

# 高温高压井固井水泥浆体系优化路径及其经济效益研究

刘 丽 (中原石油工程有限公司固井公司, 河南 濮阳 457000)

**摘要:** 高温高压井固井水泥浆体系对于固井工作的效率和质量有重要的基础作用, 本文深入分析了高温高压固井工作的核心挑战, 面对难题, 本文提出了利用高性能外加剂调控高温行为, 同时构建稳定浆体结构与综合防窜体系, 进而提升水泥石力学性能与长期耐久性, 以及设计智能协同的一体化浆柱结构等一系列优化路径建议, 并从风险、成本、后续效益以及整体效益等角度, 全面阐述了优化路径的经济价值。

**关键词:** 高温高压井; 固井; 水泥浆体系; 经济效益

**中图分类号:** TE256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 036-0079-03

## Optimization Path and Economic Benefits of Cement Slurry Systems for High-Temperature High-Pressure Wells

Liu Li (Cementing Company, Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd., Puyang Henan 457000, China)

**Abstract:** The cement slurry system for high-temperature high-pressure (HTHP) wells plays a fundamental role in the efficiency and quality of cementing operations. This paper provides an in-depth analysis of the core challenges in HTHP well cementing. In response to these difficulties, it proposes optimization pathways, such as utilizing high-performance additives to regulate high-temperature behavior, constructing stable slurry structures and comprehensive gas migration prevention systems, thereby enhancing the mechanical properties and long-term durability of the set cement. Additionally, it suggests designing an intelligently coordinated integrated slurry column structure. From perspectives of risk, cost, subsequent benefits, and overall efficiency, the paper comprehensively elaborates on the economic value of these optimization approaches.

**Keywords:** high-temperature high-pressure wells; cementing; cement slurry system; economic benefits

近年来, 全球能源需求一直在持续上升。随着油气勘探开发的不断深入, 越来越多的工作区块, 开始把目标转向深层、超深层以及构造复杂的地段。在这种情况下, 对高温高压固井环境的工程挑战进行系统梳理和深入分析, 找到一套更具针对性和协同性的水泥浆优化技术路径, 对于项目总体的经济效益和安全性而言, 具有重要的现实意义和研究价值。

### 1 高温高压固井核心挑战

高温高压井的固井作业, 并不是常规固井技术的简单延伸。在这种环境下, 温度和压力都会远超常规工况, 两者的耦合作用, 会在施工阶段和整个井筒寿命周期内持续影响水泥浆体系的表现。这些影响不是表面的调整问题, 而是直接来自材料本身在极端环境下的特性变化。

#### 1.1 水泥浆高温下性能劣化挑战

高温问题, 始终是最先冲击水泥浆性能的影响因素。通常, 当井下温度超过 110℃ 以后, 硅酸盐水泥的水化过程就会明显加快。水泥颗粒在这种条件下反应更快, 水泥浆的稠化时间会急剧缩短, 流动性也会在很短时间内消失<sup>[1]</sup>。

对于现场施工来说, 这种变化会直接增加泵送风险, 稍有不慎, 就可能出现“憋泵”或类似的安全问题<sup>[2]</sup>。

#### 1.2 高压及压力波动下的稳定性挑战

高压环境问题, 同样也会对水泥浆体系造成多方面的冲击。在高压条件下, 水泥浆内部的固相颗粒, 会更容易沉降出来, 自由水也会更容易被压滤析出<sup>[3]</sup>。这些变化会让环空中的浆柱密度分布出现明显差异, 这就会为地层流体提供各种窜流通道。而最棘手的则是在水泥浆从液态向固态过渡的这个阶段。在这段时间里, 静液柱压力会因为失水和体积收缩而下降。而如果地层中存在高压气体, 就很容易趁机侵入浆体, 形成连续的窜流路径。即使是水泥石已经形成, 后期的增产措施、关井操作和压力测试等行动, 也会让井筒压力出现大幅波动。

#### 1.3 水泥石长期密封完整性挑战

高温高压油气井的服役周期通常都比较长, 水泥环一般是要在几十年的时间里, 长期承受来自温度、压力和地层流体的多重影响的。而由于水泥本身属于脆性材料, 它在地应力变化、套管热胀冷缩, 以及射孔或压裂作业的冲击下, 是很容易会出现各种细小裂纹的。这些裂纹会不断扩展并最终连通, 对层间封隔功能造成直接的破裂威胁<sup>[4]</sup>。

#### 1.4 复杂工况下工程适配性挑战

高温高压井一般会分布在一些地质条件比较复杂的区域, 所以, 固井作业往往面对的是多难点并发的

复杂情况。而且深井固井常常伴随较大的温度梯度。同一套水泥浆体系的设计，必须要能在多个温区都可以保持稳定性能，这样的话，体系对于外加剂的匹配性，就有了更高的要求。如果配比稍有不当，就可能出现提前凝固或流变性突变等问题<sup>[5]</sup>。

