

Study on geological law and exploitation technology of remaining oil distribution

Hanxue Gu

China Liaohe Oilfield Ciyutuo Oil Production Plant, Shenyang, Liaoning, 110206, China

Abstract

As oilfield development progresses into its middle and late stages, residual oil distribution exhibits highly heterogeneous and complex spatial characteristics. Accurately understanding the enrichment patterns of residual oil has become a key scientific challenge for improving recovery rates. Taking a typical mature oilfield as a case study, this paper systematically analyzes the control mechanisms of reservoir configuration, sedimentary microfacies, heterogeneity, and microstructures on residual oil distribution. A refined description technology system based on multi-source information fusion is established, proposing potential tapping strategies tailored to different types of residual oil. The study reveals that lateral interbeds and abandoned channel fillings within channel sand bodies constitute the primary enrichment zones for residual oil. There is a significant positive correlation between reservoir permeability coefficient variation and the degree of residual oil distribution heterogeneity. High-position microstructures form residual oil accumulation belts due to gravitational differentiation effects. In terms of residual oil characterization, optimized seismic attribute combinations can enhance prediction accuracy to over 78%, while dynamic monitoring data effectively identifies water flooding front positions and dominant flow channels. For residual oil enrichment zones with distinct geological features, targeted approaches such as well pattern densification, horizontal well drilling, and deep-profile enhanced flooding are implemented, achieving a 3-8 percentage point improvement in recovery rates.

Keywords

Residual oil distribution; Geological patterns; Reservoir heterogeneity; Refined description; Potential tapping technology

剩余油分布地质规律与挖潜采油技术研究

谷涵雪

中国石油辽河油田茨榆坨采油厂, 中国·辽宁 沈阳 110206

摘要

油田开发进入中后期阶段后, 剩余油分布呈现高度非均质性和复杂空间分布特征, 准确认识剩余油富集规律成为提高采收率的关键科学问题。本文以典型老油田为例, 系统分析了储层构型、沉积微相、非均质性及微构造对剩余油分布的控制机制, 建立了基于多源信息融合的剩余油精细描述技术体系, 提出了针对不同类型剩余油的挖潜对策。研究表明, 河道砂体内部的侧积层和废弃河道充填物构成剩余油主要富集部位, 储层渗透率变异系数与剩余油分布不均匀程度呈显著正相关关系, 微幅度构造高部位因重力分异作用形成剩余油聚集带。在剩余油描述方面, 地震属性优化组合可将预测精度提升至78%以上, 动态监测资料能够有效识别水驱前缘位置与优势渗流通道。针对不同地质特征的剩余油富集区, 分别采用井网加密、水平井靶向钻探、深部调驱等技术手段实施挖潜, 实现了采收率提升3-8个百分点的良好效果。

关键词

剩余油分布; 地质规律; 储层非均质性; 精细描述; 挖潜技术

1 引言

油田经过长期注水开发后, 储层流体分布格局发生深刻变化, 剩余油从连续成片状态逐渐演变为零散分布格局。高渗透带因注入水优先波及而趋于水淹, 低渗透区域动用程度严重不足, 传统粗放式开发模式难以适应这种复杂局面。当前面临的核心问题集中在三个层面: 地质认识精度不够导致剩余油预测偏差大, 常规描述技术难以刻画小尺度非均质

性, 挖潜措施针对性不强造成投入产出比持续下降。沉积作用形成的原生非均质性奠定了储层物性差异的基本格局, 构造运动引起的裂缝发育影响流体渗流能力, 长期注水又在原有地质条件基础上叠加次生变化因素。注入水沿高渗透通道快速推进形成指进, 井网控制不到位的区域始终处于低动用状态, 这种多重因素交织使得剩余油分布呈现强烈的时空演化特征。破解开发难题需要从地质规律认识、描述技术创新、挖潜对策优化等方面系统开展研究, 为老油田稳产提供技术支撑。

