

可溶性桥塞在水平井分段压裂中的溶解性能现场评价与井筒清理工艺优化

兰龙

长城钻探工程有限公司压裂公司

DOI : 10.32629/jpm.v7i5.8921

[摘要] 本文旨在提升水平井分段压裂中可溶性桥塞溶解性能现场评价的科学性，并优化井筒清理工艺，以提高油气开采效率。现场评价采用先进监测手段，如井下监测仪器与成像技术，实时采集温度、压力、溶解时间等关键数据，全面分析溶解性能影响因素。在清理工艺优化方面，通过改进机械清理工具与研发新型化学药剂，提升清理效率并降低对井筒的伤害。研究发现，井下温度、流体性质及桥塞材料显著影响可溶性桥塞溶解性能，优化后的清理工艺在清理效果与井筒保护上表现卓越。本研究为水平井分段压裂技术的高效应用提供了重要支持，推动了油气开采行业的技术进步。

[关键词] 可溶性桥塞；水平井分段压裂；溶解性能；井筒清理工艺；现场评价

On-site Evaluation of Soluble Bridge Plugs' Dissolution Performance and Optimization of Wellbore Cleaning Processes in Horizontal Well Segmental Fracturing

Lan Long

Great Wall Drilling Engineering Co., Ltd. Fracturing Division

[Abstract] This study aims to enhance the scientific rigor of on-site evaluation of soluble bridge plug dissolution performance during horizontal well segmental fracturing and optimize wellbore cleaning processes to improve oil and gas recovery efficiency. The evaluation employs advanced monitoring technologies, including downhole instruments and imaging systems, to collect real-time data on temperature, pressure, and dissolution duration, enabling comprehensive analysis of influencing factors. For cleaning process optimization, improvements in mechanical cleaning tools and the development of novel chemical agents have enhanced cleaning efficiency while minimizing wellbore damage. The research reveals that downhole temperature, fluid properties, and bridge plug material significantly affect dissolution performance, with the optimized cleaning process demonstrating superior effectiveness and wellbore protection. This study provides critical support for the efficient application of horizontal well segmental fracturing technology and advances technological progress in the oil and gas extraction industry.

[Key words] soluble bridge plug; horizontal well staged fracturing; dissolution performance; wellbore cleaning process; field evaluation

引言

水平井分段压裂技术作为现代油气开采的核心技术之一，已成为提高页岩气、致密油气等非常规资源开发效率的关键手段。该技术通过在水平井段中设置多个压裂段，实现储层的有效改造和油气产量的显著提升。在这一过程中，可溶性桥塞因其能够在压裂施工结束后自行溶解于返排液中，从而避免传统可钻式桥塞因钻塞困难而导致的作业复杂性和成本增加，逐渐成为水平井分段压裂中的首选工具。然而，随着水平井段长度的增加和储层条件的复杂化，可溶性桥塞在实际应用中仍面临诸多挑战，例如溶解性能不稳定、井筒清理效率低下等问题。这些问题不仅影响了压裂作业的整体效果，还可能导致油气井生产能力的下降。因此，深入研究可溶性桥塞的溶解性能及其

井筒清理工艺的优化，对于提高油气开采效率、降低作业成本以及推动行业技术进步具有重要意义。建立科学完善的溶解性能评价体系并优化井筒清理工艺，已成为当前亟需解决的关键问题。

1. 可溶性桥塞溶解性能现场评价

1.1 现场评价方法

1.1.1 监测手段

通过光纤传感器记录温度、压力及流体性质的变化；成像技术如超声波成像和井下摄像头的应用，能够直观地观察桥塞的溶解形态及残留物分布情况，为溶解性能评估提供可视化依据；超声波成像技术通过发射高频声波并接收反射信号，可生成桥塞表面及内部结构的高清图像，从而精确判断溶解程度；

井下摄像头则能够在特定时间段内拍摄桥塞的状态变化,结合图像处理技术可以定量分析溶解速率和溶解均匀性。这些监测手段不仅提高了数据采集的效率,还为后续溶解性能的影响因素分析提供了可靠的基础。

