

低渗透油田储层保护开采技术实践与效益分析

刘延军 (延长油田股份有限公司下寺湾采油厂, 陕西 延安 716100)

摘要: 基于低渗透油田储层易受污染与压敏损伤的特性, 对储层保护开采技术体系进行了研究, 阐述了井筒结构优化、微裂缝诱导增渗、分层注采稳产及动态监测调控的协同方法, 结合鄂尔多斯盆地试验区块的工程应用, 对储层物性改善与稳产效果进行了验证, 研究结果表明该体系能显著提升渗透率保持率与经济效益。

关键词: 低渗透油田; 储层保护; 增渗技术; 分层注采; 动态监测; 经济效益

中图分类号: TE357 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2026) 006-0046-03

Practice and Benefit Analysis of Reservoir Protection in Low-Permeability Oilfield Development

LIU Yanjun (Xiasiwang Oil Production Plant, Yanchang Oilfield Co., Ltd., Yan'an Shaanxi 716100, China)

Abstract: Given the susceptibility of low-permeability reservoirs to contamination and pressure-induced damage, this study investigates reservoir protection technologies. It details a synergistic approach integrating wellbore structure optimization, microfracture-induced permeability enhancement, layered injection-production for stable production, and dynamic monitoring and control. Combined with engineering applications in the Ordos Basin test block, the reservoir property improvement and stable production effects were verified. The results indicate that this system can significantly enhance permeability retention and economic benefits.

Keywords: low-permeability oilfield; reservoir protection; enhanced permeability technology; layered injection-production; dynamic monitoring; economic benefits

低渗透油田普遍存在孔渗差、压敏性强及流体通道受限等问题, 常规增产措施难以兼顾储层保护与采收率提升^[1]。为应对高压差开发下的储层损伤与渗流衰减问题, 构建以防伤、稳压、促流为核心的储层保护开采体系, 综合运用井筒结构优化、微裂缝诱导和分层注采调控技术, 实现协同增渗与稳产, 为低渗透油田的高效可持续开发提供技术支撑。

1 储层特征与开采现状

低渗透油田储层普遍体现出孔隙结构复杂、渗流通道有限以及非均质性强的特性, 孔隙度一般都小于10%, 渗透率低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[2], 流体在孔喉处的流动受限, 压降的敏感现象十分明显, 地层岩性大多为致密砂岩跟碳酸盐岩, 胶结性质强, 孔喉结构大多是微孔、微裂缝, 岩石力学性能脆弱, 对压力变迁和作业干扰十分敏锐。受长期高压差开采以及重复压裂的影响, 储层容易发生颗粒位移、孔隙闭合及裂缝重新压缩, 造成有效渗透通道不断衰减^[3], 现行运用的压裂增产跟注采手段在提升渗流条件期间, 易引起地层污染、液体侵入以及应力失衡等二次破坏, 引起储层物性进一步的不良变化, 生产井大多有初期产量高、后期急剧下降的特点, 单井采出率偏低、开发周期减短。

2 储层保护技术体系

基于低渗透油田储层易受污染、易出现压敏、易

遭到损害的特性, 整体思路采用“防伤害、稳结构、控应力、促渗流”, 构建多梯度保护体系(见图1)。上层凭借储层地质精细刻画及孔隙结构、敏感性和应力场的分析, 开展损伤风险分区划分工作, 为工程设计提出约束要求; 中层为核心防护的单元, 涉及井筒结构的优化方案、低伤害钻完井液与封隔保护手段,

