

页岩气水平井固井水泥浆体系优化路径及其经济效益研究

李 康 (中原石油工程有限公司固井公司, 河南 濮阳 457000)

摘要: 本文系统研究了页岩气水平井固井水泥浆体系的优化路径及其经济效益。页岩气水平井固井面临顶替效率低、浆体沉降稳定性差、水泥石脆性高以及易发气窜等技术挑战, 直接制约井筒完整性与长期生产安全。针对上述问题, 研究提出了以优化流变性并强化前置液冲洗、增强浆体稳定性与控制失水、引入增韧材料改善力学性能、应用微膨胀与自愈合材料提升密封能力为核心的四大优化路径。

关键词: 页岩气; 水平井固井; 水泥浆体系; 技术优化; 经济效益

中图分类号: TE256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 036-0043-03

Research on the Optimization Path and Economic Benefits of Cement Slurry Systems for Shale Gas Horizontal Wells

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

Abstract: This paper systematically studies the optimization path and economic benefits of cement slurry systems for shale gas horizontal wells. Cementing in shale gas horizontal wells faces technical challenges such as low displacement efficiency, poor slurry settlement stability, high brittleness of set cement, and susceptibility to gas channeling, which directly affect wellbore integrity and long-term production safety. To address these issues, this research proposes four core optimization paths: optimizing rheological properties and enhancing spacer fluid flushing, improving slurry stability and controlling fluid loss, introducing toughening materials to enhance mechanical performance, and applying micro-expansion and self-healing materials to improve sealing capacity.

Keywords: Shale Gas; Horizontal Well Cementing; Cement Slurry System; Technical Optimization; Economic Benefits

我国页岩气资源丰富, 开发潜力大, 商业化条件好。加快页岩气勘探开发和利用, 对满足经济社会发展对于清洁能源的需求、控制温室气体排放、改善居民用能环境具有重要意义^[1]。在这一过程中, 水平井技术具有重要作用, 而固井质量又是保障水平井可以安全高效开发的关键环节之所在。这其中, 固井成效在很大程度上又是取决于水泥浆体系的性能, 水泥浆体系的流动特性、稳定性以及成环后的密封能力, 都会直接影响到井筒全周期的安全性和经济性^[2]。因此, 研究页岩气水平井固井水泥浆体系的优化路径, 就有了其现实必然性。与常规油气井相比, 页岩气水平井具有更加突出的工程复杂性。其井眼轨迹往往会更长、变化也会更加的频繁, 环空空间相对会更加狭窄, 地层压力体系也会普遍更为敏感。这些因素全都叠加在一起, 就会使固井施工对水泥浆体系有更为严格的要求^[3]。因为固井质量一旦不达标, 就会在后续生产阶段, 不断放大风险。环空带压、气窜等典型问题, 不仅是会影响到井筒安全, 还会使修井干预的次数快速增加, 并可能导致产能波动, 甚至是下降, 从经济层面, 削弱整个开发项目的收益水平。因此, 结合页岩气水平井的工程特点, 对水泥浆体系进行系统化、针对性的优化, 是目前有效提升固井质量、提高开发效益的重要路径之一。

1 页岩气水平井固井水泥浆体系概述

1.1 体系基本构成与功能

页岩气水平井固井水泥浆属于多组分复合体系。该体系主要包括三个部分: 油井水泥、外掺料和外加剂。其中, 油井水泥是体系中的基础胶结材料。外掺料的主要作用, 是要调节水泥浆的密度及其力学性能。外加剂的作用, 则是要负责对水泥浆的流变性、凝结过程和稳定性等工程性能, 进行精确调控。这一体系的核心功能, 是要在套管与地层之间, 形成完整、密实且持久的水泥环。而优质的水泥环, 能够实现有效的层间封隔。这种封隔作用, 既可以防止气窜与水窜的发生, 也能对套管起到支撑与保护作用^[4]。由此可见, 水泥环是否具备长期完整性, 是会直接关系到井筒的整体寿命与安全水平的。

1.2 面临的特殊技术要求

页岩气水平井固井作业, 需要应对一系列特殊的技术挑战。井眼大斜度段及水平段, 容易引起水泥浆发生沉降或形成窜槽。而环空间隙狭窄, 会导致流动阻力显著增大, 因而也会对水泥浆的流变性能, 提出更苛刻的要求。而且, 页岩地层往往具有较窄的压力窗口, 这就要求水泥浆必须同时满足低密度和高强度的特性^[5]。水平段较长, 顶替效率难以保证, 因此水泥浆需要具备良好的流动性与悬浮稳定性。固井作业

结束后,页岩气容易发生早期气窜,因此,水泥浆体系还需拥有优异的防气窜能力。在这些特殊技术要求之下,常规水泥浆体系就必须进行针对性的调整与优化,才能更好的适应到页岩气水平井的实际工程需要。

