开发潜力 [J]. 特种油气藏, 2022, 29(6): 20-28.
ZHOU Anfu, XIE Wei, QIU Xunxi, et al. On exploration and development potential of shale gas in Longyi₄ sub-bed in Luzhou Block [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(6): 20-28.

- [6] 杜燕, 刘超, 高潮, 等. 鄂尔多斯盆地延长探区陆相页岩气勘探开发进展、挑战与展望[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 33–42.
DU Yan, LIU Chao, GAO Chao, et al. Progress, challenges and prospects of the continental shale gas exploration and development in the Yanchang exploration area of the Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 33–42.
- [7] 李治衡, 李进, 张磊, 等. 渤海油田小间隙环空固井技术及应用[J]. 非常规油气, 2019, 6(1): 94–100.
LI Zhiheng, LI Jin, ZHANG Lei, et al. Study and application of small clearance cementing technique in Bohai Oilfield[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(1): 94–100.
- [8] 赵金洲, 任岚, 蒋廷学, 等. 中国页岩气压裂十年: 回顾与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 121–142.
ZHAO Jinzhou, REN Lan, JIANG Tingxue, et al. Ten years of gas shale fracturing in China: review and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 121–142.
- [9] 张驰, 周彤, 肖佳林, 等. 涪陵页岩气田加密井压裂技术的实践与认识[J]. 断块油气田, 2022, 29(6): 775–779.
ZHANG Chi, ZHOU Tong, XIAO Jialin, et al. Practice and knowledge of fracturing technology for infill wells in Fuling Shale Gas Field[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(6): 775–779.
- [10] 何吉标, 彭小平, 刘俊君, 等. 抗高交变载荷水泥浆的研制及其在涪陵页岩气井的应用[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(3): 35–40.
HE Jibiao, PENG Xiaoping, LIU Junjun, et al. Development of an anti-deformation cement slurry under alternative loading and its application in Fuling shale gas wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 35–40.
- [11] 苏东华, 黄盛, 李早元, 等. 页岩油水平井压裂水泥环力学性能设计方法[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(4): 798–805.
SU Donghua, HUANG Sheng, LI Zaoyuan, et al. Mechanical property design method of cement sheath in a horizontal shale oil well under fracturing conditions[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(4): 798–805.
- [12] 李子丰, 张永贵, 阳鑫军. 蠕变地层与油井套管相互作用力学模型[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 129–131.
LI Zifeng, ZHANG Yonggui, YANG Xinjun. Mechanics model for interaction between creep formation and oil well casing[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 129–131.
- [13] 李成嵩, 李社坤, 范明涛, 等. 水平井压裂过程中固井界面裂缝的扩展规律[J]. 钻井液与完井液, 2022, 39(6): 761–766.
LI Chengsong, LI Shekun, FAN Mingtao, et al. Rule of propagation of fractures through the bonding interfaces of cement sheath in horizontal well fracturing[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2022, 39(6): 761–766.
- [14] 王涛, 申峰, 展转盈, 等. 高强微弹水泥浆在延长油田致密油水平井中的应用[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(5): 40–48.
WANG Tao, SHEN Feng, ZHAN Zhuaiying, et al. The application of high-strength micro-elastic cement slurry in the tight oil horizontal wells of the Yanchang Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(5): 40–48.
- [15] 张东清, 万云强, 张文平, 等. 涪陵页岩气田立体开发优快钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(2): 16–21.
ZHANG Dongqing, WAN Yunqiang, ZHANG Wenping, et al. Optimal and fast drilling technologies for stereoscopic development of the Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(2): 16–21.
- [16] 李士斌, 官兵, 张立刚, 等. 水平井压裂裂缝局部应力场扰动规律[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(6): 112–119.
LI Shibin, GUAN Bing, ZHANG Ligang, et al. Local stress field disturbance law of horizontal well fracturing[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(6): 112–119.
- [17] 范明涛, 李军, 柳贡慧. 页岩地层体积压裂过程中水泥环完整性研究[J]. 石油机械, 2017, 45(8): 45–49.
FAN Mingtao, LI Jun, LIU Gonghui. Study on cement sheath integrity in shale formation fracturing process[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(8): 45–49.
- [18] 何立成. 胜利油田沙河街组页岩油水平井固井技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(2): 45–50.
HE Licheng. A cementing technology for horizontal shale oil wells in Shahejie Formation of Shengli Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(2): 45–50.
- [19] 张成金, 冷永红, 李美平, 等. 聚丙烯纤维水泥浆体系防漏增韧性研究与应用[J]. 天然气工业, 2008, 28(1): 91–93.
ZHANG Chengjin, LENG Yonghong, LI Meiping, et al. Property studies and application of leak protection and flexibility of mekralon mud[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(1): 91–93.
- [20] 郝华中, 桑明, 张晔, 等. 耐碱玻璃纤维增韧水泥石力学性能及对水泥浆性能影响[J]. 钻采工艺, 2020, 43(5): 134–138.
HAO Huazhong, SANG Ming, ZHANG Ye, et al. Mechanical properties of alkali-resistant glass fiber toughened cement and its influence on cement slurry properties[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(5): 134–138.
- [21] 李斐. 抗高温弹性水泥浆体系优化研究[J]. 钻井液与完井液, 2021, 38(5): 623–627.
LI Fei. Study on optimization of high temperature cement slurry with elasticity and toughness[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2021, 38(5): 623–627.
- [22] 刘慧婷, 刘硕琼, 冯宇思, 等. 碳纳米管的掺入对油井水泥浆性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(2): 456–460.
LIU Huiting, LIU Shuoqiong, FENG Yusi, et al. Impact of carbon nanotube addition on properties of cement paste[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(2): 456–460.
