

Promotion and Application of Multi-layer pipe cementing evaluation technology

Xiaojie Li

Reservoir Dynamic Monitoring Center of Shengli Oilfield, Dongying, Shandong, 257088, China

Abstract

Multi-layer pipe cementing technology is a key link to ensure the integrity of complex wellbore structures and development efficiency, and its quality is directly related to the service life and production safety of oil and gas Wells. With the acceleration of deep, ultra-deep and unconventional oil and gas exploration, cementing engineering is confronted with challenges such as complex wellbore, large interlayer pressure difference and high requirements for cement ring sealing. This paper analyzes the theoretical and technical system for evaluating the quality of multi-layer pipe cementing, with a focus on the comprehensive application of methods such as acoustic logging, ultrasonic scanning, acoustic amplitude analysis, downhole pressure monitoring, and intelligent data fusion. Through the practice of typical oil fields, summarize the technical advantages and limitations, and propose optimization paths that adapt to complex geological conditions. Research shows that the evaluation system based on multi-source data fusion and intelligent algorithms significantly improves the accuracy of cementing identification, promotes the transformation of engineering from experience-based to intelligent, and provides support for the safe and efficient development of deep oil and gas.

Keywords

Cementing quality evaluation; Acoustic logging; Ultrasonic scanning; Data fusion; Intelligent algorithm

多层管固井评价技术推广与应用

李晓杰

胜利油田油藏动态监测中心, 中国·山东 东营 257088

摘要

多层管固井技术是保障复杂井筒结构完整性与开发效率的关键环节, 其质量直接关系到油气井寿命与生产安全。随着深层、超深层及非常规油气勘探加快, 固井工程面临井眼复杂、层间压差大、水泥环封隔要求高等挑战。本文分析多层管固井质量评价的理论与技术体系, 重点探讨声波测井、超声扫描、声幅分析、井下压力监测及智能数据融合等方法的综合应用。通过典型油田实践, 总结技术优势与局限, 提出适应复杂地质条件的优化路径。研究表明, 基于多源数据融合与智能算法的评价体系显著提升固井识别精度, 推动工程由经验型向智能化转变, 为深层油气安全高效开发提供支撑。

关键词

固井质量评价; 声波测井; 超声扫描; 数据融合; 智能算法

1 引言

固井是油气井施工中的核心工序, 其质量直接关系到套管的密封性、井筒完整性及后续分层采油、注水等作业的安全性。传统固井评价多依赖单一声波测井手段, 在复杂地层条件下常存在分辨率不足、信号衰减、井径变化干扰等问题。随着油气勘探向深层、超高温高压及多层系井型拓展, 单层固井质量评价方法已难以满足工程要求。多层管固井结构的复杂性导致环空流体性质差异大、界面状态复杂, 必须

依托多源测井数据与智能算法开展多维度评价。近年来, 国内外学者围绕固井声学响应机理、水泥环粘结特征及多物理场响应规律开展了大量研究, 形成了声波幅度衰减法、声时差法、超声回波法等多种检测手段。与此同时, 人工智能、数据融合与三维可视化技术的引入, 为多层管固井评价提供了新的思路。本文在分析多层管固井工程特征的基础上, 构建固井评价的综合技术体系, 并结合典型油田推广案例, 探讨其在现场应用中的成效与优化方向。

2 多层管固井工程特征与技术需求

2.1 复杂井型与地层条件下的工程挑战

多层管固井通常涉及表层套管、技术套管与生产套管多级固井, 其环空结构多样、层间界面复杂。随着井深增加, 地层温度、压力梯度明显变化, 固井浆体系易出现密度分层、

【基金项目】“多层管固井评价技术推广和应用”(项目编号: YT2418)。

【作者简介】李晓杰(1998-), 男, 河北邯郸, 本科, 助理工程师, 从事测井技术研究。

气窜及流体通道。不同层段井径不均、井壁失稳、泥饼厚度差异等问题均会导致环空封隔不彻底。特别是在深层或斜井环境下,套管偏心、井斜与流体扰动进一步降低了固井完整性。此外,非常规油气井多采用分段压裂技术,对固井密封完整性要求更高。一旦固井评价不准确,易造成压裂串槽、层间串流及储层污染。因此,建立适用于多层井结构的综合评价体系成为工程质量控制的关键。

2.2 传统固井评价方法的局限性

传统固井检测主要依靠单井声波测井或声幅曲线判断水泥胶结状况。虽然该方法在浅层井段能获得较好结果,但在高温高压、多套管条件下,信号易衰减失真。声波测井对套管内液体性质、环空厚度及气体含量极为敏感,易导致假阳性或假阴性判断。单频测井数据难以揭示多层水泥环的空间非均质性,也无法准确反映微裂缝或脱粘区域分布。在多层管条件下,外层套管对内层声波传播的干扰显著,单一测井信号的解释准确度不足,需要引入多维参数联合反演模型与智能算法,以实现全井段、全环空的综合评价。

