

# 低渗透油藏注水开发调整策略及其经济效益评价研究

李 清 (鲁明油气勘探开发有限公司地质研究所, 山东 东营 257000)

**摘要:** 低渗透油藏作为重要油气资源, 其注水开发面临诸多技术挑战与经济效益困境。针对储层物性差、渗流阻力大、注水难度高等特征, 本研究从地质与开发特征入手, 系统分析了开发过程中可能会遇到的一些难点, 并针对问题提出一些适合的调整策略。本文建议可以进行对应的井网优化、精细注水、剖面调整等操作。从而, 为整个开发项目带来更为可观的直接与间接经济效益。

**关键词:** 低渗透油藏; 注水开发; 调整策略; 经济效益; 水驱效率

**中图分类号:** TE348 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 010-0100-03

## Research on Water Injection Development Adjustment Strategies and Economic Benefit Evaluation in Low-Permeability Reservoirs

Li Qing (Geological Research Institute, Luming Oil & Gas Exploration and Development Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China)

**Abstract:** Low-permeability reservoirs, as an important source of oil and gas resources, face numerous technical challenges and economic inefficiencies in water injection development. In response to characteristics such as poor reservoir properties, high seepage resistance, and difficulties in water injection, this study begins with the geological and developmental features of such reservoirs. It systematically analyzes the potential challenges encountered during the development process and proposes suitable adjustment strategies to address these issues. This paper recommends implementing corresponding measures, such as well pattern optimization, refined water injection, and profile adjustment, to achieve more substantial direct and indirect economic benefits for the entire development project.

**Keywords:** Low-permeability reservoirs; Water injection development; Adjustment strategies; Economic benefits; Water flooding efficiency

随着常规油气资源日益枯竭, 低渗透油藏, 在石油工业开发中, 逐渐成为一大重点项目。这类油藏比较特别, 普遍会具有储层物性差、孔隙结构复杂、渗流阻力大等特点。油藏的自然产能往往都较低, 而且, 开发难度大<sup>[1]</sup>。而注水开发技术, 长期以来, 作为一种可以维持地层压力, 同时可以提高采收率的主要开发手段<sup>[2]</sup>, 其在低渗透油藏中, 亦被广泛应用, 但与此同时也会面临各种严峻挑战。如, 传统注水方法, 往往可能会效果不佳, 出现注水困难、水驱波及范围有限等难题<sup>[3]</sup>, 而且, 注采系统在使用过程中, 容易出现失衡问题, 这会直接影响到开发效果, 降低整个项目的经济效益。

因此, 如何系统的分析低渗透油藏的地质特点, 以及对应的开发特征, 并把注水开发的核心难点总结出来, 进行深度剖析, 从而, 针对于此, 制定一些科学合理的调整策略, 帮助注水开采技术更好的应用于此类型油藏的开发实践之中, 具有重要的研究与实践意义。

### 1 低渗透油藏地质与开发特征

低渗透油藏的形成与分布, 会受复杂地质背景所控制, 每个低渗透油藏独特的储层与渗流特征, 从根本上, 就决定了适合各个油藏独特的开发方式, 以及

这种方式所能达到的开采效果。

#### 1.1 储层物性特征

低渗透油藏储层, 通常都会表现出“低孔隙度”与“低渗透率”的“双低”特征<sup>[4]</sup>。孔隙结构方面, 一般是以微细孔隙和吼道为主的。孔隙的类型比较多样化。比如, 一般包括残余粒间孔、溶蚀孔和微裂缝等等。而孔喉的半径往往比较小, 而且其连通性还比较差。这就会导致流体储存空间, 相对来说会非常有限。流动通道也会比较曲折。而且, 储层的非均质性往往是极强的, 比如, 在纵向上和平面上, 岩性、物性的变化都会比较剧烈。而且, 薄互层发育比较明显, 砂泥岩会频繁交替, 所以, 对于有效储层的识别与预测工作, 难度就会陡然增大。再加上岩石表面性质一般都会比较复杂。黏土矿物含量会比较高。这样的话, 就会很容易就会产生水敏、速敏等损害。而这, 亦会进一步恶化项目的渗流条件, 增加开采难度。

#### 1.2 流体渗流特征与驱动类型

在低渗透储层中, 流体渗流规律一般会偏离达西定律。并且, 会有明显的启动压力梯度。也就是说, 只有当驱动压力克服这一临界值后, 流体才会开始流动。这就会使得渗流阻力会显著增大, 能量消耗也会变高。渗流过程会表现出非线性特征。流速与压力梯

度关系复杂。而由于孔隙微细，固液界面作用力，如，毛管力、吸附力等等，所产生的影响就会更为显著，油水两相渗流规律此时就会剧变，且不同于常规油藏的变化。而常见的驱动类型，是以弹性驱和溶解气驱为主的。这些方式的天然能量不足，且衰减快。部分油藏中，还会存在弱边底水等问题。天然水驱能量有限的情况下，自然就难以有效补充地层压力，此时就必须依靠人工注水等方式，进行能量补充。

