

试油技术在低渗透油气藏评价中的应用分析

马 超

青海油田井下作业公司试油大队 青海 茫崖 736202

摘 要：低渗透油气藏因其储层物性差、渗流规律复杂，开发难度大，试油技术作为评价其开发潜力的关键环节，直接影响油气勘探开发的经济效益。本文系统梳理了试油技术在低渗透油气藏评价中的核心作用，结合典型案例，分析了地层测试、现代试井解释、射孔优化及多工艺联作等技术的具體应用场景与技术优势。研究表明，试油技术通过获取动态参数、优化渗流通道、指导改造措施，显著提升了低渗透油气藏的评价精度与开发效率，为同类油藏的高效开发提供了理论支撑与实践指导。

关键词：低渗透油气藏；试油技术；地层测试；现代试井解释；射孔优化

引言

低渗透油气藏（渗透率 $< 0.1\text{mD}$ ）占全球已探明油气储量的40%以上，其开发效率直接关系到能源安全与行业可持续发展。然而，此类油藏因储层孔隙结构复杂、渗流阻力大、天然能量不足，导致开发过程中普遍存在产量递减快、采收率低（ $< 15\%$ ）等问题。试油技术作为连接地质勘探与开发工程的桥梁，通过直接获取地层流体性质、产能及压力动态数据，为油藏评价、开发方案制定及增产措施优化提供关键依据。本文聚焦试油技术在低渗透油气藏评价中的应用，结合技术原理与工程实践，探讨其技术优化路径与发展方向。

1 低渗透油气藏开发特征与试油技术需求

1.1 低渗透油气藏开发特征

低渗透油藏以“非达西流”主导渗流，如鄂尔多斯盆地延长组油藏渗透率仅 $0.01\text{-}0.1\text{mD}$ ，流体需克服启动压力梯度，渗流速度与压力梯度非线性，油井自然产能极低（ $< 1\text{t/d}$ ），需水力压裂等人工改造^[1]。此外，低渗透油藏开发面临挑战：渗流阻力大，有效渗透率低；天然弹性能量不足，注水见效慢；储层对污染敏感，钻井液等侵入致渗透率降超50%；非均质性突出，水驱波及效率 $< 30\%$ 。

1.2 试油技术需求分析

试油技术需满足四方面需求：动态参数获取，通过压力恢复测试等量化关键参数；渗流通道优化，用射孔优化等降低渗流阻力，如表皮系数降至2以下；改造措施评价，评估增产措施效果，避免无效作业；经济效益评估，结合试油数据算单井经济极限产量与开发成本，如单井初期产量 $< 3\text{t/d}$ 时，需优化技术或政策补贴保障开发。

2 试油技术体系与低渗透油藏适应性分析

2.1 地层测试技术：动态数据获取的核心手段

地层测试技术通过封隔器隔离目标层段，利用测试阀控制井筒与地层的连通，实现“开关井”操作以获取压力恢复曲线。其技术优势首先体现在高效获取动态参数上，单次测试可同时获得地层压力、产量、表皮系数等20余项参数，较常规试油效率提升3倍以上。以大庆油田某低渗透井为例，传统试油需分阶段进行压力恢复、产量递减等测试，耗时15天；而采用地层测试技术，通过一次下入测试工具并连续开关井操作，仅用5天即完成全井段评价，测试效率显著提升。其次，地层测试可减少储层污染，测试工具直接下入裸眼井段，避免射孔对储层的二次伤害，尤其适用于敏感性强、易受污染的低渗透储层^[2]。此外，地层测试支持分层开发评价，通过跨隔测试实现多层段独立测试，为分层注水、分层压裂提供依据。例如，胜利油田某低渗透油藏采用跨隔测试技术，发现上层段渗透率高于下层段2倍，据此优化压裂设计，上层段采用高导流能力支撑剂，下层段采用多级暂堵转向压裂，单井产量提升40%。

2.2 现代试井解释技术：渗流规律解析的数学工具

现代试井解释技术以点源函数理论为基础，通过建立不稳态渗流数学模型，求解拉普拉斯空间内的压力动态曲线，进而反演储层参数。其技术优势体现在三方面。一是复杂渗流场景适配性强，可模拟水平井、多级压裂井等复杂井型的渗流特征。以白豹油田为例，其低渗透油藏采用鱼骨形多分支井开发，传统试井方法难以解析多分支井的压力响应特征；而现代试井解释技术通过建立三维渗流模型，结合物质点法模拟流体在分支裂缝中的流动，准确预测了裂缝扩展方向与产能分布，指导后续井位部署。二是早期资料反演效率高，利用早期压力数据反演储层渗透率、污染系数等参数，缩短试井

