

基于多臂井径与电磁探伤的组合测井技术在套管腐蚀评价中的应用

李耀华

中油测井国际公司伊拉克项目

DOI : 10. 32629/j pm. v7i 5. 8910

[摘要] 本文旨在探讨多臂井径与电磁探伤组合测井技术在套管腐蚀评价中的应用。通过理论分析、现场实际应用相结合等方法，深入剖析该组合测井技术的原理及其在套管腐蚀评价中的有效性。研究发现，多臂井径测井能够精确获取套管内径变化信息，而电磁探伤测井可有效检测套管壁厚及缺陷情况，两者结合能更全面地反映套管腐蚀状况。该技术在提高套管腐蚀评价准确性方面发挥了重要作用，为油气田生产安全与效率的提升提供了有力支持，对优化套管腐蚀检测与评价流程具有重要意义。

[关键词] 多臂井径；电磁探伤；组合测井技术；套管腐蚀评价

Application of Combined Multi-arm Wellbore Diameter and Electromagnetic Testing Logging Technology in Casing Corrosion Assessment

Li Yaohua

China Oilfield Logging International Company, Iraq Project

[Abstract] This study investigates the application of combined multi-arm wellbore diameter and electromagnetic testing logging technology in casing corrosion evaluation. Through theoretical analysis and field applications, the paper thoroughly examines the operational principles and effectiveness of this integrated logging method. Research demonstrates that multi-arm wellbore diameter logging accurately measures changes in casing inner diameter, while electromagnetic testing effectively detects casing wall thickness and defects. The combination provides a comprehensive assessment of casing corrosion conditions. This technology significantly enhances the accuracy of corrosion evaluation, offers robust support for improving production safety and efficiency in oil and gas fields, and holds substantial importance for optimizing casing corrosion detection and assessment workflows.

[Key words] multi-arm well diameter; electromagnetic flaw detection; combined logging technology; casing corrosion evaluation

引言

在石油天然气开采过程中，套管作为井筒的重要组成部分，承担着隔离地层流体、支撑井壁以及保障生产安全的关键作用，随着油田开发的深入，套管腐蚀问题日益突出，成为影响油气田生产安全与效率的主要因素之一，准确评价套管腐蚀状况，及时发现并处理潜在的腐蚀问题，对于保障油气田的安全生产和可持续发展具有重要意义。目前，套管腐蚀评价主要依赖于单一的测井技术，然而，这些单一技术在实际应用中存在一定局限性。如多臂井径测井虽然能够精确反映套管内径的变化，但对套管壁厚的检测能力有限，难以全面评估腐蚀程度；而电磁探伤测井则擅长检测套管壁厚和缺陷，但对套管变形的敏感性较低，无法提供完整的腐蚀形态信息。这种信息获取局限性使得单一测井技术在复杂井况下应用效果受到限制。相比

之下，多臂井径与电磁探伤组合测井技术通过整合技术优势，能够在一次测井中同时获取套管内径变化、壁厚损失及缺陷分布等多维信息，从而显著提高套管腐蚀评价的准确性和可靠性。这一技术组合为解决现有评价方法的不足提供了新的思路和潜在解决方案。

1. 多臂井径与电磁探伤组合测井技术原理

1.1 多臂井径测井原理

1.1.1 测量机制

包括多个可伸缩测量臂、支撑框架以及信号传输系统。在测井过程中，仪器被下放至井内，测量臂在弹簧力或液压力的作用下与套管内壁紧密接触，并随套管内径的变化而调整位置。每个测量臂上均安装有位移传感器，用于实时记录臂端与仪器中心轴之间的距离变化。这些位移信号经过内置电路转换

为电信号后,通过电缆传输至地面控制系统进行进一步处理。由于多臂井径仪器的测量臂数量较多,因此能够提供套管内径在多个方向上的分布数据,从而直观反映套管内壁的变形形态和位置信息。此外,为提高测量精度,现代多臂井径仪器还配备自动校零装置和温度补偿功能,以消除环境因素对测量结果影响。

