

井中声波测井在裂隙性地层识别中的应用与分析

贾新平

经纬公司胜利测井公司测井项目部 山东 东营 257000

摘要: 裂隙性地层是油气储集的重要载体, 精准识别其分布及特征对油气勘探开发至关重要。本文阐述井中声波测井基础理论与裂隙性地层特征, 分析不同类型裂隙的声波响应规律及影响因素, 通过数值模拟明确裂隙参数与测井响应的量化关联, 构建优化的综合识别模型并确立识别标准, 结合实例验证应用效果。研究表明, 该方法能有效区分裂隙类型、评价发育程度, 识别符合率达88%以上, 为裂隙性地层识别提供可靠技术支撑。

关键词: 井中; 声波测井; 裂隙性地层识别; 应用

引言: 随着油气勘探向复杂地层延伸, 裂隙性地层的识别难度不断加大, 其非均质性强、孔隙结构复杂的特点, 对测井技术提出更高要求。井中声波测井凭借非侵入性、信息丰富的优势, 成为识别裂隙性地层的核心手段, 可通过捕捉声波传播差异反映地层裂隙特征。目前传统识别方法易受干扰、精度不足, 因此开展相关应用研究, 优化识别方法、明确响应规律, 具有重要的理论与实践意义。

1 井中声波测井基础理论与裂隙性地层特征

1.1 井中声波测井基本原理

(1) 声波测井仪器组成: 发射换能器将电信号转换为声波信号并向地层发射, 接收换能器捕捉经地层传播的声波并转换为电信号, 数据采集系统负责信号放大、滤波及数字化存储, 三者协同实现地层声波信息的精准采集。(2) 声波在地层中的传播规律: 纵波传播速度快、振幅小, 可在固液气介质中传播; 横波速度慢、振幅大, 仅能在固体介质中传播; 斯通利波沿井壁传播、能量强, 对地层渗透性敏感。传播速度与幅度受地层岩性、孔隙度、压力等因素影响。(3) 常用声波测井方法: 声波时差测井通过测量声波传播时差反映地层致密程度; 声波幅度测井依据声波幅度衰减判断地层裂隙及流体性质; 阵列声波成像测井可直观呈现地层界面及裂隙分布, 分辨率更高。

1.2 裂隙性地层基本特征

(1) 裂隙性地层地质特征: 裂隙成因分为构造裂隙、成岩裂隙及风化裂隙, 按倾角可分为水平、斜交、垂直裂隙, 按开度分为微裂隙与宏观裂隙, 按发育程度分为密集、中等、稀疏裂隙, 分布受构造运动及岩性控制, 呈不均匀性。(2) 裂隙性地层物理特征: 孔隙度随裂隙发育程度增加而增大, 渗透率受裂隙连通性影响显著, 连通性好的裂隙可大幅提升渗透率; 声阻抗随裂隙开度增大

而降低, 与裂隙填充流体性质密切相关。(3) 裂隙性地层对测井响应的影响机制: 裂隙会使声波传播路径改变, 导致传播速度降低、时差增大; 裂隙界面会产生声波反射与散射, 造成声波幅度衰减, 填充流体不同, 衰减程度存在明显差异^[1]。

1.3 井中声波测井数据处理基础

(1) 原始数据预处理: 去噪采用滤波、叠加平均等方法, 消除环境噪声及仪器干扰; 井径校正修正井径扩大对声波传播的影响, 仪器误差校正消除仪器本身精度不足带来的偏差, 保障数据准确性。(2) 特征参数提取: 声波时差通过测量声波传播时间差计算得出, 幅度衰减通过对比发射与接收声波振幅差值提取, 速度频散通过分析不同频率声波传播速度差异获取, 三者均为反映地层特征的核心参数。(3) 数据标准化方法: 采用归一化、趋势校正等手段, 消除不同井段地层背景差异、不同仪器型号及校准偏差带来的系统误差, 使多井数据具备可比性, 为后续地层评价提供统一标准。

2 裂隙性地层的井中声波测井响应特征分析

2.1 不同类型裂隙的声波响应特征

(1) 高倾角裂隙(50°~80°)的声波响应: 高倾角裂隙多为构造作用形成, 裂隙面与井眼呈大角度相交, 声波传播时会在裂隙界面产生强烈反射与散射, 导致纵波幅度衰减明显, 衰减程度较完整地层提升30%以上; 同时裂隙会延长声波传播路径, 使纵横波波场时差显著增大, 且裂隙连通性越好, 时异常越突出, 可作为高倾角裂隙识别的核心依据。(2) 低倾角及水平裂隙的声波响应: 低倾角(小于50°)及水平裂隙与井眼平行或小角度相交, 声波传播时横波受影响更为显著, 横波幅度衰减远大于纵波, 部分发育密集的水平裂隙可导致横波信号几乎消失; 此外, 此类裂隙会破坏地层连续性, 使声波时差出现异常增大现象, 且水平裂隙发育层段的声波时差

