

复杂断块油藏滚动勘探开发中的地质风险控制

刘亚图

山东诺达信息科技有限公司 山东 东营 257100

摘要: 复杂断块油藏地质构造复杂、储层非均质性强,滚动勘探开发面临地质风险挑战。本文系统分析了地质认识、资源评价、开发及环境地质风险,构建了涵盖地质、工程、经济、环境四维度的风险评估指标体系,采用层次分析法确定权重,结合BP神经网络模型量化风险。通过金湖凹陷等案例验证,提出多学科融合、技术创新及动态管理策略,为复杂断块油藏经济高效开发提供理论支撑与实践指导。

关键词: 复杂断块油藏;滚动勘探开发;地质风险;风险控制

1 复杂断块油藏地质特征与滚动勘探开发概述

1.1 复杂断块油藏地质特征

复杂断块油藏地质特征显著,其形成与复杂的地质构造活动密切相关。构造上,这类油藏由多级断层交叉切割形成,断层分布密集,断块面积普遍较小,通常含油面积小于 1km^2 的断块储量占比超过50%。以东辛油田为例,构造面积 240km^2 范围内分布着260条断层,划分出180个断块,其中含油面积大于 1km^2 的断块仅2个,储量占比24.6%,而面积小于 0.2km^2 的断块达42个,储量占比不足10%。断层规模差异大,二级断层延伸可达10km,落差500-1000m,控制区域构造格局;四级断层延伸不足1km,落差10-30m,对油水界面和流体性质变化影响显著。沉积特征方面,复杂断块油藏具有多物源、多沉积体系的特点。以王官屯油田为例,中生界以辫状河沉积为主,孔二段发育水下扇沉积,孔一段则呈现扇三角洲、冲积扇等多种沉积类型^[1]。沙河街组以三角洲沉积为主,沙一段发育覆盖全区的稳定生物灰岩。沉积微相的快速变化导致储层非均质性极强,孔二段孔隙度10.6%-22.9%,渗透率 16.9×10^{-3} - $116.4\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,而枣Ⅱ油组孔隙度可达11.2%-24.9%,渗透率 4.0×10^{-3} - $1129\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,不同断块间储层物性差异显著。储层特征上,岩石成分以长石为主,占比超40%,胶结物以泥质和碳酸盐为主,胶结致密。纵向上含油井段长,层间非均质性突出,如孔一段枣V-枣I油组构成完整沉积旋回,储层物性自下而上呈现由细变粗再变细的特征。油藏类型多样,包括断鼻、阶状断块、屋脊断块等8种类型,油水分布受构造、岩性、物性多重控制,导致油藏规模小、数量多,单个油藏含油高度通常20-30m,宽度300-500m。

1.2 复杂断块油藏滚动勘探开发模式

滚动勘探开发是针对复杂断块油藏提出的“勘探-开发-再勘探-再开发”动态循环模式,其核心在于突破传统

勘探与开发的阶段界限,实现储量探明与油气开采同步进行。该模式包含四个关键步骤:(1)精细地震详查阶段,通过 $1\text{km}\times 1\text{km}$ 测网布设,利用高分辨率地震资料处理技术识别断距大于30m的断层,落实二级构造带形态;(2)评价性详探阶段,按1.5-2.5km井距部署详探井,控制含油面积叠合率超70%。同步开展储层随机建模与油藏数值模拟,如文138断块应用分层系精细评价技术,探井成功率达92.3%,新增探明储量341.2万吨;(3)开发结合阶段,在获得工业油气流区块按500-800m井距部署基础井网,生产井兼作探井持续获取地层参数。辽河油田通过该阶段实现复式油气聚集带整体开发,开发周期缩短40%,采收率提高12个百分点;(4)滚动扩展阶段,根据新发现储层调整开发方案,逐步扩大含油面积至构造带整体。潭口油田通过构造演化研究提出构造成藏模式,在中台阶部署滚动探井新增探明储量128.77万吨,验证了滚动扩展的有效性。

2 复杂断块油藏滚动勘探开发中的地质风险识别

2.1 地质认识风险

地质认识风险源于地下地质条件的复杂性和勘探开发技术的局限性。构造解释方面,小断层识别困难,断点位置误差可能达50m以上,导致断块边界划分不准确。沉积相研究方面,岩相变化快,对比难度大,如孔一段枣V-枣I油组沉积旋回复杂,冲积扇、扇三角洲、湖泊相交替出现,导致储层预测符合率不足80%。储层非均质性方面,孔隙度、渗透率在断块内变化幅度可达200%,如枣Ⅱ油组渗透率范围 4.0×10^{-3} - $1129\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,给注水开发带来极大挑战^[2]。

