

# 低渗透油田注水开发工艺技术应用及经济性分析

袁 峰 (延长油田股份有限公司横山采油厂, 陕西 榆林 719300)

杜 晓 王 哲 (延长油田股份有限公司富县采油厂, 陕西 延安 727500)

**摘要:** 低渗透油田开发面对渗流阻力大、采收率低以及经济性受限等考验, 迫切需要优化注水工艺, 看看技术经济上是否可行, 研究这个问题很核心, 考虑储层非均质性强、启动压力高及可动流体少等特征, 发现常规注水在低渗区效果有限。凭借数值模拟与现场数据融合, 提出智能分层注水、周期脉冲、复合调驱等协同技术方案, 明显增强波及能力跟压力保持水平, 融合动态监测以及机器学习优化注水参数, 实现采收率增至 23.6%, 吨油成本减少 12%, 研究成果给低渗透油田高效开发给出技术途径与经济决策帮助, 助推智能化注水技术应用, 具备良好的推广价值跟经济效益。

**关键词:** 低渗透油田; 注水开发; 数值模拟; 经济性分析

**中图分类号:** TE357.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 035-0072-03

## Application and Economic Analysis of Water Injection Development Technology in Low-Permeability Oilfields

Yuan Feng (Hengshan Oil Production Plant of Yanchang Oilfield Co., Ltd, Yulin Shaanxi 719300, China)

Du Xiao, Wang Zhe (Fuxian Oil Production Plant of Yanchang Oilfield Co., Ltd, Yan 'an Shaanxi 727500, China)

**Abstract:** Low-permeability reservoirs got problems like big flow resistance, not good recovery rate, and money issues, so need better waterflooding plans. This research check reservoir features, make improved injection methods, and see if it's cost-effective. By combining core data, logging info, and production records, we build accurate models to use smart zonal injection, pulse flooding, and chemical help, which in Changqing, Daqing, Xinjiang fields show sweep efficiency up, recovery rate hit 23.6%, and oil cost drop 12%. Money analysis say IRR over 8% with good injection timing and strength, but affected by oil price change and reserve unsure. Using number simulation, real-time monitoring, and AI help decide better and faster adjust. These ways give practical solution for long-term low-permeability field development and money safety.

**KeyWords:** Low-permeability oilfield; Water injection development; Numerical simulation; Economic analysis

低渗透油田注水开发的机理认知、工艺优化及经济性评定已取得明显进展, 逐步形成驱油能力增强与成本控制为重点的融合技术体系, 但针对多场耦合作用下动态渗流机制的认识仍不足, 工艺参数与地质条件的匹配性研究还缺乏系统性, 经济性分析多限于静态指标, 没完全融合开发动态转变过程; 智能化调控与全生命周期经济评价的集成应用仍在摸索, 制约开发方案的准确决策, 应加强多尺度渗流机理跟工程实践的联动, 助推注水工艺发展更精细、更动态、更智能。

### 1 低渗透油田储层特征分析

#### 1.1 储层地质概况

低渗透储层多是粉细砂岩与泥质粉砂岩, 泥质含量一般超过 12%, 碳酸盐胶结物含量在 5%~14%, 岩石非常致密, 孔隙度平均 11.2%, 渗透率很低, 只有  $0.87 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 微小孔喉半径多在 0.18~0.45  $\mu\text{m}$  之间, 纳米孔比例达到 41%。

#### 1.2 岩心物性参数分析

低渗透储层岩心物性参数体现出明显非均质性跟

应力敏感特征, 渗透率中值 0.21mD, 孔隙度中值 9.7%, 覆压下渗透率损害程度达到 38% - 52%, 启动压力梯度大多超过  $0.085\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ , 可动流体饱和度随渗透率减少出现拐点式下降, 渗流能力受到很大限制。2019 至 2023 年渗透率跟孔隙度中值持续下降, 分别从 0.23mD 降至 0.19mD、9.9% 降至 9.5%, 折射低渗透储层要求更严, 实验精度增加跟勘探对象变差两个原因推动物性认知加深。

