

物探测井在地热开发中的应用

赵 珂

山西省煤炭地质一一五勘查院有限公司 山西 大同 037003

摘要：物探测井技术通过测量井孔周围岩石的物理性质，为地热资源开发提供关键数据支持。本文系统阐述了物探测井的定义、原理及常用方法分类，重点分析了其在地热开发全生命周期中的应用：勘探阶段可精准定位热储层并解析地质构造，建设阶段支持井身结构与套管下入的实时监测，生产阶段则用于井管健康状态评估及热储层动态跟踪。研究指出，未来物探测井将向智能化、多物理场融合、高精度化方向演进，并强化复杂地质条件下的适应性能力，为地热资源高效开发提供技术保障。

关键词：物探测井；地热开发；应用

引言：地热能作为清洁低碳能源体系的重要组成部分，其开发效率高度依赖对地下热储层空间分布与动态特征的精准认知。传统地质勘探手段受限于分辨率与实时性，难以满足地热开发全流程需求。物探测井技术通过整合电法、声波、核磁共振等多物理场探测方法，可实现井孔周围岩石物性参数的高精度获取与动态监测，成为破解地热开发技术瓶颈的关键工具。从技术原理出发，结合地热勘探、井建设及生产运营三大阶段的应用场景，探讨物探测井技术的实践价值，并展望其与人工智能、大数据等前沿技术融合的发展趋势，以期为地热产业技术创新提供理论参考。

1 物探测井技术概述

1.1 物探测井的定义与原理

物探测井是井中地球物理勘探的简称，属于物理探矿方法体系。其核心原理是通过钻孔测量岩石的物理性质（如电性、声学特性、放射性等），利用物理信号与地质参数的对应关系反演地下信息。例如，电阻率测井基于不同岩层导电性差异，通过电流场分布特征识别岩性；声波测井则通过测量声波在岩石中的传播速度，结合地层压力、孔隙度等参数建立定量关系。该技术将地质信息转换为物理信号，再经数据处理还原为地质信息，形成“测量-反演-解释”的完整链条，为资源勘探与工程地质提供关键数据支撑。

1.2 常用物探测井方法分类

物探测井方法按物理性质可分为五大类：

电法测井：包括电阻率测井、自然电位测井等，通过测量地层电导率差异划分岩性、识别含水层。例如，电阻率测井可区分砂岩（高阻）与泥岩（低阻），自然电位测井通过渗透层电位异常定位地下水补给方向。

放射性测井：涵盖自然伽马测井、中子测井等，利

用岩石放射性特征分析矿物成分。自然伽马测井通过铀、钍、钾衰变释放的 γ 射线强度区分页岩（高伽马）与砂岩；中子测井则通过中子与氢原子核的弹性散射反应，定量计算地层孔隙度。

声波测井：测量声波在岩石中的传播速度，结合地层压力、岩石力学性质评估储层质量。例如，声波时差与孔隙度呈负相关，可用于计算砂岩储层的有效孔隙度。

热测井：通过测量地温梯度、井内温度异常，定位地下水渗流通道或热储层边界。例如，在干热岩开发中，热测井可识别高温裂隙带分布。

工程测井：包括井径测井、井斜测井等，监测钻孔技术状态。井径仪通过机械-电学转换原理测量井壁直径变化，辅助判断套管变形或井壁坍塌位置^[1]。

2 物探测井在地热开发各阶段的应用

2.1 地热勘探阶段

2.1.1 热储层的定位与识别

热储层是地热开发的核心目标，其定位需结合物探测井的多参数综合解译。电阻率测井通过区分高阻基岩（如花岗岩）与低阻热储层（如裂隙带或含水层），结合自然伽马测井识别岩性变化，可初步圈定热储层空间范围。例如，在干热岩开发中，电阻率异常区常对应高温裂隙发育带，其低阻特征与周围致密岩体形成鲜明对比；在孔隙型热储中，中子测井与声波测井联合反演的孔隙度参数，可量化评估热储渗透性，孔隙度高于15%的区域通常具备商业开发价值。核磁共振测井通过测量地层中氢原子的弛豫时间，直接识别含流体裂隙，其分辨率可达厘米级，尤其适用于低渗透热储的精细刻画。此外，井温测井通过记录地温梯度变化，可辅助验证热储层温度异常，结合区域地热场模型，提高定位精度。实际应用中，需通过多井对比验证热储层连续性，降低勘