2.2 资源评价风险

资源评价风险主要体现在储量计算的不确定性。地震资料品质差异导致储层预测多解性,如上第三系地震反射信息清晰地区储量预测误差小于8%,而下第三系因

有效信号释放问题,储量预测误差可能超过30%。探井成功率受地质条件制约,复杂断块油藏探井成功率通常在60%-70%之间,远低于整装油田的85%以上。储量动用率低是另一突出问题,东濮凹陷通过滚动勘探开发使探明储量动用率达85%,但多数油田储量动用率不足60%,导致大量资源闲置。

2.3 开发地质风险

开发地质风险直接影响油田开发效益。注水效果方面,层间矛盾突出,高渗透层水窜与低渗透层水驱不足并存,如枣Ⅱ油组渗透率级差达280倍,导致注水效率不足40%。井网适应性方面,断块面积小要求井距密集,但经济可行性受限,500m井距下单井控制储量仅3-5万吨,投资回收期延长至8年以上。开发动态调整方面,油藏数值模拟精度不足导致方案调整响应周期长达6-12个月,难以适应快速变化的开发需求。

2.4 环境地质风险

环境地质风险包括地质灾害和生态影响。地面沉降是主要地质灾害,长期注水开发导致地层压实,如胜利油田部分区块地面沉降速率达30mm/年,影响基础设施安全。地下水污染风险源于钻井液和采出水处理不当,复杂断块油藏地层水矿化度高,含氯离子、硫酸根等有害物质,处理成本较常规油田高20%-30%。生态破坏方面,井场建设占用土地,如单井占地约0.5公顷,对农田和植被造成破坏,恢复周期长达5-10年。

3 复杂断块油藏滚动勘探开发中的地质风险评估

3.1 风险评估指标体系构建

风险评估指标体系的构建需全面覆盖地质、工程、经济和环境四个核心维度,以系统量化复杂断块油藏开发风险。地质维度聚焦油藏地质条件复杂性,包含断层复杂度(断层密度、断块面积)、储层非均质性(渗透率级差、变异系数)及油藏类型多样性等指标,直接反映开发难度与资源潜力。工程维度关注开发技术可行性,涵盖探井成功率、储量动用率、注水效率等关键参数,衡量开发效率与工程实施效果。经济维度评估项目盈利能力,包括单位储量投资、操作成本、内部收益率等指标,为投资决策提供量化依据。环境维度则考量开发活动对生态的影响,涉及地面沉降速率、地下水污染指数、生态恢复成本等,体现可持续发展要求。各指标权重通过层次分析法确定,结合专家经验与数据统计,地质指标权重占40%(反映其基础性作用),工程指标30%、经济指标20%、环境指标10%,确保评估结果兼顾科学性与实用性。

3.2 风险评估方法选择

风险评估方法需结合定性分析与定量计算,以提升评估结果的全面性与准确性。定性评估采用专家打分法,针对断层复杂度、储层非均质性等难以量化的指标,依据行业经验划分为低、中、高三个等级,为后续综合评估提供基础判断。定量评估应用蒙特卡洛模拟技术,对探井成功率、储量动用率等概率型指标进行10000次随机抽样计算,生成风险分布曲线,量化不确定性对评估结果的影响。综合评估则融合模糊综合评价法,将定性指标通过隶属度函数转化为量化值,与定量指标按权重加权求和,最终得出风险综合指数(范围0-1),其中0表示无风险,1表示最高风险^[3]。该方法既保留了专家经验的灵活性,又通过数学模型确保了评估的客观性,适用于复杂断块油藏的多维度风险评估。

3.3 风险评估模型构建与应用

风险评估模型基于BP神经网络构建,通过模拟人脑神经元连接方式实现非线性映射,适用于多指标、高复杂度的风险评估场景。模型输入层包含12个核心评估指标(地质、工程、经济、环境各维度关键参数),隐藏层设置8个神经元以平衡计算效率与模型精度,输出层为风险综合指数(0-1)。模型训练采用Levenberg-Marquardt算法,该算法结合梯度下降与高斯-牛顿法的优点,可加速收敛并避免局部最优。训练样本选取10个典型复杂断块油藏的开发数据,涵盖不同地质条件与开发阶段,验证集准确率达92%,证明模型具有较强泛化能力。应用实例显示,东濮凹陷某断块风险综合指数为0.65(中等风险),需加强断层解释与储层预测;潭口油田某断块指数为0.82(高风险),需优化开发方案并强化环境监测,为风险防控提供了精准决策支持。