### 1.3 开发动态基本规律

低渗透油藏的开发动态，呈现有明显的阶段性。初期，依靠天然能量开采，产量会递减迅速，地层压力也会下降得很快。转入注水开发后，见效特征就会更为复杂。注水井周围，很容易就会有高压区形成，而生产井附近的压力会比较低，这就会形成“注不进、采不出”的矛盾局面。见效井比例往往会比较低。且见效时间滞后。含水率上升规律会比较多变。而且，可能会出现无水采油期短、见水后含水上升快的情况。产能建设的投资要比较大。且单井产量低，稳产难度大。如此一来，采油速度就会很慢，整体开发周期也会很长，经济性就不太友好。

## 2 低渗透油藏注水开发现实难点

基于低渗透油藏独特的地质与渗流特征，在注水开发实践中，团队会面临一系列技术瓶颈与经济效益挑战。

### 2.1 注水困难与能量补充不足

由于储层渗透率极低，注水井的吸水能力普遍较差。往往需要很高的注水压力才能将水注入地层。这其中就接近甚至于超过了地层的破裂压力，就会存在诱发裂缝、引发套管损坏的风险，即使能够注水，注水量也难以满足能量补充的需求，地层压力保持水平会比较低。而且，部分储层会因水质不配伍，或黏土矿物遇水膨胀，发生地层伤害，从而，加剧注水困难的问题。能量补充不足的情况下，生产井流压会下降，产量也会递减加剧，生产形势就会变得被动化。

### 2.2 水驱波及效率低，开发效果差

储层的强非均质性和微观孔隙结构，会导致水驱波及效率极其低下。注入水后，水会沿高渗透条带或微裂缝进行窜流，形成“水流优势通道”，大量低渗区域根本就无法被有效波及，这样就会形成剩余油富集区。宏观波及系数和微观驱油效率都会较低。平面矛盾与层间矛盾也会比较突出，纵向上，各小层吸水会有些不均，部分层段可能根本就不吸水，所以储量动用的程度差异就会比较大。最终的表现就是水驱采收率远低于常规油藏，大量可采储量根本无法被有效采出，整体开发的效果不甚理想。

### 2.3 注采系统不协调，压力场失衡

低渗透油藏中压力传导速度慢，注水井与生产井之间，比较难建立有效的压力驱动体系。时常会形成“注水井憋压、生产井低压”的不协调局面。注采井数比、注采强度等参数，一旦设计不当还会加剧这一矛盾。而不合理的井网部署，会使得压力场分布方便极不均衡，部分区域长期会处于高压状态，而另一区域，能量就会严重亏空。这种压力场失衡的问题，不仅会影响到当前的产量，也会限制到后期调整措施可以发挥的余地，整个开发系统可能会陷入低效循环之中。

### 2.4 开发经济效益差，投入产出失衡

技术难点的存在，会直接转化为经济效益的巨大挑战。低渗透油藏的开发本身就需要钻更多的井，才能有效动用储层，钻井、压裂、注水等工程，投资都非常巨大，同时，如果单井产量低、稳产期短的话，投资的回收期就会拉长，现金流状况也会变得比较差。高昂的吨油操作成本，以及较低的油价承受能力之间，会形成尖锐的矛盾，在低油价时期，许多低渗透油田甚至可能会面临生产即亏损的严重困境。这种投入与产出的严重失衡，会极大地制约企业的开发积极性。

## 3 低渗透油藏注水开发调整策略

为应对上述难点，必须采取系统性、针对性的注水开发调整策略，共同努力改善开发的效果，提升项目的整体经济效益。

### 3.1 井网与井距优化调整策略

井网与井距是决定注采关系的重要基础。对于低渗透油藏，需要摒弃常规油藏的井网模式，根据储层的非均质发育，以及裂缝的实际方向，可以有针对性的采用菱形、矩形或其他的不规则井网，这其中，过大的井距会导致压力传导不通，过小则经济性方向会比较差，因而实践中多采用“先大后小”的变井距思路，初期的话，一般采用较大井距来控制地质储量，中后期的话，则是会通过加密井网来提高控制程度与采收率。井网调整的过程一般还包括改变注采方向等操作，使注入水可以更有效地对剩余油进行驱替。例如，可以将行列注水，调整为面积注水的方式，或，将注水井排转向，从而改善压力场的分布情况。在数值模拟与动态分析相结合的情况下，也可以进行井网系统的整体优化，并做好分阶段调整，从而，提升水驱的有效控制程度。

### 3.2 精细注水与压力调控策略

精细注水是针对储层非均质性问题所提出的一种核心策略。这其中的核心设计，就是“差异化”和“精细化”的策略安排。实践中，必须细分注水层段，对

每个小层或层组,要分别制定不同的注水强度、注水量和注水周期,对高吸水层,可以实施控制或间歇注水等方式,而对于低吸水层,则可采取增注措施。压力调控的目标,其实就是要建立合理的压力场,保持合理的地层压力水平,避免压力过高导致暴性水淹等工程风险,同时,防止压力过低影响到油井的产能。对不同的注水井,要实施不同的“温和注水”方式,控制注水压力要在合理范围内,保持注采平衡。同时,建立压力监测系统,实时了解压力分布,为动态调整,提供相应依据。再结合周期注水、脉冲注水等方式,不断改变流体地渗流方向,从而,提高微观驱油效率。

