

采油工程技术在低渗透油藏开发中的创新应用研究

赵亮亮

胜利油田鲁明油气勘探开发有限公司, 山东济南, 251600;

摘要: 低渗透油藏因储层孔隙结构复杂、渗透率低、渗流能力弱等突出特点, 长期以来是油气开发领域的重点与难点。本文聚焦采油工程技术在低渗透油藏开发中的创新应用, 深入分析了储层物性限制、渗流机理复杂、常规技术适应性不足等开发瓶颈, 系统探讨了储层改造、智能开采、注水开发等关键技术的创新方向、应用路径及实际效果, 旨在为突破低渗透油藏开发技术壁垒、提升采收率提供全面技术参考, 助力低渗透油气资源的高效、经济开发。

关键词: 低渗透油藏; 采油工程技术; 创新应用

DOI: 10.64216/3080-1508.25.04.018

引言

低渗透油藏作为全球油气资源的重要组成部分, 其开发对缓解能源供需矛盾具有重要意义。但受储层孔隙结构复杂、渗透率低等因素影响, 常规采油技术采收率低、开发效益差。因此, 研究采油工程技术的创新应用, 对突破低渗透油藏开发瓶颈至关重要。

1 低渗透油藏开发的技术瓶颈

1.1 储层物性限制

低渗透油藏储层孔隙度普遍较低, 多在 5%-15% 之间, 且孔隙结构复杂, 以微孔隙和细喉道为主, 导致流体流动阻力显著增加。同时, 储层渗透率极低, 多数低于 50mD, 部分特低渗透油藏甚至低于 1mD, 油气在储层中的自然流动能力极差, 常规开采方式下产量衰减迅速, 难以实现经济有效的开发。此外, 低渗透储层往往存在较强的非均质性, 储层岩性、物性在纵向和横向上变化剧烈, 导致油气分布分散, 增加了开采的不确定性。

1.2 渗流机理复杂

低渗透油藏中的流体渗流不再遵循达西定律, 存在启动压力梯度大的特点, 即只有当驱动压力超过一定阈值时, 流体才能开始流动。这一特性使得油气从储层流向井筒的过程受阻, 传统驱动方式难以形成有效的渗流场。同时, 储层岩石的敏感性较强, 在开发过程中易因流体与岩石的相互作用产生水敏、盐敏等伤害, 进一步降低储层渗透率, 加剧渗流困难。此外, 低渗透储层的边界效应显著, 储层与周围岩体的物质交换和能量传递复杂, 也增加了渗流机理的研究难度。

1.3 常规技术适应性不足

常规采油技术在低渗透油藏开发中表现出明显的

适应性缺陷。例如, 常规直井开采井控范围小, 难以有效动用储层资源; 传统压裂改造技术形成的裂缝长度和导流能力有限, 无法实现储层的充分改造; 注水开发时, 由于储层渗透性差, 注入水推进速度缓慢, 且易沿高渗透条带窜流, 导致波及系数低, 采收率提升效果不佳。这些技术局限性使得低渗透油藏开发长期面临“开采难、动用程度低、采收率低”的困境。

2 储层改造技术的创新应用

2.1 水力压裂技术的创新

水力压裂技术借助高压流体的冲击力使储层破裂并形成裂缝网络, 作为低渗透油藏改造的核心手段, 近年来在技术原理与施工工艺层面实现了多维度创新。在裂缝形态控制上, 突破传统单一裂缝模式, 创新采用分段多簇压裂技术, 通过在水平井段科学划分压裂段, 并在各段内合理布置多个压裂簇, 结合地质力学模拟技术精准计算储层应力分布, 对压裂液排量、砂比、施工压力等关键参数进行动态优化, 从而实现对裂缝延伸方向、密度及分布范围的精准调控, 形成的裂缝网络更趋均匀且覆盖范围显著扩大, 储层改造体积较传统技术有大幅提升, 为油气流动开辟了更畅通的通道。在压裂液体系创新方面, 针对低渗透储层易受伤害的特性, 研发出低伤害压裂液体系, 以清洁胍胶、滑溜水等为基础液, 复配防膨剂、高效破胶剂等功能性添加剂, 在保证良好携砂性能的同时, 可最大限度降低流体对储层的伤害, 其中滑溜水压裂液凭借低黏度、低摩阻的特性, 能减少在储层微孔隙中的滞留时间, 降低水敏性伤害, 尤其适用于特低渗透储层的改造需求。