1.3 主流体系类型与发展

为应对上述技术挑战,多种针对性的水泥浆体系逐渐发展并得到应用。比如,低密度高强度水泥浆体系,通常就会掺入空心微珠、漂珠等减轻材料,来实现密度与强度的平衡。而防气窜水泥浆体系,则多会采用触变水泥、胶乳水泥或膨胀水泥等材料,以增强环空密封能力。还有韧性水泥浆体系,则是会加入纤维或弹性材料,来改善水泥石的抗冲击性能,从而适应页岩地层后续的压裂作业。目前,水泥浆体系的发展,总体呈现出一种功能复合化与性能精细化的趋势。这是因为,单一性能突出的体系,已难以满足工程实际需求,水泥浆体系需要在防气窜、力学性能、耐久性等方面,进行综合性能的全面提升。

2 页岩气水平井固井水泥浆体系常见问题分析

2.1 顶替效率低与水泥环不连续

在水平井段,顶替效率低是一个常见问题。钻井液与水泥浆之间,存在着一定的密度和流变性差异,而这种差异,很容易就会导致顶替不彻底。而未能被顶替干净的钻井液,就会残留在环形空间里,形成连续的槽道。这些残存的槽道,最终就会成为水泥环中的薄弱带或缺失部分。这其中,不连续的水泥环,是无法实现有效的层间封隔的。在后续的生产或压裂作业中,高压流体就会很容易沿着这些薄弱通道发生窜流。而这种层间流体互窜,会直接威胁到生产安全,也可能对环境造成严重的影响。

2.2 水泥浆稳定性差引发的缺陷

水泥浆在水平段容易发生稳定性问题。具体表现上,就是自由水析出和固体颗粒沉降的问题。这其中,自由水会上移并聚集在井眼上侧,从而形成连续的水带,这会严重破坏水泥环的整体封固质量。与此同时,固体颗粒沉降则是会导致井眼下侧的水泥石密度过高,而上侧密度又过低。这种水泥石密度分布不均的现象,直接的后果就是水泥环的强度也不均匀。在后期井下作业或地层压力变化时,强度薄弱点就会更容易发生破裂。

2.3 水泥石力学性能不匹配

常规水泥石通常表现出较高的脆性和较大的弹性模量。然而,页岩气开发,是需要进行大规模的水力压裂,这一过程会产生巨大的交变应力。而在这种应力反复作用下,脆性的水泥石就会极易产生微环隙或发生破裂。而如果水泥环的完整性遭到了破坏,是很

难进行自行恢复的。这问题的核心就在于,水泥石与套管及周围地层的力学性能是存在不匹配问题的。这种不匹配会导致它们在受力时,变形不协调,而这,也是诱发环空带压的一个主要原因。

2.4 早期气窜与长期密封失效

页岩气井固井后,水泥浆在凝结期间会发生一定的“失重”现象,此时液柱压力会暂时降低。地层中的气体,也会更加容易趁此压力薄弱期,侵入水泥浆柱。而气体侵入的话,不仅会形成气窜通道,还会严重破坏水泥浆与套管、与地层两个界面的胶结质量。从长期来看,部分水泥浆体系在井下环境中可能会出现体积收缩的问题。这种收缩,最终会在界面处产生微观的间隙。而这些微小的缺陷,事实上就是会为页岩气提供潜在的运移通道,成为一个长期的、隐蔽的安全隐患,威胁着井筒的永久密封性。

3 页岩气水平井固井水泥浆体系优化路径

3.1 优化浆体流变性并强化前置液冲洗

提升顶替效率的关键,在于优化水泥浆的流变性。这项工作先是要全面调整水泥浆的流变曲线。实践中发现,采用高效的分散剂,是可以显著降低浆体的塑性粘度的。与此同时,配合使用悬浮稳定剂,则能维持浆体所必需的动切力。这种复合添加的技术路径,能使水泥浆在较低的泵送压力下,实现理想的平板流型。而平板流型对于环空钻井液的顶替作用,会更加平稳和彻底。

不过,仅仅优化水泥浆本身还是不够的,前置液体系的性能也必须得到充分的强化。高效的前置液能够有效清除井壁和套管表面的虚滤饼与残留钻井液膜。而清洁的界面可以为水泥浆的胶结提供更为良好的基础,这是一个常常被忽视的关键环节。所以,优化流变性与强化前置液冲洗,这两项措施需要协同作用,才能全面消除因顶替不净导致的水泥环槽道与不连续问题。

3.2 增强浆体悬浮稳定性与控制失水

水平段水泥环的均匀性,从根本上来看,主要依赖的是浆体自身的稳定性。所以,要增强悬浮稳定性的核心,关键就在于如何更好的提高浆体的静切力与颗粒悬浮能力。这其中,复配使用纤维素类增粘剂与无机纳米材料,相对来说还是比较有效的。这种复合体系能在浆体中形成稳定的空间网络结构。该结构可以有力地支撑水泥颗粒,从而防止其在重力作用下发生沉降。

与此同时,控制自由水的生成也同样至关重要。实践中,需要选用高效的降失水剂,例如 AMPS 共聚物,在井壁形成一层致密且低渗透率的滤饼。这层滤

饼可以有效地锁住浆体内的水分，防止自由水上窜聚集。一个稳定且失水受控的浆体，最终才能在整个环形空间内，凝结形成密度和强度都均匀分布的水泥石，共同构成保障水泥环整体质量的基础。

