

复合酸液在碳酸盐岩油藏中的酸化均匀性研究

王增敏

中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司石油工程技术研究院

DOI:10.32629/etd.v6i7.18232

[摘要] 复合酸液因具备剪切变黏、反应可调与铺展可控等特征,为提升碳酸盐岩油藏酸化均匀性提供理论基础与技术支点。本文面向储层孔隙结构与裂缝连通性复杂条件,构建酸液流场分布调控、反应界面延迟推进、刻蚀通道展宽诱导及酸化前沿稳定演化四类控制机制,揭示剪切黏度调节、反应窗口转移与润湿性增强在非均质结构中协同作用规律。岩心酸化实验结果显示,该体系在改善流体分布、降低推进差异与扩大酸效覆盖方面具有显著效果,为酸化改造参数设计与控制策略优化提供技术支撑。

[关键词] 复合酸液; 酸化均匀性; 碳酸盐岩; 非均质储层

中图分类号: TB33 文献标识码: A

Study on the Uniformity of Composite Acid in Carbonate Reservoirs

Zengmin Wang

Shengli Oilfield Branch of China Petroleum and Chemical Corporation, Petroleum Engineering Technology Research Institute

[Abstract] Composite acid fluids, characterized by shear-thinning viscosity, adjustable reaction rates, and controllable spreading, provide a theoretical foundation and technical support for enhancing the uniformity of acidification in carbonate reservoirs. This study addresses the complex conditions of pore structure and fracture connectivity in reservoirs by establishing four control mechanisms: acid fluid flow field distribution regulation, delayed reaction interface advancement, erosion channel widening induction, and stable evolution of the acidification front. It reveals the synergistic effects of shear viscosity adjustment, reaction window transfer, and wettability enhancement in heterogeneous structures. Core acidization experiments demonstrate that this system significantly improves fluid distribution, reduces propagation disparities, and expands acid effect coverage, offering technical support for acidification parameter design and control strategy optimization.

[Key words] composite acid solution; acidification uniformity; carbonate rock; heterogeneous reservoir

引言

碳酸盐岩油藏酸化增产长期受酸液指进、通道化与酸耗无效等问题制约,核心矛盾集中于酸液在非均质孔隙-裂缝体系中分配失衡,导致局部过度刻蚀而远端改造不足^[1]。复合酸液因具备黏度可调、反应分级与传质匹配等特征,具备削弱高渗优先流与延展有效作用半径潜力,已成为提高酸化均匀性的重要技术方向^[2]。围绕均匀酸化机理与控制逻辑,本文从孔隙结构、流变行为、反应动力学及非均质演化耦合关系入手,构建可解释、可评价的均匀性分析框架,为工程参数设计提供理论支撑。

1 复合酸液酸化均匀性机理分析

1.1 孔隙结构差异对酸液推进路径的影响

碳酸盐岩孔隙类型与连通方式差异显著,溶蚀孔、粒间孔与微裂缝共同构成多尺度渗流网络,孔喉半径分布离散使局部渗

透能力呈强对比。酸液进入储层后,压降优先在高连通通道释放,形成主导流线并抑制旁侧支路补给,推进路径随连通性增强而收敛,酸液接触面在空间上发生聚集^[3]。低渗区受限于孔喉收缩与毛管约束,酸液驻留量不足,界面更新缓慢,刻蚀起始位置偏向高渗连通带。

1.2 复合酸流变特征对流场稳定性的作用

复合酸体系往往呈现剪切变稀或黏弹响应,黏度随剪切速率与温度变化而调整,促使不同流速区段形成差异化阻力分配。非均质介质内速度梯度增强,高速区易诱发指进流与旁路效应,流场稳定性下降;复合酸在高剪切区黏度降低而维持可注入性,在低剪切区黏度抬升以抑制优势通道加速,从而拉平通道与基质间流量比。若体系具备一定弹性记忆效应,可削弱脉动扰动对前沿形态影响,减少界面褶皱与局部短路。

1.3 反应动力学对刻蚀通道形成的影响

酸—岩反应速率与传质过程共同控制刻蚀形态, 动力学阶数、表观活化能及扩散边界层厚度决定酸耗位置与界面推进速度。在高渗连通带, 酸液对流补给强, 酸浓度维持水平较高, 反应速率被界面控制或混合控制主导, 刻蚀沿主流线快速加深并拉长; 在低渗区, 扩散受限导致有效浓度衰减, 反应转向传质控制, 刻蚀难以形成连续通道。复合酸采用分级反应或缓释组分时, 可降低初始强反应峰值, 延长有效反应窗口, 使酸耗由近井集中转向纵深分布, 并提高侧向孔隙参与度。