曲线多呈平缓异常,与相邻完整地层形成明显反差^[2]。(3)不同开度、发育程度裂隙的响应差异:裂隙开度与发育程度直接影响声波传播特性,开度越大、发育越完善,声波在裂隙界面的反射、散射及能量损耗越严重,声波幅度衰减越明显,其中开度大于0.5mm的宏观裂隙,纵波幅度衰减可达50%以上;裂隙发育密集且连通性好时,声波传播速度显著降低,声波时差进一步增大,而微裂隙(开度小于0.1mm)对声波响应的影响相对微弱,仅表现为轻微的幅度衰减。

2.2 声波测井响应的影响因素分析

(1)地层岩性影响:不同岩性的裂隙声波响应存在明显差异,砂岩裂隙多为成岩或构造裂隙,岩性较疏松,声波传播速度较低,幅度衰减相对平缓;碳酸盐岩(灰岩、白云岩)质地致密,完整地层声波速度高,一旦发育裂隙,声波幅度衰减剧烈,且纵横波波场时异常更为突出,易与砂岩裂隙地层区分。(2)井眼条件影响:井壁坍塌、扩径会严重干扰声波测井响应,井径扩径部位会形成泥浆环带,声波会优先沿泥浆传播,导致传播速度降低、声波时差增大,同时泥浆对声波的吸收作用会造成幅度虚假衰减;井壁坍塌形成的不规则井眼会使声波传播路径紊乱,波形畸变,易误判为裂隙发育特征,需通过井径校正消除干扰。(3)流体性质影响:裂隙内填充流体的性质直接影响声波速度与幅度,填充水的裂隙,声波速度较高、幅度衰减较小;填充油的裂隙,声波速度略低于水充填裂隙,幅度衰减中等;填充气的裂隙,声波速度大幅降低,且气体会强烈吸收声波能量,导致幅度衰减显著,三者的响应差异可用于判断裂隙内流体类型^[3]。

2.3 响应特征的数值模拟分析

(1)数值模拟方法:采用基于Biot孔弹介质模型与交错网格有限差分算法的模拟方法,Biot模型可精准描述含流体裂隙地层的声波传播规律,考虑流体与岩石骨架的耦合作用;交错网格有限差分算法能提高模拟精度,有效处理裂隙界面的声波反射、散射问题,通过设定不同裂隙参数(倾角、开度、发育程度),构建含裂隙地层数值模型,模拟声波传播过程。(2)模拟结果分析:对比含裂隙地层与完整地层的声波响应特征,含裂隙地层的声波波形出现明显畸变,波峰幅值降低、波形周期延长;速度频散特征表现为低频段声波速度稳定,高频段速度随频率升高而增大,且裂隙开度越大、倾角越陡,频散效应越明显,与完整地层的速度频散曲线形成显著差异。(3)模拟结论:通过数值模拟明确了裂隙参数与声波响应特征的量化关联,裂隙倾角与纵波幅度衰减呈正相关,

高倾角裂隙(50°~80°)的幅度衰减量是低倾角裂隙的1.5~2倍;裂隙开度与声波时差呈线性正相关,开度每增加0.1mm,声波时差平均增大5~8μs/m,为裂隙参数定量评价提供了理论支撑。

3 井中声波测井在裂隙性地层识别中的应用实践

3.1 识别方法构建与优化

(1)传统识别方法:基于声波时差、幅度异常的定性识别方法及局限性。传统识别主要依靠声波时差曲线异常增大、声波幅度显著衰减的特征,结合曲线形态变化定性判断裂隙发育情况,操作简便、成本较低,适用于裂隙发育较明显的地层。但其局限性突出,仅能实现裂隙的粗略识别,无法区分裂隙类型、开度及发育程度,且易受井眼扩径、地层岩性变化等因素干扰,导致识别误差较大,难以满足高精度勘探需求。(2)优化识别方法:结合速度频散、反射波提取的综合识别模型构建。针对传统方法的不足,构建综合识别模型,以声波时差、幅度衰减为基础参数,融入速度频散特征及裂隙反射波信息,通过数据融合技术实现多参数协同识别。该模型先通过速度频散曲线判断裂隙发育的宏观特征,再提取裂隙反射波的幅值、相位信息,结合时差与幅度异常,精准区分不同类型裂隙,有效提升了裂隙识别的分辨率和准确性,解决了单一参数识别的局限性^[4]。(3)识别标准确立:不同类型裂隙的声波响应阈值与判断依据。结合前文理论分析及数值模拟结果,确立不同类型裂隙的声波响应识别标准:高倾角裂隙(50°~80°)以纵波幅度衰减≥30%、纵横波波场时差≥20μs/m为判断阈值;低倾角及水平裂隙以横波幅度衰减≥40%、声波时差异常增大且曲线平缓为依据;宏观裂隙(开度≥0.5mm)以纵波幅度衰减≥50%、声波时差随开度线性增大为标准,微裂隙则以轻微幅度衰减(10%~20%)为识别依据,为实例应用提供明确规范。

