

适用于酸化压裂的水泥浆体系研究及现场应用

杨智程

中海油田服务股份有限公司 河北廊坊

【摘要】根据钻进情况，目标井需要在固井完成后进行酸化压裂完井作业。需要一种适用于酸化压裂的水泥浆体系，要求弹性模量低于 6GPa，抗拉强度高于 3MPa。经过严格的材料研选与水泥浆性能优化，成功构建出一套具有低弹性模量，高抗拉强度的水泥浆体系，弹性模量为 5.8GPa，抗拉强度为 3.2MPa，具有优异的力学性能，满足酸化压裂作业需求并成功应用于目标区块。

【关键词】固井水泥浆；酸化压裂；弹性模量；抗拉强度

【收稿日期】2025 年 7 月 14 日

【出刊日期】2025 年 8 月 12 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250355

Research and on-site application of cement slurry system suitable for acid fracturing

Zhicheng Yang

China Oilfield Services Limited, Langfang, Hebei

【Abstract】 According to the drilling situation, the target well needed to proceed acid fracturing completion operations after cementing operation was completed. A cement slurry system suitable for acid fracturing was required, which showed have elastic modulus below 6GPa and tensile strength above 3MPa. After strict material selection and performance optimization for cement slurry, a cement slurry system with low elastic modulus and high tensile strength had been successfully constructed. The results showed that its elastic modulus was 5.8 GPa and its tensile strength was 3.2 MPa, which had excellent mechanical properties and could meet the requirements of acid fracturing operations. Then, the cement slurry was successfully applied to the target block.

【Keywords】 Cementing slurry; Acid fracturing; Elastic modulus; Tensile strength

前言

目标区块在固井完成后会采用酸化压裂的方式进行完井作业，除了满足常规作业要求外，对水泥石的力学性能提出了特别的要求，需构建一种低弹性模量，高抗拉强度的水泥浆体系^[1,2]，满足酸化压裂作业^[3]需求，最大程度的减少压裂作业对水泥石的破坏^[4]。测录井结果表明目标区块最高静止温度为 120℃。根据水泥水化特性，水泥水化产物在高于 110℃时转化为疏松多孔的 α -硫酸二钙，据固井学者的研究^[5]，防止水泥强度衰退的方法一般是在水泥中加入不少于 35%（BWOC）的硅粉，硅粉的掺入，使得钙硅比由 1.5 调整为 1.0，可避免水泥水化产物在 110℃时转化为疏松多孔的 α -硫酸二钙，转而形成低孔隙率的低钙硅酸盐雪硅钙石，防止抗压强度严重衰退^[6]。针对酸化压裂作业井的特殊需求，需要水泥石满足较低的弹性模量要求。本研究通过适当增大水灰比来减小体系中的水泥含量，从而减小

水泥石的抗压强度，降低其脆性。常规水泥浆的密度为 1.90g/cm³，为了保证水泥浆的稳定性，该水泥浆体系的密度设计为 1.85g/cm³。

1 实验部分

1.1 实验材料研选

1.1.1 抗高温衰退材料的研选

在本次水泥浆体系的设计中，选择了 100 目、300 目以及 800 目硅粉。经水泥浆基本性能测试结果表明，100 目硅粉过粗，容易在水泥浆中产生沉降，影响水泥浆的稳定性；800 目硅粉过细，会明显影响水泥浆的混灰性能，使水泥浆浆体过稠，不利于作业时水泥浆的泵送和循环顶替。因此优选 300 目硅粉作为该体系的抗高温衰退材料，利于水泥浆的流变型的调节，同时也保证了水泥浆的沉降稳定性。

1.1.2 降失水剂的研选

优选 C-FL80L 作为水泥浆体系的降失水剂，是一

作者简介：杨智程（1996-）男，汉族，天津人，硕士研究生，工程师，研究方向：固井专业相关工作。

种 AMPS 类的降失水剂，具有耐高温和耐盐的特性，且在高温条件下控制失水性能优异。

1.1.3 缓凝剂的研选

优选 AMPS 类高温缓凝剂作为该水泥浆体系的缓凝剂^[7]。AMPS 活性高，具有耐温耐盐性好的特点。该种缓凝剂适用于温度高于 100℃的油气井，且对水泥浆有一定的分散作用，在发挥缓凝作用的同时可以降低水泥浆的粘度，给水泥浆流变性能的调节提供了很大的空间。

