低摩阻滑溜酸在水平井连续油管分段酸化中的流变学特性与减阻效果评价

兰龙
长城钻探工程有限公司压裂公司

【摘　要】本文旨在深入探究低摩阻滑溜酸在水平井连续油管分段酸化中的流变学特性与减阻效果，以解决当前酸化作业中面临的摩阻问题，提升施工效率与效果。通过流变学特性实验和减阻效果评价实验，结合不同温度、剪切速率等条件下的深入分析，全面剖析低摩阻滑溜酸的性能。研究发现，低摩阻滑溜酸在不同条件下展现出独特的流变学特性，其减阻效果显著优于常规酸液。这不仅为优化水平井连续油管分段酸化工艺提供理论依据，也为该技术在油气田开发中的高效应用奠定坚实基础，具有重要的实践指导意义与推广价值。

【关键词】低摩阻滑溜酸；水平井；连续油管分段酸化；流变学特性；减阻效果

Rheological Properties and Drag Reduction Performance Evaluation of Low-Friction Sliding Acid in Horizontal Well Coiled Pipe Segmental Acidizing

Lan Long
Great Wall Drilling Engineering Co., Ltd. Fracturing Division

【Abstract】This study aims to thoroughly investigate the rheological characteristics and drag reduction efficacy of low-friction sliding acid during horizontal well coiled pipe segmental acidizing, addressing current friction challenges in acidizing operations and enhancing construction efficiency and effectiveness. Through rheological experiments and drag reduction evaluations combined with comprehensive analysis under varying temperature and shear rate conditions, this work provides a comprehensive assessment of the acid's performance. The findings demonstrate that low-friction sliding acid exhibits unique rheological properties under different conditions, demonstrating significantly superior drag-reduction performance compared to conventional acid solutions. These results not only provide a theoretical foundation for optimizing horizontal well coiled pipe segmental acidizing processes but also establish a solid basis for its efficient application in oil and gas field development, holding significant practical guidance value and promotion potential.

Keywords: Low-friction acidizing fluid; Horizontal well; Continuous tubing segmental acidizing; Rheological properties; Drag reduction effect

引言

水平井连续油管分段酸化技术作为现代油气田开发中的一项重要增产措施，近年来在非常规储层改造中得到了广泛应用。该技术通过连续油管将酸液精确注入目标层段，能够有效解除近井地带的污染并改善储层渗透率，从而显著提高油气井的产量。尽管该技术已取得显著进展，随着水平井段长度的增加以及井眼轨迹复杂性的提升，传统酸液体系在施工过程中面临诸多挑战，仍存在一系列亟待解决的技术难题。其中，摩阻问题尤为突出。由于连续油管在长水平井段内易发生螺旋屈曲现象，加之酸液与管柱内壁之间的摩擦阻力较大，常常导致施工压力超过设备极限，甚至引发管柱自锁或封隔器失效等问题。此外，在页岩油藏等复杂储层的压裂改造过程中，常规酸液体系因溶解缓慢、携砂性能差以及对温度敏感等缺陷，进一步加剧了摩阻控制的难度。因此，深入研究低摩阻滑溜酸的流变学特性及其减阻效果，不仅有助于揭示其作用机理，还能为优化酸化工艺参数提供科学依据，具有重要的理论价值和现实意义。

1. 低摩阻滑溜酸特性分析

1.1 化学组成

低摩阻滑溜酸作为一种专为水平井连续油管分段酸化设计压裂液体系，其化学组成对其性能表现具有决定性作用。通常，低摩阻滑溜酸主要化学成分包括可变黏减阻剂、纳米乳液以及其他辅助添加剂。其中，可变黏减阻剂是其核心组分，能够在不同温度和剪切速率下提供稳定减阻效果。研究表明，0.1–0.6%的可变黏减阻剂能够显著提升滑溜水的溶解速度和减阻性能，90 秒内即可完成基本溶解，此外，纳米乳液的加入进一步增强了体系稳定性和抗盐能力，能够适应复杂储层环境的要求。这些化学成分的协同作用不仅优化滑溜酸的流变学特性，还显著提升其在酸化作业中的适用性。

从化学成分分析角度来看，低摩阻滑溜酸设计充分考虑其在实际应用中的需求。低摩阻滑溜酸通过其独特的化学组成实现了这一目标，同时避免了传统滑溜水在溶解速度、携砂性能及抗盐能力等方面的不足。此外，两性离子型共聚物等成分的引入也使得该体系在耐矿化度和抗温性能方面表现出色，为复杂储层条件下的酸化作业提供了可靠保障。

