

油藏注水开发策略与经济效益最大化研究

尹佳宁 (胜利油田东胜精攻石油开发集团股份有限公司, 山东 东营 257000)

摘要: 本研究针对油藏注水开发中的技术难点, 系统分析了提高经济效益的关键策略。通过优化注水井网布局和实施分层注水技术, 可以解决注水不均和驱替效率低的问题; 采用化学驱和多阶段注水技术, 可以显著提升剩余油的动用效率; 通过水质管理与设备升级, 可以有效降低注水系统的运行成本。此外, 研究强调了经济规划的重要性, 通过科学制定开发规划、优化注水参数和引入经济评估模型, 可以实现开发效益与经济回报的双重提升。研究结果表明, 注水开发的经济性与技术优化密切相关, 合理的策略设计不仅能够提升油藏采收率, 还可以实现企业的经济目标, 为复杂油藏的高效开发提供理论支持和实践参考。

关键词: 油藏; 注水开发; 经济效益; 注水技术

1 引言

随着全球能源需求的不断增长, 石油资源在世界能源结构中占据着举足轻重的地位。然而, 随着油田开发程度的提高, 许多油藏进入中高含水期, 采收率的提高成为制约油田持续发展的关键问题^[1]。在这一背景下, 注水开发作为提高油藏采收率的核心技术之一, 其作用是弥补原油采出后所造成的地下真空, 保持或提高油层压力, 实现油田高产稳产, 以获得较高的采收率, 目前已被广泛应用于全球各大油田开发之中。注水开发通过补充地层能量和改善油藏驱替效率, 不仅延长了油田寿命, 还有效提升了资源利用率。

然而, 在注水开发过程中, 水驱系统的不合理设计和实施可能导致资源浪费、油藏损害及经济效益的下降^[2]。因此, 如何在技术可行的前提下, 通过优化注水开发策略实现经济效益的最大化, 成为当前油田开发研究的重点和难点。

2 油藏注水开发技术难点

油藏注水开发是提升采收率的重要手段, 但实际应用中面临诸多技术挑战, 主要包括以下方面:

2.1 注水均匀性控制困难

非均质性油藏中注水均匀性难以控制, 高渗透区流体阻力较低, 水流易沿这些通道优先进, 导致“水窜”现象严重。这不仅造成高渗透区过度开发, 还使低渗透区剩余油动用不足, 限制整体采收率提升。

2.2 水驱效率降低

随着开发推进, 含水率持续升高, 水油流度比逐步恶化。低黏度水易沿高渗透通道流动, 油滞留在低渗透区, 导致驱替效率下降。结果是驱替效果减弱、剩余油动用不足, 同时增加开采能耗并降低开发经济性。

2.3 地层敏感性问题

注入水与地层矿物间的物理化学反应引发一系列不良后果。常见问题包括粘土矿物的膨胀和迁移, 导致储层孔隙堵塞及渗透率下降。此外, 化学反应可能改变岩石润湿性, 进一步降低驱替效率。

2.4 注入水质要求高且难以达标

注入水中悬浮颗粒、溶解氧、微生物及腐蚀性成分会对地层和系统造成损害。颗粒堵塞孔隙, 溶解氧和微生物污染引发腐蚀及沉淀, 钙镁离子形成结垢, 这些问题削弱了驱油效率, 增加了系统运行难度和维护成本。

3 油藏注水开发策略分析

针对第2章中提到的技术难点, 本章提出具体的解决策略, 分别从分层注水、化学驱替、地层稳定、注入水质管理和经济优化五个方面进行分析。

3.1 采用分层注水与堵水调剖技术

在油藏开发过程中, 由于地层非均质性造成的注水不均和水窜问题严重影响了油田开发的效率与经济效益。为有效解决这一难题, 可以采用分层注水与堵水调剖技术, 通过精细化调整与针对性干预, 实现注水开发的优化。

分层注水技术是基于油藏不同渗透层的物理特性, 对各层注水量进行精确控制的工程方法。在高渗透层, 过量注水容易导致水窜现象, 注入水沿最易通过的通道快速流失, 不仅浪费了注入的水量, 还降低了水驱开发的波及效率。分层注水技术通过设置分层注水系统, 将注水量严格分配到每个渗透层中, 避免高渗透层因注水过快引发水窜现象。同时, 对于低渗透层而言, 其较大的渗流阻力导致注水难以有效进入, 动用程度较低。通过分层注水, 可以向低渗透层合理

注水,使其逐步进入有效动用状态,从而均衡整个油藏的开发进程,提升采收率。堵水调剖技术则主要针对高渗透层或形成水窜通道的区域,这些区域往往成为无效水流的主要通道,造成注水开发的不均匀性。采用聚合物凝胶或颗粒材料对这些通道进行封堵是一种行之有效的手段。通过向高渗透区域注入封堵剂,可以堵塞无效水流通通道,显著减少水窜现象的发生。更重要的是,封堵后的流向调整将注入水引导至尚未充分开发的低渗透区域,使水驱范围进一步扩大。在改善注水均匀性的同时,也有效提高了油藏的动用效率。

