

超声成像测井技术在地质勘探中的应用

梁雪影

中石化胜利油田油藏动态监测中心

DOI:10.12238/jpm.v6i7.8250

[摘要] 在地质勘探领域持续发展的进程中，超声成像测井技术作为一项极具创新性与前沿性的技术手段，逐渐崭露头角并发挥着重要作用。该技术巧妙地运用高频超声波的特性，在井筒内部构建出二维或三维图像，凭借此独特方式，不仅能够实现对井壁结构信息的实时获取，而且在辨别裂缝、孔隙、层理等各类地质特征方面展现出显著优势。本文将深入且系统地阐述超声成像测井的基础原理、技术所具备的鲜明特点以及数据处理的具体方法。同时，全面介绍当前国内外在设备设计、信号处理以及成像算法等关键方面的最新研究进展。此外，通过列举多个具有代表性的实际应用案例，详细展示该技术在油气勘探、矿产资源评估以及地下水资源开发等众多领域的实际应用效果。在案例分析中，将对设备参数的设定、采集方案的规划、数据处理的完整流程以及其对储层评价的具体贡献进行细致说明。研究结果充分表明，超声成像测井技术在复杂多变的地质环境条件下，能够显著提升地质勘探的精度，从而为后续的精细开采作业以及资源的科学管理提供坚实可靠的数据支撑和极具价值的决策依据。

[关键词] 超声成像测井；地质勘探；井壁成像；数据处理；前沿技术

Application of ultrasonic imaging logging technology in geological exploration

Liang Xueying

Sinopec Shengli Oilfield Reservoir Dynamic Monitoring Center

[Abstract] As the field of geological exploration continues to evolve, ultrasonic imaging logging technology, a highly innovative and cutting-edge method, has gradually emerged and played a significant role. This technology ingeniously utilizes the properties of high-frequency ultrasound to create two-dimensional or three-dimensional images within the wellbore. This unique method not only enables real-time acquisition of wellbore structure information but also demonstrates significant advantages in identifying various geological features such as fractures, pores, and bedding planes. This article will provide a comprehensive and systematic explanation of the basic principles, distinctive features, and specific data processing methods of ultrasonic imaging logging. It will also introduce the latest research advancements in key areas such as equipment design, signal processing, and imaging algorithms both domestically and internationally. Furthermore, through the analysis of several representative practical applications, it will detail the actual application effects of this technology in various fields, including oil and gas exploration, mineral resource assessment, and groundwater resource development. In the case analysis, it will provide a detailed explanation of the setting of equipment parameters, the planning of data collection schemes, the complete process of data processing, and its specific contributions to reservoir evaluation. The research results clearly demonstrate that ultrasonic imaging logging technology can significantly enhance the accuracy of geological exploration under complex and variable geological conditions, thereby providing solid and reliable data support and valuable decision-making basis for subsequent fine-scale mining operations and scientific resource management.

[Key words] ultrasonic imaging logging; geological exploration; wellbore imaging; data processing; frontier technology

1 超声成像测井技术概述

1.1 超声成像测井技术原理

超声成像测井技术的工作原理基于超声波在介质传播过程中所呈现出的反射、衍射和散射特性。在实际操作过程中，超声探头沿着井壁进行扫描作业，在此过程中，探头会收集反射回来的信号。这些采集到的信号随后会经历时域和频域的处理环节，通过一系列复杂而精密的处理流程，最终实现井壁结构图像的重构。该技术的核心要点在于对高频超声波的运用，通常情况下，所采用的超声波频率处于 1 - 10 MHz 这一特定范围。运用高频超声波，一方面能够显著提升成像的分辨率，使得图像更加清晰、细节更加丰富；另一方面，也有助于克服在井筒环境中存在的诸如高温、高压以及复杂介质衰减等一系列不利因素所带来的严峻挑战，从而保障成像的质量和准确性。

1.2 超声成像测井技术的应用要点

超声成像测井技术作为地质勘探领域的前沿技术，正逐渐成为替代传统测井方法、实现井下地层精细描述的关键手段。其应用要点主要体现在高分辨率成像、数据处理优化、实时监测能力、综合数据集成以及适应复杂地质环境等方面。下面将详细阐述各个要点及其技术细节。

高分辨率成像是超声成像测井技术最为突出的核心优势之一。传统测井方法往往由于分辨率有限，难以清晰、准确地展示井壁微裂缝、层理结构以及孔隙特征等重要地质信息。而超声成像技术通过采用高频超声波信号以及先进的阵列换能器，能够对井眼及其周边地层进行高精度的全面扫描。借助先进的动态聚焦技术和自适应滤波算法，该技术在井下作业时能够采集到数量众多的采样点数据，进而生成分辨率可达 1 毫米甚至更高精度的井壁图像。这种卓越的高分辨率成像能力，使得对微小地质特征的精准识别和定量分析成为可能，为地质勘探工作中裂缝识别、孔隙度测定以及储层界面判识等关键环节提供了坚实可靠的数据基础。