周期。例如，长庆油田某水平井试井初期压力数据波动大，传统方法需等待径向流阶段出现后才能分析；而采用“压力导数-时间双对数图”分析方法，通过识别早期线性流阶段特征，提前10天获得储层渗透率（0.08mD）与表皮系数（5），为压裂设计优化提供了及时依据。三是开发效果预测准确，结合物质平衡法，可预测油藏最终采收率与开发动态。例如，新疆油田通过建立考虑启动压力梯度的物质平衡模型，预测某低渗透油藏最终采收率为18%，较传统模型提升5个百分点，为开发方案调整提供了科学依据。

2.3 射孔优化技术：渗流通道构建的关键环节

射孔优化技术通过调整射孔密度、相位角及穿透深度，降低近井地带渗流阻力，其技术要点包括深穿透射孔弹、多级压裂射孔联作及动态负压射孔。深穿透射孔弹采用高能炸药与复合材料弹体，实现孔深 > 500mm，穿透钻井污染带。河南油田某低渗透井采用深穿透射孔弹后，近井地带渗透率恢复率从60%提升至85%，单井产量提高25%。多级压裂射孔联作结合水力压裂，在射孔孔眼处形成多级裂缝网络^[1]。新疆油田某井采用“射孔-压裂-暂堵转向”联作工艺，首先通过射孔形成初始渗流通道，随后注入高粘度压裂液形成主裂缝，最后注入暂堵转向剂封堵主裂缝，迫使后续压裂液转向形成次生裂缝，最终形成复杂的裂缝网络，单井产量提升至8.5t/d，较传统压裂提高3倍。动态负压射孔通过控制井筒液面高度，形成负压环境，减少射孔液回压对储层的伤害。大庆外围低渗透油田采用动态负压射孔技术，使射孔液回压降低50%，近井地带渗透率损害率从40%降至15%，单井初期产量提高30%。

2.4 多工艺联作技术：效率与效益的双重提升

多工艺联作技术通过整合射孔、压裂、测试等工序，实现“一趟管柱完成多环节作业”，其技术优势显著。首先，减少起下管柱次数，避免二次污染，缩短试油周期。辽河油田某井采用“射孔-压裂-测试”联作工艺，传统作业需分三次起下管柱，耗时15天；而联作工艺仅需一次起下管柱，作业时间缩短至7天，且避免了管柱多次起下对储层的机械伤害。其次，实时数据反馈支持压裂参数动态调整。塔里木油田超深低渗透气藏（埋深 > 6000m）采用“射孔-压裂-测试-排液”联作工艺，在压裂过程中同步进行压力监测，发现某段裂缝扩展速度低于预期后，立即调整压裂液粘度与排量，最终形成有效的裂缝网络，单井测试成功率提升至90%，开发周期缩短50%。此外，成本优化效果显著，联作工艺较单工序作业成本降低30%-40%。例如，胜利油田某低渗透油藏采

用联作工艺后，单井试油成本从200万元降至120万元，经济效益显著提升。

3 典型案例分析

3.1 大港油田低渗透储层试油实践

大港油田某区块的储层地质特征表现为渗透率极低（0.08-0.15mD）且压力系数处于0.92-1.05的范围，属于典型的低压低渗透油藏。在这种地质条件下，传统试油技术暴露出诸多弊端，其中压力测试精度低以及产能预测偏差大等问题尤为突出，这严重影响了对油藏的准确评价和后续开发策略的制定。为克服这些问题，该油田采用了一系列针对性的技术组合。在射孔环节，选用127型深穿透射孔弹，其孔径达到12mm，穿深可达450mm。这种射孔弹能够有效降低井眼附近的渗流阻力，为油气的流入创造更有利的通道，从而提高试油过程中油气的采出效率。在测试制度方面，实施“一开6h+一关36h”的工作制度，并配合多级压力计实时监测压力变化。这种工作制度能够更全面地获取储层在不同时间段的压力响应信息，有助于准确分析储层的压力特性。在压裂改造方面，采用低伤害滑溜水携砂，加砂强度为3.2m³/m，使得支撑裂缝导流能力达到80D·cm。低伤害滑溜水能够减少对储层的伤害，而合理的加砂强度和较高的支撑裂缝导流能力则可以有效改善储层的渗流条件，提高油井的产能。通过应用上述技术组合，取得了显著的应用效果。试油结果显示，该井初期日产油达到12.5t，含水率仅为8.2%，与邻井相比产量提高了60%（表2）。压力恢复曲线解释表明，储层渗透率为0.11mD，表皮系数为-1.8。这些数据不仅验证了所采用技术组合的有效性，也为后续对该油藏的开发提供了重要的参考依据。

