

文章编号:1000-4092(2022)02-222-06

提高水泥层间封隔能力的低密度弹性密封水泥浆性能评价*

幸雪松¹, 孙翀¹, 许明标^{2,3}, 王晓亮^{2,3}, 杨晓榕³, 彭石峰³

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 2. 长江大学非常规油气湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430100;
3. 荆州嘉华科技有限公司, 湖北 荆州 434000)

摘要:在现有的固井水泥浆技术条件下,保障井筒完整性长期稳定面临挑战,尤其是常规低密度水泥浆,射孔后水泥石的完整性遭到严重破坏,造成密封失效,水泥石与套管及井壁间的胶结质量差,易发生窜槽等问题。针对上述问题,以环氧树脂和酸酐类固化剂为原料制得弹性剂(RES-1),并用液体纤维提高水泥石的强度和韧性、纳米液体减轻剂改善水泥浆沉降稳定性。室内对低密度弹性密封水泥浆展开了综合性能评价。结果表明,RES-1可降低水泥石的弹性模量,提高水泥石的形变能力,最优加量为10%。低密度(1.5 g/cm³)弹性密封水泥浆体系具有良好的流变性,失水量小于50 mL,线性膨胀率达到0.45%,可有效抑制微环隙、微间隙的产生。低密度弹性密封水泥浆具有较好的致密性、柔韧性和弹性形变能力。与普通低密度水泥浆相比,其渗透率和弹性模量分别降低了69.5%和78.4%,抗压强度和抗折强度分别提高了61%和87.9%。低密度弹性密封水泥浆可以有效提高水泥环的长效封隔能力,改善固井质量。

关键词:低密度;弹性密封水泥浆;弹性剂;形变能力;封隔能力

文献标识码:A DOI:10.19346/j.cnki.1000-4092.2022.02.006

中图分类号:TE256

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 前言

固井施工质量的好坏直接影响油气井的寿命。在复杂井和水平井固井施工过程中,低密度水泥浆水泥凝固后,水泥石表现为脆性,其抗压强度、抗折强度和抗冲击性能较差^[1-2]。水泥环在套管试压、射孔压裂及地层温度升高等情况下会出现细微的裂缝。当受到大量频繁的物理和机械作用时,裂缝逐渐变大,造成水泥环破碎及密封质量下降,导致固井失效,从而发生套管损坏等一系列严重的问题^[3-4],直接影响油气田的产能和高效开发^[5]。国内学者的研究表明,导致层间封隔失效的主要原因之

一是水泥石弹性形变能力差,其次是弹韧性材料能否与水泥石共同承受冲击力,阻止裂纹的扩张,保证水泥石的整体性能^[6-7]。目前,常用的方法是在水泥浆中加入纤维、胶乳及橡胶材料,改善水泥浆的抗拉、抗折等性能,降低水泥石的弹性模量,使水泥石具有更好的形变能力。

在提高水泥石弹性形变能力方面,李文蕾等^[8]提出的玄武岩纤维是一种无污染的材料,在纤维增强混凝土工程中得到了应用,技术已较为成熟。罗洪文等^[9]对玄武岩纤维改性油气井水泥石的力学性能进行了研究,发现玄武岩纤维在小加量范围内对水泥浆的流动度影响不大,且玄武岩纤维和聚丙烯

* 收稿日期:2021-11-06;修回日期:2021-12-15。

基金项目:国家科技重大专项“海外复杂地层固井及修井液技术”(项目编号2017ZX05032004-004)。

作者简介:幸雪松(1978—),男,高级工程师,长江大学油气井工程专业硕士(2004),从事钻井工程技术工作,通讯地址:100028 北京市朝阳区太阳宫南街6号院中海油大厦A座,E-mail:yangxr08@163.com。王晓亮(1982—),男,高级工程师,本文通讯联系人,从事固井技术方面的研究工作,通讯地址:434020 湖北省荆州市沙市开发区荆州嘉华科技有限公司固井技术部,E-mail:wangxiaoliang031@163.com。