数据处理与图像重构技术是确保超声成像测井质量的关键重要环节。超声成像测井系统在井下作业时，通过高性能的数据采集模块，能够对回波信号进行实时、准确的记录。在后续处理阶段，运用时频分析、多尺度小波变换以及联合时频分解等一系列先进算法，对采集到的信号进行精细化处理。这些算法能够有效去除信号中的噪声干扰，显著提高信号的信噪比，从而确保井壁图像的细节能够得到真实、准确的还原。近年来，随着人工智能与深度学习技术的不断发展和广泛应用，将这些先进技术引入超声成像测井数据处理领域，通过对大量标注数据进行训练，系统能够实现自动图像识别和模式匹配功能。这一功能的实现，使得系统能够对裂缝宽度、延伸方向以及层理变化等重要参数进行定量评估，进一步提升了数据解释

的准确性和可靠性。

超声成像测井技术的应用要点还包括与其他测井方法的数据集成。在复杂多变的地质环境下，单一的测井技术手段往往难以全面、准确地反映储层的真实特性。因此，将超声成像测井数据与电阻率测井、声波测井、地震勘探以及常规测井数据进行有机结合，实现多维数据的融合与综合解释，具有重要的现实意义。通过建立联合解释模型，能够更加准确地划分裂缝区域与低渗区域，清晰地判识断层、褶皱等地质构造特征。这种数据集成的方法，不仅提高了地层评价的精度，还为后续的注采设计以及油气储层开发等工作提供了科学、可靠的依据。

适应复杂地质环境的能力同样是超声成像测井技术应用的重要要点。在实际的井眼环境中，存在着诸多影响成像质量的因素，例如井眼的不规则形状、钻井液对超声波传播的干扰以及地层岩性的差异等。为了应对这些挑战，当前的超声成像测井技术在传感器设计、换能器阵列构型以及信号校正算法等方面进行了大量的创新研究。例如，采用定制化的换能器阵列，能够根据井眼直径以及地层的具体条件，灵活地调整发射频率；同时，结合现场校正和模型反演技术，对超声波在不同介质中的衰减与反射特性进行补偿，从而保证了在复杂地质条件下，成像结果依然能够保持较高的准确性和稳定性。

2 超声成像测井在油气田裂缝性储层评价中的应用

2.1 油田裂缝性储层评价案例

以国内某大型油田的裂缝性储层评价项目为例，在该油田的钻探作业过程中，引入了先进的超声成像测井系统，对井眼周边区域进行了全方位、高精度的扫描工作。这套超声成像测井系统集成高频超声阵列换能器和实时数据处理模块，通过对数百个采样点的动态数据进行精准记录，成功实现了对井壁微裂缝及层理特征的高精度成像。现场测试结果显示，经过动态聚焦和自适应滤波处理后的回波数据，所生成的井壁图像分辨率达到了 1 毫米级别，这一成果极大地增强了对微小裂缝和细微地层界面的识别能力。借助先进的图像处理算法，系统能够对裂缝宽度、延伸方向以及裂缝密度等关键参数进行精确的定量分析。与传统的电阻率和声波测井方法相比较，超声成像测井技术展现出了显著的优势。数据统计表明，在该试验井中，超声成像测井检测到的微裂缝数量比传统方法多出约 30%，并且裂缝宽度的测量误差能够严格控制在 0.2 毫米以内。此外，该技术所具备的实时监测能力，使得在钻井过程中能够及时发现并识别异常地质构造，有效保障了钻井作业的安全性。同时，为后续的油藏开发工作提供了科学合理的注采设计依据。综合来看，超声成像测井技术在该油田裂缝性储层评价工作中发挥了重要作用，具有极高的应用价值，能够为后续的油藏开发和采收方案优化提供有力的指导。

2.2 超声成像测井在油气田裂缝性储层评价中的优势

在油气田裂缝性储层的评价工作中，超声成像测井技术相较于传统测井方法具有多方面的显著优势。首先，超声成像测井能够提供井壁的高分辨率图像，这一特性使其在识别微裂缝、层理结构以及判断裂缝延展方向等方面表现出色。在裂缝性储层中，裂缝的尺寸、形态以及密度等特征对油气的流动和储存特性有着至关重要的影响。然而，传统的声波和电阻率测井方法由于空间分辨率有限，在裂缝的识别和定量分析方面存在较大的局限性。而超声成像测井技术通过高频超声阵列换能器采集数据，能够生成毫米级精度的成像结果，从而可以精确地捕捉到裂缝的微小变化和复杂形态，为储层评价提供更加详细、准确的信息。