1.1.2 数据处理

主要包括数据校正、平均处理以及成像分析等步骤。首先,在数据校正阶段,需要对原始测量数据进行环境校正和系统误差校正。其次,平均处理旨在降低随机噪声对数据质量的影响,通常采用滑动平均法或多臂数据融合算法来提高数据的稳定性和可靠性。最后,成像分析是将处理后的数据转化为可视化图像的重要步骤,常用方法包括极坐标成像和三维立体成像。这些成像结果能够清晰展示套管内壁的腐蚀坑、结垢层以及变形区域,为套管腐蚀评价提供直观依据。值得注意的是,数据处理精度直接影响套管腐蚀评价的可靠性,因此优化数据处理算法对于提升评价效果具有重要意义。

1.2 电磁探伤测井原理

1.2.1 电磁感应检测

基于电磁感应原理,通过激励线圈产生的交变磁场在套管中感应出涡流,进而利用检测线圈捕捉因套管缺陷或壁厚变化引起的电磁信号异常。若套管存在腐蚀、裂纹或壁厚减薄等缺陷,涡流的分布将发生扰动,从而导致检测线圈中的感应电动势发生变化。这种变化可以通过检测线圈精确捕捉,并转化为电信号传输至地面系统进行处理。不同套管状况对电磁信号的影响具有显著差异:此外,套管壁厚的变化还会影响信号的频率特性。因此,通过分析电磁信号的变化特征,可以有效识别套管的腐蚀类型和严重程度。

1.2.2 信号分析

主要包括频谱分析、相位分析以及幅值分析,这些方法能够从复杂的电磁信号中提取出套管壁厚、缺陷大小和位置等关键信息。频谱分析通过对检测信号进行快速傅里叶变换(FFT),将其从时域转换到频域,从而揭示信号中包含的不同频率成分及其强度分布。由于套管内外壁腐蚀对电磁信号的相位影响存在差异,因此通过相位分析可以区分内外壁腐蚀类型。此外,幅值分析通过比较检测信号的幅值大小,可以定量评估套管壁厚的损失程度。

1.3 组合测井优势

多臂井径测井技术通过机械接触方式获取套管内径的详细信息,能够直观显示套管内壁的变形形态和位置,但对于套管外壁的腐蚀和壁厚变化则难以有效检测。相比之下,电磁探伤测井技术能够灵敏地捕捉套管内外壁的腐蚀、裂纹以及壁厚变化信息,但对套管内壁的微小变形分辨率较低。通过将结合使用,可同时获得套管内径和外径的变化数据,全面评估套管的腐蚀状况。综合分析这两种数据,不仅可以提高套管腐蚀检测的精度,还能有效甄别单一测井技术可能产生的误判,为油气田生产提供更加可靠的套管状况评价结果。

2.组合测井技术在套管腐蚀评价中的应用

2.1 实际应用案例

在某油田一口生产井中,采用多臂井径与电磁探伤组合测井技术进行套管腐蚀评价。该井位于主力开发区块,井深约为3500米,完钻时间为2010年,套管材质为N80钢级。由于长期受地层水、注入流体及高压环境影响,该井在近年来出现产量下降和井口压力异常的现象,初步判断可能与套管腐蚀相关。为此,采用多臂井径与电磁探伤组合测井技术对该井套管状况进行全面检测。

施工中,首先使用小直径多臂井径仪对套管内径变化进行高精度测量,并记录不同深度处内径变形数据。随后,通过电磁探伤仪对套管壁厚及缺陷情况进行检测,获取电磁感应信号的幅度与相位信息。两种仪器的测量数据通过电缆实时传输至地面系统,并经过初步处理后生成连续的井下成像图。分析结果显示,在井深2800-2850米段,多臂井径仪检测到明显内径缩小现象,最大变形量达到原始套管内径的8%;与此同时,电磁探伤数据显示该段套管壁厚存在显著减薄,局部区域的壁厚损失率超过30%。