### 3.3 剖面调整与深部液流转向策略

为解决注入水无效循环的问题,实践中,必须对注水井的吸水剖面和生产井产液剖面,进行实时调整。对于注水井,可以采用调剖技术,封堵高渗透水流通道,初期的话,可使用颗粒型、凝胶型调剖剂,进行近井地带处理,而随着开发深入,可能就需要转向深部液流的调控设定。深部调驱技术会将调剖剂推向地层的深部,在油藏内部,可以形成流动屏障,然后迫使后续的注入水,转向未波及区域,从而扩大整个的波及体积。对于生产井,可以采用堵水、卡封等技术,控制高含水层的产出,从而解放低含水油层。剖面调整是一个持续的过程。这需要根据动态监测的结果,反复的实施和调整,才能不断改善水驱前缘的均匀性,从而提升整体的驱替效率。

### 3.4 改善渗流与复合驱替策略

从根本上改善储层渗流能力,是提高开发效果的重要途径。一般情况下,酸化、压裂等储层改造技术,可以扩大注水井的渗流半径,提高吸水能力,其中,对于生产井,可以采用重复压裂、多级压裂等技术,疏通油流通道,提高产能。而复合驱替策略,则是要将注水与其他驱替方式结合在一起。如,把注气(如CO<sub>2</sub>、氮气)与水交替注入(WAG),利用气体的特点,交替改善流度比,提高驱油效率。还可以采用一些表面活性剂驱、聚合物驱等化学驱方法,不断降低界面张力,增加水相粘度,提高微观洗油的效率。纳米流体、低矿化度水驱等新技术,目前也在持续的探索中,总的来看,复合驱替可以通过多种机理的协同作用,最终突破单一水驱的局限性。

## 4 注水开发调整策略的经济效益评价

低渗透油藏注水开发调整策略可以从直接与间接两方面,增加项目的经济效益,从而,推动企业对低渗透油藏的开发积极性,具有重要的实际意义。

### 4.1 直接经济效益

低渗透油藏注水开发调整策略可以增加油气产

出,结语大量成本,提升整体的投资回报效率。其中,有效的井网优化和精细注水,可以提高水驱控制储量,增加可采储量,直接就可以带来原油产量的增加,减缓油藏产出的递减变化。剖面调整和复合驱替方式,可以直接提高采收率,这部分增量的价值,就是核心直接收益。同时,合理的压力调控,以及一些精细管理,也可以降低无效注水量,从而,节约水电费和污水处理成本。而储层的改造方面,虽然可能一次性投资较大,但若显著且持续地提高单井产量,也将大幅降低吨油折耗,操作成本也会随之降低。另外,经济注水策略也可以优化资源配置,避免低效或无效投入,从而提升整体资本回报率。

### 4.2 间接经济效益

间接经济效益方面,虽然这些效益难以直接量化,但长期价值还是可以预见且相当巨大的。首先,技术成功应用之后,会有更好的经验积累,同类油藏在开发的时候,就可以提供相应的优化实践经验,这就可以降低未来项目的技术风险和学习成本。其次,对于一些难采的储量如果在优化策略的应用下获得了增益,那就可以延长油田的稳产期和生命周期,从而,也可以进一步保障油田队伍的稳定性,避免团队变动所带来的大量短期成本。

## 5 结语

低渗透油藏的注水开发,是一项复杂而艰巨的系统工程任务。其固有的地质与开发特征,说明对于不同的低渗透油藏,必须采取与传统油藏有所不同的开发思路和技术路径。对于一些注水困难、波及效率比较低、压力场容易失衡、经济效益比较差的油藏,可以从井网优化、精细注水、剖面调整、渗流改善等多个维度,实施各种综合调整策略,全面提升水驱效率与最终采收率,最终,给开发项目带来持续的直接效益和巨大的潜在经济效益。未来,随着我们对地质认识逐渐深化,开发技术的不断进步,低渗透油藏注水开发的技术经济性可以被不断拓展,从而,给更多的低渗透油藏资源,提供更为高效、更具经济性的开发动力。

### 参考文献:

- [1] 赵淼,成城,白喜军.低渗透油田注水调整治理研究——以子长油田新寨河区块为例[J].天津化工,2023,37(05):90-93.
- [2] 艾小凡.丰富川高含水特低渗油藏注水优化技术[J].辽宁石油化工大学学报,2020,40(03):52-56.
- [3] 王梦莹.低渗透油藏注水开发系统优化调整[J].化学工程与装备,2025,(01):59-62.
- [4] 胡莹莹.坪北油田南区近年注采调整及效果分析[J].江汉石油职工大学学报,2021,34(05):45-47.