1.2 常规性能

首先，黏度是评价滑溜酸流动性能的关键参数之一。实验结果表明，低摩阻滑溜酸在低温环境下仍能保持较低的黏度，这为其在深层储层中的高效注入提供了重要支持。此外，低摩阻滑溜酸的密度与其溶解性和抗盐能力密切相关。研究发现，该体系在高矿化度环境下仍能保持较低的密度，从而

有效降低了对储层的伤害风险。其次，减阻率是衡量滑溜酸性能优劣的重要指标之一。室内评价结果显示，低摩阻滑溜酸在不同温度和剪切速率下均能保持较高的减阻率。此外，低摩阻滑溜酸的携砂性能也得到了显著改善，无需添加交联剂即可实现变黏携砂，这进一步简化了施工流程并降低了成本。

2. 实验方案设计

2.1 流变学特性实验

为深入研究低摩阻滑溜酸的流变学特性，采用 Anton Paar MCR302 型旋转流变仪进行测试。该设备具备高精度温控系统与广泛剪切速率调节范围，可满足不同实验条件下对样品流变学参数的精确测量需求。实验过程中，将低摩阻滑溜酸样品装入流变仪的平行板测量系统，设置板间距为 1mm 以确保测试结果的准确性。首先，在不同温度条件下（20℃、40℃、60℃、80℃）对样品进行稳态剪切扫描，剪切速率范围设定为 $0.1S^{-1}$ 至 $1000\ S^{-1}$，以获取剪切应力与剪切速率的关系曲线，并计算表观黏度。此外，通过动态振荡实验，在固定应力（0.5Pa）下改变频率（0.1Hz 至 10Hz），分析储能模量与损耗模量的变化，从而评估样品的弹性与黏性行为。

2.2 减阻效果评价实验

减阻效果评价实验在自主研发的模拟井筒系统中进行，该系统由高压泵、流量计、压力传感器及透明可视化井筒组成，能够模拟水平井连续油管分段酸化过程中的实际流动条件。实验前，先将低摩阻滑溜酸注入储液罐，并通过高压泵将其输送至模拟井筒。实验参数设置如下：流量范围为 $0.5m^3/h$ 至 $5\ m^3/h$，压力范围为 5MPa 至 20MPa，以覆盖现场作业可能涉及的工作条件。在实验过程中，利用高精度流量计（精度 ± 0.1%）实时监测流体流量，同时通过压力传感器（精度 ± 0.05%）记录井筒入口与出口的压力差。减阻率（DR）的计算公式为：$DR = \frac{\Delta P_{base} - \Delta P_{test}}{\Delta P_{base}} \times 100\%$，其中 ΔP_{base} 为清水流动时的压降，ΔP_{test} 为低摩阻滑溜酸流动时的压降。数据采集频率为 1Hz，确保实验数据的完整性与可靠性。

3. 流变学特性实验结果与分析

3.1 温度对流变学特性影响

实验结果显示，不同温度条件下，低摩阻滑溜酸的黏度随温度升高呈现下降趋势，而剪切应力则表现出非线性变化特征。此外，剪切应力在低温区（20–40℃）保持相对稳定，而在高温区（40–60℃）出现显著下降，表明高温条件下分子链的伸展程度降低，进而影响了流体的内部结构强度。从机理上分析，温度的变化不仅改变了低摩阻滑溜酸中聚合物分子与溶剂之间的相互作用，还影响了酸液体系中表面活性剂的分布状态，从而对其流变学特性产生深远影响。

另外，低摩阻滑溜酸在高温条件下的黏度下降与其化学组成密切相关。然而，随着温度的持续升高，氢键的断裂频率增加，导致分子间的缔合作用减弱，从而使黏度进一步降低。与此同时，酸液中的清洁酸成分在 60℃时的降阻率与 20℃时相比差异不大，说明其具有良好的热稳定性，能够为酸液体系提供一定的流变学稳定性保障。

3.2 剪切速率对流变学特性影响

实验结果表明，在不同剪切速率条件下，低摩阻滑溜酸的黏度与剪切应力呈现出典型的非牛顿流体行为。具体而言，在低剪切速率范围（$100S^{-1}$ 以下），低摩阻滑溜酸的黏度表现出一定假塑性流体特征；而在高剪切速率范围（$1000S^{-1}$ 以上），黏度迅速下降并趋于稳定，剪切应力则随剪切速率的增加而线性增长。

