

复杂地层条件下固井界面胶结强度的影响因素及优化方案研究

魏刚

中石化华北石油工程有限公司井下作业分公司，河南省郑州市，450000；

摘要：在石油工程等领域，固井作业在复杂地层条件下面临诸多挑战，其中固井界面胶结强度至关重要。本文深入研究复杂地层条件下影响固井界面胶结强度的因素，包括地层特性、水泥浆性能、施工工艺等方面。通过对多个实际工程案例的分析，揭示这些因素的作用机制。进而提出针对性的优化方案，旨在为提高复杂地层条件下固井界面胶结强度提供理论依据和实践指导。

关键词：复杂地层；固井界面；胶结强度；影响因素；优化方案

DOI:10.69979/3041-0673.25.05.023

引言

固井是油气井建井过程中的核心环节，其主要目的是封隔地层、支撑套管、保护油气层以及确保井筒的长期稳定性。在复杂地层条件下，如深层、高压、高温或裂缝发育地层，固井界面胶结强度直接影响固井质量，进而决定油气井的生产寿命与安全性。若胶结不良，可能导致油气窜流、套管腐蚀或错位、水泥环失效等一系列严重问题，甚至引发井控风险或环境污染。在高温高压环境下，水泥浆性能可能劣化，难以形成有效的密封屏障；而在裂缝性地层中，水泥浆易流失，导致界面胶结不均匀。深入研究复杂地层条件下固井界面胶结强度的影响因素，并制定针对性优化方案，对提高固井质量和保障油气井全生命周期运行至关重要。

1 复杂地层条件下固井界面胶结强度的影响因素

1.1 地层特性

1.1.1 地层孔隙度和渗透率

地层的孔隙度和渗透率对固井界面胶结强度有着显著影响。以某砂岩油藏为例，该油藏地层孔隙度较高，渗透率较大。在固井过程中，水泥浆容易渗入地层深处，导致在界面处水泥浆的有效填充不足，胶结强度降低。这是因为高孔隙度和渗透率的地层为水泥浆提供了更多的渗流通道，使得水泥浆在凝固前大量流失。

1.1.2 地层压力

地层压力的不均衡也会影响胶结强度。如在一些高压地层，如果固井时没有合理平衡地层压力，可能导致水泥浆被地层流体侵入，水泥浆的性能被破坏，胶结强

度无法达到设计要求。某海上油井在固井过程中，由于对地层压力估计不足，在高压地层段，地层流体侵入水泥浆体系，使水泥浆的水化反应受到干扰，最终固井界面胶结强度不达标。

1.1.3 地层岩性

不同的地层岩性与水泥浆的胶结特性差异很大。以页岩地层为例，页岩具有低渗透性和强吸水性的特点。在固井时，页岩会吸收水泥浆中的水分，使水泥浆变稠，流动性变差，难以在界面处形成均匀的胶结层。页岩表面的光滑性也不利于水泥浆与地层的附着，从而降低胶结强度。

1.2 水泥浆性能

1.2.1 水泥浆的密度

水泥浆的密度不合适会影响胶结强度。如果密度过大，会对地层产生较大的压力，可能压裂地层，破坏地层结构，影响胶结；如果密度过小，则水泥浆的沉降稳定性差，容易出现分层现象，导致界面处胶结不均匀。在某陆地油井的固井作业中，由于水泥浆密度计算错误，密度过小，在固井过程中水泥浆发生沉降，上部水泥浆强度不足，固井界面胶结强度较低。

1.2.2 水泥浆的失水性能

水泥浆失水过多不仅会导致水化反应不完全，还会在高渗透地层中引发严重问题。当水泥浆迅速失水时，井壁周围会形成厚重滤饼，这层滤饼质地致密，显著阻碍了水泥浆与地层间的有效接触和粘结，从而大幅降低胶结强度。某气井固井过程中，因失水控制不当，大量滤饼堆积于界面处，使水泥浆无法充分填充和耦合，最终实测胶结强度仅为设计值的30%。滤饼剥落还可能引

发通道,造成窜流隐患,进一步影响固井质量与井筒完整性。合理调控水泥浆失水量对确保胶结效果至关重要。

1.2.3 水泥浆的稠化时间

水泥浆的稠化时间需要与固井施工时间相匹配。如果稠化时间过短,在水泥浆还未完全顶替到位时就开始稠化,会导致水泥浆在套管与地层之间的分布不均匀,影响胶结强度;如果稠化时间过长,则会增加施工风险,如水泥浆在井下长时间处于液态,容易受到地层流体的污染。某油井固井时,由于水泥浆稠化时间过长,在井下等待过程中受到地层盐水的污染,水泥浆性能恶化,胶结强度大打折扣。