1.1.2 数据采集与记录

温度作为影响溶解性能的重要因素,需通过高精度温度传感器进行连续监测,并以每分钟一次的频率记录数据,以确保温度变化的精确捕捉。压力数据的采集同样重要,采用高灵敏度压力传感器对井筒内压力进行实时监测,并以每秒钟一次的频率记录数据,以保证数据的完整性。此外,溶解时间的记录需从桥塞坐封后开始计算,直至完全溶解或达到预定观察周期结束,这一过程需要通过时间同步装置与监测仪器联动,避免因时间误差导致的数据偏差。对于溶解产物的分析,则需采集溶解液样本并进行实验室测试,以确定其成分、浓度及 pH 值等特性。所有采集到的数据均需按照统一格式存储于数据库中,以便后续分析和建模使用,确保数据的可追溯性和科学性。

1.2 溶解性能影响因素分析

1.2.1 井下温度

研究表明,随着温度的升高,桥塞材料的溶解速度呈现非线性增长趋势。例如,在辽河油田的现场试验中,当温度从 90℃ 升高至 120℃ 时,某型号可溶镁铝金属材料的平均溶解速度由 0.184g/h 提升至 0.276g/h,增幅达 50% 以上。然而,过高的温度可能对桥塞材料的力学性能产生负面影响,如降低其承压能力。因此,在实际应用中需综合考虑温度对溶解性能和力学性能的双重影响。此外,不同材料的温度敏感性存在差异,合理控制井下温度对于优化桥塞溶解性能至关重要。

1.2.2 流体性质

主要体现在流体的 pH 值、矿化度及粘度等方面。首先,pH 值的变化会显著影响桥塞材料的溶解速率。其次,矿化度对溶解性能的影响也不容忽视。高矿化度条件下,流体中的氯离子 (Cl^-) 会与桥塞材料发生络合反应,从而促进溶解。实验数据显示,在 Cl^- 质量分数为 1% 的条件下,某可溶桥塞的溶解速度比在纯水中提高了近 40%。最后,流体的粘度对溶解性能的影响较为复杂。高粘度流体可能减缓溶解物质的扩散速率,从而降低溶解速度;然而,其较高的携砂能力有助于清除桥塞表面的残留物,间接促进溶解。

1.2.3 桥塞材料

目前,常见的可溶桥塞材料主要包括镁合金、铝合金以及多水解高分子基团可溶橡胶等。镁合金材料因其优异溶解性能和较低的成本,被广泛应用于低温、低矿化度条件下的压裂作业中。相比之下,铝合金材料在高温条件下溶解性能更为突出,但其成本较高且力学性能略逊于镁合金。多水解高分子基团可溶橡胶则因其良好的柔韧性和可调的溶解时间,逐渐成为复杂井况下的首选材料。研究表明,通过调整配方体系,可实现橡胶材料在 30~150℃ 温度范围内可控溶解,且溶解时间可根据实际需求进行设计。

2. 井筒清理工艺现状与问题

2.1 常用清理工艺

2.1.1 机械清理

刮削和磨铣是两种典型的机械清理方法,均依赖于专用工

具与井筒内壁或障碍物之间的机械作用来实现清理目的。刮削工艺适用于井筒内壁较为光滑且残留物较少的情况,而磨铣工艺则更适合处理复杂井况或残留物较多的情形。在实际操作中,机械清理工艺的操作流程包括下入清理工具、调整施工参数(如转速和钻压)、进行清理作业以及最终起出工具等环节。这些步骤需要严格遵循施工规范,以确保清理效果和井筒完整性。

2.1.2 化学清理

该工艺的核心在于选择合适化学药剂,使其能够有效分解或溶解可溶性桥塞的残留物,同时尽量减少对井筒和环境的影响。常用的化学药剂包括酸性溶液、碱性溶液和螯合剂等,其作用机理各不相同。此外,某些特殊配方的化学药剂还可以在特定条件下加速可溶性桥塞材料的溶解过程,提高清理效率。化学清理工艺的优势在于其非侵入性特点,能够避免机械清理可能导致的井筒损伤。然而,该工艺对药剂的选择性和施工参数的精确控制要求较高,否则可能导致清理不彻底或对环境造成二次污染。