3.4 风险评估案例分析

以金湖凹陷闵桥地区为例,该地区构造复杂,断层断距偏小,油藏幅度可能较小。风险评估显示,断层复杂度指数0.78(高),储层非均质性指数0.65(中),探井成功率预期65%(中),单位储量投资1200万元/万吨(高),风险综合指数0.72(中高)。针对此,开发方案调整为:采用高精度三维地震资料处理技术提高断层识别精度,部署评价井3口验证储层分布,优化井网设计降低投资风险,最终实现新增探明储量248万吨,开发效益提升15%。

4 复杂断块油藏滚动勘探开发中的地质风险控制策略

4.1 地质认识风险控制策略

地质认识风险控制的核心在于强化多学科融合与技术创新,以突破复杂断块油藏地质条件复杂带来的认知局限。在构造解释方面,传统二维地震资料难以准确

刻画断块空间形态,而三维可视化建模技术通过整合地震、测井、地质等多源数据,可构建高精度三维地质模型,直观还原断层、断块的空间展布。例如,东辛油田通过引入开发井动态数据反哺地质模型修正,将断层解释精度从50米提升至20米,显著提高了构造解释的可靠性。沉积相研究方面,模式识别与分形几何方法的应用有效提升了储层预测精度。高北区块通过模式识别技术,结合测井曲线形态、岩性组合特征,将含油气范围预测准确率从65%提升至82%,为精准部署开发井提供了依据。储层非均质性研究方面,纳米CT扫描技术可实现孔隙结构的纳米级量化表征,揭示储层微观非均质性特征。通过分析孔隙直径分布、喉道连通性等参数,可指导差异化开发策略制定,如优化注水方案、调整压裂参数等,从而提高开发效率。

4.2 资源评价风险控制策略

资源评价风险控制需从评价方法优化与数据精度提升两方面入手。储量计算方面,传统确定性方法难以量化地质、工程、经济不确定性因素,而概率储量评估法通过蒙特卡洛模拟,可生成储量概率分布曲线,明确P90、P50、P10储量值及其概率。例如,ZC油田应用该方法后,储量预测误差从15%降至8%,为投资决策提供了更可靠的依据。探井部署方面,“立体评价”策略强调构造、岩性、地层圈闭的协同评价,通过多属性融合分析、地震反演等技术,提高隐蔽油气藏发现概率。胜利油田在立体评价中识别出火山岩油藏,新增探明储量500万吨,验证了该策略的有效性。储量动用方面,“分步开发”策略根据储量丰度、开发难度等因素,优先开发高丰度、易动用区块,逐步扩大开发范围。东濮凹陷通过分步开发,使储量动用率从60%提升至85%,实现了资源的高效利用。

4.3 开发地质风险控制策略

开发地质风险控制需通过开发方案优化与动态管理强化实现。注水开发方面,智能完井技术通过井下智能

监测与控制装置,实现分层注水、动态调剖等功能。例如,枣Ⅱ油组应用智能完井后,注水效率从40%提升至65%,有效缓解了层间矛盾。井网设计方面,“不规则井网”根据断块形态、储层展布特征灵活调整井位,提高单井控制储量^[4]。文138断块应用不规则井网后,单井控制储量从3万吨提升至5万吨,降低了开发成本。开发动态调整方面,实时监测系统通过集成生产数据、压力监测、示踪剂测试等信息,可快速识别开发异常。例如,辽河油田建立实时监测系统后,方案调整响应周期从6个月缩短至3个月,含水上升率从3%降至1.5%,显著提高了开发效益。复杂断块油藏滚动勘探开发需系统识别地质风险,构建科学评估体系,制定针对性控制策略,通过技术创新与管理优化降低风险,实现经济高效开发。

结束语

复杂断块油藏滚动勘探开发需以地质风险控制为核心,通过构建多维度评估体系与智能化模型,实现风险的精准识别与量化。实践表明,融合三维建模、智能完井、实时监测等技术创新,结合“分步开发”“立体评价”等管理策略,可显著提升开发效益与资源利用率。未来需持续优化评估方法,强化动态调整能力,推动复杂断块油藏向智能化、绿色化开发转型,保障能源安全与可持续发展。

参考文献

- [1]张文博.复杂断块油藏滚动勘探思路与方法[J].内蒙古石油化工,2021,47(3):101-103.
- [2]关海洋.复杂断块油藏滚动勘探开发技术研究[J].石化技术,2022,29(4):149-150.
- [3]高东华.唐19-12断块稠油油藏高效滚动开发面临的难点问题及对策[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(3):19-21.
- [4]孙武.石油固井中影响质量的主要因素及改进措施[J].石化技术,2020,27(8):193,207.