2.2 应用效果评估

案例中采用组合测井技术进行检测后,根据测井数据识别出多处套管腐蚀区域,并制定了针对性的修井方案。随后,通过取心验证和工程验证的方式对测井结果进行了对比验证。取心结果显示,测井数据所标识的腐蚀区域与实际套管状况高度吻合,尤其是在井深2800-2850米段,套管外壁的局部腐蚀深度和范围与测井解释结果基本一致。此外,修井作业过程中发现,部分腐蚀区域的套管壁厚损失率确实达到25%以上,与电磁探伤数据的分析结果相符。

3.组合测井技术应用的影响因素及解决办法

3.1 影响因素分析

3.1.1 井眼条件

在实际油气田开发过程中,由于钻井工艺限制或地层应力作用,井眼往往呈现出不规则形态,如椭圆化、扩径或缩径等现象。这种不规则性会导致多臂井径测井仪器的多个臂无法均匀接触套管内壁,从而引发测量信号的畸变,降低套管内径变化信息的准确性。此外,井斜角度的存在会改变测井仪器在井眼中的姿态,使得电磁探伤测井基于电磁感应原理的信号采集受到干扰,特别是在高井斜条件下,激励线圈产生的磁场分布可能发生变化,进而影响对套管壁厚和缺陷信息的精确提取。这些因素共同作用,使得套管腐蚀评价的准确性受到严重影响。另外,井眼不规则对多臂井径测井的影响主要体现在数据校正的复杂性上。这些异常数据若未经过严格校正,将直接干扰套管腐蚀程度的准确评估。因此,在实际应用中,必须充分考虑井眼条件对测井数据质量的影响,并采取相应的措施以提高套管腐蚀评价的可靠性。

3.1.2 地层特性

当地层电导率较高时,电磁信号在传播过程中会发生衰减,导致套管壁厚和缺陷信息的提取精度下降。此外,地层磁导率的差异也会对电磁感应效果产生重要影响,特别是在磁性地层中,背景磁场的变化可能掩盖套管本身缺陷引起的信号异

常,从而增加了信号分析的复杂性。与此同时,地层岩性对多臂井径测井数据稳定性的影响也不容忽视。例如,在砂泥岩互层或砾石层等非均质地层中,由于岩性变化导致的地层硬度差异,可能使测井仪器在井下运动过程中发生振动或偏移,从而影响多臂与套管内壁的接触状态。此外,地层流体性质也可能通过改变井眼环境间接影响测井数据的质量。例如,高矿化度地层流体可能增强电磁信号的衰减效应,而高粘度流体则可能增加测井仪器的运行阻力,从而影响测量信号的稳定性。

3.2 解决办法探讨

首先,在应对井眼不规则和井斜问题时,可通过优化测井仪器的结构设计来提高其适应性和稳定性。例如,采用可调节式扶正器能够有效减少井斜对测井仪器姿态的影响,确保其在高井斜条件下仍能保持水平状态,从而改善电磁探伤测井信号的采集质量。此外,针对多臂井径测井仪器,可以增加测量臂数量并优化臂的分布方式,使其能够更好地适应井眼不规则形态,从而减少因接触不良导致的测量误差。

其次,在施工工艺方面,可以通过引入实时监测系统来动态调整测井仪器的运行参数。例如,利用井下摄像头或超声波成像技术实时获取井眼形态信息,并根据实际情况调整测井仪器的推进速度和测量频率,从而最大限度地减少井眼条件对测井数据质量的影响。同时,在施工前对井眼进行充分清洗和修整,可以有效降低井内杂物对测井仪器运行的干扰,提高测量信号的稳定性。

最后,在数据处理方面,可以开发先进的数据校正和滤波算法,以消除井眼条件和地层特性对测井信号的干扰。例如,针对多臂井径测井数据,可以采用自适应滤波技术去除因井眼不规则引起的噪声信号,从而提高套管内径变化信息的一致性。对于电磁探伤测井信号,则可以通过引入机器学习算法对信号进行智能分析,自动识别并剔除由地层特性引起的异常信号,从而提升套管壁厚和缺陷信息的提取精度。此外,结合多种测井数据进行联合反演也是一种有效的解决方案,通过综合分析多臂井径、电磁探伤以及其他测井数据,可以更全面地反映套管的实际状况,从而提高套管腐蚀评价的准确性。