- [23] 冯宇思, 刘硕琼, 刘慧婷, 等. 碳纳米管改性水泥石力学性能研究[J]. 钻井液与完井液, 2018, 35(6): 93–97.
FENG Yusi, LIU Shuoqiong, LIU Huiting, et al. Study on mechanical performance of set cement modified with CNT[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2018, 35(6): 93–97.
- [24] 陈立超, 张典坤, 吕帅锋. 碳纳米管复合固井水泥静态断裂性能试验研究[J]. 材料导报, 2022, 36(增刊2): 148–153.
CHEN Lichao, ZHANG Diankun, LYU Shuaifeng. Experimental study on dynamic and static fracture performance of carbon nanotubes cement[J]. Materials Reports, 2022, 36(supplement 2): 148–153.
- [25] 武奎旺, 肖建中, 夏风, 等. 碳纳米管的分散方法与分散机理[J]. 材料导报, 2011, 25(9): 16–19.
WU Xiwang, XIAO Jianzhong, XIA Feng, et al. Dispersion methods and dispersion mechanism of carbon nanotubes[J]. Materials Review, 2011, 25(9): 16–19.
- [26] 王涛, 窦倩, 贾红军. 酰胺改性碳纳米管对固井水泥浆性能的影响[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(1): 103–109.

- WANG Tao, DOU Qian, JIA Hongjun. Effects of amide-modified CNTs on properties of cement slurry[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(1): 103–109.
- [27] 郭小阳, 李早元, 辜涛, 等. 复杂油气藏固井液技术研究与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2017: 192–199.
- GUO Xiaoyang, LI Zaoyuan, GU Tao, et al. Research and application of cementing fluid technology in complex oil and gas reservoirs[M]. Beijing: Science Press, 2017: 192–199.
- [28] 步玉环, 穆海朋, 王瑞和, 等. 复杂应力环境下纤维水泥阻裂机理实验研究 [J]. *石油学报*, 2008, 29(6): 922–926.
- BU Yuhuan, MU Haipeng, WANG Ruihe, et al. Crack resistance mechanism of fiber cement under the action of complex stress[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(6): 922–926.
- [29] LIU Huiting, JIN Jianzhou, YU Yongjin, et al. Influence of halloysite nanotube on hydration products and mechanical properties of oil well cement slurries with nano-silica[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 247: 118545.
- [30] 张楠楠, 李云龙, 刘锦红, 等. 玄武岩粉对海工胶凝材料性能及水化的影响 [J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(7): 2204–2210.
- ZHANG Nannan, LI Yunlong, LIU Jinhong, et al. Effect of the addition of basalt powder on properties and hydration of marine cementitious materials[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(7): 2204–2210.
- [31] 牛荻涛, 何嘉琦, 傅强, 等. 碳纳米管对水泥基材料微观结构及耐久性能的影响 [J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(5): 705–717.
- NIU Ditao, HE Jiaqi, FU Qiang, et al. Effect of carbon nanotubes on microstructure and durability of cement-based materials[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 48(5): 705–717.
- [32] 窦倩, 王涛, 张书勤, 等. 碳纳米管固井水泥复合材料抗腐蚀及力学性能研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(11): 3703–3711.
- DOU Qian, WANG Tao, ZHANG Shuqin, et al. Research on corrosion resistance and mechanical properties of carbon nanotubes reinforced cement-based composites[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(11): 3703–3711.
- [33] EL-GAMAL S M A, HASHEM F S, AMIN M S. Influence of carbon nanotubes, nanosilica and nanometakaolin on some morphological-mechanical properties of oil well cement pastes subjected to elevated water curing temperature and regular room air curing temperature[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 146: 531–546.
- [34] 马振锋, 于小龙, 杨全枝, 等. 陆相页岩气水平井钻井提速技术 [J]. *非常规油气*, 2017, 4(4): 88–92.
- MA Zhenfeng, YU Xiaolong, YANG Quanzhi, et al. The technology of improving rate of penetration in continental shale gas horizontal well[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2017, 4(4): 88–92.
- [35] 匡立新, 陶谦. 渝东地区常压页岩气水平井充氮泡沫水泥浆固井技术 [J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(3): 39–45.
- KUANG Lixin, TAO Qian. Cementing technology using a nitrogen-filled foamed cement slurry for horizontal shale gas wells in the eastern Chongqing area[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(3): 39–45.
- [36] 席岩, 李方园, 王松, 等. 利用预应力固井方法预防水泥环微隙环隙研究 [J]. *特种油气藏*, 2021, 28(6): 144–150.
- XI Yan, LI Fangyuan, WANG Song, et al. Study on prevention of micro-annulus in cement sheath by prestressed cementing method[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(6): 144–150.
- [37] 谢关宝, 滕春鸣, 柳华杰. 盐岩蠕变对水泥环气密封完整性影响规律研究 [J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(2): 78–84.
- XIE Guanbao, TENG Chunming, LIU Huajie. Study on the influence of salt rock creep on the integrity of cement sheath gas seals[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(2): 78–84.
- [38] 丁士东, 刘奎, 刘小刚, 等. 环空加压固井对双层套管水泥环界面径向应力的影响 [J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(1): 30–37.
- DING Shidong, LIU Kui, LIU Xiaogang, et al. The effect of pre-applied annulus back pressure cementing on radial stress of interfaces in double layer casing systems[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(1): 30–37.
- [39] SZELĄG M. Evaluation of cracking patterns of cement paste containing polypropylene fibers[J]. *Composite Structures*, 2019, 220: 402–411.
- [40] KRUSZEWSKI M, MONTGROSSI G, RAMÍREZ MONTES M, et al. A wellbore cement sheath damage prediction model with the integration of acoustic wellbore measurements[J]. *Geothermics*, 2019, 80: 195–207.
- [编辑 滕春鸣]