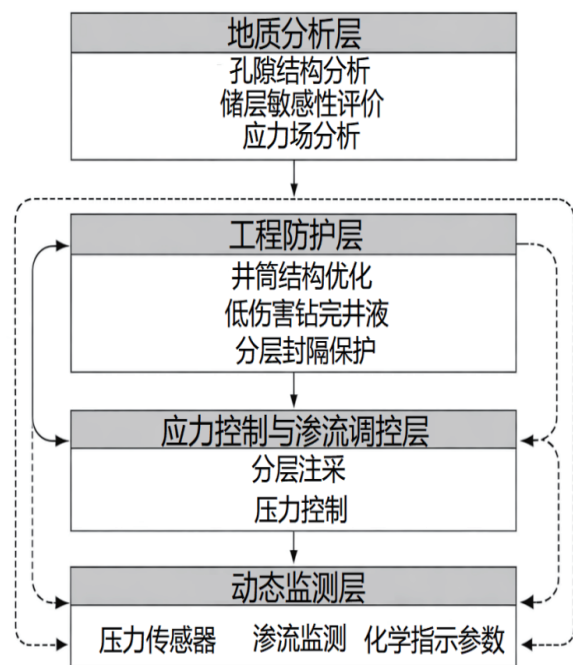


图1 储层保护技术体系

兼顾物理与化学两方面的防护；下层把分层注采及压力控制当作手段，维持地层的稳定性，预防孔隙塌落和裂缝二次压实；外围凭借动态监测及参数反馈，实时感知并校正压力、渗流及化学指标，实现保护状态的动态考量与闭环管控。

3 保护开采关键技术

3.1 井筒结构优化

井筒结构优化试图实现钻完井过程与储层保护的协同一致，让井筒兼具稳固的属性与渗流的通畅能力，鉴于低渗透油层具有易塌、易堵、易出现压敏的特征，设计需从井壁支撑以及流体隔离两方面开展，就井径与封隔的布置情况而言，利用上大下小分级式的井筒结构分散轴向载荷，且在高、低敏感层交界之处设置封隔器，形成应力隔离层，预防压差耦合引发孔喉闭合^[4]。完井形式首选筛管—衬管复合结构，金属筛管的用途是防砂导流，外层衬管起到平衡压力与释应的效果；在易出砂井段添加可膨胀衬套，为增强井壁支撑力度，于井筒内壁配置低渗透隔离衬层，可阻止钻井液侵入，维持压力传导连贯性，减弱水锁效果，借助有限元耦合模拟来优化井筒、地层、流体三场的应力分布，让结构从静态防护进入动态自适应模式，形成可做反馈的保护性完井体系。

3.2 微裂缝诱导增渗

微裂缝诱导增渗的核心诉求是通过控制应力场跟压裂液参数，使储层内部搭建可控、相连通、非破坏性的裂缝网络，在不伤害原有孔隙结构的情境下增大渗流半径，就低渗透致密砂岩储层的高脆性特征而言，现场实施操作采用“定向应力释放+限能压裂”联合方式来开展。首先，依靠应力场数值模拟确定水平主应力差 $\Delta\sigma \leq 3\text{MPa}$ 的有利地段，以保障裂缝沿主应力方向拓展而不穿透层界，把压裂液黏度控制到 $25 \sim 35\text{MPa}\cdot\text{s}$ ，使泵注排量维持于 $2.0 \sim 2.5\text{m}^3/\text{min}$ ，支撑剂的粒径规格为 $0.3 \sim 0.6\text{mm}$ ，以保证裂缝宽度维持在 $0.2 \sim 0.4\text{mm}$ 范围间，创建可实现流体导流的微裂缝体系。其次，在注入阶段运用阶段泵压控制办法，把压裂曲线划分成“升压—恒压—释压”这三段，实现裂缝起始、延伸及稳定导流的可控制流程。裂缝形成后，其对储层有效渗透率的提升可由下式描述：

$$K_{\text{eff}} = K_0 + \beta \cdot \varphi_f \cdot \frac{w^2}{12} \quad (1)$$

式中： K_{eff} 为裂缝形成后的有效渗透率； K_0 为储层原始渗透率； β 为裂缝连通系数（ $0.6 \sim 0.9$ ）； φ_f 为裂缝体积比； w 为裂缝宽度。

在压裂后期这个阶段，采用低压气驱或者泡沫流体制换法，去除裂缝里的残液以维持通道的稳定，由

此形成兼具导流与储存能量功能的微裂缝系统。

3.3 分层注采稳产

分层注采稳产技术的核心是构建层间压力跟渗流的动态平衡体系，实现高渗层不过量注液、低渗层不断供液，进而让储层整体产能实现长期稳定，鉴于低渗透油田层间差异显著，渗透率变异系数达 $0.7 \sim 0.9$ 的特性^[5]，工程设计选择“分区测定—差压控制—流量反馈”的三阶段工程流程。

