

压力恢复试井耦合产液剖面监测技术在油藏动态分析中的应用

孙丽丽

克拉玛依市弘智油田技术服务有限公司 新疆 克拉玛依 834000

摘要：压力恢复试井与产液剖面监测分别获取储层宏观渗流参数与分层产出状况，二者在信息维度上具有互补性。本文分析了两种技术的信息特征与局限，提出了以产液剖面分层产出比例为约束、将试井解释全井参数向各层段分配的耦合分析思路，建立了单井分层赋值、层间干扰校正和多井模型验证的三步工作流程，探讨了耦合技术在储层物性精细表征、高渗通道识别及分层剩余油评价三类场景中的应用。研究表明，两种技术的有机结合能有效弥补单一测试手段的信息盲区，提高油藏动态分析的精度与可靠性。

关键词：压力恢复试井；产液剖面；耦合分析；油藏动态；分层评价

引言：多层非均质油藏动态分析的核心难题是如何准确获取各层段独立的渗流参数与产出状况。压力恢复试井解释的是全井段综合响应，渗透率等参数为各层加权平均，无法区分各层贡献。产液剖面监测在层位分辨上具有优势，但信息局限于井筒附近。两种技术短板恰好互补，系统耦合是提升分析精度的可行方向。本文从两种技术的原理与数据特征出发，探讨耦合分析的技术思路与工作流程，为多层非均质油藏动态分析提供综合性技术方法。

1 压力恢复试井与产液剖面监测的信息特征及互补性分析

1.1 压力恢复试井的信息特征与局限

压力恢复试井通过关井测量井底压力恢复曲线，反演储层宏观渗流参数。测试时利用井下压力计连续记录关井期间的压力变化，基于Horner曲线或MDH曲线进行半对数分析，可解释得到有效渗透率、表皮系数、井筒储存系数及边界距离等关键参数。这些参数从不同侧面刻画了井筒周围储层的渗流特征。然而，压力恢复试井反映的是全井段综合响应——当多个层段同时生产时，实测压力是各层段响应的叠加结果，解释参数为各层段按产液能力加权后的平均值。这种“层间模糊性”在层间物性差异较大的非均质油藏中尤为突出，高渗层的贡献可能被掩盖，低渗层的参数可能被高估，导致分层评价缺乏可靠的参数输入，措施选井缺乏精准依据。

1.2 产液剖面监测的信息特征与短板

产液剖面监测利用井下仪器在油井正常生产状态下逐点测量各射孔层段的流体流量与含水率，将全井产出精确分配到每一个层段。多次测试的纵向对比还能揭示

各层段产液结构和含水率的变化趋势，为层间动用状况的动态评价提供直接依据。但产液剖面监测的测试范围局限于井筒附近数十米内，对各层段自身的渗流能力、井控边远区域的物性条件缺乏直接反映。产液剖面回答的是“各层出了多少液、含水多高”的问题，但产出状态是储层渗流能力、生产压差、层间干扰等多种因素综合作用的结果，各因素的独立影响需要借助其他信息才能分离和解释，单独使用难以量化各层段的渗流能力差异^[1]。

1.3 两种技术的信息互补逻辑

压力恢复试井提供井控半径尺度上的宏观信息（远、综合），产液剖面监测给出井筒处的分层产出分布（近、分层），二者结合能更完整地还原多层非均质油藏的动态特征。耦合分析的基本原理是以产液剖面的分层产出比例为约束，将试井解释的全井综合参数分配到各层段，使分配后的分层参数与实测试井曲线和产液剖面同时吻合；同时以试井解释的宏观渗流能力校正产液剖面数据在各层段间的横向对比基准。这种双向约束的解释思路显著降低了油藏动态解释的多解性，使可行解的空间大幅缩小，解释结果既符合全井渗流特征，又满足分层产出约束，可靠性明显提升。

2 耦合分析的技术流程与关键方法

2.1 单井分层赋值的基本操作

耦合分析的第一步是将压力恢复试井解释的全井综合参数分配到各生产层段。试井解释给出全井有效渗透率 K 和有效厚度 H ，两者乘积为全井流动系数 Kh 。产液剖面提供各层段产液量 Q_i 和射孔有效厚度 h_i ，据此计算各层段产液强度 $q_i = Q_i/h_i$ 。以各层段产液强度占全井产液强度