1.4 非均质地层条件下的均匀性演化机制

非均质地层中均匀性表现为时间演化问题, 初期由结构差异主导流量分配, 中期由流变—反应耦合主导通道竞争, 后期由几何反馈主导前沿稳定或失控。优势通道一旦形成, 局部渗透率随刻蚀增强而继续增大, 正反馈使酸液持续偏流, 前沿推进呈加速特征; 若复合酸在低速区维持较高黏度并延缓界面反应, 旁支路获得补给机会, 负反馈可抑制通道独占并促成多通道并行扩展。演化过程中, 孔隙连通网络发生重构, 等效渗透率张量与各向异性随刻蚀程度改变, 均匀性指标需采用时变权重并引入空间方差或熵类表征。

2 复合酸液在碳酸盐岩油藏中的酸化均匀性控制技术

2.1 调控酸液流场分布

裂缝—孔隙交错叠置的碳酸盐岩储层表现出非均质性的多尺度流动通道结构, 酸液在注入初期沿高渗导流通道趋于集中, 易形成单一优势通路。为打破主流线稳定格局, 复合酸液在设计上引入可剪切流变响应机制, 在流场中建立黏度梯度响应结构。高渗裂缝区域内, 酸液受高剪切作用黏度迅速下降, 通道开启性增强, 低渗孔隙区则维持黏滞性以增强横向渗透。该差异黏度结构配合阶梯式低速分级注酸程序, 使酸液前沿呈现出非轴对称推进形态, 抑制酸液过早聚焦, 诱导酸液在不同渗透通道间进行空间重构。图1所示为技术实施前后酸液在储层中分布格局的变化, 图中可以观察到复合酸形成了剪切诱导黏度层级与暂态阻滞带, 有效实现流向扰动与多路径分布。

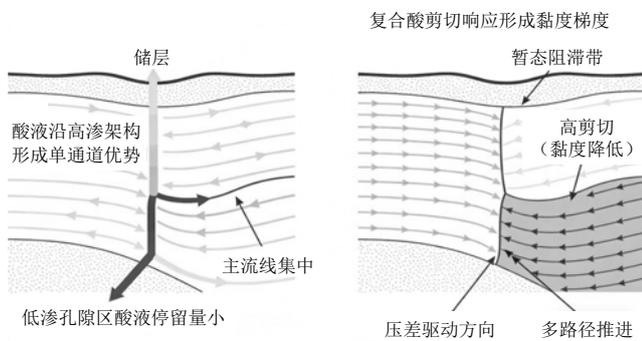


图1 复合酸液剪切响应诱导下的碳酸盐岩储层流场分布机制

为进一步激发非主控路径的酸液响应行为, 配方中引入可形成暂态滞留结构的助剂组分, 在主通道形成短时流阻效应, 使

局部压降重新分配, 驱动酸液渗入微裂缝及盲端孔喉^[4]。酸液在多孔隙体系中展现出准层流状态与多向扩散趋势, 其分布形态不再受主控路径支配, 而是在压差驱动下建立流量重构机制, 能够显著降低酸化短路概率, 为后续酸刻通道演化奠定空间基础。

2.2 延缓反应界面推进

复合酸液在碳酸盐岩非均质介质中展现出界面反应速率与传质控制的复杂耦合机制, 酸液中嵌入反应活性调节组分, 使不同区段酸—岩界面演进速率产生偏移。高连通裂缝中酸液以剪切稀化模式迅速通过, 流动主导反应过程; 而孔隙稠密但渗透率低的区域中, 扩散占主导地位, 酸液在表面形成延迟释放膜层, 界面反应维持在低速区间, 整体前沿演化呈现“楔形拓展”特征。

反应界面的推进过程中, 通过实时温度调节与酸耗速率反馈机制, 保持动力学常数稳定波动在设定区间, 使界面推进速度避免出现“快—慢交替”或“前锋穿透”现象。渗透率突变区中酸液前沿呈缓进扩展, 原生界面弥散程度增强, 反应带厚度趋于扩大, 反应区域的体积效应优于平面突进。前沿结构表现为准平稳层进形态, 保证酸液在空间中的等效作用范围不断外展, 有效对冲储层非均质性带来的前沿失稳风险。

2.3 扩展刻蚀通道展宽

在碳酸盐岩储层微观结构中, 刻蚀行为受限于反应界面形态与产物阻塞程度。复合酸液中配置表面润湿性调节因子, 改变酸液—岩石接触角及铺展行为, 使其在孔隙壁面形成更连续的反应层。该反应层在微尺度结构中具备较强的持续性与自修复能力, 使刻蚀界面持续暴露于酸作用区域, 通道扩展方向从单一纵深推进转为纵横同步推进, 断面形态由条带状向椭圆状或梭形演化。

酸液在刻蚀过程中维持中低雷诺数条件, 贴壁流态下的反应均匀性增强, 使通道两侧壁面反应程度接近, 规避了传统酸液产生的“穿孔—旁路”结构。储层中局部孔喉收缩区因酸液剪切黏度缓释机制获得充分腐蚀时间, 半径分布趋于平滑, 通道形态表现为无突变式扩展。刻蚀尺度随反应推进持续增长, 横向展宽优于纵向贯通, 最终在非均质地层中形成多尺度、多方向刻蚀网络, 有效覆盖弱连通孔系。