## 2 水泥浆体系优化技术路径

面对前述的各种系统性挑战，需要将材料本身的热力学行为、流变特性、还有井下实际的工况，都进行整合考量，形成一种具有系统工程思维的优化路径，才能更好的解决问题。

### 2.1 利用高性能外加剂调控高温行为

面对高温环境的挑战，关键的做法是要对水泥水化的过程进行主动“调控”，而不是简单的抑制而已。这里面的关键环节，是要做好外加剂的分子结构设计工作。以耐高温缓凝剂为例，其可以在高温下稳定吸附在水泥颗粒的表面，通过控制钙离子的浓度，来调控整个水化晶核的生长速率，实现水化进程的“可控化发展”。在这种情况下，就算温度超过了200℃，水泥浆的稠化时间也能持续的稳定下去，不会突然缩短。而这种可预测的确定性，是现场施工安全窗口把控的重要基础。

另一方面，高温下的强度衰退问题，也必须同步解决。这里面，活性硅质材料（如硅粉）是比较常用的一种有效方案。因为硅粉中的无定形二氧化硅，在高温下会与氢氧化钙发生二次反应，会生成更稳定的水化硅酸钙凝胶。而这一过程，实质上就构建了一种能够“抗高温”的微观结构，它能使水泥石的强度在长期服役中更加稳定，轻易不会出现显著衰退的问题，同时也能将渗透率控制在较低的水平，效果还是很好的<sup>[6-7]</sup>。

此外，高温降水剂与具备高温分散能力的减阻剂，同样也是保障体系稳定的重要组成部分。它们的主要作用，是让水泥浆在高温作用下，依然能保持良好的流动性和滤失控制性能，这样的话，在泵送的过程中，就不会出现流变性突变，或是失水过快的意外情况。整体来看，这几类材料组合之下，可以共同形成一个协同作用的“高温材料包”，为整个固井体系在高温环境下的可靠性，奠定坚实的材料基础。

### 2.2 构建稳定浆体结构与综合防窜体系

高压环境所引发的固相沉降和自由水析出问题，其根源在于浆体自身的内部结构，还是不够稳固。要解决这类问题，关键做法，是必须从优化固体颗粒的级配，还有强化整体结构控制来入手。这里面，要合理搭配不同粒径的微细固相颗粒，并且引入纳米级的材料，把颗粒之间的空隙全给填充完整，形成一种更

为致密、均匀的浆体结构。这种结构，才能显著提升浆体的悬浮稳定性，将沉降与析水的问题，很好地控制住。

与此同时，防气窜也是高压固井中另一个技术关键点。气窜风险最高的阶段，一般的话，主要是集中在水泥浆从液态向固态转变的这个“过渡态”时期。因此，触变性水泥体系、自愈合水泥体系，以及添加微膨胀组分的研究，就成为了近年来比较重要的技术探索方向。触变体系的特点是，它能在浆体静止的时候，形成一种弱凝胶结构，这样的话，就能直接增强体系对气体侵入的阻力。而自愈合体系的作用，在于它能在微裂缝产生的最初阶段，就实现自动封堵的功能。至于微膨胀组分的作用，则是可以补偿水泥浆因水化和失水而产生的体积收缩，避免静液柱压力下降的问题。实践中，可以将这三类措施结合起来应用，这样的话，在高压环境下，也能构建起一个多层次、有韧性的立体防窜屏障，整个防窜的可靠性，就会更高一些。

### 2.3 提升水泥石力学性能与长期耐久性

从保障井筒几十年长期安全的角度来看，水泥石的脆性断裂风险，还有化学侵蚀问题，是必须正面解决的两大挑战。这里面，增韧与补偿收缩，是改善水泥石脆性问题的两条主要路径。通常的做法，是往水泥浆里掺入纤维材料，比如聚丙烯纤维或玄武岩纤维。这种做法，能在水泥石内部形成一个三维的网络支撑。当水泥石因应力产生微裂缝的时候，这些纤维就能发挥出“桥联”的作用，可以把裂缝的两边给拉住，有效地限制住裂缝的扩展，这样一来，材料的抗拉和抗冲击性能，就提升上去了。这会使得水泥石在应对井下周期性的压力波动时，表现得更具韧性，更“有抵抗力”，对长期的层间封隔是有利的。

与此同时，提升水泥石长期的化学稳定性，也是一个核心工作。这里面，关键的材料是偏高岭土，还有聚合物类的抗蚀材料。偏高岭土的主要作用，是去消耗水泥水化产物中，那些容易受腐蚀的氢氧化钙，把不利的成分转化掉，从而优化整个材料的物相组成。而聚合物类材料的功能，则是在水泥石的孔隙表面，形成一层憎水膜，这层膜能够阻挡酸性气体，或者高矿化度地层流体的侵入。实践中，将这类材料组合起来使用，相当于给水泥石注入了内在的“耐久基因”，能够帮助其在漫长的服役周期内，把性能稳定在一个较好的水平，延缓材料衰减的进程，这是一个着眼于长期效益的解决方案。