纤维均在一定加量范围内可以提高水泥石的抗拉强度、抗折强度和抗压强度。除此之外,玄武岩纤维改善水泥石韧性的效果好于聚丙烯纤维。孙建磊等^[10]发现玄武岩纤维具有较高的拉伸强度和弹性模量,但由于纯天然玄武岩熔体导热性能差,析晶上限温度较高容易析晶,使得玄武岩纤维制备过程中有着成纤难度大、工艺控制条件严格和设备适应性高等技术难点,同时使用成本也较高。谭春勤^[11]和张清^[12]等通过在水泥浆中掺入胶乳、纤维和有机颗粒来提高水泥石的弹塑性。当加入弹塑材料后,水泥石抗折强度变大、脆度系数变小、弹性模量和体积模量降低。但该方法仅对常规密度水泥浆具有降低弹性模量等效果,没有针对低密度水泥浆进行研究。王涛等^[13]在水泥浆中加入纤维、胶乳等形成高韧性、高弹性水泥浆。但该类水泥浆在增强水泥石弹韧性的同时,也会相应地降低水泥石的强度,且胶乳加量大、易破乳、成本高。李早元等^[14]将弹性颗粒橡胶加入水泥浆以实现油井水泥降脆增韧的效果。但橡胶颗粒表面为疏水性,影响了其在浆体内的均匀分布,且过多的橡胶掺量会增大水泥石孔隙,对水泥石抗压强度和结构的影响较大。王银东等^[15]采用焦炭粉来改性水泥石弹性形变能力,但焦炭粉颗粒对水泥石弹性参数的影响与橡胶粉相似。将焦炭粉加入水泥浆中,整个体系强度分布不均,且焦炭粉的抗压强度低于水泥颗粒强度,导致整个水泥石体系抗压强度明显下降。孙坤忠等^[16]优选了新型弹性材料SEP-1和SEP-2,对耐高温水泥浆体系采用C—S—H凝胶相塑化和增孔方法改造水泥石的脆性。但该弹性材料憎水,导致颗粒界面与水泥水化产物间存在胶结强度较低的界面,进而影响水泥石力学性能。

为了满足低密度水泥石具有良好弹韧性的同时,又能提高水泥石的强度,室内将固化剂与环氧树脂按照一定比例混合制备胶液弹性剂(RES-1)。在制备过程中选用二羟甲基丁酸(DMBA)亲水扩链剂引入一种特殊亲水基团,使得弹性剂RES-1具有亲水性。然后,将弹性剂RES-1加入水泥浆中,研究了RES-1的性能及其与相关添加剂协同作用对水泥浆性能的影响规律。由于RES-1胶液中含有环氧基等极性基团,使环氧凝胶产物具有很高的黏结强度,实现水泥石增韧增弹的效果。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

嘉华G级油井水泥,四川嘉华特种水泥厂;淡水(自来水);丙酮甲醛缩聚物分散剂(CF44L)、2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸(AMPS)、聚合物类降失水剂(CG88L)、有机磷酸盐类缓凝剂(H21L)、聚丙烯酰胺类增强剂(STR)、改性有机硅类消泡剂(CX601L)、无机盐类促进剂(CN-R)、酸酐类固化剂(ST)、活性硅类纳米液体减轻剂(C60L,由硅酸钠、纳米微孔活性硅粉、无水乙醇、羧酸盐类表面活性剂制得)、液体纤维、环氧树脂、胶乳,荆州嘉华科技有限公司;弹性剂(RES-1),自制。

DFC-0708型恒速搅拌机,沈阳金欧科石油仪器技术开发有限公司;ZNN-D6B六速旋转黏度计,青岛海通达专用仪器有限公司;TG-8040DA增压稠化仪、TG-71高温高压失水仪,沈阳泰格石油仪器设备制造有限公司;HY-20080型万能材料试验机,上海衡翼精密仪器有限公司;TAW-2000岩石三轴试验机,长春市朝阳试验仪器有限公司;高温高压固井水泥环气密完整性评价仪、高温高压固井壁面验审仪,自制;SU8010冷场发射扫描电子显微镜,日本日立公司。

1.2 实验方法

(1)弹性剂RES-1的制备。室温下将环氧树脂和ST固化剂按照一定比例混合后,放入模具用烘箱(65~120℃)烘烤,固化约20min后得到高温的凝胶试样,然后将高温凝胶体放入冷水中水浴约2min,即得到胶液弹性试样RES-1。