2.4 平稳酸化前沿演化

酸化前沿演化受多因耦合控制, 复合酸液体系在构建稳定前沿形态过程中, 结合反应速率调节、流动黏度控制与几何反馈干预策略, 构建出厚度可控、演进节奏平缓的前沿结构^[5]。不同空间尺度中酸浓度梯度被主动限制在设定区间内, 使前沿推进区域形成稳定反应带, 避免尖峰式推进导致的“短路通道”。酸化前沿在裂缝与孔隙之间展现出多点同步演进态势, 而非传统单核推进模式。

伴随酸化刻蚀程度变化, 通道形态演化对渗透率的影响引发二次流场重构, 复合酸体系实时响应结构变化, 自动调整流动路径与反应点位置, 使推进前沿维持准对称扩展。高频震荡式微

扰注入方案配合流变性反馈机制控制前沿速度波动,使其在非均质储层中保持稳定形态,避免“快带—死带”共存结构出现。酸液影响区呈现环形外扩格局,刻蚀边界保持光滑连续,构建出整体均衡的酸化空间场。

3 实验分析

3.1 实验设计

实验在中石化勘探开发研究院岩心模拟中心完成,选用高精度碳酸盐岩人造岩心,构建非均质多孔裂缝微结构通道,模拟典型储层渗透率差异与结构不连续性条件。实验装置为可视化高温高压酸化测试系统,配置成像采集单元与压差、反应界面跟踪模块,可实现对酸液推进过程的动态观测。实验组设定三组对比方案:常规酸液组、单控制技术组、复合控制技术组。各组采用等体积、等速率注入,采集阶段性流速图像、压力曲线与刻蚀轮廓。评估指标选用酸液流速分布偏差系数、主支通道压差比、反应界面推进速率差、延迟反应时间窗口、通道横向展宽率、截面变异系数、前沿偏离因子与酸耗等效面积共8项,数据采用三次重复试验平均值计算。

3.2 实验结果

测试结果如表1所示,酸液流速分布偏差系数由0.42下降至0.19,反映剪切黏度调控机制有效拉平优势通道与基质区域流量差异,黏弹响应在孔隙弱连通区形成高阻流带,打散主导流结构,削弱酸液聚集趋势。主通道压差比从2.35降至1.11,表明酸液沿裂缝优先通道释放压降强度降低,复合控制策略促使低渗路径获得足量压强支撑,分流效果显著增强。反应界面推进速率差下降至0.31mm/s,说明反应带均衡拓展,延迟反应窗口由0.97s拓展至3.42s,得益于酸液界面反应速率调节机制,在低渗孔隙中实现滞后触发、非峰值酸耗分布,形成分区推进态势。通道横向展宽率提升至2.57,截面变异系数降至0.23,源于润湿性调控诱导的贴壁腐蚀增强,酸液在非主控孔隙中形成侧向刻蚀结构,通道断面由窄带形态转向均匀拓展模式。酸化前沿偏离因子从0.41下降至0.14,显示酸液推进边界趋于稳定、前沿形态由尖锐突进转为层进外扩,震荡式注入模式联合流变反馈机制有效压制快带偏移。酸耗等效面积由4.32cm²升至9.85cm²,证实酸液作用体积扩大,酸效空间覆盖率提升,反映复合技术组在异质结构下构建出更大尺度的协同改造网络。

表1 测试结果对比

指标名称	技术实施前	技术实施后
酸液流速分布偏差系数	0.42	0.19
主通道压力梯度与支通道压差比/(m/s)	2.35	1.11
反应界面推进速率差/(mm/s)	0.68	0.31
延迟反应时间窗口/s	0.97	3.42
通道横向展宽率	1.13	2.57
通道截面变异系数	0.56	0.23
酸化前沿形态偏离因子	0.41	0.14
酸耗等效面积/cm ²	4.32	9.85

4 结语

基于复合酸液黏弹调控、反应速率延迟、润湿性调整与前沿干预策略构建出适用于碳酸盐岩油藏的均匀酸化控制体系,经非均质岩心实验验证,在酸液分配、界面推进与通道展宽等方面展现出空间尺度上的协同调控优势,具备工程推广潜力。

[参考文献]

- [1]张利明,刘志良,刘成林,等.深层碳酸盐岩油藏注氮气提高采收率研究[J].石油实验地质,2025,47(06):1431-1439.
- [2]邓圣学,吴塞塞.延长油田低渗透油藏水平井复合酸液吞吐提高采收率技术研究[J].化学工程师,2024,38(8):48-52.
- [3]周晋辉.复合酸液体系对不同煤阶煤酸化改性增透实验研究[D].太原理工大学,2023.
- [4]徐国涵.复杂缝洞型碳酸盐岩油藏试井理论及应用研究[D].东北石油大学,2025.
- [5]李振哲,姚宗全.缝洞型碳酸盐岩挥发性油藏注水保压技术——以塔中油田为例[J].云南化工,2025,52(11):121-125.

作者简介:

王增敏(1987--),男,汉族,山东日照人,本科,工程师,研究方向:石油工程。