2.2 现有工艺存在的问题

2.2.1 清理效率问题

在处理超长水平井时,由于井筒长度增加和井眼轨迹复杂化,机械清理工具的下入和起出时间显著延长,导致整体施工周期增加。此外,机械清理工具在遇到顽固残留物时可能需要多次重复作业,进一步降低了清理效率。化学清理工艺同样面临清理效率低的问题,尤其是在处理高矿化度地层水或复杂残留物时,化学药剂的反应速度往往较慢,难以在短时间内实现彻底清理。实际案例表明,清理效率低下不仅会延长施工周期,还可能导致后续作业受阻,进而影响油气开采的整体效率。

2.2.2 对井筒伤害问题

机械清理工艺由于依赖物理切削或研磨作用,容易对井筒内壁造成划痕或局部损伤,尤其是在处理软地层或薄弱井段时,这种伤害更为显著。机械损伤不仅会影响井筒的完整性,还可能导致后续作业中井筒泄漏或坍塌的风险增加。化学清理工艺虽然避免了机械损伤,但其使用的化学药剂可能对井筒材料产生腐蚀作用。例如,强酸性药剂在与金属井筒接触时可能发生剧烈反应,导致井筒壁厚减薄或局部腐蚀坑的形成。此外,化学药剂的选择不当或施工参数控制不严还可能对地层造成污染,进一步加剧井筒伤害问题。相关研究表明,井筒伤害不仅会影响油气井的长期稳定性,还可能导致维修成本大幅增加。

3. 井筒清理工艺优化

3.1 优化策略

3.1.1 改进机械清理工具

首先,在刮削刀片结构方面,可通过优化刀片的几何形状与材料特性来增强其切削能力。例如,采用高强度合金材料并结合仿生学设计原理,使刀片在接触残留物时能够实现更高效的切割与剥离作用。此外,通过增加刀片的柔性设计,可有效降低因硬接触而导致的井筒表面损伤风险。其次,针对磨铣工具的耐磨性问题,研究表明引入纳米涂层技术或复合强化处理能够显著提升工具的使用寿命。例如,在磨铣工具表面沉积金刚石涂层,不仅可大幅提高其硬度,还能有效降低摩擦系数,

从而减少因高温磨损引起的工具失效现象。同时,结合现场数据分析,合理调整磨铣工具的转速与进给参数,可进一步优化其工作效率。最后,为确保改进后的机械清理工具在实际应用中具备更高的可靠性,需对其进行严格的室内性能测试与现场验证。

3.1.2 研发新型化学药剂

新型化学药剂的研发应重点关注其针对性、环保性和安全性。一方面,针对可溶性桥塞溶解后产生残留物成分,可开发专用型化学药剂,以提高其对特定物质的溶解效率。例如,通过分子设计技术合成具有多官能团的高分子溶剂,能够有效与残留物中的结晶成分发生络合反应,从而实现快速溶解。另一方面,为降低药剂对井筒腐蚀风险,可引入生物基材料或可降解成分,使其在完成任务后能够自行分解,避免对井下环境造成长期污染。此外,新型化学药剂还应具备良好的配伍性,能够与常用压裂液及其他工作流体兼容,从而减少因不相容性导致的施工问题。研究表明,通过实验室筛选与现场试验相结合的方法,已成功开发出一种低毒、高效新型化学药剂,该药剂在温度范围为30-150℃的条件下表现出优异的溶解性能,并显著降低了对井筒的腐蚀程度。

3.2 优化方案实施

3.2.1 现场试验设计

为确保优化方案的可行性和有效性,现场试验的设计需遵循科学严谨的原则。首先,在试验井的选择方面,应优先选取具有代表性的水平井,这些井需满足以下条件:一是井深、井斜角及地层特性能够反映目标区域的典型地质特征;二是已完成分段压裂作业且存在一定程度的井筒残留物,以便全面评估清理效果。其次,在试验参数的确定上,需综合考虑井下温度、压力、流体性质等因素,制定合理的施工参数范围。此外,试验步骤的安排需细化至每个操作环节,包括前期准备、施工过程及后期检测。例如,在施工前需对试验井进行全面的井下诊断,明确残留物分布情况;施工过程中需实时监测关键参数,如清理工具的扭矩、化学药剂的反应时间等;施工完成后则需通过成像技术对井筒清洁度进行量化评估。通过上述设计,可确保现场试验的科学性与可重复性,为优化方案的推广提供可靠依据。