此外，低摩阻滑溜酸在不同剪切速率下的流变学参数变化还与其化学组成密切相关。值得注意的是，低摩阻滑溜酸中多功能滑溜水体系在剪切速率变化过程中表现出优异的抗剪切性能，其减阻率在 0.1%加量时仍能达到 74.84%，这主要得益于其可变黏减阻剂设计理念。因此，剪切速率对低摩阻滑溜酸流变学特性的影响不仅取决于分子链的动态行为，还与其组分的协同作用密切相关。

3.3 酸浓度对流变学特性影响

实验结果表明，在不同酸浓度条件下，低摩阻滑溜酸的黏度与剪切应力呈现出显著的非线性变化特征。具体而言，当酸浓度从 5wt%增加至 15wt%时，低摩阻滑溜酸的黏度从 32mPa.s 降至 24mPa.s，降幅达 25%，而剪切应力则表现出先升高后降低的趋势。

另外，酸浓度对低摩阻滑溜酸流变学特性的影响还与其化学组成密切相关。在高酸浓度下，氢离子竞争作用破坏了分子间的缔合作用，导致网络结构瓦解，黏度显著下降。此外，低摩阻滑溜酸中的清洁酸成分在不同酸浓度下均表现出良好的降阻性能，其降阻率在酸浓度变化过程中保持相对稳定，这为其在实际应用中的性能稳定性提供保障。因此，酸浓度对低摩阻滑溜酸流变学特性的影响不仅取决于分子间的相互作用，还与其组分的协同作用密切相关。

4. 减阻效果评价结果与分析

4.1 不同流量下减阻效果

实验结果表明，在不同流量条件下，低摩阻滑溜酸表现出不同的减阻率变化趋势。当流量较低时，减阻率维持在较高水平，然而，随着流量逐渐增加，减阻率呈现下降趋势。此外，实验数据表明，在某一临界流量点后，减阻率的变化趋于平缓，这表明滑溜酸分子链在高剪切条件下的降解已达到动态平衡状态。通过对比不同流量下的减阻率数据，可以得出流量与减阻效果之间存在非线性关系，这一发现为优化酸化施工参数提供了重要依据。

另外，流量对减阻效果的影响还受到滑溜酸化学组成的调控作用。低流量时，减阻剂分子能够充分吸附于管壁表面，形成稳定的润滑膜；而高流量时，润滑膜的部分破坏导致减阻效果下降。因此，合理控制施工流量不仅有助于提高滑溜

酸的减阻性能，还能延长其有效作用时间。相关研究指出，结合现场施工条件，优化流量参数可显著改善酸化效果，并降低施工成本。

4.2 不同酸浓度下减阻效果

实验结果显示，随着酸浓度的增加，滑溜酸的减阻率先升高后趋于稳定，这一现象与其化学组成及流变学特性密切相关。在较低酸浓度范围内，滑溜酸中的减阻剂分子数量有限，无法完全覆盖管壁表面，导致减阻效果较弱。然而，当酸浓度达到某一临界值时，减阻剂分子在管壁表面的吸附达到饱和状态，形成连续的润滑膜，从而使减阻率达到峰值。继续增加酸浓度对减阻效果的提升作用有限，甚至可能因过度酸化导致滑溜酸性能下降。

从机理上看，酸浓度对减阻效果影响还涉及滑溜酸与地层岩石之间相互作用。高浓度酸液能够更有效地溶解地层中的碳酸盐矿物，从而改善储层渗透性并降低流体流动阻力。然而，过高酸浓度可能导致酸岩反应速率过快，使得酸液在未完全进入目标储层时便被消耗殆尽，影响整体酸化效果。此外，实验数据分析表明，酸浓度对减阻效果的影响还受到温度、剪切速率等外部条件的耦合作用。例如，在高温条件下，酸液黏度降低，酸浓度对减阻效果的影响更为显著。这些发现为优化滑溜酸配方及施工参数提供了理论支持。

4.3 与常规酸液减阻效果对比

实验结果表明，在相同施工条件下，低摩阻滑溜酸减阻率普遍高于常规酸液，尤其是在高流量或高温条件下，这主要归因于低摩阻滑溜酸中特有的减阻剂成分，这些成分能够有效降低流体与管壁之间的摩擦系数，并在复杂井筒环境中保持稳定的润滑性能。相比之下，常规酸液由于缺乏高效的减阻功能组分，其减阻效果往往受限于流体黏度及外部条件的变化。