在第一阶段，通过多探头电缆测井与动态压差试井确定各层渗透系数 K_i 与储量分布比 R_i ，建立分层注采剖面。第二阶段，根据地层压力平衡要求，控制注采压差 ΔP_i 维持在（ $3 \sim 5$ ）MPa 范围内，以防止高渗层突破和低渗层供液不足^[6]。层间流量分配采用以下控制方程：

$$Q_i = C_i \cdot (P_{\text{inj},i} - P_{\text{res},i}) \quad (2)$$

式中： Q_i 为第 i 层注水量； C_i 为该层渗流导流系数； $P_{\text{inj},i}$ 为注入端压力； $P_{\text{res},i}$ 为地层原始压力。通过在线调节 C_i 的设定，可实现流量的实时再分配。

在实施过程中，采用可变动的分层注水管柱和独立封隔装置，将不同层段的注采流体分途输送，把高渗透层注水强度控制到 $0.12 \sim 0.15\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ 这个区间，低渗层要把注水强度保持在 $0.06 \sim 0.08\text{m}^3/$ ，同时配合定期的反洗操作防止出现堵塞现象，针对生产端，配备可调节流阀与流量计，依据实时流量的变化态势自动调节采出比，保证单井综合含水率波动不超过 $\pm 2\%$ 。

在调控阶段，系统引入闭环反馈算法，通过监测井口压力变化率 $\frac{dP}{dt}$ 与日采注比，实时修正注采配比。当 $\frac{dP}{dt}$ 超过 0.05MPa/h 或产液偏离设定值 5% 时，系统自动调整注采阀开度，实现压力的动态稳定^[7]。

3.4 动态监测调控

在现场投放主采井、注水井和观测井构成“三维监测网络”，配置压力、温度和流量传感器，监测以 10min 为周期，数据传输频率设定为 1Hz ，系统实时采集压力、注采量、井底温度、含水率这些参数，在边缘节点完成特征提取以及异常识别。若局部压力下降的速率超 0.08MPa/h ，或含水率增长的幅度超 3% 时，自动开启调控机制，借助电控节流阀微调注水强度与采出比，以维持分层压力的平衡，各节点数据经光纤集中到地面控制中心，聚类算法识别出异常区段后生成调控指令，系统借助“前馈预测—滞后修正”机制，用时 90s 完成响应操作，实现注采参数的动态平稳控制。

4 工程应用与效益分析

4.1 工程概况

工程择取鄂尔多斯盆地东缘某低渗透油田试验区

块,安置 12 口生产井、6 口注水井与 4 口监测井,造就完整注采单元,执行“井筒结构优化—微裂缝诱导增渗—分层注采稳产—动态监测调控”一体化方案举措,井筒采用筛管与衬管复合的完井方式,在高敏感层设置封隔;压裂施工所采用的黏度为 28MPa·s,排量 2.2m³/min;注采系统实施三层分开调控,把压差控制到 4.0±0.5MPa,监测阶段会实时采集井口压力与流量,经边缘节点分析后自动调控注采比例。

4.2 保护效果对比

为验证储层保护开采技术的效果,对试验区块实施前后的主要生产与物性指标进行对比分析,结果见表 1。数据取自连续 90 天的监测记录。储层渗透率提升 67.1%,说明微裂缝诱导与分层注采形成了高效导流通道,增强了低渗层流体流动性;渗透率保持率增长 41.4%,表明井筒结构与低伤害钻完井液在减轻压实与液体侵入方面作用显著;含砂量下降 56.9%,体现筛管-衬管结构与注水配比控制的防砂效果;压差系数与含水率分别下降 18.8% 和 27.5%,显示应力场更趋平衡、能量分布更稳定。单井日产油量提高 59.4%,表明该技术在稳产、提效与改善渗流条件方面效果显著。