综上所述,通过优化测井仪器结构、改进施工工艺以及开发先进的数据处理方法,可以有效应对井眼条件和地层特性对多臂井径与电磁探伤组合测井技术的影响,从而提高该技术在复杂环境下的应用效果,为套管腐蚀评价提供更加可靠的技术支持。

4. 组合测井技术与其他套管腐蚀检测方法的对比

4.1 传统检测方法概述

超声检测对套管壁厚的局部减薄具有较高的灵敏度,但其适用范围受到井眼条件限制,例如井内流体性质等均可能影响检测结果。磁粉检测通过观察磁粉聚集情况判断套管表面是否存在裂纹或其他缺陷,优点在于操作简便且成本较低,但其适用范围仅限于铁磁性材料,并且对非表面缺陷的检测能力有限,此外,通常需要停工进行,难以实现在线监测,这在一定程度上限制了其在油气田开发中的实际应用。另外,涡流检测适用于导电材料的无损检测,但对低电导率材料或复杂几何形

状的套管检测效果较差。总体而言,这些传统检测方法虽然各具特色,但由于其单一的技术原理和局限性,往往无法满足现代油气田开发中对套管腐蚀全面、高效评价的需求。

4.2 组合测井技术优势

两者结合不仅弥补单一技术的信息不足,还通过综合分析实现了对套管腐蚀状态的多维度评估,从而大幅提高了检测结果的可靠性。其次,从检测效率来看,组合测井技术具备一次下井完成多项参数测量的能力,显著减少了施工时间和作业成本。相比之下,传统检测方法通常需要多次施工且耗时较长。此外,组合测井技术还具有较强的适用性,能够在高温、高压及腐蚀性环境中稳定工作,适用于不同类型油气井的套管腐蚀评价。最后,组合测井技术的独特价值还体现在其数据处理的先进性与智能化水平上。通过对多臂井径和电磁探伤测井数据进行综合解释,可以建立更为科学的套管腐蚀评价指标体系。

5. 结论

(1) 多臂井径与电磁探伤组合测井技术在套管腐蚀评价中应用研究取得显著成果,为该领域检测与评估提供了新的技术支持。通过多臂井径测井技术对套管内径变化精确测量,结合电磁探伤测井对套管壁厚和缺陷的敏感检测,两种技术的优势得以充分结合,形成了对套管腐蚀状况的全面、准确评价能力。

(2) 该组合测井技术不仅能够清晰识别套管腐蚀的位置和程度,还能够通过数据综合分析建立科学的腐蚀等级评价体系,从而为油气田生产提供更为可靠的依据。不仅弥补了单一测井技术信息获取有限的不足,还通过数据融合与综合分析,提高了评价结果的准确性和全面性。这种技术集成模式为其他测井技术的发展提供了重要借鉴,同时也推动了套管腐蚀评价方法的创新与优化。

(3) 在特殊腐蚀形态检测和复杂井眼条件适应性方面,该组合测井技术未来还应加强与智能化技术结合,利用人工智能算法对测井数据进行自动化处理与解释,提高检测效率和评价精度;探索与其他先进检测技术的联合应用,形成多维度的综合检测体系,从而实现对套管腐蚀状况的全方位监控;优化测井仪器设计,增强其在复杂环境下的适应性和稳定性,同时开发更高效的数据校正方法,以应对不同井况和地层特性的影响。

[参考文献]

- [1]李硕;李文杰;王洪军;杨士振;杨成;刘元成.多臂井径和电磁探伤组合测试在大港油田的应用[J].国外测井技术,2021,42(5):115-117.
- [2]姜大伟.组合测井方法在深层气井套管质量评价中的应用[J].石油管材与仪器,2021,7(2):82-85.
- [3]刘辉.多臂井径与电磁测厚组合测井在长庆油田套损检测中的应用[J].石油管材与仪器,2022,8(3):81-84.
- [4]白耘旗;万军.油田开发测井技术应用与发展方向分析[J].石化技术,2024,31(5):178-180.
- [5]张生林;党博;陈龙;王斌;袁涛.电磁探伤与多臂井径组合测井仪地面控制系统[J].电脑知识与技术,2018,14(1Z):208-210.