

Dynamic monitoring of reservoir geological parameters and adjustment of oil production and development

Yang Bai

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

Abstract

Dynamic changes in geological parameters during reservoir development directly impact recovery rates and economic efficiency. This study integrates monitoring technologies such as 4D seismic imaging, production logging, and inter-well tracing to establish a multi-scale, multi-parameter dynamic monitoring system. Through comprehensive analysis of temporal variations in reservoir properties, fluid characteristics, and pressure systems, we elucidate their mechanisms affecting development outcomes. A geological parameter evolution model developed from monitoring data quantitatively demonstrates the intrinsic relationship between microstructural changes in reservoirs and macroscopic development responses. The research proposes targeted development adjustment strategies including optimized injection-production structures, well pattern densification schemes, and selection of optimal recovery enhancement technologies, while establishing a full lifecycle development optimization model. Practical applications demonstrate that development adjustments guided by dynamic monitoring can effectively improve waterflooding sweep efficiency, increasing ultimate recovery rates by 5-8 percentage points.

Keywords

reservoir dynamic monitoring; geological parameter evolution; 4D seismic imaging; development adjustment; recovery rate

油藏地质参数动态监测与采油开发调整

白洋

中国石油辽河油田茨榆坨采油厂, 中国·辽宁 沈阳 110206

摘要

油藏开发过程中地质参数的动态变化直接影响采收率和经济效益。本研究综合运用四维地震、生产测井、井间示踪等监测技术, 构建了多尺度、多参数的动态监测体系, 深入分析了储层物性、流体性质、压力系统的时变规律及其对开发效果的影响机理。基于监测数据建立的地质参数演化模型, 定量评价了储层微观结构变化与宏观开发响应的内在联系。研究提出了针对性的开发调整对策, 包括注采结构优化、井网加密方案、提高采收率技术优选等, 并建立了全生命周期开发调整优化模型。实践表明, 动态监测指导下的开发调整能够有效改善水驱波及效率, 提高最终采收率5%~8%。

关键词

油藏动态监测; 地质参数演化; 四维地震; 开发调整; 采收率

1 引言

随着现代监测技术的快速发展, 四维地震成像、动态测井分析、井间连通性示踪等先进手段为油藏实时监测提供了技术保障, 使得动态参数追踪和开发策略实时调整成为现实。当前, 虽然各项监测技术在油田应用中已显示出良好效果, 四维地震能够识别流体饱和度空间分布, 生产测井可获取近井储层变化特征, 示踪技术揭示了流体运移规律, 但多源数据的有效整合、参数演化模型的精确构建以及基于此的科学调整方案制定仍面临技术挑战。

【作者简介】白洋(1987-), 男, 中国辽宁盘锦人, 本科, 助理工程师, 从事石油地质研究。

2 目标区块油藏地质参数动态监测方法与技术体系

2.1 基于四维地震的储层物性动态变化监测

目标区块实施了覆盖156平方公里的多期四维地震监测, 通过对比不同时期的三维地震数据识别储层流体饱和度和压力变化。采用精细时移校正技术处理后, 地震属性分析揭示了储层波阻抗与含水饱和度的良好相关性, 当含水饱和度从20%升至80%时, 波阻抗增加15%~20%。通过建立岩石物理模型实现了水驱前缘和剩余油分布的动态刻画, 监测结果显示主力油层水淹分布存在明显非均匀性, 高渗条带水淹严重而构造高部位仍有大量剩余油。时移地震差异分析还定量评估了地层压力空间分布, 为注采系统调整提供了重要依据^[1]。

2.2 生产测井资料在储层动态评价中的应用

通过系统实施产液剖面测井、饱和度测井和套管井地层评价等多种测井方法,获取了井筒及近井地带的详细动态信息。产液剖面测井揭示60%的产液量集中于30%的射孔层段,层间矛盾突出导致纵向波及系数仅为0.45-0.52。饱和度测井结果表明主力层剩余油饱和度降至25%~35%,而薄差层仍保持45%~55%的较高水平。套管井地层评价技术突破常规测井限制,通过脉冲中子测井识别出多个因物性差或井网控制不足而未动用的层段,这些层段成为挖潜的重点目标。

2.3 井间示踪与试井动态监测技术集成应用

开展的多批次井间示踪试验直观反映了储层连通性特征,部分井组示踪剂突破时间仅15~20天,远低于理论值,表明存在高速渗流通道。通过分析示踪剂浓度曲线识别出单峰型、多峰型和拖尾型三类渗流模式,反演结果显示30%的注入水通过不足10%储层体积的优势通道快速突破。试井数据表明储层渗透率平均下降20%~30%,主要由微粒运移和粘土膨胀引起,注采井间压差达5-8兆帕。综合分析井间示踪与试井数据,建立了储层非均质性定量表征模型,明确了渗透率级差、变异系数等参数的动态变化规律,为开发调整提供了定量依据^[2]。