### 2.4 设计智能协同的一体化浆柱结构

面对复杂多变的井下工况，固井设计更应该被理

解成是,构建一个协同工作的“系统”。这里面,所谓“一体化”设计,指的是不能只考虑一种水泥浆配方,而是必须依据井筒不同深度段的温度、压力,以及具体的地质特性,对前导浆、领浆、尾浆等各段浆体的性能,进行针对性的配置,并且要让它们之间,能够像接力一样良好地衔接起来。比如说,在存在“窄密度窗口”的脆弱井段,做法上,就需要采用低密度但强度较高的浆体,来实现安全的压力平衡,防止压漏地层;而在主要气层或高压层附近,则必须换成高密度、具备高防窜性能的尾浆,进行重点封固。这种分段设计、区别对待的做法,整个的针对性是更强的。

与此同时,对于存在巨大温差的深井来说,缓凝剂的梯度设计,更是一项至关重要的工作。这里面,必须确保从井底到井口,整个浆柱在不同温度区的稠化时间,能够合理地匹配起来。这样的话,才能实现整体浆柱的同步凝结与强度发展,避免出现环空密封不连续的问题,保证封隔的完整性。此外,前置液的流变性优化,以及它和钻井液、水泥浆之间的相容性设计,也是保障钻井液被高效顶替、保证水泥环完整性的关键环节之一。

总的来说,只有实现整个浆柱结构,在性能上与施工时序上的全局协同,才能在复杂的井眼条件下,获得最为稳健可靠的固井质量,这整个过程,正是系统工程思维在固井作业中的最终体现。

### 3 优化实践的经济效益分析

高温高压井的固井优化工作,绝不仅是技术层面的提升那么简单。这里面,它所带来的经济价值,往往比项目预期的还要更大一些。因为固井质量的好坏,会直接影响到后续十几年甚至更长时间的生产表现。所以,从作业风险控制、生产效益保障以及油田整体开发价值这三个角度,可以对固井水泥浆体系优化工作的经济效益进行系统性的分析。

#### 3.1 降低作业风险与直接成本

优化后的水泥浆体系,其最直接的经济效益,在于能够大幅提高一次固井的成功率。对于高温高压井来说,这里面,一旦固井作业失败,后续的补救成本是极高的。无论是停工等待的时间,还是额外消耗的物资,都会直接计入非生产性成本。因此,一套稳定且可控的固井体系,其核心价值,其实是帮助项目避免那些高成本的补救措施,比如挤水泥、补注水泥浆段,或者更极端的侧钻作业等等。这部分成本的节约,是最直观、最“立竿见影”的,它也直接构成了项目初期投资效益的重要部分。

#### 3.2 保障井筒完整性与后期生产效益

固井质量的好坏,会直接决定一口油气井在后期,

能否顺利实施压裂、分层开采等一系列增产措施。这里面,如果水泥环无法提供长期可靠的层间封隔,那么这些增产措施就会受到严格限制,甚至根本无法正常进行。一个能够长期保持完整性的井筒,它不仅能减少因环空带压导致的套管风险,也能显著降低后期的维护频率和维修成本。而这对于整个油田的生产运营来说,是有长期的、稳定的隐性收益的。而这也是支撑油田稳产、高产的重要基础。

#### 3.3 提升油田整体开发价值

从更宏观的油田开发角度来看,一套优质的固井体系,其价值是延伸性的。它能够有效延长单井的经济寿命,提高最终的采收率,同时也能最大限度地减少因环空泄漏、井喷等高风险事件带来的环境与安全风险。油田的整体开发效率,也会随着每一个井筒可靠性的提升,而得到整体性的改善。所以,水泥浆体系的优化工作,本质上,就是保障油田资产长期价值的重要技术环节之一。

### 4 结语

高温高压井的固井工作,是一个需要材料科学、流体力学和工程经验共同支撑的一种系统工程。从高温稳定性、高压防窜能力、长期耐久性,到复杂工况下的适配性来看,这其中的每一项固井影响因素,都需要施工团队在材料设计和体系组合上,付出更多精细化的努力。未来的研究中,仍需在新材料、新机理和智能化设计方法上,继续深化,从而更好的应对不断深化的勘探开发工作需要。

#### 参考文献:

- [1] 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(01):109-114.
- [2] 崔金龙.固井超高温水泥浆体系性能评价与应用[J].西部探矿工程,2023,35(06):26-28.
- [3] 马丞.固井水泥浆体系优化分析[J].石油和化工设备,2025,28(03):119-122.
- [4] 齐静,朱伟伦,张新文,裴雪峰,哈丽米娜·巴拉提.深井固井水泥浆技术浅析[J].内蒙古石油化工,2025,51(05):96-100.
- [5] 于培刚,侯海欧.不同固井水泥浆体系防气窜能力研究[J].河南科技,2024,51(01):33-38.
- [6] 张弛,王中华,李早元,等.超深高温高压气井固井防气窜水泥浆体系研究与应用[J].天然气工业,2024,44(5):120-128.
- [7] 刘洋,郭小阳,李宁,等.基于全生命周期性能调控的深井高温高压固井水泥浆体系设计[J].石油勘探与开发,2023,50(2):389-398.