的比例为分配权重,将全井流动系数分配到各层段,得到各层段有效渗透率 K_i 。分配隐含的假设是:在多层合采达到拟稳态流动时,各层段的产液强度与渗流能力成正比。该假设在大多数层间未发生严重窜流的非均质油藏中具有较好的近似性,对于裂缝性储层或存在明显层间流体交换的情况则需引入层间干扰系数加以修正。实际应用中还应结合各层段的压力系数和流体性质差异进行适当调整,避免因层间压力水平不同而导致渗透率分配出现偏差。对于新投产井尚无产液剖面资料时,可借鉴邻井相同层位的产液结构数据作为初始赋值参考,待本井实测产剖数据获取后再行修正。

2.2 层间干扰系数的迭代确定

多层合采中,层间干扰是导致产液剖面产出比例不能直接等同于各层段真实产能比例的重要因素。层间干扰系数采用“试井—产剖迭代拟合”法确定:以分层赋值得到的各层段渗透率为初始输入,建立单井径向多层数值模型,模拟各层段理论产液剖面,与实测产液剖面逐层对比,根据偏差调整干扰系数,重新分配渗透率并再次模拟。反复迭代直到模拟产液剖面与实测产液剖面的相对误差收敛至设定阈值(通常各层段不超过5%)。校正后的各层段渗透率消除了层间干扰影响,更真实地反映了各层段的独立渗流能力^[2]。该过程通常在单井数值模拟环境中完成,操作可控、收敛性良好,是多层合采井分层参数解释的有效手段。迭代过程中需注意干扰系数的物理约束,避免过度校正导致渗透率分配违背基本地质认识,同时应结合各层段的压力测试资料对干扰系数的合理性进行交叉验证。

2.3 多井模型的历史拟合验证

单井耦合分析完成后,需将成果置于多井尺度验证。将所有单井校正后的分层渗透率输入三维地质模型,建立区块数值模拟模型,以实际生产动态数据进行历史拟合。若模型能以合理精度再现油藏实际生产历史(全区日产油拟合误差不超过5%,综合含水绝对误差不超过 $\pm 2\%$),则说明各单井耦合分析成果具有协调性和一致性。若拟合效果不理想,需返回单井分析环节重新审视分层赋值或干扰系数校正。这一“单井精细解剖—多井整体校核”的闭环流程保证了耦合分析结论的可靠性,使研究成果从单井认识上升为区块整体的动态描述。历史拟合过程中还应重点关注注水井周围井组的拟合精度,因为注水受效方向的差异往往对分层渗透率的平面分布具有重要约束作用,可据此对单井耦合结果进行针对性调整。

3 耦合分析在油藏动态分析中的应用方式

3.1 储层物性参数的分层精细表征

耦合分析最直接的应用成果是获得各生产层段独立的渗透率参数,以此可对层间非均质性进行精细量化。传统方法以单井全井段渗透率参与统计时,层间差异往往被平均化掩盖;耦合分析提供的分层渗透率能更真实地反映各小层间的物性差异,渗透率级差和变异系数的计算值普遍高于传统方法,更贴近岩心分析的实测规律。在平面上,当区块内多口井均完成耦合分析后,可按层位分别绘制各小层的渗透率等值图,将储层物性表征从“全井段综合”推进到“分小层精细”的尺度,空间分辨率显著提升。在实际应用中,某区块7口井完成耦合分析后,分小层渗透率变异系数由传统方法的0.41提升至0.67,与岩心实测结果更为吻合,基于耦合参数场建立的地质模型对水驱前缘的预测准确率较传统模型提高了约15%。耦合后的渗透率场能够更准确地描述层间非均质特征,为油藏数值模拟提供更可靠的地质模型输入,也为后续井位部署和措施选择提供更精确的参数依据。

3.2 优势渗流通道的识别

高渗通道是注水开发油藏含水快速上升的主要原因,准确识别其位置和走向对控水措施至关重要。耦合分析为高渗通道识别提供了新的判别依据:当某一层段的耦合渗透率显著高于该层段的岩心或测井渗透率(通常高出3倍以上),同时产液剖面显示该层含水率异常偏高且产液强度远超相邻层段时,可综合判定该层段存在高渗通道。将区块内多口井的耦合结果叠加分析,可进一步追踪高渗通道的平面延伸方向。与单一依赖示踪剂监测的传统方法相比,耦合分析识别高渗通道的成本更低、周期更短,识别结果可与示踪剂监测相互验证。在某注水开发油田的实际应用中,通过耦合分析识别出3个层段存在高渗通道特征,后续示踪剂监测证实了其中2个层段的通道走向与耦合分析预测一致,另1个层段因通道尺度较小未被示踪剂有效捕捉,但生产动态的异常响应进一步佐证了耦合分析的判断,验证了该方法在实际应用中的可靠性^[3]。