(2)水泥浆常规性能评价。按照国家标准GB 10238—2005《油井水泥》和GB/T 19139—2012《油井水泥试验方法》评价水泥浆的性能。采用六速旋转黏度计测定水泥浆的流变性,测定条件为90℃×20min;采用高温高压失水仪测定水泥浆的失水量,测定条件为90℃×8MPa×30min;采用高温高压稠化仪测定水泥浆的稠化时间,测定条件为90℃×45MPa×45min。

(3)水泥石力学性能评价。水泥石配方为:100%水泥+20%STR+52%淡水+2.5%CG88L+1.5%CF44L+0.4%H21L+1%CX601L+液体纤维。水泥石养护条件为90℃×24h。采用万能材料试验

机测试RES-1的抗压强度、抗折强度、抗冲击强度等力学性能。

(4)水泥石应力应变测试。将弹性密封水泥浆体系按配方制作成直径25 mm、长度50 mm的岩心,然后用岩石三轴试验机测量岩心的三轴应力-应变曲线。

(5)水泥石抗窜性能测试。将配好的水泥浆缓慢注入模拟地层与套管的环空中,避免环空起泡,制作地层-水泥环-套管耦合胶结模型。然后,将含有水泥浆的模型吊入比地层岩心外径更大的水泥环气密完整性评价装置的釜体中养护。养护条件为温度90℃、压力20~40 MPa。达到养护龄期24 h后,从釜盖上给釜内加压,记录釜内压力突然减小时的峰值(最大压力值)作为抗窜的压力。

2 结果与讨论

2.1 低密度弹性密封水泥浆组分优选

2.1.1 增韧剂

液体纤维是由具有表面活性的1 mm长度碳纤维与1.5 mm碳纤维按质量比3:1混合,再经特殊液化工艺处理得到的液体增韧防漏材料。液体纤维加量对水泥基浆抗压强度、柔韧性及胶结性的影响如表1所示。与未加液体纤维相比,加入了液体纤维的水泥石柔韧性明显提高。加入2%液体纤维后,水泥石各项力学性能最好,抗压强度、抗折强度及抗冲击强度分别提高了25%、43%、85%。与固体纤维相比,液体纤维具有良好的水分散性,能均匀分散于配浆水中;在荷载作用下,可横跨裂缝承受拉应力并可使液化纤维材料具有一定的延性,提高固井水泥浆的韧性和抗压强度。加入液体纤维水泥石的剪切强度均大于3 MPa、拉伸强度均大于200 kPa,表明液体纤维提高了水泥石的胶结性能。因此,选择液体纤维作为增韧材料加入水泥浆中,推荐加量为1%。

表1 液体纤维加量对水泥石力学性能的影响

液体纤维加量/%	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	抗冲击强度/(kJ·m ⁻²)	剪切强度/MPa	拉伸强度/kPa
0	18.0	3.7	1.78	2.40	90
1	23.0	4.1	2.60	3.50	220
2	22.5	5.3	3.29	4.43	320
3	20.2	5.0	3.02	4.35	290

2.1.2 纳米液体减轻剂

水泥浆密度的降低一般通过掺入低密度材料(如粉煤灰)来实现,但常规粉煤灰低密度水泥浆沉降严重^[17-18]。纳米液体减轻剂C60L的密度为0.2~0.3 g/cm³,粒径小于50 μm。将该材料与液体纤维复配使用,以提高水泥浆的性能。不同低密度减轻剂材料对水泥浆性能的影响如表2所示。在低密度(1.5 g/cm³)水泥浆体系中,相比于粉煤灰,纳米液体减轻剂配制的水泥浆的抗压强度明显增强,且水泥浆上下密度差为0,说明水泥浆的悬浮稳定性好。这是由于纳米液体减轻剂主要成分为纳米活性硅。该纳米粒子具有束水和吸附功能,可吸附于水泥颗粒表面,并与水泥水化产物反应产生H—Si—H凝胶结构^[19]。该结构可起到悬浮水泥颗粒、稳定水泥浆体的作用。