2.2 体积压裂技术的应用

体积压裂技术是专为低渗透油藏开发设计的突破

性技术,其核心原理在于通过大规模、高强度的压裂作业,在储层内部构建复杂的网状裂缝系统,而非传统技术形成的单一主裂缝,从而实现对储层的立体式全面改造。该技术通过对压裂参数与施工工艺的系统优化,包括压裂液注入强度、支撑剂选型及施工时序控制等,促使裂缝在纵向和横向上充分延伸,有效沟通储层中原有的天然裂缝与人工造缝,形成相互交织、贯通性强的裂缝网络,大幅提升储层整体渗透率与导流能力。体积压裂技术对页岩油、致密砂岩等典型低渗透储层具有极强的适应性,能够显著提高储层的动用程度,使原本难以开采的油气资源得以有效动用。与常规压裂技术相比,采用体积压裂后,单井产量可获得显著提升,且产量递减趋势明显放缓,油井的有效生产周期得以延长,为低渗透油藏的高效开发提供了有力支撑。

2.3 高能气体压裂技术的改进

高能气体压裂技术利用炸药或火药在井筒内燃烧产生的高压气体冲击储层,促使其形成裂缝,因施工流程简便、成本相对较低等优势,在低渗透油藏改造中占据重要地位,近年来在技术安全性与裂缝控制效果上取得了显著改进。改进后的技术采用分段控制燃烧工艺,通过精确设计药剂用量与燃烧速率,实现对压裂能量释放强度与时间的精准调控,避免了因能量过于集中导致的储层过度破碎或伤害。同时,结合数值模拟技术对储层地质特征的分析,优化压裂段间距与施工关键参数,使形成的裂缝分布更均匀,有效提升了储层的整体导流能力。该技术在薄层低渗透油藏改造中表现出独特优势,由于其能量释放集中且可控,能够在薄层储层中形成有效裂缝而不破坏上下隔层,在显著提高油井产量的同时,可减少不必要的施工成本投入,实现开发效益的最大化。

3 智能采油技术的创新应用

3.1 智能监测系统

智能监测系统是实现低渗透油藏精准开发的基础,通过部署各类传感器和监测设备,实时采集储层参数与生产数据,为开发决策提供依据。在储层监测方面,采用光纤传感技术和微地震监测技术,可实时监测压裂过程中裂缝的扩展方向、长度和形态,以及生产过程中储层压力、温度的变化。光纤传感技术具有分布式监测能力,能实现对井筒周围储层参数的连续测量,精度可达 0.1°C 和 0.1MPa ;微地震监测技术通过捕捉压裂产生的微小地震信号,反演裂缝的空间分布特征,为优化压裂方案提供数据支持。在生产监测方面,智能井口装置和井下传感器可实时采集井口压力、流量、温度以及井下

流体性质等数据,并通过无线传输技术上传至数据中心。数据中心对采集的数据进行实时分析,及时发现生产异常,如井筒堵塞、层间窜流等,为及时调整生产参数提供依据,提高了生产的稳定性。

3.2 智能调控技术

智能调控技术基于智能监测系统采集的数据,通过智能算法和自动控制设备,实现对开采过程的动态调控,优化生产参数,提升开发效果。在注水调控方面,智能注水系统根据储层压力分布和吸水能力,自动调整各注水层段的注水量和注水压力。系统通过分析实时监测数据,结合数值模拟模型,预测储层压力变化趋势,制定动态注水方案,避免注入水窜流和低效循环,提高注水波及系数。例如,通过分层智能配水器,可实现对每个小层注水量的独立调控,使低渗透层段的吸水能力提升20%以上。在抽油机调控方面,智能抽油机控制系统根据油井产量、井口压力等参数,自动调整抽油机的冲程、冲次等参数,实现负载与产量的动态匹配。系统采用自适应控制算法,能根据油井工况的变化实时优化运行参数,减少无效能耗,提高抽油效率。在低渗透油藏中,该技术可使抽油机系统效率提升10%~15%,同时延长设备使用寿命。

4 注水开发技术的创新应用

4.1 注水方式的优化

低渗透油藏注水开发的关键在于选择合适的注水方式,以提高注入水的波及范围和驱油效率,针对不同类型的低渗透储层,创新形成了多种优化的注水方式。超前注水技术是针对低渗透油藏启动压力梯度大的特点提出的创新注水方式。该技术在油井投产前先进行注水,使储层压力提前恢复至原始地层压力以上,建立有效的驱动压力系统,降低流体流动阻力。超前注水可使储层保持较高的压力水平,减少原油黏度增加和储层伤害,从而提高油井初始产量和采收率。实践表明,超前注水可使低渗透油藏采收率提升5%~10%。间歇注水技术通过周期性地停止和恢复注水,利用储层岩石的弹性和流体的压缩性,形成不稳定的渗流场,促进注入水向低渗透区域扩散。在注水暂停期间,高渗透区域的压力逐渐降低,低渗透区域的流体在压力差作用下向高渗透区域流动,后续注水时注入水可更多地进入低渗透区域,提高波及系数。间歇注水技术尤其适用于非均质性较强的低渗透油藏,能有效缓解注入水窜流问题。