1.1.4 降脆增韧材料的研选

1) 弹性材料的研选

国内外常用于固井水泥浆的弹性材料有胶乳、树脂、碳粉、橡胶粉、轮胎粉、沥青等。

其中，胶乳是一种乳液聚合物，悬浮颗粒直径一般为 0.05~0.5μm，含有约 50%固相。胶乳被广泛应用于固井水泥浆中来提高水泥石的弹性，胶乳还具有填充和成膜的作用，可以减小水泥石的孔隙率，同时具有辅助降失水的作用，对明显提高水泥浆的防气窜性能。有研究发现，掺入胶乳的水泥石，抗冲击功降低，抗折强度增大，抗压强度减小，弹性模量大幅度降低，总体来看，水泥石的形变能力明显提高，抗冲击性能增强，。该体系选择胶乳作为弹性材料^[8]。

2) 增韧材料的研选

国内外常用的增韧材料有碳纤维、玻璃纤维、矿物纤维等。该体系选择矿物纤维 C-SE7 作为关键增韧材

料。

1.2 实验设备

符合 API 标准的专业实验设备，包括恒速搅拌机、常压稠化仪、旋转粘度计、高温高压失水仪、增压稠化仪、增压养护釜、超声波静胶凝强度测试仪、压力试验机、单轴抗压测试仪、以及巴西劈裂测试仪等。

1.3 实验方法

水泥浆实验根据 GB/T 19139-2012 标准相关要求

1.4 实验配方

该体系的设计密度为 1.85g/cm³：100%水泥 + 40%300 目硅粉 + 2%矿物纤维 + 0.5%消泡剂 + 4%高温降失水剂 + 6%胶乳 + 0.4%分散剂 + X%高温缓凝剂 + 52.2%淡水。配方中涉及材料均来自蓝海博达科技有限公司。

2 水泥浆体系的性能测试及结果讨论

2.1 酸化压裂水泥浆常规浆体性能测试

2.1.1 流变性能

经过配方的优化调整，优选出具有良好流变性能的水泥浆体系，相关流变数据见表 1。

2.1.2 沉降稳定性

在 110℃，90MPa 的条件下进行了停开机试验。停机 30 分钟后开机，无较大的稠度变化，且拆出后的浆体无沉降，证明该体系在 110℃循环温度下的沉降稳定性良好，实验结果见图 1。

表 1 水泥浆体系的流变性能数据

水泥浆密度	养护温度	流变						
		φ3	φ6	φ30	φ60	φ100	φ200	φ300
1.85g/cm ³	90℃	7	11	32	56	80	136	186