表2 减轻剂对水泥浆性能的影响

减轻剂	24 h抗压强度/MPa	上下密度差Δρ/(g·cm ⁻³)
粉煤灰	15.6	0.05
纳米液体减轻剂	22.5	0

2.1.3 弹性剂 RES-1

(1)RES-1的微观结构

由图1可见,RES-1为连续无间的产胶结构,骨架结构致密,基本不存在孔洞,因此RES-1固化体具有很高的黏结强度。另外,RES-1固化体表面有许多纤维状凝胶颗粒,粒径在5~50 nm之间。该纳米颗粒具有较高活性,可以吸附水中的阴、阳离子,使得固化产物RES-1具有较好的亲水性。RES-1的粒径微小,可有效充填到水泥颗粒间,降低水泥石的渗透率,提高水泥石的强度。

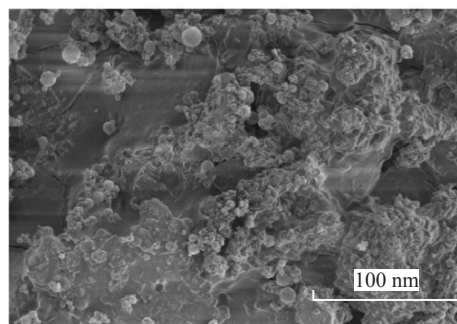


图1 RES-1的扫描电镜图像

(2)RES-1对水泥浆性能的影响

弹性剂RES-1加量对水泥浆性能的影响如表3

表3 RES-1 加量对水泥浆性能的影响

RES-1 加量/%	流变性(90 °C)				稠化时间/ min	抗压强 度/MPa	弹性模量/ GPa
	$\Phi_{600}/\Phi_{300}/\Phi_{200}/\Phi_{100}/\Phi_0/\Phi_3$						
0	>300/264 /194/106/ 22/17				82	23.6	9.9
5	260/206 /155/96 /14/9				136	27.9	7.2
10	275/240/ 185/110/ 11/8				198	32.2	4.9
15	>300/298 /255/148 /15/10				203	26.3	5.9

注:水泥浆配方为 100%水泥+20%增强剂+52%淡水+2.5% CG88L+1.5% CF44L+0.4% H21L+1% CX601L+1%液体纤维; $\Phi_{600} \sim \Phi_3$ —转速为 600~3 r/min 时旋转黏度计的读数。

所示。RES-1 分散于水中与水泥的级配良好。RES-1 的加量在 0~15% 时,对水泥浆的流变性没有明显影响,延长了水泥浆的稠化时间。RES-1 可明显增大水泥石的抗压强度,降低水泥石的弹性模量。这是由于 RES-1 能较好地分散于水泥中,凝胶颗粒与水泥水化产物有效黏结,使得水泥浆与骨料间形成具有高黏结力的膜,实现了水泥石增弹增韧的效果,从而改善水泥石的形变能力,有利于提高水泥环的密封完整性。

(3)RES-1 对抗窜性能的影响

室内采用高温高压固井壁面验窜仪测试了 RES-1 对水泥环的抗窜能力。RES-1 质量分数为 0、5%、10%、15% 时,水泥浆的抗窜强度分别为 7.5、13.9、15.7、12.6 MPa/m²。加入 RES-1 后,水泥浆的抗窜强度均大于 10 MPa/m²,说明 RES-1 具有良好的抗窜性能。当 RES-1 加量为 10% 时,水泥石的抗窜性能最强,抗窜强度是未加 RES-1 的 2.09 倍,因此推荐弹性剂 RES-1 的加量为 10%。

2.2 低密度弹性密封水泥浆的综合性能

在优选了液体纤维增韧剂、纳米液体减轻剂 C60L 和弹性剂 RES-1 的基础上,对与其相容性良好的外加剂(如增强剂、降滤失剂等)进行了评价,优化得到性能良好的低密度弹性密封水泥浆体系,体系配方如下。(1)普通低密度水泥浆:100%水泥+9% 粉煤灰+30% STR+57% 淡水+2.5% CG88L+1% CF44L+0.8% H21L+1.0% CX601L+5% 胶乳;(2)低密度弹性密封水泥浆:100%水泥+20% STR+52% 淡水+2.5% CG88L+1.5% CF44L+0.4% H21L+1% CX601L+10% C60L+1% 液体纤维+1.3% CN-R+10% RES-1。