探风险。

2.1.2 地质构造分析

地质构造控制热储分布与热流体运移路径，物探测井是解析井旁构造的关键工具。电阻率成像测井通过极板阵列测量地层电阻率各向异性，可直观呈现井壁裂隙走向、倾角及张开度，结合岩心定向数据，可构建三维裂隙网络模型，揭示热储连通性。例如，在断层控制型地热田中，声波全波列测井发现的横波速度异常带常与断层破碎带对应，其低速特征反映岩石破碎程度，为断层产状判定提供依据。井斜测井结合地层倾角测井，可分析褶皱轴部或断层转折端应力集中区，指导热储富集区预测。此外，自然伽马-电阻率组合测井可识别地层不整合面或侵入体接触带，这些区域因热接触变质作用常形成高渗透带。综合应用多参数构造解释，可建立地热系统概念模型，优化后续勘探靶区部署。

2.2 地热井建设阶段

2.2.1 井身结构监测

井身结构监测是确保地热井安全钻进与长期稳定的关键环节。物探测井技术通过实时测量井径、井斜及地层接触关系，动态评估井身质量。井径测井利用多臂井径仪测量井壁直径变化，可识别井眼缩径、扩径或椭圆度异常，为调整钻井液性能或修正钻具组合提供依据。例如，在高温地热井中，井径突变可能反映地层软硬交错或钻头偏磨，需及时采取措施防止卡钻。井斜测井结合随钻测斜仪（MWD）数据，可连续监测井眼轨迹偏离设计方位的角度，确保井身符合靶区要求。此外，声波成像测井通过高分辨率井壁图像，可直观识别井壁裂隙、溶洞或破碎带，为固井质量评价提供地质依据。综合应用多参数监测数据，可构建三维井身模型，优化后续完井方案，降低井塌、漏失等工程风险。

2.2.2 套管下入监测

套管下入监测旨在保障套管居中、密封性及与地层的耦合质量。物探测井技术通过测量套管内径、壁厚及水泥环胶结状态，实现全流程质量管控。电磁测井利用套管导电性差异，可检测套管变形、腐蚀或接箍错位，其探测深度可达套管外数米，辅助判断套管外水泥返高。声波变密度测井（CBL）通过分析套管波与地层波的能量衰减，定量评价水泥环胶结强度，识别微环隙或窜槽通道。例如，在高温地热井中，水泥环完整性直接影响套管抗热应力能力，需通过变密度测井验证胶结质量。此外，伽马-密度测井组合可区分套管、水泥环与地层密度差异，辅助校准套管下入深度。实时监测数据可指导固井施工参数调整，确保套管-水泥环-地层一体化结

构稳定，延长地热井使用寿命。

2.3 地热井生产阶段

2.3.1 井管破损与腐蚀监测

地热井管长期处于高温、高压及腐蚀性流体环境中，易发生破损或腐蚀，导致生产效率下降甚至停产。物探测井技术通过多参数综合监测实现井管健康状态评估。电磁测井利用套管导电性变化，可定位套管穿孔、裂缝或接箍失效位置，其探测精度可达厘米级，适用于早期微破损识别。超声测井通过发射高频声波并接收反射信号，可生成井管内壁三维图像，直观显示腐蚀坑、结垢或机械磨损特征，结合壁厚测量数据量化腐蚀程度。例如，在氯离子含量高的地热流体中，超声测井可发现点蚀引发的局部壁厚减薄，为预防性维修提供依据。此外，中子活化测井通过分析井管周围流体成分变化，可间接推断腐蚀介质迁移路径，辅助优化缓蚀剂注入方案。综合应用多种测井方法，可建立井管全生命周期健康档案，降低非计划停机风险。

2.3.2 热储层动态监测

热储层动态监测是优化地热开采策略、防止热储衰竭的核心手段。物探测井技术通过长期跟踪热储物性参数变化，揭示热流体运移规律。分布式光纤测温（DTS）沿井筒连续测量温度场分布，可识别热储边界扩展或收缩，结合产量数据评估热突破风险。例如，在强化采热过程中，DTS可捕捉井筒周围温度异常升高，预警热储局部过热。核磁共振测井通过测量氢原子弛豫时间，可动态监测热储孔隙度、渗透率变化，量化分析水合物的溶解或裂隙闭合对渗透性的影响。此外，生产测井组合（如流量计+持水率计）可实时获取井内流体流速、相态分布，结合数值模拟反演热储压力场演变，为调整开采强度或实施回灌提供科学依据。通过多维度动态监测，可实现热储可持续开发，延长地热田生命周期^[2]。