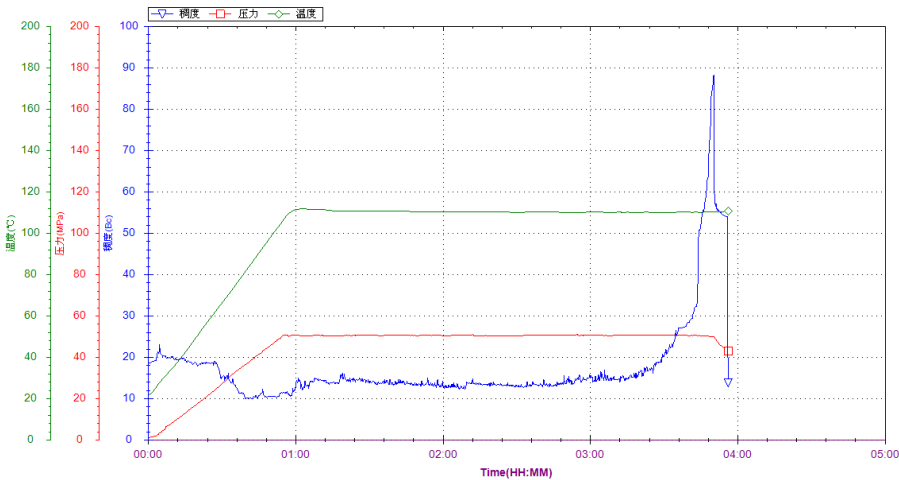


图 1 稠化时间曲线图

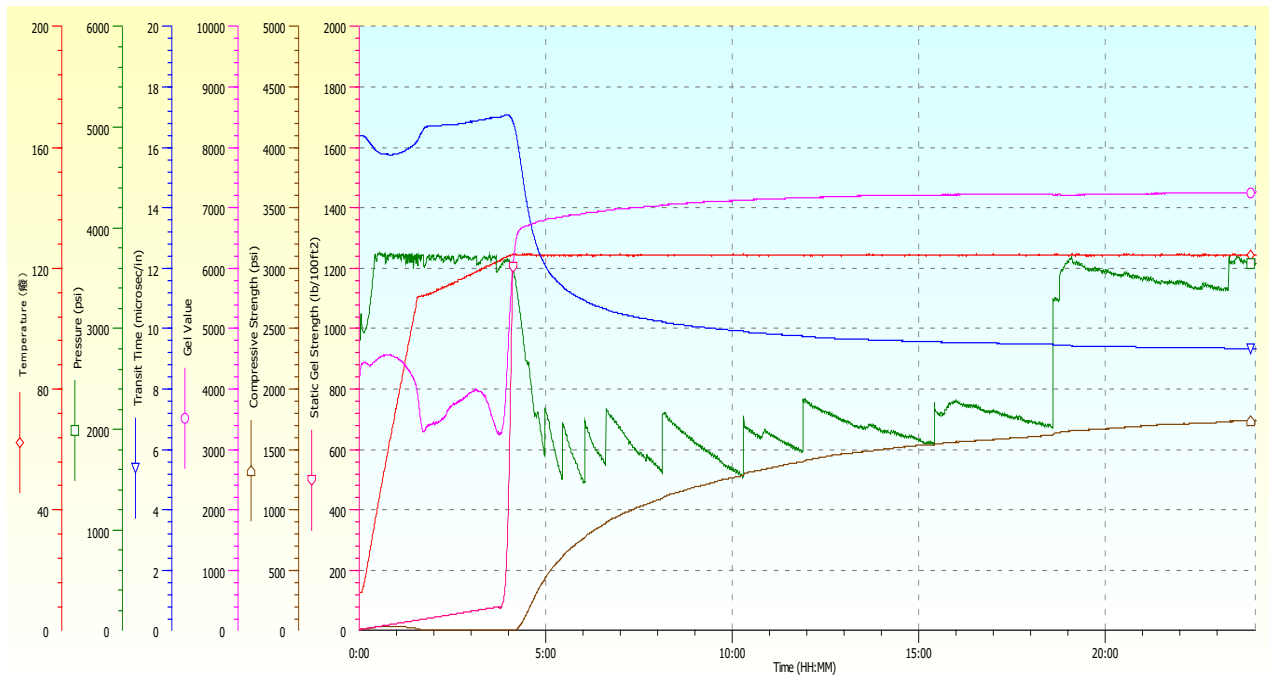


图2 UCA 测试结果

2.1.3 API 失水性能

使用高温高压失水仪，在 90℃条件下测试该体系的失水性能。失水量 18ml，满足现场要求（<50ml）。

2.1.4 稠化时间及可调性测试

现场施工的稠化时间要求在 200-250min。经过实验研究，高温缓凝剂加量为 2g 时，可将水泥浆在 110℃循环温度下的稠化时间调至 240min，基本呈直角稠化，实验结果见图 2。

通过调整高温缓凝剂加量，测试水泥浆在 110℃下的稠化时间。研究表明高温缓凝剂加量变化±1g，该水泥浆体系的稠化时间不存在反转等异常现象，稠化时间未出现急剧缩短或者延长的情况。

2.1.5 防窜性能

目前国内外常用的水泥浆防窜性能评价方法有

SPN 值，静胶凝过渡时间法，水泥浆测窜分析法等，此次采用静胶凝过渡时间法对该体系进行防气窜性能的评价测试^[9]。该体系的静胶凝过渡时间为 15min，实验结果见图 2，该体系由液态转变为固态过渡时间较短，气侵时间短，表明该体系的防气窜能力较强。