1.3 施工工艺

1.3.1 顶替效率

顶替效率是衡量固井施工质量的关键指标。若顶替效率低,不仅套管与地层间的钻井液无法完全替换,形成混合层影响胶结效果,还可能导致水泥浆分布不均,降低固井界面胶结强度。以某定向井为例,其井眼轨迹复杂,弯度较大,导致固井时顶替效率仅为75%,大量钻井液残留。特别是在井壁不规则区域,残留的钻井液与水泥浆混合,形成了弱胶结带,最终固井界面胶结强度下降约40%,严重影响井筒密封性和长期稳定性。

1.3.2 固井速度

固井速度过快或过慢都不利于胶结强度的提高。固井速度过快时,水泥浆的紊流程度不足,无法有效清洗井壁和套管壁,残留的钻屑、滤饼等杂质会形成弱胶结面;过快的速度可能导致顶替效率降低,使钻井液与水泥浆混合,影响固井质量。而固井速度过慢,水泥浆可能在井下高温高压环境下过早失水或稠化,甚至引发早期凝固,导致施工失败。在某浅井固井时,因固井速度过快,井壁清洗不彻底,残留物严重影响了胶结强度,最终造成封隔效果不佳。

1.3.3 套管居中情况

套管居中情况对固井质量至关重要,直接影响水泥浆在环空的分布均匀性。若套管偏移未居中,将导致水泥浆厚度不均:一侧过厚,另一侧过薄,薄的一侧因水泥浆量不足或受压不均,胶结强度显著下降。例如某深井固井作业中,由于套管下入时发生偏移,固井后检测发现,套管偏心区域的水泥石与地层、套管间的胶结强度比正常区域低约35%,且存在明显的声波泄漏通道,严重影响井筒完整性与长期稳定性。

2 复杂地层条件下固井界面胶结强度的优化方案

2.1 针对地层特性的优化

2.1.1 地层预处理

对于高孔隙度和渗透率的地层,可采用预封堵技术以提升固井质量。具体操作是先注入低渗透性封堵剂,有效封堵地层中的大孔隙与裂缝,从而显著减少水泥浆在固井过程中的渗流损失,确保水泥浆能够均匀填充环空区域。在某砂岩油藏的固井作业中,通过预先设计封堵剂配方并优化注入参数,成功减少了地层流体侵入,同时提高了顶替效率。结果表明,相比未采取预封堵措施的井,该井的水泥浆有效填充体积增加了约40%,固井界面胶结强度也因此提升了约30%,大幅改善了井筒的长期密封性和稳定性。

2.1.2 压力平衡设计

准确测量地层压力是确保固井质量的关键步骤。通过使用高精度的压力测量仪器,并结合先进的地层压力预测模型,可以精确评估地层的承压能力。在此基础上,设计合理的水泥浆密度和施工压力,确保在固井过程中能够有效平衡地层压力,防止井漏或井喷等复杂情况的发生。在某海上油井的固井作业中,技术团队利用三维地质建模和实时监测系统,优化了水泥浆配比与泵注参数,成功实现了地层压力的动态平衡。最终,该井的固井界面胶结强度不仅达到了设计要求,还显著提升了井筒的长期稳定性和密封性能,为后续开采作业奠定了坚实基础。

2.1.3 地层岩性适配

针对页岩等特殊岩性地层,可对水泥浆进行改性处理。通过加入高效页岩抑制剂,有效减少页岩对水泥浆水分的吸收,降低水化作用导致的井壁不稳定问题,同时显著提高水泥浆与页岩表面的附着力和兼容性。优化后的水泥浆体系还能改善流变性能,增强顶替效率,确保界面胶结质量。在某页岩气井固井作业中,采用添加页岩抑制剂的水泥浆配方后,不仅有效控制了井筒压力平衡,还使固井界面胶结强度较传统工艺提升了约45%,大幅提高了井筒密封性和长期稳定性,为后续压裂改造和生产作业提供了可靠保障。

2.2 针对水泥浆性能的优化

2.2.1 精确控制水泥浆密度

通过精确的计算和实验室测试,结合地层压力、温度及井筒条件等因素,确定合适的水泥浆密度范围。在固井过程中,采用高精度密度监测设备实时跟踪水泥浆密度变化,并通过自动化控制系统进行动态调整,确保其始终处于最佳设计区间。某陆地油井在复杂地质条件