【作者简介】谷涵雪(1988-), 女, 中国辽宁沈阳人, 本科, 工程师, 从事石油地质研究。

2 目标区块剩余油分布地质规律研究

2.1 储层构型与沉积微相对剩余油分布的控制作用

河流相储层的沉积构型决定剩余油空间分布特征,主河道内发育的侧积层和泥质夹层构成渗流屏障,注入水沿高渗通道推进使侧积层后方原油滞留形成富集区。废弃河道呈孤立透镜状分布,内部剩余油饱和度维持0.6以上,若井网部署未准确识别将长期处于未动用状态^[1]。河漫滩和决口扇薄层砂体虽渗透率低、连续性差,但累计厚度占储层总量20-30%,蕴含的剩余油资源不容忽视。沉积微相平面展布控制储层物性宏观变化,河道中心相带经长期水驱含水饱和度已升至0.7以上,而边缘相带剩余油饱和度仍保持0.4-0.6,属可接替开发的现实储量。

2.2 储层非均质性对剩余油分布的影响机制

多尺度储层非均质性共同作用形成复杂剩余油分布格局,渗透率变异系数超过0.6时剩余油分布复杂性急剧增加。层间非均质性导致纵向水驱差异显著,高渗层吸水比例占总注水量60%以上,低渗层长期低产甚至停产,层间干扰随开发时间延长不断加剧。平面非均质性使相邻井点渗透率差值达5-10倍,强非均质条件下易形成指进现象造成原油绕流。微观孔隙结构差异影响毛管压力和相对渗透率关系,决定微观驱油效率。长期注水冲刷使优势通道渗透率增加20-40%,低渗区域因微粒堵塞反而下降,动态变化使剩余油分布格局持续调整。

2.3 微构造特征对剩余油富集的控制规律

微幅度构造起伏虽仅几米至十几米,但对剩余油分布控制作用显著。注入水在重力作用下向构造低部聚集,原油因密度小向高部运移,构造脊部和局部高点剩余油饱和度比周边高0.1-0.2。大型断层将油藏分割为独立压力系统,断层下降盘因物性差且受断层遮挡,注入水波及困难形成剩余油富集区。鼻状构造和转折端因地层倾角变化使流体运移滞留,岩性物性双重控制使该区域剩余油分布特殊,调整井初期产量往往高于平均水平。局部应力集中区产生的裂缝影响孔隙保存,地应力方向与注采井连线夹角也影响井间干扰程度^[2]。

3 剩余油精细描述与量化表征技术

3.1 基于地震属性融合的剩余油分布预测方法

地震属性分析通过提取振幅、频率、相位等特征参数揭示地下储层特性,单一属性反映有限,而优化组合可实现互补增效。波阻抗属性适合划分砂泥岩界面,相干属性能识别断层裂缝,频率衰减属性可检测含油气性。建立地震属性与剩余油饱和度的定量关系是预测核心,通过收集井点数据作为样本,优选5-7种敏感属性组合,复相关系数可达0.75以上。神经网络和机器学习算法能处理非线性关系并挖掘隐含信息,训练后的模型预测符合率可达78%以上。时移地震技术通过对比不同时期数据直接监测流体变化,对动态追踪剩余油分布具有独特优势。

3.2 动态监测资料在剩余油描述中的应用研究

生产测井通过流量和含水测试确定各层产液剖面,多次测井对比可揭示吸水产液的时间变化规律。试井分析利用井底压力恢复曲线获取渗流参数,脉冲试井通过观测压力响应判断井间连通性,连通性好的区域压力响应快,而连通性差的区域往往存在未波及剩余油。示踪剂监测技术通过跟踪注入水运移路径,根据示踪剂到达时间和浓度特征判断渗流通道状况,快速突破表明存在高渗通道导致注入水窜流而两侧低渗区域驱替不足。井间地震技术将震源和检波器置于不同井中,分辨率显著提高,结合时移地震可实现剩余油分布的立体监测。