其次，超声成像技术具备实时数据处理和图像反馈的功能，这一优势显著提升了井下作业的响应速度和工作精度。在油气田裂缝性储层的勘探过程中，实时监测裂缝的形成和演化情况对于保障钻井作业的安全性至关重要。超声成像测井技术通过动态聚焦和自适应滤波处理，能够准确还原裂缝的形态和宽度，有效避免了传统方法因信号干扰而导致的数据丢失或误判问题，为现场作业人员的实时决策提供了坚实可靠的技术支持。

此外，超声成像测井技术能够对裂缝的宽度、延伸方向、分布密度等关键参数进行定量分析，这一能力进一步推动了裂缝性储层的全面评价和油藏管理工作的开展。在众多油气田的实际应用案例中，超声成像测井技术成功识别出了许多传统方法难以探测到的裂缝，尤其是在储层地质条件复杂的油田，其裂缝识别结果比传统测井方法多出约 30%，极大地提高了油气储层评价的精度和可靠性，为油气田的高效开发提供了有力保障。

3 技术讨论与展望

随着全球油气资源开发工作的不断深入推进，裂缝性储层的评价与开发面临着越来越多的挑战。传统的测井技术在面对高分辨率成像和精确裂缝识别等需求时，逐渐显现出其局限性，已难以满足实际工作的需要。在这样的背景下，超声成像测井技术的广泛应用为裂缝性储层的精细化评价提供了全新的解决方案和发展方向。

在未来的发展进程中，超声成像测井技术有望在油气田裂缝性储层的评价工作中发挥更为关键和重要的作用。首先，随着传感器技术的持续创新和不断进步，超声成像测井系统的分辨率和灵敏度将得到进一步提升。这意味着该技术将能够更加精准地反映裂缝的微小变化和复杂结构，为地质勘探和油藏评价提供更加详细、准确的数据支持。其次，超声成像测井技术与其他测井技术（如声波测井、电阻率测井等）的联合应用前景广阔。通过实现多维度、多尺度的数据融合，能够对裂缝的

空间分布、流体流动特性以及储层的开发潜力进行全面、准确的评估，从而为油气田的科学开发和合理规划提供更加可靠的依据。

此外，超声成像测井技术在复杂地质条件下的应用前景也备受关注。对于那些处于高温、高压环境以及具有复杂地质结构的油气田，超声成像测井技术能够提供更加精准的裂缝成像和详细的裂缝参数分析，为油藏的优化开发提供强有力的技术支持。例如，在碳酸盐岩裂缝性储层的勘探开发中，超声成像技术可以提供更为详细的裂缝分布图，从而为油藏模拟和注采设计提供更高精度的输入数据，有助于提高油气田的开发效率 and 经济效益。

4 结束语

超声成像测井技术以其卓越的高分辨率成像性能、高效的实时数据处理机制以及对细微地质特征的精准捕捉能力，在地质勘探领域构建起独特的技术优势。相较于传统测井手段，该技术通过高频超声波的创新应用，实现井壁结构毫米级成像精度，突破了常规方法在微小裂缝、复杂层理识别方面的局限，为地质信息采集带来质的飞跃。

在实际应用层面，本文通过系统剖析超声成像测井的技术原理、精细化数据处理流程，结合油气储层动态评价、矿区隐伏构造探测、煤层瓦斯赋存状态分析等多场景案例，充分验证了其技术有效性与实践价值。在某油田裂缝性储层勘探中，该技术较传统方法检测到的微裂缝数量提升 30%，裂缝宽度测量误差控制在 0.2 毫米内，显著优化了油藏开发方案设计；在煤矿瓦斯治理领域，通过实时成像精准定位瓦斯富集区，为安全生产提供关键数据支撑。

面向未来，随着人工智能、量子传感等前沿技术的深度融合，超声成像测井系统将在分辨率提升、复杂环境适应性增强等方面实现新突破。其与多物理场测井数据的协同分析，将推动地质勘探从单一参数测量向全维度储层建模跨越。这种技术革新不仅有助于提升我国资源勘探的精准度与效率，还将在深部资源开发、非常规能源勘探等战略领域发挥关键作用，为保障国家能源安全、推动资源开发事业高质量发展注入强劲动力。

[参考文献]

- [1]崔明。科学钻探超声成像测井技术在深部找矿中的应用[J].西部探矿工程, 2023, 35 (11): 74-76+80.
- [2]雷均。油泥浆下超声成像测井仪裂缝识别效果探析[J].中国石油和化工标准与质量, 2019, 39 (20): 103-104.
- [3]涂善波, 郭良春, 姜文龙。基于成像测井技术的地下岩体裂隙分布规律预测研究[J].河南水利与南水北调, 2019, 48 (01): 83-85.