

基于全成本核算的吐哈油田三塘湖盆地低渗透油藏压裂改造技术研究

董芮妍（吐哈油田三塘湖采油管理区，新疆 哈密 839000）

摘要：低渗透油藏储层致密，渗透率低，常规开采难以形成稳定产能，压裂改造成为提升开发效果的重要手段。施工过程中涉及材料、设备、能耗、人工等多项成本，传统成本测算方式难以全面评估经济投入，全成本核算方法基于各环节成本构成，优化资源配置，使开发更具经济可行性。本文结合吐哈油田三塘湖盆地的地质特征，分析低渗透油藏压裂改造的关键环节，优化压裂液体系，改进裂缝形态控制，调整能量分配方式，完善成本测算方法，构建资金优化策略，并结合实际案例验证改造技术的效果，为类似低渗透油藏的高效开发提供实践依据，使全成本核算在油藏改造中具有更广泛应用价值。

关键词：低渗透油藏；全成本核算；压裂改造；智能优化；经济评估

中图分类号：TE357 文献标识码：A 文章编号：1674-5167（2025）023-0058-03

Research on fracturing technology for low permeability reservoirs in the Sangtaku Basin of Tumuluke Oilfield based on full cost

Dong Ruiyan(Tuha Oilfield Sandanghukou Oil Production Management Area, Hami Xinjiang 839000, China)

Abstract: Tight reservoirs with low permeability and low permeability in low-permeability oil reservoirs make it difficult to stable production capacity by conventional exploitation, and fracturing transformation has become an important means to improve the development effect. The construction process involves many costs such as materials, equipment energy consumption and labor, and the traditional cost calculation method can hardly comprehensively assess the economic investment. The full cost accounting method is based on the cost composition of each to optimize resource allocation and make the development more economically feasible. This paper analyzes the key links of fracturing transformation in low permeability oil reservoirs, optimizes fracturing fluid system, improves the crack morphology control, adjusts the energy distribution mode, and perfects the cost calculation method in combination with the geological characteristics of Sangtaku Basin in the Tuha Basin. It constructs the capital optimization strategy, and verifies the effect of the transformation technology in actual cases. It practical basis for the efficient development of similar low-permeability oil reservoirs, so that the full cost accounting has a more extensive application value in oil reservoir transformation

Keywords: low permeability reservoir; full cost accounting; fracturing modification; intelligent optimization; economic evaluation

低渗透油藏开发是全球油气行业面临的重要挑战，其低孔隙度、低渗透率特性导致开发成本高、产量低，经济效益难以满足工业化需求。压裂改造技术作为提升低渗透油藏开发效率的关键手段，近年来受到广泛关注，但其高昂成本限制大规模应用。全成本核算作为综合性经济分析方法，全面评估开发活动经济性，为技术优化提供科学依据。本文基于全成本核算理论，结合吐哈油田三塘湖盆地地质特征，提出创新压裂改造技术优化方案，旨在降低开发成本、提高压裂效果及经济效益，为低渗透油藏高效开发提供理论支持与实践参考。

1 全成本核算内涵

全成本核算适用于资源密集型产业，涉及直接成本、间接成本、隐性成本、外部成本等多个维度。在油田开发领域，传统成本核算方式往往侧重于短期投

入与产出关系，忽略长期经济影响，全成本核算则更加注重全生命周期的经济测算。钻井、压裂、生产、维护、环保、弃置等环节均需纳入成本考量范围，资金分配更加精准，投资决策更加科学。材料消耗、设备折旧、人工投入、能耗支出、环境修复、政策税收等因素构成完整成本结构，每项费用对整体收益均产生影响，合理优化成本配置成为关键。技术选择直接关系到经济回报，不同工艺对资金需求不同，参数优化可有效降低单位产量成本，提升资金使用效率。

2 吐哈油田三塘湖盆地低渗透油藏地质特征

吐哈油田三塘湖盆地低渗透油藏属于典型陆相碎屑岩沉积体系，储层物性较差，非均质性强，渗透率整体偏低，原油流动能力受限。地层构造复杂，经历多期构造变动，断裂体系发育，局部区域应力差异显著，裂缝展布呈现方向性，储层改造难度较高。岩性

以细粒砂岩、粉砂岩为主,胶结作用较强,孔隙结构以粒间孔、溶蚀孔、微裂缝为主,基质渗透率较低,天然裂缝具有一定导流能力,但闭合性较强,长期开发过程中裂缝导流能力衰减明显。储层压力系统整体偏低,储层能量不足,原油赋存状态以毛管束缚形式为主,驱替效率受孔喉半径分布影响较大,产能受限。油藏埋藏深度较大,储层温度较高,常规压裂液体体系适应性较差,液固相互作用较为明显,压裂过程中液体滤失率较高,影响裂缝有效展布范围。