2.2.1 低密度弹性密封水泥浆的常规性能

低密度弹性密封水泥浆和普通低密度水泥浆的性能对比如表 4 所示。两种水泥浆的流性指数(n)均大于 0.7,稠度系数(K)均小于 0.5 Pa·sⁿ,说明两种水泥浆的流变性均良好。相比于普通低密度水泥浆,低密度弹性密封水泥浆的失水量小于 50 mL,水泥浆膨胀性更好,线性膨胀率达到 0.45%,满足固井基本要求。低密度弹性密封水泥浆的渗透率低于普通低密度水泥浆(降低 69.5%),表明液体纤维增韧剂和弹性剂 RES-1 能很好地分散于水泥中,水泥水化产物具有黏结和桥联作用,调整了水泥试件内的应力分布,增加了水泥石结构的密实性,可以有效防止水泥石微裂缝的产生。

表4 低密度弹性密封水泥浆的常规性能

水泥浆	n	$K/$ (Pa·s ⁿ)	稠化时间/ min	失水量/ mL	膨胀 率/%	渗透率/ (10 ⁻⁴ μm ²)
普通低密度 水泥浆	0.81	0.48	198	52	-0.13	1.65
低密度弹性 密封水泥浆	0.86	0.27	211	39	0.45	0.32

2.2.2 低密度弹性水泥浆的弹性特征

在 80 °C、围压 18 MPa 的条件下,采用岩石三轴试验机测定水泥石的弹性模量。由图 2 可见,与普通低密度水泥石相比,低密度弹性密封水泥石的峰值应力下降了 20.4%,峰值应变提高了 98.8%,弹性模量下降 78.4%。低密度弹性密封水泥石在受到外力压缩时的弹性形变能力强,弹性模量低,有效改善了水泥石的密封性和弹性,提高水泥环层间封隔能力。同时,低密度弹性密封水泥浆的弹性极限应力为 39.5 MPa,适合复杂井固井的运行压力(10~36 MPa)。

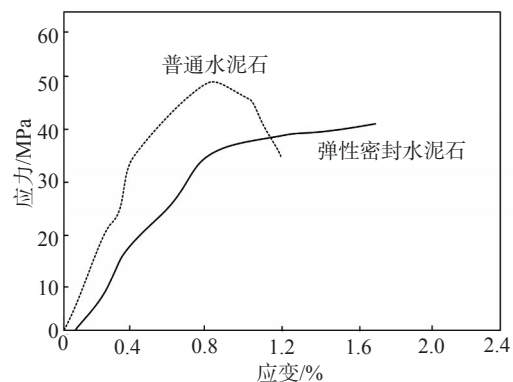


图2 水泥石单轴应力-应变测试曲线

2.2.3 低密度弹性密封水泥石的力学性能

室内测得低密度弹性密封水泥石的抗压强度为 27.2 MPa, 比普通低密度水泥浆的抗压强度 (16.9 MPa) 提高了 61%。抗折强度是指水泥石单位面积承受弯矩时的极限折断应力, 又称抗弯强度、断裂模量, 通常指水泥石材料受到弯曲负荷的作用而破坏时的极限应力^[20]。由图 3 可见, 在同样的外力作用时, 低密度弹性密封水泥石的抗折强度达到了 7.89 MPa, 相比于普通水泥石提高了 87.9%, 说明低密度弹性密封水泥浆具有良好的韧性, 水泥石力学性能得到改善, 满足施工要求。

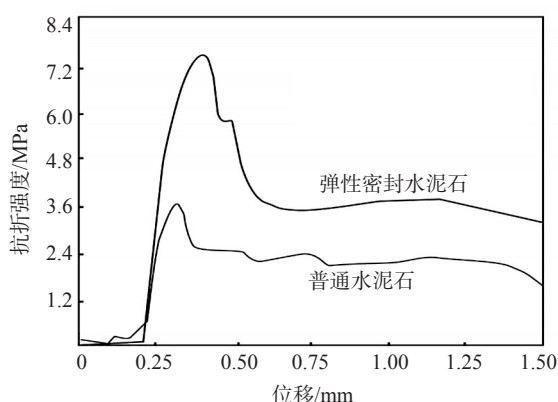


图3 水泥石抗折强度曲线

2.2.4 水泥环封隔与防窜能力

室内采用自制的高温高压固井水泥环气密完整性评价仪, 通过模拟验窜来测试水泥浆的封隔能力, 实现水泥环密封效果的检测。室内分别对两种水泥浆模型进行了交变压力验窜测试, 水泥环交变压力范围为 20~40 MPa, 升降压力频率 5 次, 90 °C 养护。水泥浆封隔与防窜能力测试结果如表 5 所示。低密度弹性密封水泥浆在模拟封固中的抗窜强度均大于 7 MPa/m², 表明该水泥浆的封固能力强。

