

综合录井与地球物理数据融合在油气勘探中的应用

赵磊

(中石化海洋石油工程有限公司上海特殊作业分公司, 上海 200131)

摘要 在油气勘探领域, 随着勘探目标向深层、复杂地质结构延伸, 单一录井技术或地球物理方法因数据维度局限性难以精准刻画储层特征, 导致油气识别精度不足、钻井风险控制难度增大。综合录井与地球物理数据的融合技术通过整合多源异构数据, 构建“地质—地球物理”协同分析框架, 成为提升勘探效能的重要突破口。本文系统阐述了数据融合的技术路径及应用场景, 并分析了其应用效果, 以期通过多源数据融合技术的规范化应用, 为复杂储层勘探提供可复制的技术解决方案。

关键词 综合录井技术; 地球物理数据; 数据融合; 油气勘探

中图分类号: TE1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.12.004

0 引言

综合录井与地球物理数据作为油气勘探过程中的两类核心技术, 各自承担着井下地质信息实时监测与地下储层物性参数刻画的关键任务, 二者在数据采集、处理及应用环节具有较强的互补性。单一录井手段难以精准刻画复杂地层的油气显示特征, 而地球物理数据在测井解释过程中容易受到井眼条件与地质环境的影响, 使得储层参数存在较大的不确定性。在钻井轨迹优化、储层流体识别以及风险提示系统构建等环节, 综合录井与地球物理数据融合的应用价值日益凸显, 依托多源信息互补性实现勘探目标的精细化刻画与科学决策已成为当前油气勘探技术发展的重要方向。

1 综合录井与地球物理数据融合的基础

1.1 综合录井技术概述

综合录井技术在油气勘探过程中承担着井下地质信息实时监测的重要任务, 主要依赖岩屑、气测、地化、地层压力等多项数据获取手段, 对井底及井筒周围的地质条件进行动态分析。该技术使用泥浆循环系统收集岩屑并对矿物组成、颗粒形态及含油气性状进行系统识别, 以确定地层岩性变化及油气显示特征, 借助气测录井装置获取钻井过程中溢出的烃类组分, 分析天然气组分比及烃类含量变化趋势, 以判断油气层赋存情况, 地化录井手段测定岩石中的元素含量变化, 评估储层有机质富集程度及油气成藏环境。地层压力录井利用钻井参数监测地层压力动态特征, 为井控及

安全钻井提供依据^[1]。

1.2 地球物理数据采集与处理

地球物理数据在油气勘探中的应用主要体现在测井与地震数据两个方面, 其中测井数据依赖电法、声波、核磁共振等物理探测技术, 对井壁及周围地层的岩性、孔隙度、含流体特性等关键参数进行定量表征。电法测井包括感应测井、侧向测井等方法, 利用岩石电导率差异识别储层流体性质, 声波测井使用纵波与横波传播特性计算岩石弹性模量, 从而推断储层物性参数, 核磁共振测井从氢质子弛豫时间分布揭示孔隙结构及可动流体饱和度。地震数据由人工激发地震波并记录反射信号, 分析地下地质结构及储层分布特征, 反演储层厚度、构造形态及油气富集区间。测井数据在井筒周围具有较高分辨率但覆盖范围有限, 而地震数据在空间展布方面占据优势但储层参数精度受限, 两者在数据精度与空间分辨率方面各有侧重。在数据处理过程中, 测井曲线需要经过噪声滤除、环境校正及标准化处理, 保证不同井位之间数据的可比性, 地震数据处理包括滤波、静校正、速度分析及偏移成像, 以增强有效信号并消除干扰^[2]。

1.3 数据融合的原理与方法

综合录井与地球物理数据的融合基于多源信息互补性, 采取数学模型与物理约束构建数据联合反演方法, 以提高油气储层识别的精度, 数据融合过程中涉及测井曲线与录井信息的关联分析、地震与测井数据

的约束反演以及多属性综合表征三类主要方法。测井曲线与录井信息的关联分析基于统计学与信号处理方法,构建录井参数与测井响应之间的数学关系,提升油气层解释的一致性。地震与测井数据的约束反演方法在地震振幅与测井物性参数之间建立联系,以测井数据约束地震反演过程,使地震解释结果更贴合并下实际情况,多属性综合表征方法则依据不同物理参数对储层性质的敏感性构建交叉验证体系,从多角度增强对油气层的识别能力。