3 物探测井技术应用的未来发展趋势

3.1 智能化与自动化发展

物探测井技术的智能化与自动化发展已成为行业转型的核心驱动力。依托人工智能、大数据、云计算等前沿技术，物探测井正从“数据采集-人工解释”的传统模式向“智能感知-自主决策”的闭环系统演进。例如，深度学习算法已广泛应用于地震资料处理中的初至拾取、断层识别及层序解释，通过卷积神经网络（CNN）构建的智能模型可自动提取多尺度地质特征，显著提升复杂构造解释的精度与效率。在测井领域，基于长短时记忆网络（LSTM）的智能测井解释软件可实现岩性识别、曲线预测的自动化，在鄂尔多斯盆地等工区的应用中，岩

性预测准确率提升至93%，较传统方法提高10个百分点。自动化技术的突破则体现在装备与流程的革新。智能可控震源可根据地表条件动态调整参数，无人机搭载物探设备实现无人化地形探测与数据回收，而数字节点采集系统通过集成可控震源与电子学技术，构建起百万通道级的陆上智能采集网络。

3.2 多物理场融合与综合解释

多物理场融合与综合解释是物探测井技术突破单一参数局限、提升地质认知精度的关键方向。传统测井方法通常依赖单一物理场（如电性、声学或放射性）数据，难以全面刻画复杂地质体的非均质性。而多物理场融合通过整合电阻率、声波、核磁共振、中子密度、自然伽马等多维度数据，结合岩石物理实验建立的物性-岩性-流体响应模型，可实现地质参数的联合反演。例如，在碳酸盐岩热储开发中，电阻率测井可识别裂隙发育带，声波测井能量化裂隙张开度，核磁共振测井则直接测量裂隙中的流体含量，三者融合可精准构建裂隙网络模型，指导定向钻井与压裂设计。综合解释技术则依托机器学习与大数据分析，将多物理场数据与地质、工程信息交叉验证，形成“数据-模型-决策”的闭环。未来，随着量子计算与数字孪生技术的引入，多物理场融合将实现实时动态解释，为地热开发、油气勘探等场景提供更高效、精准的决策支持。

3.3 高精度与高分辨率提升

高精度与高分辨率是物探测井技术突破地质复杂性的核心需求。随着地热开发向深层、非常规领域拓展，传统测井方法因分辨率不足难以捕捉微米级裂隙、纳米级孔喉等关键储层特征。未来技术发展将聚焦于硬件革新与算法优化双重路径：在硬件层面，纳米传感器、超导量子干涉仪（SQUID）等新型探测器的应用，可将测井分辨率提升至微米级，例如光纤传感测井通过分布式测量温度、应变场，可识别直径小于1毫米的微裂隙；在算法层面，基于压缩感知理论的稀疏反演算法、深度学

习驱动的图像超分辨率重建技术，可从低信噪比数据中提取高频地质信息，如利用生成对抗网络（GAN）对电阻率成像测井图像进行超分辨率增强，使裂隙识别精度提高3倍以上。

3.4 适应复杂环境与特殊井况

随着地热开发向深部、超高温、高压及非均质地层条件延伸，物探测井技术需突破传统环境适应性瓶颈。针对深部地热井（> 5000米）的高温（> 200℃）、高压（> 150MPa）环境，耐高温电子元件与特种陶瓷封装技术成为关键，例如采用碳化硅（SiC）半导体材料的测井仪器，可在300℃环境下稳定工作，同时通过高压密封舱设计保障传感器精度。对于水平井、大位移井等特殊井况，随钻测井（LWD）与旋转导向钻井系统深度融合，利用高速泥浆脉冲或电磁波传输技术实现实时数据回传，配合高精度井斜/方位传感器，确保测井数据在井眼曲率> 5°/30m的复杂轨迹中依然准确可靠^[3]。

结束语

物探测井技术作为地热开发的核心支撑手段，贯穿勘探、建设到生产全生命周期，通过精准定位热储、解析地质构造、监测井身安全及动态评估热储状态，为地热资源的高效开发与可持续利用提供了关键数据保障。未来，随着智能化、多物理场融合、高分辨率及复杂环境适应等技术的突破，物探测井将实现从“定性描述”到“定量表征”的跨越，推动地热产业向深部、绿色、低碳方向迈进。

参考文献

- [1] 刘慧中,李明辉,袁建飞等. 地热资源勘探开发助推广安转型发展[N]. 中国矿业报,2021-08-20(003).
- [2] 张志刚.油田水文地质勘探和地热工程设计[J].西部探矿工程,2021,33(08):184-186.
- [3] 王劲松,季嘉恒.地热资源勘探开发利用前景分析[J].住宅与房地产,2021,No.543(21):234-235.