表 5 水泥浆封隔与防窜能力测试结果

水泥浆	压力/MPa	抗窜强度/(MPa·m ²)
普通低密度水泥浆	20	7.6
	40	6.8
	20~40	3.3
低密度弹性密封水泥浆	20	8.9
	40	7.8
	20~40	7.3

3 结论

以环氧树脂和酸酐类固化剂为原料制得的弹性剂 RES-1 具有良好的亲水性, 能均匀分散于水泥颗粒间, 与水泥水化产物形成紧密的网状互穿交联结构。经 RES-1 改性后的水泥基材料的弹性与变形能力大幅度提高, 弹性模量最大降低 51%, 从而降低水泥石的脆性, 10% 的 RES-1 可提高水泥石抗窜能力 1.09 倍。将 RES-1 与优选的液体纤维、纳米液体减轻剂复配, 构建的低密度 (1.5 g/cm³) 弹性密封水泥浆具有良好的弹韧性, 水泥石的抗折强度为 7.89 MPa、抗压强度为 27.2 MPa。与普通低密度水泥石相比, 其线性膨胀率达到 0.45%, 渗透率和弹性模量降低, 抗压强度提高, 实现了水泥石“高强度低弹性模量”的韧性转变, 提高了水泥的弹性形变能力, 增强了水泥环在动态冲击条件下的层间封隔能力。

参考文献:

- [1] 彭金龙, 李全双. 抗高温低密度弹塑性水泥浆体系研究与应用[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(3): 104-108.
- [2] 郭远耀, 许明标, 宋建建, 等. 用于提高水泥浆封固能力的树脂体系性能评价[J]. 油田化学, 2020, 37(4): 599-603.
- [3] 李鹤, 黄志强, 黄鹏. 纤维材料对提高水泥石增韧性研究进展[J]. 当代化工, 2018, 47(1): 163-166.
- [4] 宋建建, 许明标, 周俊, 等. 针状硅灰石微粉改善固井水泥浆性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(8): 2657-2661.
- [5] 许明标, 李路, 武志强, 等. 一种能有效保障井筒完整性的高强韧性水泥浆体系研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2016, 13(17): 49-53.
- [6] 王晓亮, 许明标, 杨晓榕, 等. 纳米溶胶在水泥浆中的应用[J]. 油田化学, 2021, 38(3): 412-416.
- [7] 程荣超, 步玉环, 王瑞和. 碳纤维增韧防窜油井水泥体系的实验研究[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(3): 23-26.
- [8] 李文蕾, 吴永根, 马世宁. 玄武岩纤维增强机场道面混凝土力学性能实验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2012, 38(1): 179-182.
- [9] 罗洪文, 李早元, 程小伟, 等. 矿物纤维低密度水泥石力学性能研究[J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(2): 76-78.
- [10] 孙建磊, 李龙, 张胜靖. 玄武岩纤维的研究进展、性能及其产品应用[J]. 中国纤检, 2010(21): 76-79.
- [11] 谭春勤, 刘伟, 丁士东, 等. SFP 弹韧性水泥浆体系在页岩气井中的应用[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(5): 53-56.
- [12] 张清. 固井中弹塑型水泥石的研究及应用[J]. 技术研究, 2018(4): 67.