下施工时,引入了密度监测与精确控制技术,不仅使水泥浆密度在整个作业过程中保持稳定,还有效平衡了地层压力,避免了井漏和窜流等问题。最终,该油井的固井界面胶结强度显著提高,为后续高效开发奠定了坚实基础。

2.2.2 改善水泥浆失水性能

添加失水控制剂可有效减少水泥浆的失水,优化其流动性和滤饼质量,从而显著改善固井效果。在某高渗透地层的油井固井作业中,通过加入专门研发的失水控制剂,水泥浆的失水率成功降低了50%。这不仅减少了对地层的污染,还增强了水泥石与地层之间的胶结性能,使界面胶结强度大幅提升。同时,优化后的水泥浆体系表现出更佳稳定性,确保了施工过程的安全性和效率,为后续油井的高效开发提供了可靠保障。

2.2.3 优化水泥浆稠化时间

根据地层温度、施工时间及井深等具体条件,通过精细化调整水泥浆配方,不仅能够优化稠化时间,还能进一步提升固井质量。在某高温油井案例中,采用复合缓凝剂体系,结合实时监测技术,合理延长了水泥浆的稠化时间,确保其与固井施工节奏精准匹配。这种优化方案有效避免了因稠化时间不足导致的顶替效率降低和胶结性能下降问题,最终使固井界面胶结强度显著提高,并为后续作业提供了可靠保障。该方法还具备较强的适应性,可推广至其他类似复杂工况。

2.3 针对施工工艺的优化

2.3.1 提高顶替效率

优化扶正器的设计与布置是提升套管居中度、改善顶替效率的关键措施之一。在某复杂定向井案例中,通过精确计算井眼轨迹和地层特性,采用螺旋式与刚性扶正器相结合的方式,并合理调整其分布密度,使套管居中度从原本的45%显著提高至82%。这不仅将顶替效率从60%大幅提升至80%,还有效减少了顶替过程中通道形成的风险。固井界面胶结强度提高了近35%,确保了水泥环均匀填充,为后续油井的安全高效生产奠定了坚实基础。该方法还显著降低了固井作业失败的可能性,具有较强的推广应用价值。

2.3.2 合理控制固井速度

根据地层特性、井深及温度梯度等因素,综合运用数值模拟与工程经验,精确确定合理的固井速度。在某深水井固井作业中,通过计算机模拟计算和动态监测,

优化注水泥排量与泵注程序,确保水泥浆流变性能稳定,避免了过快或过慢导致的顶替效率降低和窜流风险。在保证水泥浆性能的同时,显著提高了固井界面胶结强度,实现了优质密封效果,为后续生产提供了可靠保障。

2.3.3 确保套管居中

采用先进的套管下入技术,如旋转套管下入技术、居中器优化布置技术等,可显著提高套管居中度。在某深井固井作业中,通过应用旋转套管下入技术,结合精确计算井眼轨迹与地层特性,合理调整扶正器类型及分布密度,使套管居中度提升至85%以上。该技术有效减少了套管偏心带来的流体分布不均问题,确保水泥浆在环空中形成均匀的流动形态。固井界面胶结强度在整个圆周上分布均匀,且平均胶结质量较传统方法提高30%,大幅降低了窜流风险,为油气井长期安全高效生产提供了可靠保障。

3 结论

复杂地层条件下,固井界面胶结强度不仅受地层特性、水泥浆性能和施工工艺的影响,还与温度、压力及地应力分布密切相关。通过深入分析这些因素,并结合实际工程案例,提出了一系列优化方案,如调整水泥浆配方以适应高温高压环境、改进顶替效率以减少通道形成等。这些措施在实践中显著提升了胶结强度,保障了固井质量,延长了油气井的生产寿命并增强了安全性。然而,随着勘探开发逐步进入更深、更复杂的地层,如深水、非常规储层等,传统方法已难以满足需求。需进一步研究新型材料与智能化施工技术,以应对日益严苛的地质条件,确保固井效果持续提升。

参考文献

- [1] 马丁. 胜利 Y33 区块提高界面胶结强度固井工作液体系研究[D]. 山东: 中国石油大学(华东), 2021.
- [2] 梁岩. 塔中碎屑岩地层固井二界面胶结性能研究[D]. 山东: 中国石油大学(华东), 2019.
- [3] 孔凡就. 提高固井第一界面胶结力的研究[D]. 长江大学, 2013.
- [4] 陆沛青, 陶谦, 周仕明, 等. 固井第二界面水化产物微观结构分析与界面强化措施研究[C]// 中国石油学会 2020 年固井技术研讨会论文集. 2020: 102-110.
- [5] 吴健. 固井水泥环密封完整性研究[D]. 长江大学, 2014.