3 油藏地质参数动态演化规律与开发响应特征

3.1 储层物性参数时变规律及其对开发效果的影响

长期水驱开发导致储层物性参数发生显著变化。孔隙度监测显示主力油层呈现先增后减趋势,开发初期因溶蚀作用增加2~3个百分点,后期受微粒运移和粘土矿物转化影响降低1~2个百分点。渗透率变化更为复杂,高渗层因长期冲刷渗透率增幅超过50%,而中低渗层受微粒堵塞影响下降20%~40%,这种差异化变化加剧了层间矛盾,使注入水更倾向进入高渗层形成无效循环。岩相分析表明长期水驱使岩石润湿性向亲水转化,接触角从120-130度降至90-100度,导致残余油饱和度增加3~5个百分点。储层敏感性随开发动态变化,速敏问题日益突出,当注水速度超过临界值时部分井注水能力降低40%~60%。

3.2 流体性质变化规律及对开发政策的制约

原油和地层水性质在开发过程中发生系统性变化,直接制约开发效果。地层原油黏度随压力下降而增加,当压力从25兆帕降至15兆帕时黏度增加30%~50%,脱气原油密度相应从0.85克/立方厘米增至0.88克/立方厘米,这些变化增大了流动阻力并降低驱油效率。长期注水使地层水矿化度从8万毫克/升降至5万毫克/升,离子组成改变导致水型从氯化钙型转为氯化钠型,影响了岩石-流体相互作用及界面张力^[3]。当地层压力低于饱和压力后溶解气大量脱出,气油比从80立方米/吨增至150立方米/吨,游离气占据孔隙空间形成贾敏效应严重影响原油流动能力。高含水

期油水乳化现象愈发严重,含水率超过60%后形成的乳状液黏度比纯原油高2-5倍,不仅增加流动阻力还导致油水分离困难。

3.3 压力系统演化与能量保持状况评价

地层压力动态变化直接关系到油藏能量状况,监测数据显示目标区块经历了压力下降—恢复—再下降的复杂过程。开发初期因天然能量不足地层压力快速下降至65%保持水平,实施注水后压力逐步恢复至原始压力的85%~90%。当前面临的主要问题是压力分布非均衡性,注水井附近压力超过原始压力10%~15%存在套管损坏风险,而生产井附近压力保持水平不足70%影响产能发挥,横向压力梯度达0.5-0.8兆帕/百米远高于合理范围。不同层系压力差异明显,主力油层因注采强度大压力波动剧烈,非主力层因注采不完善压力持续下降,层间压差达3-5兆帕造成层间窜流影响分层开发效果。弹性能量利用评价表明在压力下降10兆帕条件下弹性采出程度仅为2.5%,说明必须依靠注水保持地层能量。

3.4 储层微观结构变化机理及宏观响应

储层微观结构变化是宏观参数演化的根本原因。扫描电镜观察发现长期水驱导致矿物成分转化,长石溶蚀形成次生孔隙但产生的高岭石堵塞喉道,黏土矿物从蒙脱石向伊利石转化释放的铁离子形成氢氧化铁沉淀降低渗透率^[4]。压汞实验量化的孔隙结构演化显示大孔隙比例增加而中小孔隙比例降低,平均孔隙半径从15微米增至18微米但孔喉半径从3微米降至2微米,孔喉比增大导致贾敏效应加剧使束缚水饱和度增加5~8个百分点。微粒运移是储层伤害主要机制,高速水流冲刷使颗粒在喉道聚集形成桥堵,产出液中固体颗粒浓度达200-500毫克/升。应力敏感性随开发增强,有效应力从10兆帕增至20兆帕时渗透率降低35%~45%,这种应力敏感性在低渗透储层尤为明显成为制约产能的关键因素。

4 基于动态监测的采油开发调整对策与效果预测

4.1 注采结构调整与层系重组优化

基于动态监测结果制定了差异化的注采结构调整方案,对水淹严重的高渗层实施限注或暂停注水措施使注水量降低30%~50%,对动用程度低的中低渗层则加强注水并提高注水压力2-3兆帕以改善波及效果。层系重组打破了原有开发层系界限,将物性相近、压力系统相似的小层重新组合形成新的开发单元,主力油层细分为3~4个开发层系实现分层注采,非主力层通过合并开发提高经济效益,重组后层系间干扰降低60%。注采对应关系的优化基于示踪监测结果展开,对存在优势通道的井组调整注水方向避开高渗条带,对连通性差的井组实施压裂改造建立有效驱替系统,使注采对应率从65%提高到85%。分注分采工艺应用桥式偏心分注工具实现2-5层分层注水且各层注水量可独立调控,智能分采技

术通过井下流量控制器实现产液剖面自动调节,实施后纵向波及系数提高到0.65-0.72^[5]。

4.2 井网加密与注采系统完善方案

井网加密作为改善开发效果的重要手段,基于四维地震识别的剩余油富集区部署加密井位,采用排间加密、排内加密和不规则加密方式将井距从300米缩小至150~200米,显著提高了储层控制程度。加密井设计充分考虑地质参数动态变化特征,在高剩余油饱和度区域采用定向井和水平井技术增大泄油面积,水平段长度500~800米且方向垂直于主应力方向以避免水窜,射孔层位避开强水淹层重点动用剩余油富集的薄差层。注采井网转换提高了系统适应性,将部分低产油井转为注水井形成线性或面积注水模式,转注井选择基于产能评价和连通性分析确保能建立有效驱替系统,井网转换后注采井数比从1:3调整为1:2.5提高了注水强度。周期注水策略根据压力监测数据制定注水—停注—注水的周期方案,注水期30~45天、停注期15~20天以利用毛管力和重力作用提高波及体积,实施后含水率降低3~5个百分点、阶段采出程度提高2~3个百分点^[6]。