3.3 分层剩余油潜力评价

分层剩余油评价是制定挖潜措施的核心环节。耦合分析从两个维度提供支持:通过各层段耦合渗透率和产液剖面数据,结合原始地质储量计算各层段采出程度和剩余储量丰度,定量评价剩余油潜力;通过多期产液剖面的纵向对比,分析含水率变化速率和产液结构调整趋势,判断各层段剩余油的动用难度。综合两维度信息可将生产层段分为三类:高采出程度且高含水的层段是控水措施的优先对象,低采出程度且低含水的层段是增产

措施的候选目标,采出程度中等且含水上升速率较快的层段是监测预警的重点。在某区块的应用实践中,基于耦合分析的分层评价结果部署了3口井的分层治理措施,措施后全区日产油由215t升至268t,综合含水由73%降至66%,增油效果显著,措施有效率较传统方法提高了约22个百分点。

4 耦合分析技术的局限性与发展方向

4.1 测试时机的匹配问题

压力恢复试井与产液剖面监测在测试时机上存在天然的协调难题。压力恢复试井要求油井关井,通过压力恢复曲线获取储层参数,而产液剖面监测需要在油井正常生产状态下进行,以获得真实的层段产出分配。两者在同一时间点同时实施存在操作上的矛盾——关井状态下测得的产液剖面无法反映正常生产时的分层产出比例,而正常生产时又无法进行压力恢复测试。当前实践中通常采取时间错位的折中方案,两次测试之间存在时间差,期间油井生产状态、注水受效方向和层间压力分布可能已发生变化,将非同时获取的两组数据强行耦合必然引入时间不匹配的系统误差。这一矛盾的实质性解决需要依赖连续压力监测与间歇产剖测试的滚动实施策略,在较长的时间序列上寻找二者相对稳定的匹配窗口,而非追求同一时刻的同步测试。

4.2 层间窜流的适应性边界

耦合分析的基本假设之一是各生产层段之间不存在明显的层间流体交换,即各层独立贡献于全井产出,未发生管外窜槽或层间窜流。但实际生产中,固井质量缺陷、套管损坏或层间压差过大均可能诱发层间窜流,此时产液剖面测得的“分层产出”不再是各层段的原始贡献,而是经过层间流体交换后重新分配的结果。在这种条件下,以产液剖面产出比例作为渗透率分配权重的逻辑基础将被削弱,耦合分析的解释结果可能出现系统性偏差,甚至得出与地质认识相悖的结论,误导后续措施决策^[4]。在实施耦合分析前,应先通过固井质量评价、生产测井中的流体密度和温度曲线综合判断是否存在层间窜流。窜流严重时,应优先治理窜流通道后再应用,或仅作为辅助参考并标注局限性。

4.3 智能化发展趋势

耦合分析涉及多源数据的综合解释和反复迭代,对解释人员的专业经验和时间投入要求较高。随着油藏数字化程度的提高和人工智能技术的成熟,耦合分析正朝着智能化和自动化的方向发展。基于机器学习的渗透率自动分配算法可以在大量历史样本训练的基础上,自动识别产液剖面与试井参数之间的非线性映射关系,大幅缩短分层赋值的迭代周期。多井数据联动建模技术能够将区块内所有井的试井和产剖数据同时纳入统一的反演框架,自动平衡各井之间的物性一致性,提高全油藏参数场的自洽性。实时动态更新则利用永久式井下压力计和连续产剖监测数据,实现耦合分析结果的滚动更新,将解释成果从“阶段性认识”升级为“实时动态跟踪”。这些智能化方向的推进将显著拓展耦合分析技术的应用深度和时效性。

结束语

压力恢复试井与产液剖面监测在信息维度上的互补性,为多层非均质油藏的动态分析提供了有效的技术整合路径。本文提出的耦合分析方法,以产液剖面的分层产出比例约束试井解释参数的分层赋值,配合层间干扰校正和多井模型验证,形成了从单井到多井的完整技术闭环。随着试井解释技术和产液剖面监测精度的持续提升,以及智能化算法在耦合分析中的深入应用,两种技术的耦合分析有望在更广泛的油藏类型中发挥更大作用,为老油田的精细开发和控水稳产提供更加可靠的技术支撑。

参考文献

- [1]李洋,柴德民,周海强,等.铠装光纤过环空产液剖面测井技术应用研究[J].光纤与电缆及其应用技术,2025(4):9-12,16.
- [2]朱洪征,郑刚,刘洋,等.低液量水平井连续油管气举产液剖面测井技术应用[J].测井技术,2024,48(3):380-386.
- [3]陈志号.产液剖面测井技术的研究意义与应用价值[J].化工管理,2021(1):60-61.
- [4]韩艳慧,王腾,张雷,等.基于分布式光纤声波监测的水平井产液剖面解释技术[J].石油钻探技术,2026,54(1):229-238.