3 基于全成本核算的吐哈油田三塘湖盆地低渗透油藏压裂改造技术

3.1 精选压裂液体,降低材料消耗

针对吐哈油田三塘湖盆地低渗透油藏地质特征,优选低浓度滑溜水体系替代传统高粘度压裂液,减少化学添加剂用量,降低材料采购成本,同时采用返排液回收技术,对压裂施工后返排液体进行过滤与处理,实现循环利用,减少新材料消耗。结合储层温度与压力条件,选择耐高温、低滤失压裂液体体系,优化液体性能,减少液体浪费,并建立压裂液体成本数据库,实时记录材料使用情况,分析成本构成,优化采购与使用方案。利用数值模拟技术,预测不同压裂液体对裂缝扩展影响,选择性价比最高的液体体系,实现材料成本精准控制。针对储层非均质性强特点,采用多功能压裂液体体系,兼顾降阻、携砂与防膨性能,减少液体种类使用,简化施工流程,同时优化压裂液配方,利用纳米材料增强液体性能,提高液体利用率,减少单位面积液体用量。结合全成本核算模型,分析压裂液体各环节成本占比,识别高成本环节,制定针对性优化措施,并设置智能化液体调配系统,实时监测液体性能参数,动态调整液体配方,减少性能波动导致液体浪费。建立压裂液体供应链管理体系,优化采购渠道与库存管理,降低采购与存储成本,同时针对低渗透油藏开发特点,采用低伤害压裂液体体系,减少液体对储层伤害,降低后续处理成本,应用液体性能快

速检测技术,实时评估液体性能,减少不合格液体使用,优化液体注入工艺,采用分段注入方式,减少液体浪费,结合地质数据与施工参数,优化液体用量设计,减少过量使用,并引入液体成本实时监控系统,动态跟踪液体使用情况,及时调整施工方案,降低材料消耗。

3.2 精控裂缝扩展,调整施工参数

精准控制裂缝扩展形态,依据储层地质特征、应力场分布、流体动力学特性调整施工参数,使裂缝长度、宽度、导流能力达到最优状态,减少无效改造,优化成本分配。图1(a)展示压裂数值模型,水平井筒、层理结构、主应力方向等关键要素直接影响裂缝生长路径,调整泵注压力梯度、应力分布可有效改变裂缝形态。图1(b)反映裂缝扩展状态,裂缝受水平主应力方向控制,延展过程中流体滤失、砂比变化、局部应力集中影响裂缝形态调整,泵注排量优化需结合实时应力监测数据,使裂缝形态稳定,避免过度延展或过早闭合造成支撑剂浪费。裂缝形态演化过程图1(c)反映不同时间阶段裂缝扩展范围及形态变化,合理调整施工压力可控制裂缝延展速率,减少无效扩展,提高有效改造体积。裂缝导流能力控制采用智能砂比调整系统,依据裂缝动态变化调整砂比曲线,使支撑剂填充更加合理,提高裂缝导流能力,减少施工后裂缝闭合导致的改造失效。支撑剂浓度优化采用渐进式投放策略,依据裂缝宽度变化调整支撑剂粒径匹配度,使颗粒分布均匀,降低高浓度投放导致的裂缝过早堵塞风险,提高支撑剂运移效率。液体滤失控制结合暂堵剂策略,使裂缝两端形成暂堵区,减少压裂液过度渗漏,提高裂缝内有效流体比重,优化裂缝形态控制效果。裂缝分布优化结合地质建模数据,依据储层应力差异性调整多级压裂参数,使裂缝展布更加均匀,避免应力集中区出现裂缝合并或过密分布现象。裂缝闭合风险控制及支撑剂运移优化需结合现场数据分析支撑剂沉降特征,使砂粒在裂缝中保持合理分布,