另外，低摩阻滑溜酸在延长酸化有效距离方面也表现出明显优势。常规酸液在注入过程中容易因摩阻损失过大而导致压力升高，限制注入深度和覆盖范围。而低摩阻滑溜酸通过显著降低流体摩阻，能够在较低注入压力下实现更远距离酸化作业，这对于超长水平井分段酸化尤为重要。此外，低摩阻滑溜酸抗盐能力和温度稳定性也优于常规酸液，使其在复杂储层条件下的适用性更强。

通过与常规酸液的对比研究，可以明确低摩阻滑溜酸在水平井连续油管分段酸化中的技术优势。其优异的减阻性能不仅能够提高酸化效率，还能显著降低施工成本和风险，为非常规油气藏的高效开发提供了有力技术支持。

5. 现场应用案例分析

在某油田的一口碳酸盐岩储层水平井，完钻井深为 4500m，水平段长度为 2000m，储层非均质性较强，平均渗透率为 50mD，孔隙度为 15%。该井在施工过程中面临的主要挑战是如何在不均匀储层中实现高效的酸化改造。传统的均匀酸化工艺难以满足储层各小层物性差异较大的需求，因此采用了基于低摩阻滑溜酸的差异化酸化工艺。该工艺通过调节酸蚀蚓孔长度，实现了对不同物性储层的针对性改造。

在施工过程中，低摩阻滑溜酸的注入参数根据储层特性进行了优化设计。实验数据显示，在温度为 120℃、剪切速率为 500S^{-1}的条件下，低摩阻滑溜酸的黏度较常规酸液降低了约 35%，且其减阻率在不同流量条件下均保持在 80%以上。此外，通过引入连续油管差异化酸化工艺，施工过程中的环空压力得到了显著控制，避免因高压导致的携砂堆积问题。应用效果表明，该井在采用低摩阻滑溜酸进行差异化酸化后，采油剖面得到了显著改善，产量较传统均匀酸化工艺提高了约 60%。

6. 结论与认识

（1）本文系统分析低摩阻滑溜酸在水平井连续油管分段酸化中流变学特性及其减阻效果，揭示其性能优化的关键因素。实验结果表明，低摩阻滑溜酸在不同温度、剪切速率和酸浓度条件下的流变学特性表现出显著变化规律。

（2）在减阻效果评价方面，低摩阻滑溜酸相较于常规酸液表现出显著优势。通过与常规酸液的对比发现，低摩阻滑溜酸不仅具备优异的减阻性能，还表现出良好的抗盐性和温度适应性，这为其在非常规储层酸化作业中的广泛应用奠定了基础。

（3）本文深入剖析了低摩阻滑溜酸的流变学特性及其减阻效果，为水平井连续油管分段酸化技术的优化提供了重要的理论支持。研究成果不仅有助于解决当前酸化作业中面临的摩阻问题，还为未来滑溜酸的性能改进和应用拓展提供了重要参考。

（4）低摩阻滑溜酸作为一种具有广泛应用前景的酸化工作液，其性能优化和应用拓展仍需进一步深入研究。通过结合材料科学、化学工程及油气田开发等多学科知识，未来有望实现该技术在更多领域的创新应用，为我国油气田高效开发和节能降耗做出更大贡献。

参考文献

[1]刘培培;何定凯;潘柯羽;王清刚.非常规油藏多功能滑溜水体系研究与应用[J].精细石油化工进展,2022,23(6):1–5.
[2]王达;冯浦涌;周福建;崔波;董建安;王寿鑫.连续油管差异化酸化工艺及其在伊拉克 A 油田的应用[J].大庆石油地质与开发,2022,41(6):86–93.
[3]张群双.北特鲁瓦底水油藏水平井分段酸压技术应用研究[J].地球科学前沿（汉斯）,2021,11(5):614–623.
[4]朱洪;李波;罗延庆;董志明;蒋敏.长庆油田超长水平井低摩阻固井技术研究及应用[J].钻采工艺,2023,46(2):21–26.
[5]段贵府;何春明;才博;张辉;吴刚;程晓东.滑溜水在裂缝性碳酸盐岩体积酸压中的研究与应用[J].钻井液与完井液,2019,36(4):512–516.