2.1.6 水泥石力学性能

力学性能评价方法：采用岩石力学评价设备，该设备可开展单轴，三轴抗压强度测试，巴西劈裂抗拉测试^[10]，循环加载抗压测试以及蠕变压力测试等。此次实验我们采用单轴抗压测试以及巴西劈裂测试来评价水泥石的弹性模量和抗拉强度。将该体系在 120℃静止温度下进行增压养护 24 小时，拆出后使用岩石力学评价设备分别对水泥石的抗压强度，杨氏模量以及抗拉强度进行了评价，评价结果见表 2。

表 2 酸化压裂水泥石力学性能

配方	序号	长度/mm	直径/mm	质量/g	强度/MPa	杨氏模量/GPa	抗拉强度/MPa	抗拉强度平均值/MPa	杨氏模量平均值/GPa
1.85sg 0%胶乳 0%纤维	1-1	49.67	25.09	46.03	30.4	7.82	2.1	2.30	7.89
	1-2	49.59	25.09	45.94	28.5	7.96	2.5		
1.85sg 6%胶乳 2%纤维	2-1	47.38	25.12	43.01	24.7	6.42	3.1	3.25	5.84
	2-2	49.14	25.07	44.48	25.1	5.25	3.4		

测试发现，水泥石的抗压强度均大于 2000psi，满足基本作业需求。掺入胶乳和纤维的水泥石的抗拉强度为 3.25MPa，弹性模量为 5.84GPa，与空白组相比，

水泥石的抗拉强度明显提高，弹性模量明显降低，水泥石的弹韧性得到了大幅的提升，水泥石力学性能满足后期酸化压裂的作业需求。

3 现场应用

渤海中部海域某井, 8-1/2" 井眼设计井身 6155m, 钻进至 4495m 时遇花岗岩, 继续钻进至 4988m 提前完钻。本井段钻进过程中有不同程度的 CO₂ 置换侵入; 且完井后需进行压裂作业, 压裂压力较高。该井段采用适用于酸化压裂的水泥浆体系固井作业, 该体系速凝段过渡时间短, 缓凝段返高增加附加量, 保证固井结束后压稳系数 > 1, 可有效防止气侵。水泥石弹性模量低于 6.0GPa, 水泥环弹韧性较好, 可有效保障 110MPa 压裂水泥环密封完整性。固井作业顺利进行, 全井段优良, 固井作业结束后未出现环空带压现象, 层间封隔有效。

4 结论

1) 经过严格的材料研选和体系的优化与性能测试, 成功构建出一套适用于酸化压裂的水泥浆体系;

2) 该体系流变性能良好, 高温高压失水可控, 稠化时间可调, 稠化敏感性较小;

高温下水泥石的弹性模量低, 抗拉强度高, 力学性能优异, 可满足酸化压裂作业需求。

参考文献

[1] 冯瑞阁, 李玮, 孟仁洲, 等. 星探 1 井韧性防窜水泥浆技术

[J]. 钻井液与完井液, 2023.9, 40(5), 658~664.

[2] 胡千红, 陈军, 王正非, 等. 耐高温弹性水泥石研究[J]. 化工管理, 2023, (21), 145~149.

[3] 武愉欣. 压裂作业对固井水泥环完整性影响分析[J]. 西部探矿工程, 2023, (1), 75~78.

[4] 刘广杰. 低渗油气田水平井压裂完井固井水泥浆技术研究[J]. 化工管理, 2015.2, 145.

[5] 符军放. 掺硅粉高水灰比水泥石高温强度衰退现象分析[J]. 钻井液与完井液, 2017.1, 34(1), 112~115.

[6] 赵峰, 曾雪玲, 龙丹等. 超高温固井水泥添加剂研选及工程性能评价[J]. 钻采工艺, 2023.7, 46(4), 131~136.

[7] 田宏伟, 汪蕾, 耿国伟等. 油井水泥高温缓凝剂 CHR40 的合成与评价[J]. 石油化工应用, 2016.1, 35(1), 17~20.

[8] 杨智程, 黄峰. 储气库固井水泥浆技术综述[J]. 化学工程与装备, 2022.10, 216-218.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