2 数据融合在油气勘探中的应用

2.1 岩屑录井与地球物理测井联合分析

岩屑录井从对钻井过程中携带出的岩屑样品进行分析,识别岩性变化、矿物成分及油气显示特征,提供储层岩性及含油气性状的实时信息。地球物理测井依靠电法、声波、核磁共振等探测手段,测定地层物理性质,反映储层孔隙度、渗透率及流体饱和度等关键参数。岩屑录井侧重于物质组成及油气痕量分析,地球物理测井主要关注储层物性及流体特征,两者在数据表现形式与解释方法上存在较大差异。

在数据融合过程中,岩屑录井的矿物成分、气测异常及地化特征与测井数据建立关联,以提高储层识别精度,测井曲线的电阻率、声波时差及自然伽马值可作为岩屑录井分析结果的约束参数,确定岩屑识别出的油气显示是否对应有有效储层。综合分析时,利用测井数据预测的孔隙度和渗透率构建岩屑录井特征参数的定量关系,形成储层综合评价指标,提高储层流体识别的准确性。

在岩屑录井与地球物理测井数据协同应用领域,基于气测指标与岩石物理参数的交互验证机制,可有效提升储集层判识精度^[3]。具体而言,录井系统捕获的烃类异常响应及岩矿组分信息,能够与测井曲线中的地层导电特性(如深侧向电阻率)及弹性波传播参数(如纵波时差)形成数据耦合。这种多源信息融合技术通过建立岩-电响应数学模型,有效弥补了单一测井方法在储层孔隙结构及流体性质解释方面的局限性。实践表明,该整合方法显著改善了储层参数反演的可靠性,特别是在弱显示油气层的判别方面展现出更强的技术优势。

2.2 钻井轨迹优化中的数据融合应用

在地质导向钻井工程中,井眼轨迹优化通过综合地层响应参数、实时钻进轨迹及地质构造信息,建立动态导向控制体系,保障钻头精确穿行目标产层。岩

屑录井实时获取的岩性序列与含烃特征,结合测井曲线对储层孔隙结构的定量解析,辅以地震剖面揭示的构造几何形态,三者协同构建出高精度轨迹修正模型。在工程实施过程中,录井系统监测的岩性转换界面为识别标志层顶界提供直接依据,实现井斜角的实时微调。测井响应的电学特性(如电阻率差异)、声学特征及密度参数形成储层空间定位约束条件,精确界定产层空间展布。地震构造解析技术则通过地层产状反演动态修正轨迹方位偏差,确保井眼延伸方向与地层界面保持最佳几何匹配。

2.3 风险提示系统的构建与优化

在钻井作业过程中,井涌、井漏、卡钻及异常高压等复杂地质风险严重影响施工安全,岩屑录井与地球物理数据的融合在风险提示系统构建中起到了关键作用。岩屑录井的地层压力监测、地化参数变化及气测异常可作为井下异常预警信号,测井数据的声波时差、密度与孔隙度参数用于评估地层力学特性,地震数据的地层压力反演结果提供区域压力背景约束,三者的综合分析可构建实时动态风险提示系统。风险提示系统的优化依赖于多源数据联合建模,构建井下异常状态的预警判别准则。岩屑录井气测数据的变化速率、测井曲线的梯度特征及地震反演压力数据的偏差联合构建风险评价模型,提高了预警的精准度。

在计算过程中,利用压力梯度公式:

$$P=\rho gh$$

其中, P 为地层压力, ρ 为泥浆密度, g 为重力加速度, h 为井深,根据实时测井与岩屑录井数据动态计算压力梯度,识别异常压力区域,优化钻井液密度,降低井控风险^[4]。风险提示系统在钻井过程中实现了动态调整,依靠岩屑录井的实时监测、测井数据的参数反演及地震数据的构造约束,提高了异常情况识别的可靠性,降低了钻井事故发生概率,增强了油气勘探的安全性与经济性。

3 数据融合的效果与技术优势

3.1 油气识别精度提升分析

基于多源数据协同分析的油气检测技术体系,通过整合岩屑录井系统获取的岩性剖面、矿物组成及烃类异常响应,结合测井曲线包含的导电特性、体积密度、弹性波传播参数及孔隙流体响应特征,系统性优化了储层流体制约条件。地震属性特征有效约束储层横向展布规律,构建起三维空间油气检测模型,实现了含油气单元的精准圈闭。通过跨尺度数据校正机制,测

井资料的垂向分辨率优势系统性校正了岩屑录井的纵向采样偏差,增强了烃类响应与含油饱和度的相关性。同时,岩屑录井的岩矿鉴定结果为测井解释提供了岩石物理模型的地质标定基础。在多元参数联合反演框架下,测井响应特征与岩屑地球化学属性的综合解译,显著改善了对复杂储集体的有效识别能力。数据融合前后油气层识别精度的提升情况如表1所示。