表 1 储层保护技术实施前后关键指标对比

| 指标项目 | 实施前 | 实施后 | 改善幅度 (%) |
|--|------|------|----------|
| 平均渗透率 (×10 ⁻³ μm ²) | 0.85 | 1.42 | 67.1 |
| 渗透率保持率 (%) | 62.4 | 88.3 | 41.4 |
| 含砂量 (mg/L) | 72 | 31 | 56.9 |
| 地层压差系数 | 1.38 | 1.12 | 18.8 |
| 含水率 (%) | 46.5 | 33.7 | 27.5 |
| 单井日产油量 (t/d) | 3.2 | 5.1 | 59.4 |

4.3 经济效益分析

于储层保护开采技术实施之后,整体经济效益明显上扬,每口单井追加投资差不多 42 万元,为总开发成本的 11.6%,但产量增长以及周期延长所获的收益比投入要高得多,单井日产油量从 3.2t/d 提升至 5.1t/d,平均每年增产大约 693t,按照每吨 2850 元的单价计算,一年新增产值大概是 197.5 万元。单位产油成本从 1420 元/t 减低到 960 元/t,出现 32.4% 的降幅,投资要收回成本约需 7.5 个月,投资回报率实现了 235%,含砂量的降低和压差平衡的改善让井筒维护周期延长了 1.8 倍,停井检修相关支出减少近 18%,说明该技术在稳定产量、增加效益以及经济可持续性方面优势显著。

5 技术改进措施

针对试验区块在运行中所暴露的控制精度及系统

响应欠缺问题,后续技术改进可从结构精细化、算法智能化、体系协同化这三方面开展。首先,在井筒结构上添加可调式封隔元件,做到不同层段封隔压力独立调控,调控精度从原本的 ±0.5MPa 提升到 ±0.2MPa,可有效杜绝层间应力的干扰。其次,在裂缝诱导阶段采用数字化压裂参数控制方式,凭借实时监测注入压力曲线与裂缝的扩展速率,实现裂缝宽度控制误差小于 0.05mm,杜绝裂缝越出边界或闭合出现失稳。第三,在注采操作阶段构建基于边缘计算的分层自适应配水算法,结合历史注采曲线以及瞬时流量信号,自动对各层注采比加以优化,使日产油波动率维持在 ±1.5% 以内。此外,动态监测模块要进行升级为多源融合体系,归并光纤分布式的声波、压力和温度数据,达成采集分辨率升至 1s 级。按照上述改进,储层保护开采技术将建成实时感知、精准控制与预测修正一同进行的闭环优化体系,为大规模推广提供工程范畴的支撑力量。

6 结语

储层保护开采技术经由井筒结构优化、微裂缝诱导增渗、分层注采稳产和动态监测调控的协同施行,达成了低渗透油田由单一增产向综合维护稳定产量的转变,此体系在控制应力耦合、维持渗流通道畅通、延长生产周期上效果突出,未来可进一步增进监测精度与自适应调节本事,构建智能化的储层全生命周期保护及开发的体系。

参考文献:

- [1] 王鹏飞.Y 油田扶余油层高压成因分析及技术措施研究[J].采油工程,2025(04):69-74.
- [2] 常晨.低渗透油田注水开发中油田动态分析技术的应用研究[J].清洗世界,2025,41(11):132-134.
- [3] 王迎涛.油田低渗透油藏防漏堵漏钻井液技术研究[J].石化技术,2025,32(11):338-340.
- [4] 王宇璇.低渗透油藏注水井增注技术研究及应用[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(19):157-159.
- [5] 侯吉瑞.低渗透油田提高采收率技术的挑战与思考[J].钻采工艺,2025,48(05):158-168.
- [6] 李建辉,江智强,刘建升,等.长庆油田超低渗透油藏低产井整体重复压裂技术研究与应用[J].钻采工艺,2025,48(06):195-199.
- [7] 俞洋,付琳,张士豪.低渗透油田石油开采技术研究[J].工程技术研究,2025,10(19):214-216.

作者简介:

刘延军(1974-),男,汉族,陕西延安人,本科,中级工程师,研究方向:石油工程。