3.3 储层地质知识库与三维地质建模技术

储层地质知识库整合区域地质背景、沉积相模式、储层构型、成岩特征和开发历史,形成系统化知识体系为建模提供地质约束。三维建模流程包括构造建模确立空间骨架、相建模采用随机模拟方法刻画沉积相分布、属性建模在相控约束下分配孔渗参数。建模参数优化至关重要,变程参数根据沉积单元规模确定以控制属性相关距离,变差函数选择需匹配不同地质对象特征。模型验证通过交叉验证方法剔除部分井点预测其参数值,采用相关系数、均方根误差等定量指标评价模型与实际的吻合程度,确保建模质量可靠^[3]。

3.4 数值模拟历史拟合与剩余油定量评价

油藏数值模拟在地质模型基础上求解多相流动方程,网格剖分需兼顾地质特征与计算效率,流体性质和相渗曲线等基础数据直接影响结果可靠性。历史拟合通过调整储层和流体参数使模拟指标与生产历史相符,遵循从整体到局部、从粗到细的拟合策略。自动历史拟合技术利用遗传算法、集合卡尔曼滤波等优化算法搜索最优参数,人机结合的半自动模式兼顾效率与地质合理性。拟合后的模型用于剩余油定量评价,提取饱和度数据绘制分布图识别富集区,不同类型剩余油储量统计为挖潜措施提供依据,方案预测可优选开发调整方案并通过敏感性分析识别风险因素。

4 剩余油挖潜技术对策与效果评价

4.1 基于储层构型的井网加密调整技术

井网加密是改善储层动用状况、提高采收率的有效手段,加密井位选择必须建立在储层构型研究基础上,避免盲目布井造成投资浪费^[4]。河道砂体侧翼和废弃河道区域因井网控制薄弱长期处于低动用状态,是加密调整的首选目标,加密井应部署在原井网薄弱环节以缩短井距、提高控制程度、扩大注入水波及体积。加密井网设计需综合考虑地质条件和经济效益,剩余油丰度高、物性好、连通性差的区域加密效果通常较好,井距确定是设计核心,应根据储层渗透率和剩余油分布特征通过数值模拟优化,不同区域可采用差异化井距标准。垂直井与水平井的选择取决于储层几何形态,对于横向连续但纵向较薄的砂体,水平井能大幅增加泄油面

积提高单井产能；而厚度较大但平面非均质性强的储层，垂直井配合分层开采更为适宜。注采井网调整优化不仅包括加密，还涉及井网形式改变和注采关系重组，将排状井网改为点状井网可改善注采连通状况，提高水驱波及效率。

4.2 水平井及多分支井靶点优化设计方法

水平井技术为开发薄差储层和复杂构造油藏提供了新途径，水平井段沿储层倾向或走向延伸可钻遇多个砂体，单井控制储量远大于垂直井。靶点设计是水平井部署的关键，靶点位置直接决定井眼能否钻遇优质储层和剩余油富集区，地质导向技术在钻进过程中实时采集地层信息并根据实钻情况调整井眼轨迹，确保井眼始终在有利位置穿行。靶点优化设计的前提是准确掌握剩余油空间分布，需基于精细地质模型和剩余油分布图圈定富集带的平面展布和纵向位置，选择剩余油丰度大、储层物性好的区域作为靶区，井段方位应避免优势渗流通道以防注入水沿井筒快速窜进造成过早水淹。多分支井技术进一步提高了单井储层接触面积，从主井眼分出若干分支井眼，每个分支可针对不同剩余油富集层实现一井多用，但施工难度大、风险高，目前主要应用于剩余油高度富集且常规井难以有效动用的特殊区域。