两项技术的结合不仅可以在宏观层面优化油藏的整体注水开发效果,还可以在微观层面解决特定区域的水窜和动用不足问题。分层注水技术以精细控制为核心,解决注水分布不均的问题,注重对各渗透层的有效管理;堵水调剖技术则以封堵和引导为目标,矫正异常的水驱流动方向。这种双管齐下的技术手段使得油藏开发更加科学和高效,不仅显著提高采收率,还为复杂油藏的进一步开发提供了实践依据和技术支持。通过灵活应用这些技术措施,可以有效应对油藏开发过程中面临的复杂挑战,最大限度地挖掘油藏潜力。

3.2 引入化学驱与多阶段注水技术

为有效解决注水开发后期水驱效率降低的问题,可以采用化学驱技术与多阶段注水策略的有机结合,通过精细化的工程设计与动态优化,提升注水效果并延长高效生产周期。化学驱技术的核心在于注入聚合物或表面活性剂,通过显著提高注入水的粘度,降低水与油的流速比,使驱替液的黏弹性更好地匹配油藏岩石的孔隙结构。这种优化能够有效改善水驱过程中常见的水窜现象,促使油藏中的剩余油被充分动用,从而提高微观驱替效率。此外,表面活性剂的引入还能降低油水界面张力,增强润湿反转效果,使疏油性岩石表面更易被水润湿,进一步提升采收率。

在此基础上,多阶段注水技术通过对油藏开发周期的不同时期进行精细化管理,实施动态注水策略来进一步优化驱替效果。在油藏开发初期,可以以低速注水为主,利用较小的注水速率实现高效的驱替控制,从而避免因注水速度过快而导致的压力波动和早期水突破现象,保证油藏的均匀开发。在中期阶段,随着储层压力的下降与含水率的升高,可适当提高注水速率或调整注水点布局,使注入水在更大范围内发挥补充驱替能量的作用。至开发后期,可结合水质改善与动态监测技术,合理分配注水强度,优化压力梯度的

分布,确保剩余油的持续动用。此外,化学驱与多阶段注水的协同作用还可以通过实验与数值模拟技术进一步验证与优化。在实际实施过程中,利用油藏工程数值模拟技术对化学驱参数进行敏感性分析,可以为化学剂的注入浓度、注水速率及注入周期的动态优化提供数据支撑。同时,通过多阶段注水方案的不断调整与压力场监测技术的实时反馈,可以及时修正开发方案,防止驱替液分布的不均匀性带来的开发效率下降问题。

3.3 使用地层稳定剂与注水压力优化

为应对地层敏感性问题,技术手段上可以采用地层稳定剂注入与注水压力优化相结合的方式,从化学作用和物理调控两方面协同保护地层结构,维持储层的稳定性和开发效率。地层稳定剂的注入是一种依托化学改性技术的有效措施,旨在通过改变储层岩石和流体的相互作用特性,从根本上抑制敏感性问题。具体而言,在注水前注入粘土稳定剂或缓蚀剂,可以通过静电平衡和离子交换作用稳定粘土颗粒,减少矿物颗粒的水化膨胀效应和释放现象,从而降低微观孔隙结构的损伤概率。此外,稳定剂能够吸附在矿物表面,强化其机械强度,避免孔隙网络因颗粒脱落而失效。对于特定敏感性较强的储层,可以引入双功能稳定剂,这种化学剂不仅能提高粘土稳定性,还能够调节油水界面特性,使流体流动更加顺畅。优化注水压力的过程则通过动态控制流体驱替力和岩石抗压能力的平衡,确保储层在保持高效驱替的同时不遭受力学破坏。压力控制的核心在于注水速率与地层渗透率的协同设计。过高的注水压力可能引发孔隙通道扩张、储层裂缝化等不可逆损害,而过低的压力则无法提供足够的驱替动力。通过储层压力监测和实时反馈机制,可以动态调整注水压力,确保其始终处于岩石承压能力范围内。进一步地,通过分段调节注水强度,优化压力场分布,可以实现对低渗区域的重点开发,减轻水窜现象,提高驱替液波及系数。

为了实现两种措施的技术协同,在工程实践中可以依托数值模拟与敏感性分析优化设计方案。利用岩心实验和油藏数值模拟技术,可以模拟不同浓度和类型稳定剂的作用效果,定量评估其对渗透率变化和孔隙结构稳定性的改善程度。此外,通过压力分布场的建模和敏感性研究,可以精确制定适配不同开发阶段的压力优化策略。例如,在开发初期以低压注水为主,减少对储层的直接破坏;在中后期则通过逐步提升压