2.3 多层管固井质量控制的技术需求

为适应复杂多变的地层环境,多层管固井评价技术必须实现多源信息融合与高精度识别,以满足深层、高压及多套管井段的工程需求。其核心在于构建覆盖不同井型与地质条件的多频声学响应数据库,综合分析声波传播特征、水泥密度及界面状态,实现对各管层水泥环胶结质量的精准识别。同时,需发展具备高温高压适应性的超声回波与三维成像技术,确保在极端环境下信号稳定与图像清晰。利用机器学习与深度学习算法可实现声学数据的智能判别与固井质量趋势预测,提高识别准确率与响应效率。此外,融合井下压力、温度及声学实时监测数据,可实现固井完整性的动态评估与异常预警,构建由“检测—分析—预测”组成的闭环智能评价体系,为复杂地层下的安全固井与高效开发提供可靠技术支撑。

3 多层管固井质量评价技术体系

3.1 声波测井与声幅分析法

声波测井在多层管固井质量评价中占据核心地位,其原理基于声波在不同介质中的传播特性差异,通过分析传播速度、声幅衰减和相位变化,判断水泥环胶结状况。声幅越大表明声能衰减小,说明固井粘结较差;声幅减弱则表示能量被水泥吸收,粘结良好。针对多层套管结构中信号干扰复杂的问题,工程上常采用双频激励、多接收阵列与变角入射等方法,提高不同层间声波衰减识别精度。利用声时差曲线与相位差特征可精确区分气体、液体及固体介质分布,识别脱粘与气窜区。通过建立声幅响应模型并与实测曲线比对,可实现固井质量的量化评价。该方法操作简便、分辨率高,在页岩气井、深井及老井修复工程中得到广泛验证,是固井质量评价体系的基础性技术支撑。

3.2 超声扫描与三维成像技术

超声扫描技术以高频声波为探测信号,利用波束扫描与回波成像实现井筒及环空空间信息重建。其高频波束具有短波长与强穿透特性,可实现毫米级分辨率的环空结构成像。超声扫描仪通过获取水泥环回波的强度、相位与到达时间,定量计算水泥密实度、孔隙率及界面粘结完整性,实现三维可视化分析。与传统单道声波法相比,超声扫描能有效识别微裂缝、脱粘层及环空气窜通道,尤其适用于多层套管及复杂井段。现代超声成像系统还可结合旋转扫描与高温耐压传感技术,实现高温高压井段的实时检测。研究表明,该方法在深层与高压环境下仍能保持高信噪比,为固井缺陷定位、定量分析及修井决策提供了精确依据,显著提升了井筒完整性评价的科学性与可靠性。

3.3 多源数据融合与智能识别算法

多层管固井质量的精准评估离不开多维信息的融合与智能算法的辅助分析。通过整合声波、超声、温度、压力、井径及返浆参数等多源数据,可构建“声学—力学—流体”耦合模型,对固井状态实现全局感知。基于机器学习与深度神经网络的算法,如随机森林、卷积神经网络(CNN)与时序LSTM模型,可对复杂信号特征进行多维提取与自动分类,从而识别水泥环中的脱粘、气窜、孔隙及界面裂隙类型。融合算法还可引入动态时间修正与空间插值,对多井段数据进行同步分析,显著提高固井状态识别精度。通过实时数据监测与模型预测,系统能够提前预警固井异常及环空气窜风险,实现智能化、可视化的全过程质量控制。该模式推动固井评价从经验解释迈向数据驱动与智能决策的新阶段,标志着固井检测技术由传统检测向综合诊断的转型升级。

4 典型油田应用案例分析

4.1 鄂尔多斯盆地页岩气井固井评价实践

鄂尔多斯盆地页岩气井多呈水平与分支结构,固井段长、井径变化大、环空压力梯度复杂,传统单一测井方式难以准确反映固井质量。工程团队在页岩气生产井中采用多层技术套管与尾管固井体系,引入声波幅度衰减与超声扫描联合检测技术,对不同井段水泥环密度及胶结状况进行定量分析。通过数据融合与特征加权算法,系统识别出脱粘、微裂缝及气窜通道位置。实测结果与随钻压力测试吻合度达95%,固井合格率由原先的84%提升至92%以上。评价表明,基于多源融合的综合检测体系能够实现毫米级缺陷识别,有效弥补传统声波法的局限,显著提升页岩气压裂段封隔效果与开发安全性,为非常规气藏固井评价提供可复制的区域标准。