4.3 提高采收率技术适应性评价与优选

化学驱技术适应性评价基于储层物性和流体性质动态特征展开,聚合物驱适用于渗透率大于100毫达西、原油黏度小于50毫帕秒的储层,目标区块主力油层满足条件因此设计聚合物浓度1500-2000毫克/升、注入孔隙体积倍数0.4-0.5。表面活性剂针对残余油饱和度高的区域,筛选出的表面活性剂体系界面张力达到 10^{-3} 毫牛/米数量级且在地层条件下稳定性良好,复配体系包括阴离子表面活性剂、助剂和碱,注入段塞尺寸0.3个孔隙体积。泡沫驱技术有效解决了气窜问题,氮气泡沫体系视黏度达30~50毫帕秒能有效封堵高渗通道,泡沫质量分数60%~80%、半衰期大于72小时,外场试验表明可提高采收率5~8个百分点。微生物驱作为绿色技术得到应用,筛选出的菌种在地层条件下生长良好且代谢产物包括生物表面活性剂和有机酸等,微生物的选择性堵水作用改善了吸水剖面并提高了中低渗层动用程度^[7]。

4.4 全生命周期开发调整方案优化与效果预测

建立了基于动态监测的全生命周期优化模型,集成地质建模、数值模拟、经济评价等模块实现开发方案动态优化,优化目标函数考虑采收率、经济效益、开发风险等多因素并采用遗传算法求解最优方案。开发阶段划分基于含水率和采出程度,低含水期(含水率<60%)维持年采油速度3%~4%的高速开发,中含水期(含水率60%~90%)控制含水上升速度实施精细调整,高含水期(含水率>90%)降低成本实施经济极限开发。效果预测采用多种方法相互验证,数值

模拟预测最终采收率可达42%~45%较目前提高8~10个百分点,递减曲线分析预测可采储量增加800万-1000万吨,水驱特征曲线显示通过开发调整水驱指数降低0.8-1.2表明水驱效率明显改善。风险评估识别了可能的不确定因素,地质认识不确定性通过多个地质模型评估、油价波动风险通过敏感性分析量化、技术风险通过先导试验降低,建立了风险应对预案确保开发调整的稳健性。经济评价表明开发调整总投资15亿-20亿元、预期增加产值40亿-50亿元,投资回收期3~4年、内部收益率25%~30%,社会效益方面延长油田生产寿命10~15年保障了能源供应安全^[8]。

5 结语

通过建立多技术集成的动态监测体系,本研究成功实现了对油藏关键地质参数的连续追踪和演化规律解析,为精准化开发调整决策构建了科学基础。研究成果表明,储层物性、流体性质、压力场等参数的时变特征直接影响开发效果,而基于动态监测数据制定的调整策略能够显著提升开发性能。实践验证显示,通过注采系统重构、井网布局优化、增产技术集成应用等措施,可有效改善水驱波及效率,实现采收率的大幅提升。

参考文献

- [1] 赵巍,张文彪,李蒙,赵华伟,陆文明,廉培庆.四维地震驱动的深海浊积岩油藏地质模型更新方法及应用:以安哥拉PU油田为例[J].地质科技通报,2022,41(4):301-308.
- [2] 王波,聂其海,陈进娥,王春燕,郭静茹,刘渊.四维多波地震在油藏动态监测中的应用[J].石油地球物理勘探,2021,56(2):340-345+10011,10012.
- [3] 秦勇,李保柱,胡水清,张景.玛湖凹陷致密砾岩油藏四维地应力场模拟研究与应用[J].石油科技论坛,2022,41(2):23-31.
- [4] 李会会,李冬梅,梅胜文,万小勇,邹宁.断控型挥发油藏连通井组动态储量计算新方法 with 主控因素分析[J].科学技术与工程,2025,25(9):3657-3663.
- [5] 徐智敏,陈天赐,陈歌,李剑锋,孙亚军,李鑫,袁慧卿,何也.煤层采动顶板水文地质参数演化与矿井涌水量动态计算方法[J].煤炭学报,2023,48(2):833-845.
- [6] 童长兵,程时清,石立华,等.基于微流控模型的致密油藏周期注水微观剩余油分布实验[J].大庆石油地质与开发,2025(3).
- [7] 何晨毓,刘丽琼,肖玉茹,等.鄂尔多斯盆地红河油田长8油藏效益开发地质评价参数的确定[J].石油实验地质,2023,45(4):791-796.
- [8] 卢惠东,庞丽丽,薛巨丰,等.断块油藏动态层系井网合理参数界限及应用——以东辛油区营17断块为例[J].石油地质与工程,2024,38(1):84-89.