3.3 引入增韧材料以改善水泥石力学性能

改善水泥石力学性能的核心，在于提高其韧性。这是因为，高韧性的水泥石才能更好地匹配页岩地层的力学特性。为此，实践中需要从微观结构上对水泥石进行改性。实现这一目标的主要途径，则是引入弹性或纤维类增韧材料。其中，加入胶乳粒子是一项广泛应用的技术。这些细小的柔性粒子能够充分填充水泥石内部的微观孔隙。

更重要的是，它们在受到外力时，可以有效地吸收和分散应力。这一作用能显著提升水泥石的抗拉强度与变形能力。与此同时，掺入短切纤维是另一个行之有效的手段。纤维在水泥石基体中纵横交错，可以形成三维网络。这种结构能起到良好的桥接作用。当微裂纹开始出现时，纤维能够阻止其进一步扩展与贯通，从而延缓整体破坏。

3.4 应用微膨胀与自愈合材料提升密封能力

提升水泥环的密封能力，需要采取主动与动态的防护策略。这一策略主要针对的就是早期气窜和长期性能衰减两个关键阶段。这其中，解决早期气窜问题的直接方法，就是应用微膨胀材料。该材料在水泥水化过程中，会发生可控的体积膨胀。这种膨胀能在环空内产生持续的预应力，可以主动抵消水泥浆凝结初期因“失重”导致的压力下降，从而有效封堵气体窜流的通道。

为了应对长期服役中难以避免的微损伤，也可以引入一些自愈合材料。这类材料通常是以微胶囊或特殊活性矿物的形式，预先掺入水泥体系。当水泥石因外部应力产生微裂缝时，裂缝处暴露的材料就会与渗入的水分发生反应。反应生成的新的胶结物质，能够自动填充并封闭裂缝，使结构恢复原有的密封功能。

4 优化路径的经济效益分析

4.1 直接成本与周期效益

水泥浆体系优化前期可能会增加一些材料成本，然而，从整个建井周期来看，这类投入是能带来明显的经济回报的。经过优化的水泥浆体系，能够显著提高一次固井的成功率，从源头上减少质量问题。而一次固井的成功可以避免很多的补救作业，特别是挤水泥等高成本措施，都可以减少。这样就能减少补救作业的额外费用，缩短建井周期，提高经济优势。

4.2 长期生产安全与维护成本节约

优化水泥浆体系的核心目标，是要建立结构完整、

密封可靠的水泥环。从单井的长期生产周期来看，前期投入能显著提升井筒的安全性和稳定性。而水泥环的密封性能越好，环空带压和气窜等风险就越容易得到控制，生产期需要实施的关井、修井和压力治理措施也会随之减少。井筒在整个生命周期内的维护成本，就会明显降低，运营风险也能得到有效控制。同时，单井产能也会更加稳定。因此，可靠的固井质量不仅是一项工程要求，也是提升长期收益的重要基础。

4.3 整体开发效益与社会效益提升

在气田规模化开发的背景下，固井质量的提升投入，能显著提高单井产量的稳定性并延长井筒寿命，从而增加可采储量、提升开采效率。随着单井表现更加的稳定，单位产量的开发成本会逐步降低，项目的整体经济效益，也会随之增强。除了经济效益之外，固井质量的提升还会带来突出的社会与环境效益。更可靠的密封性能也能减少甲烷等温室气体的泄漏，改善开发过程中的环境表现，进一步提升油气工程领域的整体经济竞争力。

5 结语

页岩气水平井固井水泥浆体系优化是一项系统工程。优化工作需要正视水平井固井面临的具体技术问题，从追求单一高强度，转向保障长期密封完整性。短期看，水泥浆体系优化可以提高固井作业的一次成功率，并节约建井时间。长期来看，它可以为井筒的长期安全运行和经济效益最大化，提供最为根本的保障。未来，水泥浆体系的智能化、环保化与超高适应性，是其重要的发展方向。持续深化该领域的研究与实践，对于推动页岩气产业降本增效，提高项目全生命周期经济效益，具有重要的现实意义。

参考文献：

- [1] 何冠羲, 姜洪斌, 梁悦, 杨扬, 韩龙. 表面活性剂提高页岩气井固井水泥浆的抗污染性能评价 [J]. 油田化学, 2023, 40(01): 32-38.
- [2] 吴雪平. 致密气水平井固井质量提升技术研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(08): 29-32.
- [3] 夏忠跃, 解健程, 范志坤, 贾佳, 郭建东. 临兴区块致密气水平井固井技术优化 [J]. 能源化工, 2021, 42(04): 55-60.
- [4] 徐小峰, 宋巍, 杨燕, 李祥银, 周岩, 冯福平, 韩旭, 刘圣源. 页岩储层水平井固井水泥浆体系应用研究进展 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(17): 7161-7173.
- [5] 贾佳, 夏忠跃, 冯雷. 鄂尔多斯盆地致密气水平井固井水泥浆优化及应用 [J]. 精细石油化工进展, 2021, 22(01): 20-24.