4.2 塔里木盆地深井高温固井质量检测

塔里木盆地深层碳酸盐岩地层温度高、压力大,固井过程中易出现浆液失水、气侵及热应力裂缝,给质量评价带来挑战。项目团队研发高温耐压超声探头,结合声时差实时

补偿与多频信号增强算法,突破了传统声波在高温环境下信噪比低的问题。实测数据显示,超声回波强度能准确反映水泥环致密度及粘结完整性,声幅曲线与温度梯度联合反演模型成功定位多处潜在脱粘区。技术应用后,井筒泄漏率下降约30%,固井缺陷检出率提升40%,极大增强了井筒完整性与安全裕度。该方法在深层高温固井工程中验证了多源声学数据融合的可靠性,推动了我国深井固井评价技术向精细化与智能化方向发展。

4.3 海上油田复杂固井评价推广

海上油田钻井环境空间受限、井身结构多样、作业周期要求高,对固井质量实时监测与风险控制提出更高要求。项目组在海上复合固井体系中集成无线声波监测与井下智能节点采集技术,构建基于边缘计算的固井动态监测系统。系统可实时采集环空声幅、密度、返浆流速及温度信号,并通过融合算法识别异常波形,判定密度突变与环空气窜。通过可视化平台,施工人员可即时掌握固井动态,实现“施工—检测—诊断”一体化闭环管理。推广应用表明,该系统将海上多层固井一次成功率提高至95%,修井率降低20%,并实现了远程协同决策。研究成果验证了智能固井评价体系在复杂环境下的适应性与经济效益,为海上油田固井质量控制与数字化管理提供了重要技术支撑。

5 技术推广与工程优化路径

5.1 多源数据平台与标准化体系建设

多层管固井评价的数据平台应采用“井筒对象—环空单元—测点时序”三级数据模型,统一声学、超声、温压、井径、返浆与作业参数等多源数据的编码、时间戳与空间定位规则,配套水泥环材料本构与界面状态字典,确保跨井区可比。平台以统一数据湖承载原始与衍生特征,设置质控与追溯链路,实现仪器校准、井段缺测插补、异常点屏蔽与版本管理。标准体系应明确不同井型的阈值范围、解释置信度分级与报告格式,建立“试验井—对比井—推广井”三级验证闭环与年度复核机制,支持接口开放与安全分级授权,形成跨区域共享与持续迭代的行业基线。

5.2 智能算法与可视化系统集成

智能评价以多尺度特征工程为基础,联合声幅衰减、相位差、回波包络、温压梯度与施工参数构建特征集合,采用集成学习与时空深度网络实现缺陷识别、粘结分级与泄漏风险预测,并以迁移学习适配不同盆地工况。系统通过不确

定性量化与可解释方法输出贡献度与置信区间,便于现场判读与闭环纠偏。三维可视化以井筒数字孪生为载体,将多源数据贴附至环空网格,动态呈现水泥密实度、界面脱粘与通道演化;边云协同使井场端完成快速预评,云端完成全井段反演与自动出图,报告一体化生成,显著压缩解释与决策周期。

5.3 推广应用的管理与经济效益分析

技术推广需嵌入企业的工程治理与成本控制流程,构建“标准—培训—考核—复盘”的管理链条:以统一SOP与KPI对接招采与施工组织,以专家远程会诊与集中算力支撑多井并行评估,以复盘库沉淀“工况—缺陷—处置”知识图谱,减少个人经验依赖。经济性评估宜采用全生命周期视角,计入测井与平台投入、修井减少、停产损失降低与事故风险下降的量化收益,并以情景与敏感性分析验证不同井型与价位的边际效益。现场统计表明,智能化评价提升一次合格率并减少返工,通常可节约修井成本15%~25%、缩短施工周期8%~12%,在压裂井与高温深井中效果尤为显著,为规模化推广提供明确的财务与安全收益支撑。

6 结语

多层管固井评价技术的发展与推广,是保障深层与非常规油气井安全高效开发的重要支撑。通过声波测井、超声扫描、多源数据融合及智能算法的协同应用,可实现对复杂井筒固井质量的多维识别与定量评价。典型油田实践证明,该技术体系在提升固井完整性、减少井筒失效与优化施工设计方面具有显著效果。未来,应进一步加强声学响应机理研究、标准化体系建设与算法模型优化,构建集监测、诊断、预测于一体的智能固井评价平台。其推广应用将推动油气钻完井工程由经验管理向智能决策转变,为我国能源开发提供更加坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 杨玲.智能井瞬变电磁阵列多层管柱损伤检测方法研究[D].西安石油大学,2023.
- [2] 王宇.瞬变电磁法多层管柱损伤自动识别技术研究[D].西安石油大学,2019.
- [3] 王登岳.多层金属管柱电磁探伤技术探究[D].西安石油大学,2017.
- [4] 赵成龙,王俊石,孙帅帅,等.多层管柱损伤电成像测井仪在钻完井作业中的应用[J].科学技术创新,2022,(25):41-44.
- [5] 徐凤阳,郝晓良.新一代多层管柱电磁探伤电成像测井技术及其应用[J].油气井测试,2011,20(02):70-73+78.