- [13] 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): 41-48.
- [14] 李早元, 郭小阳, 罗发强, 等. 油井水泥环降脆增韧作用机理研究[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 428-441.
- [15] 王银东. 页岩气储层弹性水泥浆体系研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2016: 15-22.
- [16] 孙坤忠, 陶谦, 周仕明, 等. 丁山区块深层页岩气水平井固井技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(3): 55-60.
- [17] 秦江, 宋凯, 文华, 等. 纳米低密度水泥浆体系在页岩油水平井固井中的应用[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2021, 18(2): 55-61.
- [18] TAHMOURPOUR F, HASHKI K, HASSAN H. Different methods to avoid annular pressure buildup by appropriate engineered sealant and applying best practices (cementing and drilling) [J]. SPE Drill Complet, 2010, 25(2): 248-252.
- [19] 岳家平, 耿亚楠, 武治强, 等. 水泥封固段长度对固井胶结面密封能力影响的试验研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2020, 17(2): 53-57.
- [20] 杜伟峰, 杨焕强, 黄志强, 等. 围压条件下水泥封固长度对封隔能力的影响规律[J]. 石油机械, 2021, 49(7): 53-58.

Performance Evaluation of Elastic Sealing Cement Slurry with Low Density for Improving the Sealing Capacity between Cement Layers

XING Xuesong¹, SUN Chong¹, XU Mingbiao^{2,3}, WANG Xiaoliang^{2,3}, YANG Xiaorong³, PENG Shifeng³

(1. CNOOC Research Institute Company, Ltd., Beijing 100028, P R of China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for Unconventional Oil and Gas, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, P R of China; 3. Jingzhou Jiahua Technology Company, Ltd., Jingzhou, Hubei 434000, P R of China)

Abstract: Under the existing cementing slurry technology, ensuring the long-term stability of wellbore integrity is facing challenges, especially the conventional slurry with low density. After perforation, the integrity of cement stone is seriously damaged, resulting in sealing failure, poor cementing quality between cement stone and casing or well wall, and channeling is easy to occur. In view of the above problems, the elastic agent (RES-1) was prepared by using epoxy resin and anhydride curing agent as raw materials, the liquid fiber was used to increase the strength and toughness of cement paste, and the nano liquid lightening agent was used to improve the settlement stability of cement slurry. The comprehensive performance evaluation of elastic sealing cement slurry with low density was carried out. The results showed that RES-1 could reduce the elastic modulus and improve the deformation capacity of cement paste. The optimum dosage was 10%. The elastic sealing cement slurry system with low density (1.5 g/cm³) had good rheology. The water loss was less than 50 mL and the linear expansion rate reached 0.45%, which could effectively inhibit the generation of micro annulus and micro gap. The elastic sealing cement slurry with low density had good compactness, flexibility and elastic deformation ability. Compared with ordinary cement slurry with low density, its permeability and elastic modulus were reduced by 69.5% and 78.4%, and its compressive strength and flexural strength were increased by 61% and 87.9% respectively. The elastic sealing cement slurry with low density could effectively increase the long-term sealing capacity of cement sheath and improve cementing quality.

Keywords: low density; elastic sealing cement slurry; elastic agent; deformation capacity; sealing capacity

(上接第 196 页。continued from p.196)

amine groups as a shale inhibitor was synthesized by the reaction of aziridine and TAEAA made from triethanolamine (TEA) and 2-chloroethylamine hydrochloride (CEAH). Meanwhile, the metal organic framework (MOF) material was employed as catalyst for ring-opening reaction. The adsorption morphology of HBEA on clay surface was simulated by molecular dynamics, the inhibition of HBEA and the compatibility with drilling fluid system were evaluated. The results showed that attributing to its high ratio of amine groups, HBEA exhibited larger amine density than the straight chain polyetheramine D230 and D400. The adsorption model of HBEA on clay surface was consistent with that of D230 and D400, but the density and adsorption energy of a single molecule were significantly higher than that of the latter two, indicating the excellent adsorption capacity of HBEA. The yield point of slurry system containing 1% HBEA was only 7.0 Pa when the dosage of bentonite reached 25%. The swelling height of bentonite in 2% HBEA solution reduced about 60% compared with fresh water system and the rolling recovery rate of shale was 78.87%. Compared with the original polyetheramine inhibitor in three drilling fluids, HBEA with same dosage ensured the system stability of rheological property and filtration before and after aging. Meanwhile, HTHP filtration decreased gently and the rolling recovery rate of shale increased slightly. HBEA had excellent inhibition and compatibility with different drilling fluids.

Keywords: hyperbranched polyetheramine; inhibitor; amine value; adsorption energy; drilling fluid