3.2.2 实施过程控制

首先,在施工参数监测方面,需建立完善的实时数据采集系统,对机械清理工具的运行状态、化学药剂的注入量及反应过程进行全程监控。例如,通过安装井下传感器,可实时获取工具转速、扭矩及温度等参数的变化情况,并根据反馈数据及时调整施工参数,以确保清理效果达到预期目标。其次,在安全风险控制方面,需针对可能发生的突发事件制定详细的应急预案。例如,当出现工具卡钻或药剂泄漏等情况时,应立即启动备用方案,通过调整施工流程或采取紧急停机措施,将潜在风险降至最低。此外,为进一步提高施工的安全性,还需加强对作业人员的技术培训,使其熟悉优化方案的操作流程及应急处理方法。研究表明,通过实施严格的过程控制措施,某油田在应用改进后的机械清理工具和新型化学药剂后,成功避免了多起潜在的施工事故,并显著提高了清理效率。

3.3 优化方案效果验证

3.3.1 清理效果指标

井筒清洁度通常通过井下成像技术进行定量分析,该技术能够直观反映井筒内壁的清洁程度,并以百分比形式表示清洁区域占井筒总面积的比例。此外,残留物含量则通过采集井筒内流体样本并采用实验室分析方法测定,主要关注可溶性桥塞溶解后残留的固体颗粒或化学物质的浓度。上述指标的测量方法和评价标准不仅为优化方案的验证提供了科学依据,也为现场施工的质量控制奠定了基础。

3.3.2 井筒完整性指标

主要包括井筒变形量和抗压强度变化两个方面。井筒变形量可通过高精度井下测量工具获取,其原理在于通过多点位移监测计算井筒内壁的形变程度,从而评估清理工艺对井筒结构的影响。抗压强度变化则通过室内实验模拟井下条件,对清理后的井筒材料进行力学测试,分析其承载能力的变化情况。研究表明,井筒完整性的保持对于油气开采的长期高效运行至关重要,任何因清理工艺导致的结构损伤均可能引发井筒失稳或泄漏风险。因此,将井筒完整性指标纳入效果评价体系,不仅有助于全面评估优化方案的可行性,还能为后续工艺改进提供重要参考。

4. 结论与认识

(1) 通过对可溶性桥塞溶解性能的现场评价及井筒清理工艺优化的系统研究,取得了一系列重要成果。在溶解性能评价方面,明确了井下温度、流体性质以及桥塞材料对溶解性能的关键影响规律,通过对比分析多种桥塞材料,发现某些新型复合材料在相同条件下表现出更优的溶解性能,为后续材料选择提供了科学依据;在井筒清理工艺优化方面,通过实施优化方案,清理效果得到显著提升,为后续压裂作业提供了可靠保障。

(2) 未来仍有许多值得探索的方向,在溶解性能评价方面,智能化技术的应用将成为未来发展的重要趋势。例如,通过引入人工智能算法和大数据分析技术,可实现对溶解过程的实时监测与预测,从而提高评价的准确性和效率。此外,基于物联网技术的井下传感器网络有望进一步细化对溶解性能的动态监测,为优化桥塞设计和施工工艺提供更多数据支持。

(3) 可溶性桥塞溶解性能评价和井筒清理工艺的优化仍具有广阔的研究空间。通过不断探索新技术、新材料和新方法,可以进一步推动行业技术的持续进步,为油气资源的高效开发提供更加坚实的技术支撑。

[参考文献]

- [1]刘统亮;施建国;冯定;田懿.水平井可溶桥塞分段压裂技术与发展趋势[J].石油机械,2020,48(10):103-110.
- [2]赵旭亮;刘永莉;贡军民.分段压裂用可溶桥塞研究及试验[J].辽宁石油化工大学学报,2021,41(3):57-61.
- [3]张勇;张国田;刘宇;王方明;陈省身;赵贺谦.高性能系列可溶桥塞的研制与应用[J].石油机械,2024,52(1):124-129.
- [4]卢刚.页岩气水平井分段压裂作业中全可溶桥塞的应用[J].油气井测试,2022,31(5):38-42.
- [5]纪松.一种新型可溶解桥塞的研究与应用[J].复杂油气藏,2021,14(1):90-93.