力增强驱替范围，同时与稳定剂形成协同效应，使敏感性问题的始终处于可控状态。

3.4 完善注入水处理系统

针对注入水质要求高的问题，可以通过多项技术措施的协同应用，从设备升级到动态监测，再到水资源循环利用，全方位完善注入水处理系统。升级高效水处理设备是提升水质的重要技术手段。通过引入多级过滤系统，可以有效去除注入水中的悬浮固体和细微颗粒，避免这些颗粒在注入过程中堵塞储层孔隙或破坏渗透性。同时，采用化学杀菌工艺能够显著减少注水系统中因微生物繁殖引起的生物污染风险，从而抑制储层内细菌生长对流体流动的影响。此外，为防止氧腐蚀对注水设备及地层结构的破坏，除氧工艺通过物理脱氧或化学脱氧方式降低溶解氧浓度，使注入水具有更高的化学稳定性。通过这一系列工艺组合，可以确保注入水不含腐蚀性成分、有机污染物及固体颗粒，为储层的长期稳定开发提供良好的水质保障。动态水质监测机制的建立是水处理系统智能化管理的核心。通过部署在线水质监测设备，可以对注入水的颗粒含量、硬度和溶解氧水平等关键指标进行实时采集与分析。这种实时监控手段不仅可以快速发现水质异常，还能够为水处理设备的运行调整提供数据支持。例如，当监测到溶解氧浓度升高时，可以及时调节除氧工艺参数以降低氧化风险；而当颗粒含量超标时，系统能够自动增加过滤频率，防止固体颗粒对储层渗透率的损害。动态监测系统通过数据的实时反馈与自动化调节，使注入水的水质始终保持稳定且符合标准。在实现高水质注入的同时，水质循环利用技术可以提供一种经济与环保兼顾的解决方案。将生产水进行深度处理并回注油藏，可以显著降低新鲜水的使用量，缓解水资源短缺的压力。高效处理工艺包括分离悬浮物、去除有机物和矿物离子等步骤，这些工艺可以将生产水的各项指标恢复至注入标准，从而替代部分新水资源用于油藏开发。水质循环利用不仅减少了废水排放带来的环境负担，还有效降低了注水开发的整体用水成本。

4 油藏注水开发中经济效益最大化要点分析

为实现油藏注水开发的经济效益最大化，需要从规划、技术优化、成本控制和经济评估等方面综合考量，通过科学管理和技术手段提升开发效益。关键点包括合理开发规划、运营成本优化、单井产量提升和经济风险管控，具体措施如下：

4.1 合理开发规划，优化资源利用

科学规划是实现注水开发经济效益的基础。基于储层地质特性、压力分布和驱替规律，设计合理的注水方案并优化井网布局，可最大化水驱波及范围和原油动用程度。通过精准控制注水速率和动态调整注水强度，避免过度注水或注水不足引发的储层损害和经济损失。同时，结合动态监测与数值模拟技术，可在开发周期内持续优化方案，提高注水效率与储层管理灵活性。

4.2 优化技术手段，降低开发成本

采用先进的自动化设备和优化注水工艺流程，可显著提升操作精度并降低运营成本。高效注水泵、智能监控系统和节能技术的应用减少了能耗和维护费用。定期检修设备可延长使用寿命，降低设备折旧成本。同时，推广节能减排和水资源循环利用技术，不仅节约资源，还能降低环境治理成本，提升整体经济效益。

4.3 提高单井产量，延长经济寿命

通过优化注水参数（如注水量、压力和周期）提升驱油效率，动用更多剩余油并延长单井经济寿命。在不同开发阶段，采用分阶段优化策略（如中后期引入化学驱技术或调整井组布局）进一步改善驱替效果。利用数据分析和人工智能技术实时调整注水参数，实现单井生产效益最大化，同时降低单位原油生产成本，全面提升开发经济性。

5 结语

注水开发是油藏提高采收率的重要技术手段，但其经济效益的实现取决于多方面的优化与管控。本研究围绕注水开发的技术难点，提出了一系列解决策略，并通过经济视角对规划、技术、成本和风险进行全面分析。通过科学的开发规划、技术工艺的改进和经济评估模型的引入，可以实现资源的高效利用与成本的有效控制，同时提升单井产量和注水系统的长期稳定性。注水开发策略的优化不仅为油藏开采提供了可持续发展的技术支持，还显著增强了经济效益，为油田企业的高效运行和长期盈利奠定了坚实基础。

参考文献：

- [1] 张艳妮. 油田动态分析技术在低渗透油田注水开发中的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(20): 187-189.
- [2] 杨伟华, 胡方芳, 王蒙, 盛潇, 李可欣, 李永鑫. 致密油藏开发特征及开发技术研究 [J]. 石油化工应用, 2024, 43(10): 27-29.