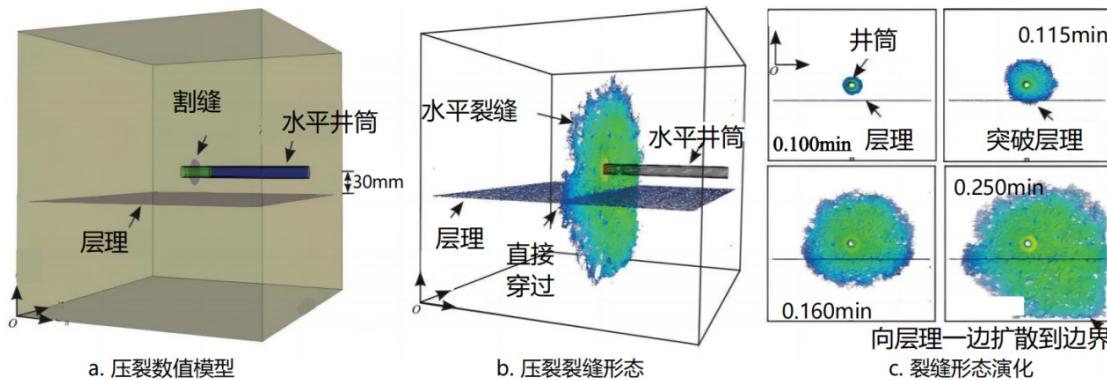


图1 低渗透油藏压裂裂缝扩展数值模拟与形态演化

提高裂缝长期导流能力。

3.3 采用智能装备，优化能量分配

低渗透油藏压裂施工需精准管理能量输入，避免设备超载或能量浪费，智能化装备可动态匹配施工需求，使能量利用率达到最优水平。智能泵送系统依据井口传感反馈调节流量，使压力稳定在裂缝扩展阈值，减少脉冲效应导致的裂缝不规则生长。多级压力调控装置优化管线输送模式，调整液体推送节奏，使高压区段能量损耗最小化。智能阀控系统结合裂缝扩展进程分阶段调整通道开闭状态，使支撑剂分布更加均匀，减少裂缝内部局部过载现象^[7]。能量回收模块结合地层反压效应减少泵送负荷，使返排液动能部分回收，提高整体系统能效比。施工设备联动系统整合泵组、混配单元、输送装置，使各环节能量释放匹配实时需求，减少冗余运行导致的资源消耗。智能温控单元结合储层温度自适应调节流体流变特性，使高温环境下液体稳定性提高，减少不必要的温控修正。数据采集终端实时监测井底能量分布，依据计算模型动态调整能量输入，使裂缝扩展所需动能维持在最优范围，降低非必要的能量损失。

3.4 强化成本测算，合理配置资金

低渗透油藏压裂改造涉及多个成本构成，测算系统需覆盖钻完井、压裂液、支撑剂、设备能耗、人工费用、环保治理等环节，建立全流程动态数据库，使支出结构精细化。智能财务分析模块匹配实时施工数据，构建成本预测模型，使采购、租赁、能源预算符合施工节奏，降低资金冗余。资金配置依据储层特征划分优先级，使高渗透优势区块匹配精细化改造资金，使边际效益低区域调整施工规模，减少资源分配不均问题。成本敏感性分析计算不同井段单位产量成本，使投资决策依据更具针对性，使批量施工与精准压裂结合，使经济性随地质条件调整。分阶段资金投放模式匹配施工进程，使预算释放符合工程需求，使流动性维持在合理区间，使超预算预警系统提高资金分配精准度。全自动监测系统整合物料消耗、设备折旧、人工开支等数据，动态比对预算与实际支出，使超支项及时调整，使财务规划更具弹性。智能采购系统结合市场波动预测，使原材料采购时机更具优势，使库存管理匹配工程需求，使长期合同与现货采购结合，使成本调控更具灵活性。投资回报模型依据油价变化、税收调整、回收周期计算经济性，使资金投放策略更加立体化，使长期与短期收益平衡，使资金使用结构优化。

4 案例实践

吐哈油田三塘湖盆地某区块压裂改造试验选取一口低渗透储层井，储层渗透率平均为0.09mD，孔

隙度7.62%，天然裂缝发育程度较低，储层压力梯度0.85MPa/100m，油层厚度16.34m，地应力方向以NW-SE向为主，水平应力差2.57MPa。施工前期地质建模结果表明，常规压裂方案无法有效延展裂缝，支撑剂运移受限，压裂液滤失较高，导致单井产能未能达到经济开采要求。压裂液体系优化采用低浓度滑溜水压裂液，使化学添加剂使用量降低，使液体渗透能力增强，使滤失率减少至18.37%。支撑剂优化选择复合粒径组合方案，使裂缝填充更均匀，使裂缝闭合强度提升，使导流能力稳定提高12.87%。施工装备调整采用智能泵送系统，使压裂液流量动态匹配裂缝延展状态，使单位施工能耗下降15.29%。实时监测系统依据应力反馈调整施工参数，使泵压维持在38.26MPa，使裂缝有效延展长度提升23.14%。改造后初期日产量较历史数据提升，从8.47m³/d提高至12.63m³/d，使早期产能贡献增强。稳产期延长至135天，相较改造前增加50%，使稳产期内总采收量提高。压力测试显示，裂缝连通高渗透区，使渗流半径扩大16.72%，使动用储量增加。成本测算数据显示，施工周期缩短22.48%，单井投资回收期由24.35个月缩减至18.79个月。返排液回收率提高至72.14%，使废液处理成本降低，使水资源循环利用率提升。资金配置分析表明，高效区块投资占比增加12.87%，使整体资金投放更具针对性，使经济效益得到优化。

5 结论

吐哈油田三塘湖盆地低渗透油藏开发难度较大，传统压裂改造成本高、产能提升有限，全成本核算为优化开发提供了科学依据。压裂液体系调整降低材料消耗，智能装备优化能量分配，施工参数调整控制裂缝形态，资金配置优化提高投资回报，使各环节更加精细化、经济性更强。案例分析表明，优化措施可提升产量、延长稳产期、降低施工成本，使低渗透油藏开发更加高效。全成本核算方法结合压裂技术优化，提高了资源利用率，使经济效益最大化，对类似油藏开发具有推广价值。

参考文献：

- [1] 张翼飞，孙强，于春磊，孙志刚，贝君平. 低渗透油藏压裂裂缝展布特征及影响因素 [J]. 大庆石油地质与开发, 2025, 44(1):86-92
- [2] 刘成桢. 低渗透油藏水平井分段压裂改造技术研究与应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(09):169-171.

作者简介：

董芮妍（1991.3.8-），女，汉族，甘肃，本科，助理，研究方向：油气田开发。