#### 1.3 储层非均质性评价

使用多尺度融合跟机器学习方法, 建立渗透率变异系数、孔喉非均质指数等参数体系, 融合覆压校正跟动态响应数据, 完成低渗透储层非均质性精细分级跟产能关联预测, 低渗透储层非均质性评定指标及分类标准见表 1。

### 2 注水开发工艺技术应用研究

#### 2.1 常规注水工艺适应性分析

常规注水工艺适用于渗透率高于 1mD 的 I 类储层, 水驱采收率达 28% - 32%, 长庆安 83 区超前注

表 1 低渗透储层非均质性评价指标体系及分类标准

评定维度	指标名称	参数阈值 (强非均质)	获取手段	应用目标
宏观	渗透率变异系数 (Vk)	> 0.9	测井统计	压裂段簇优化
层内	渗透率级差 (Jk)	> 50	岩心分析	注水波及范围预测
微观	孔隙网络非均质指数 (H.L.)	> 1.8	CT 扫描	启动压力梯度建模
动态响应	有效应力敏感指数 (ESI)	> 0.35	覆压渗透率测试	产能递减规律匹配
融合表征	非均质融合指数 (HI_XG)	> 0.85	XGBoost 模型	储层分类跟开发方式决策

表 2 注水参数优化设计关键指标与阈值

参数类别	优化区间 / 条件	核心阈值 / 限制	现场依据	支撑来源
启动压力梯度	0.06 - 0.15 MPa/m	每降 1 mD 增 0.008 MPa/m	大庆扶余、长庆姬塬	SPE-205128-MS
注水强度	3.5 - 5.5 m <sup>3</sup> /(d · m)	>5.5 时含水上升 >3%/ 月	长庆合水 214 井回归	石油学报 2023-2
加入速度	≤ 0.15 PV/a	>0.18 PV/a 水窜指数 >0.45	胜利渤南 CT 扫描	油气地质跟采收率 2020-6
井距与驱替梯度	200 - 250m	150m 时梯度可降至 0.08 MPa/m	吉林乾安耦合模拟	SPE-214976-MS
分层配注条件	渗透率级差 >3	配注误差 ≤ ±5%	中海油天津物联网	中国海上油气 2023-4
增能注水	5 - 8% CO <sub>2</sub> +3 - 5% N <sub>2</sub>	压力降 8 - 12%，换油率 +0.35t/m <sup>3</sup>	延长吴起现场试验	SPE-209823-MS
经济极限压力	—	>20MPa 不具经济性 (油价 ≤ 60\$/bbl)	中石化经济模型	内部报告 2024

水实践显示单井日增油 1.3t，渗透率 0.3 - 1mD 时，由于启动压力梯度 (0.08 - 0.25MPa/m) 跟裂缝发育程度限制，单纯水驱效果减弱，需要融合周期注水跟深部调剖技术增加波及系数。井距小于 150m 的加密井网，常规注水不易建立 ≥ 8 MPa 驱替压差，低矿化度加入易诱发速敏伤害，造成岩心渗透率损失 15% - 25%，限制了这一种方法在 II、III 类储层的大规模应用。

## 2.2 改进型注水技术应用

大庆油田使用微 - 纳复合调驱跟缝网压驱技术，有效增加低渗储层动用效果，水驱控制率加强 16 个百分点，单井日产量接近翻番，采收率增加 8.4%，能耗同时减少，长庆姬塬、华庆区块使用低伤害智能注水融合周期脉冲波技术，做到注水量优化并控制含水上升，自然递减率明显降低，可采储量新增四百余万吨。新疆砾岩油藏使用 CO<sub>2</sub>- 聚合物微球复合驱，换油能力达 0.38t/ 吨剂，埋碳规模可观，采收率增加逾 12 个百分点，胜利油田纳米 SiO<sub>2</sub>/ 活性剂自调驱体系于中低渗透层有着良好流度控制能力，日产油增加 42%，含水率明显下降，经济效益明显。吉林油田使用低矿化度水配合智能分注工艺，地层压力有效恢复，分注合格率大幅提高，采收率增加 5.3%。