3.2 白豹油田特殊渗流储层评价

白豹油田某井的储层具有独特的地质特征，其渗透率仅为0.05mD，并且存在显著的启动压力梯度（0.028MPa/m）。在这种特殊的地质条件下，传统试井方法无法准确描述非达西流动效应，导致产能预测出现较大偏差，难以满足对油藏精确评价的需求。针对这些问题，该油田进行了一系列技术创新。在渗流模型修正方面，基于实验数据建立了考虑启动压力梯度的修正杜哈美模型，其压力响应函数为：

$$\Delta p(t) = \frac{141.2qB\mu}{kh} \left[\ln \left(\frac{8.085t}{r_w^2 S} \right) + 0.8686S \right] + \frac{G_0 r_w^2}{t}$$

该模型能够更准确地描述储层中流体的渗流规律，为后续的试井解释提供了理论基础。在动态测试设计上，采用“变流量+变压力”的测试制度，通过获取不同生产制度下的压力响应数据，能够更全面地了解储层的

动态特性,为准确评价储层提供丰富的信息。此外,还开发了基于机器学习的压力曲线自动匹配系统,该智能解释平台能够快速准确地对压力曲线进行解释,使解释效率提升了80%,大大提高了试井解释的工作效率。

这些技术创新在实际应用中取得了良好的效果。试油解释结果表明,储层渗透率为0.052mD,启动压力梯度为0.028MPa/m,与岩心实验数据吻合度高达92%(表3)。该井初期日产油8.3t,经过压裂改造后稳定在12.1t。这一结果验证了所采用技术方案的可靠性,为白豹油田特殊渗流储层的开发提供了可行的技术路径。

4 试油技术在低渗透油藏评价中的挑战与对策

4.1 技术挑战

试油技术在低渗透油藏评价中面临三方面挑战。其一,径向流延迟问题突出,低渗透油藏压力传导慢,导致径向流阶段出现晚,延长试井周期。例如,长庆油田某低渗透井试井初期压力数据仅显示线性流特征,需等待30天后才能观察到径向流阶段,导致试井周期延长至45天。其二,多级压裂干扰复杂,人工裂缝网络导致压力响应特征难以解析。新疆油田某多级压裂井试井数据显示,压力导数曲线出现多级波动,传统双对数分析方法无法准确识别各裂缝贡献率^[4]。其三,非均质性影响显著,储层渗透率差异大导致测试数据代表性不足。鄂尔多斯盆地某低渗透油藏渗透率变异系数达0.8,单井测试数据难以反映整个油藏的渗流特征。

4.2 优化对策

针对上述挑战,需采取三方面优化对策。其一,发展早期资料反演技术,利用早期压力数据反演储层参数。例如,通过引入“压力导数-时间双对数图”分析方

法,提前识别径向流阶段特征,将试井周期缩短至20天以内。其二,开发智能试井解释软件,结合机器学习算法自动识别压力曲线特征。新疆油田利用卷积神经网络(CNN)对多级压裂井试井数据进行训练,模型准确率达90%以上,可快速量化各裂缝贡献率。其三,建立多级压裂试井模型,考虑裂缝干扰的渗流数学模型。长庆油田通过建立考虑裂缝间干扰的三维渗流模型,结合有限元方法求解压力动态,准确预测了多级压裂井的产能分布,指导后续压裂设计优化。

5 结语

试油技术是低渗透油气藏评价核心,通过获取动态参数、优化渗流通道及评价改造措施,提升油藏评价精度与开发效率。地层测试、现代试井解释、射孔优化及多工艺联作四项技术协同,为经济开发提供支撑。未来,试油技术将向“精准化、高效化、智能化”发展,如智能试井解释实现实时自动分析,纳米材料暂堵转向压裂形成复杂裂缝网络。试油技术创新将持续保障低渗透油气藏高效开发,助力能源安全与行业可持续发展。

参考文献

- [1]余文学.油田试油流程及其技术要点分析[J].西部探矿工程,2023,35(07):68-70.
- [2]张旭.低渗透储层试油工艺应用现状及趋势分析[J].化工管理,2018,(06):116.
- [3]王超.低渗透储层试油工艺应用现状分析与发展探讨[J].中小企业管理与科技(下旬刊),2015,(08):240.
- [4]张虔,陈建军,曾利刚,等.低渗透复杂油气藏提高采收率技术研究[J].能源化工,2023,44(06):59-62.