表1 数据融合前后油气层识别精度提升情况

识别方法	融合前油气识别精度	融合后油气识别精度	提升幅度(%)
单一岩屑录井	0.72	0.85	0.13
单一测井数据	0.76	0.89	0.13
综合数据融合	0.8	0.95	0.15

3.2 风险提示系统对勘探安全性的提升

钻井工程中面临的流体侵入、循环液漏失、钻具遇卡及地层超压等地质危害,通过录井参数异常响应实现主动防控。岩屑录井系统捕捉的烃类异常波动、压力系统变异及岩相转换特征,构成井下风险早期识别的关键判据。测井曲线揭示的岩石力学参数(如地层压实程度、结构完整性)为围岩稳定性评估提供了基础数据支撑。地震压力预测技术通过地层压力场三维重构,可有效识别区域压力封存箱边界,为潜在高压流体运移通道的定位提供地球物理依据。多源监测数据的协同应用显著增强了风险预警系统的空间分辨率与响应时效。

基于多元数据融合技术构建的井下动态监控体系,通过整合录井烃类浓度梯度变化、测井岩石力学响应及地震压力场特征,形成多源参数协同监测机制。该体系可实时评估钻井液柱压力与地层破裂压力的动态平衡关系,指导钻井液性能的精准调控,优化井周应力分布状态。录井系统的实时监测功能有效补偿了测井数据的滞后性缺陷,测井参数的岩石力学解释则为地震压力预测提供了地质力学约束^[5]。

3.3 钻井轨迹控制优化成效

钻井轨迹控制依赖地层参数、构造形态与实时井眼轨迹数据,岩屑录井提供地层岩性变化与油气显示信息,测井数据用于储层物性参数约束,地震数据提供地层倾角及构造形态,三者结合可提高井眼轨迹控制的精度,使钻头沿最优路径进入目标储层。数据融合后,测井数据提供的孔隙度、渗透率及声波时差用

于调整轨迹参数,使井眼轨迹更加符合储层地质特征,岩屑录井的实时监测功能使地层界面识别更加精准,地震数据的构造反演结果优化了井斜角度调整策略,使井眼轨迹避免进入非目标层段,提高了钻井路径规划的合理性。在轨迹优化过程中,建立轨迹控制的空间约束模型,构建井斜角、方位角与地层倾角之间的关系,以优化井眼轨迹调整策略。井眼轨迹在三维空间中的位置可表示为:

$$X=X_0+\int_0^L \cos(\alpha)\cos(\beta)dL$$

$$Y=Y_0+\int_0^L \cos(\alpha)\sin(\beta)dL$$

$$Z=Z_0+\int_0^L \sin(\alpha)dL$$

其中X, Y, Z为井眼在三维坐标系中的位置; X_0 , Y_0 , Z_0 为井口坐标; α 为井斜角; β 为方位角; dL 为微元长度。实时岩屑录井与测井数据对模型参数进行动态调整,使井眼轨迹符合目标储层结构,提高储层钻遇率。

4 结束语

综合录井与地球物理数据的融合提升了油气层识别的精度、钻井轨迹控制的合理性与风险提示系统的安全性。岩屑录井提供的地层岩性与油气显示特征增强了测井数据的可靠性,测井曲线的物性参数分析优化了井眼轨迹调整策略,地震数据的构造反演为储层展布提供了空间约束。数据融合构建了更加精准的储层评价体系,使钻井路径控制更加稳定,异常预警能力进一步增强。综合录井与地球物理数据的协同应用优化了勘探技术体系,提高了油气勘探的经济效益与技术水平。

参考文献:

- [1] 闻竹,孙凤兰,郑春生,等.综合录井技术在黄骅坳陷乌马营聚煤带深层煤岩气勘探中的应用[J].录井工程,2024,35(04):68-76.
- [2] 石晓翎.地质录井技术在F32-平1井施工中的应用[J].西部探矿工程,2024,36(12):67-69.
- [3] 陈俊华,李召兵,王延志,等.录井地质工程一体化综合解释技术在水平井压裂选层中的应用[C]//西安石油大学,陕西省石油学会.2024油气田勘探与开发国际会议论文集I.大庆钻探工程公司油气资源开发技术服务项目经理部,2024.
- [4] 王千飞.油田综合录井技术探讨[J].西部探矿工程,2024,36(09):183-185.
- [5] 康洪峰.水平井钻井过程中的综合录井技术[J].石油知识,2024(04):58-59.