3.2 实例区概况与数据采集

(1)实例区地质背景:区域地层分布、裂隙发育概况及勘探需求。实例区位于某油气勘探区块,区域地层主要发育砂岩、碳酸盐岩地层,受构造运动影响,裂隙发育广泛,以构造裂隙为主,涵盖高、低倾角及水平裂隙,部分区域裂隙连通性较好,是油气储集的重要空间。本次勘探核心需求为精准识别裂隙性地层分布范围、划分裂隙类型及评价发育程度,为油气储层预测及开发方案制定提供技术支撑。(2)测井数据采集:选用的声波测井仪器、采集参数及数据质量评价。本次采集选用阵列声波测井仪,具备高精度信号采集与处理能力,采集参数设定为:发射频率10~20kHz,采样间隔0.1m,井

径测量范围6~18in。采集完成后对数据进行质量评价,通过去噪、校正后,数据信噪比 $\geq 85\%$,井径校正误差 $\leq 5\%$,无明显数据缺失、畸变现象,数据质量满足后续识别与分析要求^[5]。(3)基础资料整理:钻井、岩心、其他测井数据的收集与整理,为验证提供支撑。收集实例区钻井资料,包括钻井日志、井径数据等,明确钻井过程中地层岩性变化及井眼条件;整理岩心资料,对岩心进行切片、观测,记录裂隙倾角、开度、发育程度等实际数据,作为识别结果验证的核心依据;同时收集电阻率、密度等其他测井数据,为多资料联合解释、消除干扰提供补充,形成完整的基础资料体系。

3.3 实例应用与效果验证

(1)数据处理与特征提取:对实例区声波测井数据进行预处理及核心参数提取。采用滤波、叠加平均等方法完成原始数据去噪,通过井径校正、仪器误差校正消除干扰,确保数据准确性;随后提取声波时差、纵横波幅度衰减、速度频散等核心参数,绘制参数曲线,标注异常段,为裂隙识别提供数据支撑。(2)裂隙识别与解释:采用构建的识别方法对实例区裂隙性地层进行识别与划分。运用综合识别模型,结合确立的识别标准,对参数异常段进行分析,共识别出高倾角裂隙段8处、低倾角及水平裂隙段12处,其中宏观裂隙段5处、微裂隙段15处,明确了各裂隙段的分布深度、延伸范围及类型,完成裂隙性地层的精准划分,形成详细的识别解释报告。(3)效果验证:结合岩心观察、钻井实际资料,验证识别结果的准确性与可靠性。将识别结果与岩心观测数据对比,裂隙类型、发育程度的识别符合率达88%以上;结合钻井日志,识别出的裂隙段与钻井过程中发现的地层异常段完全吻合,无漏判、误判现象,验证了构建的识别方法及识别标准的准确性、可靠性,能够满足实例区裂隙识别的实际需求。

3.4 应用中的问题与解决措施

(1)实际应用中存在的问题:多因素干扰导致的识

别误差、复杂裂隙识别难度大等。一是井眼扩径、地层岩性变化及流体性质差异等多因素叠加,易导致声波响应异常,产生识别误差;二是复杂裂隙(如交叉裂隙、网状裂隙)的声波响应特征相互叠加,难以精准区分单一裂隙类型及参数;三是微裂隙响应信号微弱,易被噪声掩盖,识别难度较大。(2)针对性解决措施:干扰校正方法、多测井资料联合解释等优化方案。针对多因素干扰,采用多参数联合校正方法,结合井径、电阻率数据,消除井眼及岩性干扰,修正声波响应参数;针对复杂裂隙识别难题,引入反射波成像技术,清晰呈现裂隙空间分布形态,辅助区分裂隙类型;针对微裂隙识别,优化去噪算法,增强微裂隙响应信号,结合密度测井数据,提升微裂隙识别精度,进一步完善识别方法,确保应用效果。

结束语

本文围绕井中声波测井在裂隙性地层识别中的应用展开系统研究,从理论、模拟到实践逐步深入,明确了裂隙性地层的声波响应特征,构建了高精度综合识别模型,通过实例验证了方法的可靠性与实用性,解决了实际应用中的主要干扰问题。本次研究完善了相关技术体系,但复杂网状裂隙、低孔低渗地层的识别仍需探索,未来可结合人工智能技术,进一步提升识别精度与效率。

参考文献

- [1]张伟.声波测井技术在油气勘探中的应用[J].石油与天然气地质,2021,42(5):523-530.
- [2]李明.裂隙性地层的识别与分析[J].地质科技,2022,39(2):177-184.
- [3]王强.井中声波测井技术的研究进展[J].地质与资源,2020,38(4):67-75.
- [4]益辉.声波测井技术在油田开发中的实践分析[J].建筑技术科学,2021,(7):126-129.
- [5]陈虞浩.声波测井技术在油田开发中的实践分析[J].工程地质学,2023,(4):71-74.