4.3 深部调驱与提高采收率技术应用

化学驱技术通过注入表面活性剂、聚合物等化学剂改善水驱效果，聚合物驱利用高粘度溶液增加注入液流度比、改善吸液剖面、扩大波及体积，三元复合驱结合碱、表面活性剂和聚合物的协同作用，既降低油水界面张力又改善流度比，驱油效率显著提高。深部调剖技术针对储层非均质性强、层间干扰严重的油藏，调剖剂注入高渗层后封堵优势渗流通道，迫使后续注入水转向低渗层提高其动用程度，调剖剂包括凝胶类、颗粒类、泡沫类等，不同类型适用条件和封堵机理各异^[5]。调驱方案设计需明确调剖对象和堵水层位，通过吸水剖面和产液剖面测试识别强吸水层和高产水层作为调剖对象，调剖井选择应覆盖主要水窜通道形成封堵带。气驱技术包括氮气驱、二氧化碳驱等，通过注入气体降低原油粘度、补充地层能量，二氧化碳与原油混相可大幅提高驱替效率但需较高注入压力且存在气窜风险，适合深层、低渗、稠油等难动用储量开发。

4.4 综合挖潜方案优化与经济效益评价

综合挖潜方案将多种技术手段有机结合实现剩余油系统挖潜，不同技术适用于不同类型剩余油，需根据油藏实际

情况制定包含井网调整、水平井钻探、化学驱、调剖等多项措施的综合方案，方案设计应分阶段实施，优先开展见效快、风险小的措施为后续创造条件。方案优化是多目标、多约束的决策过程，优化目标包括采收率最大化、投资回收期最短、经济净现值最大等，不同目标间可能存在矛盾需要权衡取舍，数值模拟为方案优化提供定量评价手段，通过模拟不同方案开发效果对比技术经济指标筛选最优方案。经济评价是方案决策的核心依据，需建立经济评价模型计算各方案的投资、成本、收益，得出净现值、内部收益率、投资回收期等经济指标，投资估算应详细列出钻井投资、地面工程投资、化学剂采购费用等各项支出，收益预测基于产量和油价需考虑产量递减规律和油价波动风险。风险评价识别方案实施中可能遇到的各类风险，地质风险源于储层认识不确定性，技术风险来自施工难度和技术成熟度，经济风险主要是油价波动和成本超支，风险应对策略包括建立多套方案、分期实施、设置风险储备金等。

5 结语

剩余油挖潜工作关系老油田能否持续稳产，精细地质研究和先进描述技术的应用为准确认识剩余油分布创造了条件。储层构型、非均质性、微构造对剩余油分布具有复杂的控制作用，深入研究这些地质因素才能科学预测剩余油富集部位。地震属性分析、动态监测、三维建模、数值模拟等技术的综合运用，使剩余油描述精度得到显著提升。井网调整、水平井钻探、化学驱、调剖等挖潜技术各具特点，根据地质条件和剩余油类型合理选择是提高效果的关键。综合挖潜方案的制定应遵循技术可行和经济合理的双重标准，方案实施中的动态管理和效果评价对确保挖潜成效至关重要。

参考文献

- [1] 刘璐.注水油藏开发后期剩余油分布特征分析与挖潜对策研究[J].石化技术,2025,32(8):292-294.
- [2] 刘萍,张皎生,王睿恒,李文芳,李舒彤.低渗透储层基于岩心仿真模型的微观剩余油研究[J].石油化工应用,2025,44(2):28-31.
- [3] 殷鹏飞.埕东西区储层非均质性及对剩余油分布的影响[J].山东石油化工学院学报,2025,39(2):43-48.
- [4] 吴彤,吴雨风.靖边油田天赐湾区块长6⁽¹⁾致密储层非均质性特征及其控制因素研究[J].河南科技,2025,52(3):98-101.
- [5] 王崔,常皓楠,马楠,白宸铭.麻科义区块长6剩余油主控因素及平面分布规律[J].广东石油化工学院学报,2025,35(3):10-13+19.