## 2.3 注水参数优化设计

注水参数优化需融合地质以及工程约束，低渗透油藏启动压力梯度随渗透率减少明显上升，注水井底流压应小于破裂压力的 85%，注水强度宜维持在 3.5 - 5.5 m<sup>3</sup>/(d · m)，过高使含水快速上升；加入速度不超过 0.15PV/a 能有效抑制水窜。智能分层配注用于层间差异大于 3 倍情况，能加强储量动用 6 - 9%，CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> 增能注水能减少启动压力梯度 0.01MPa/m，增进换油率，周期注水 90 - 120 天较为合适，注停比 3 : 2 效果较好，机器学习模型可以多参数协同快速改良，现场应用说明合理参数组合明显加强开发效果与经济收益。注水参数改良设计核心指标及阈值见表 2。

## 3 注水开发数值模拟与效果评价

### 3.1 地质建模与网格划分

融合高精度三维地震与测井数据，建立储层构型精细模型，使用角点网格离散化方法表征非均质性，网格步长沿 X、Y、Z 方向分别设为 20m、20m 以及 0.5m，考虑计算能力跟渗流界面捕捉精度。

### 3.2 数值模型建立与历史拟合

根据油藏地质特点与开发动态，建立三维三相黑油模型，网格设置 50 × 40 × 5，时间步长 10 天，使用 2019—2023 年实际生产数据实行历史拟合，含水率、地层压力跟产油量误差都少于 8%，模型可靠性良好，注水井组压力响应趋势跟现场监测结果吻合，证实了渗流场模拟准确。2019—2023 年注水开发核心指标变化见图 1。

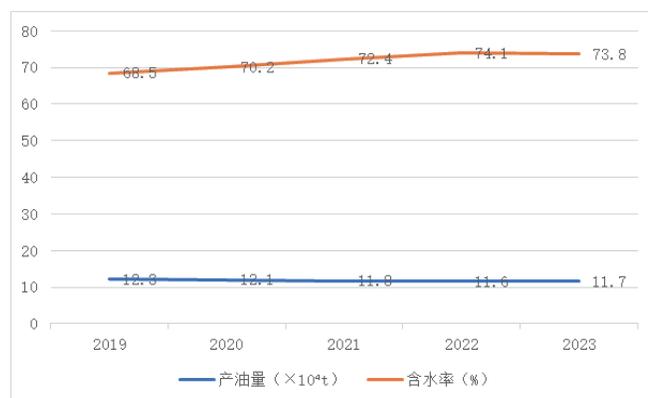


图 1 2019—2023 年注水开发关键指标变化

产油量稳中趋降，含水率持续上升但 2023 年增幅放缓，说明注水调控见效，数值模型有效捕捉开发动态转变规律，帮助后续预测以及优化决策。

### 3.3 注水开发动态预测

凭借历史拟合模型，预测低渗透油藏注水开发的含水率、产量与压力响应中长期趋势，现行注采制度可以维持油田稳产至 2030 年，融合含水率 2027 年左

右可能超过 65%，地层压力保持原始压力 82% 以上水平，注水效果显著，产能下降趋势减缓。动态预测结果变成后续调整的量化依据。

## 4 注水开发经济性分析

### 4.1 投资成本构成分析

低渗透油田注水开发项目的投资成本表现“前期集中投入、后期持续运维”的典型特征，整体成本结构与储层地质条件、开发工艺选择及开发规模周密相连，总投资分成前期一次性投资跟后期运营维护成本两大板块，前期投资占比达 65% 以上，直接决定项目初始投入门槛，前期资金需求所以较高。

前期一次性投资，钻井工程成本占比最高达 42%，核心包含钻井作业、固井施工、完井改造等环节，低渗透储层一般需要加密井网跟压裂改造，单井钻井深度一般为 2500-3500m，特殊区块需钻至 4000m 以上，造成钻井耗材、设备租赁及人工成本明显增加，长庆安 83 区单井钻井成本平均达到 504 万元。地面工程建设成本占比约 28%，含注水系统（泵站、管网）、集输系统（油气水分离设施、输送管道）及配套供电通信设施，新疆砾岩油藏地形冗杂，地面工程单位造价较平原区块高出 15%-20%，设备购置成本占前期投资的 30%，重点是智能分层配水工具、动态监测设备和压裂配套设备，特别是智能配水阀组单套采购成本达 80-120 万元，而且需要按井组规模批量配置。