4.2 注水流体的创新

注水流体的性质直接影响注水效果,针对低渗透储层的特点,创新开发了多种新型注水流体,以改善流体与储层的配伍性和驱油效率。纳米流体注水技术是近年来的研究热点,纳米流体由纳米颗粒分散在基液中形成,具有独特的物理化学性质。纳米颗粒可通过吸附、封堵等作用改善储层润湿性,降低原油与岩石的界面张力,提高驱油效率;同时,纳米颗粒可填充储层微孔隙,减少注入水的无效漏失,提高注水效率。实验表明,纳米流体注水可使低渗透岩心的驱油效率提升 8%-15%。泡沫流体注水技术利用泡沫的贾敏效应,封堵高渗透条带,迫使注入水进入低渗透区域,扩大波及范围。泡沫流体具有较高的黏度和稳定性,能在储层中形成有效的封堵,减少注入水窜流。同时,泡沫的弹性可提高驱替压力,促进原油从微孔隙中脱离。该技术适用于非均质性强、存在高渗透通道的低渗透油藏,能显著提高注水开发效果。

5 提高采收率技术的创新应用

5.1 化学驱技术

化学驱技术通过向储层定向注入特定化学剂,调控流体界面性质与渗流规律,是低渗透油藏提高采收率的重要手段,近年来在配方优化与应用工艺上取得显著突破。聚合物驱技术以高分子聚合物溶液为驱替介质,通过分子链缠绕形成空间网络结构,显著提升驱替相黏度,降低油水黏度比以改善流度比,从而扩大波及范围。针对低渗透储层高矿化度、高温的复杂环境,新型抗盐抗温聚合物通过分子结构修饰(如引入耐盐基团),在矿化度超 10×10^4 mg/L、温度超 80℃ 条件下仍能保持 70% 以上的黏度保留率,同时低浓度(0.1%-0.3%)配方设计减少了聚合物在微孔隙中的吸附滞留,降低储层堵塞风险,注入能力较传统配方提升 20%-30%。表面活性剂驱技术则通过双亲分子在油水界面的定向排列,大幅降低界面张力,促使原油从岩石表面剥离并形成油珠被驱替。新型双子表面活性剂因具有双疏水链与双亲水基结构,表面活性较传统单链表面活性剂提升 1-2 个数量级,在高矿化度地层水中仍可将界面张力降至 10^{-3} mN/m 以下,且在低渗透储层孔隙中的扩散系数提高 30%,有效解决了常规表面活性剂在低渗储层中传质受限的

问题。

5.2 气驱技术

气驱技术借助气体低黏度、高扩散性的特性,通过溶解膨胀、降低原油黏度及补充地层能量等作用,在低渗透油藏开发中展现出独特优势,其技术创新聚焦于注入方式优化与气藏配伍性提升。二氧化碳驱技术利用 CO_2 与原油的良好混相能力,在一定压力下形成混相驱体系,使原油黏度降低 50%-80%,同时 CO_2 溶解可使原油体积膨胀 10%-30%,增强驱替动力。针对低渗透储层非均质性强的特点,创新采用分段交替注入工艺,结合压裂形成的裂缝网络,通过控制各段注入量与注入时机,引导 CO_2 向低渗区域扩散,使波及系数提升 25% 以上,现场应用表明,该技术可使低渗透油藏采收率提高 10%-15%。天然气驱技术适用于富含伴生气的低渗透油藏,通过注入与地层原油性质匹配的天然气,补充地层能量以维持合理生产压差,同时利用天然气与原油的混相作用提高驱油效率。其优势在于气源成本低、与储层配伍性好,对储层伤害率低于 5%,通过数值模拟优化注入压力(保持在原始地层压力的 80%-90%)与注采比(1.0-1.2),可有效避免气窜,实现对低渗透储层的均衡驱替。

6 结论

本文系统研究采油工程技术在低渗透油藏开发中的创新应用,发现储层改造技术(如分段多簇压裂、体积压裂)改善了渗流条件;智能采油技术实现开采精准化;优化的注水开发技术提高波及系数与驱油效率;化学驱、气驱等技术进一步挖潜。这些技术推动开发水平提升,为提高采收率提供途径。未来技术创新将呈集成化、绿色化、智能化深度提升趋势,有望突破开发瓶颈,推动低渗透油气资源高效绿色开发。

参考文献

- [1] 王强. 低渗透油藏高效开发策略研究[J]. 石油勘探与开发, 2023, 40(5): 678-689.
- [2] 孙丽. 优化采油工艺在低渗透油藏中的应用[J]. 油气田地面工程, 2024, 39(2): 123-130.
- [3] 刘刚. 基于案例分析的低渗透油藏增产技术探讨[J]. 中外能源, 2025, 20(1): 45-52.