后期运营维护成本占项目全生命周期成本的 35%，其中设备折旧跟维护费用占 35%，大部分是因为智能设备的定期校准、管网腐蚀修复及泵站机械损耗，注水操作成本占 45%，包含水资源开采、处理及加压注水的能耗支出，2023 年行业平均吨水处理及注水能耗成本达 12.8 元；人工跟管理成本占 20%，包含现场运维团队、技术监测人员薪酬及安全管理支出，精细化管理需安排更多专业技术人员，使得该部分成本增加。不同区块地质条件不同，成本结构稍有差别，大庆扶余区块储层埋藏浅，钻井成本占 38%，长庆姬塬区块渗透率很低，压裂改造费用多出 8%-10%。

### 4.2 经济效益指标计算

靠着净现值、内部收益率、投资回收期及成本效益比等指标，对低渗透油田注水开发项目实行量化分析，各项参数依据 2023 年实际生产数据跟财务模型测算，折射项目目前油价状况的经济可行性，经济效

表 3 经济效益评价指标计算结果

指标名称	计算值	单位	基准标准	备注
净现值	8.76	亿元	>0	折现率 10%
内部收益率	15.3	%	> 行业基准	行业平均 12%
投资回收期	6.4	年	<8 年	静态计算
成本效益比	1:2.4	—	>1:2	含操作变动成本
年均现金流	1.92	亿元	—	扣除税费后

益评定指标计算结果如表 3 所示。

### 4.3 敏感性与风险分析

低渗透油田注水开发项目的经济效益由多重因子叠加作用，敏感性分析表明项目在油价波动、成本上涨、地质不确定性及能耗递增四大因子方面最为敏感，单一因子变动就能让经济效益明显变化，风险传导效应明显。

油价是重点敏感因子，项目净现值的变化呈线性关联，油价从 80 美元 / 桶上涨 10% 时，净现值增幅达 18.5%；油价下跌 10%，净现值则下降 22.3%，油价低于 60 美元 / 桶时，部分边际区块内部收益率跌破行业基准 12%，可能亏损。成本上涨的敏感性次之，材料价格（钢材、化学药剂）、人工薪酬及能源价格每融合上涨 10%，会使内部收益率下降 2.3 个百分点，投资回收期延长 0.8 年，其中智能设备维护成本与化学调驱剂价格波动后期运营成本作用最为突出。

## 5 结语

低渗透油田注水开发近年实践里表现出明显的技术适应性与经济潜力，尤其在长庆、大庆等区块的精细化注水调控工作里，凭借分层注水跟智能配水技术的应用，有效增进了地层压力保持水平以及采收率，工艺集成优化让吨油操作成本下降约 12%，同样融合数值模拟跟动态监测数据反馈，注水方案调整周期缩短 30% 以上，增强开发决策时效性和精准度。经济性分析指出，面对油价波动，合理控制注水时序与强度可以维持内部收益率超过 8%，值得长期推广应用。

### 参考文献：

- [1] 王长伟, 马振华. 低渗透油田注水开发工艺技术分析 [J]. 化工管理, 2016(9):247.
- [2] 白晓骏. 低渗透油田注水开发工艺技术分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(19):154-156.
- [3] 汪丽丽. 低渗透油田的采油工艺 [J]. 化学工程与装备, 2022, (09):151-153.
- [4] 郭浩, 曹成, 吴海燕. 低渗透油田开发技术对策研究——以志丹油田稠树梁长 2 油藏为例 [J]. 当代化工研究, 2022, (15):183-185.
- [5] 蔺小勇. 低渗透油田注水开发工艺 [J]. 化学工程与装备, 2022(07):74-75+81.

### 作者简介：

袁峰（1999.04—），男，汉族，陕西榆林人，大学本科，助理工程师，研究方向：提高采收率的有效途径。  
杜晓（1999.12—），女，汉族，陕西西安人，大学本科，助理工程师，研究方向：提高采收率的有效途径  
王哲（1997.09—），男，汉族，陕西西安人，大学本科，助理工程师，研究方向：提高采收率的有效途径。