

测井方法在地热储层识别与评价中的应用研究

刘 旭

河北省煤田地质局第二地质队（河北省干热岩研究中心） 河北 邢台 054000

摘 要：地热资源作为清洁、可再生的能源，其开发利用对于全球能源结构的优化和环境保护具有重要意义。测井方法作为地热储层识别与评价的关键技术，通过测量井中岩层的物理特性，为地热资源的勘探和开发提供了重要依据。本文详细探讨了测井方法在地热储层识别与评价中的应用，包括测井方法的基本原理、地热储层特征、测井方法在地热储层识别中的具体应用、测井方法在地热储层评价中的作用以及面临的挑战和未来发展趋势。

关键词：测井方法；地热储层；识别；评价

引言

地热资源是指地壳内可供开发利用的地热能、地热流体及其有用组分。地热储层的识别与评价是地热资源勘探开发的基础工作。测井方法作为地球物理勘探技术的一种，通过测量井中岩层的各种物理信息，为研究地热储层的特性提供了重要手段。本文旨在详细阐述测井方法在地热储层识别与评价中的应用，以期地为地热资源的科学开发提供理论支持和技术指导。

1 测井方法的基本原理

1.1 测井方法的定义与分类

测井方法，简称测井，是利用地球物理原理测量井中岩层的各种物理信息，以研究钻井地质剖面、解决地下地质问题的一门应用技术学科。测井方法按物理性质可分为电法测井、声波测井、放射性测井等；按测量方式可分为电缆测井、随钻测井等。其中，电法测井包括电阻率测井、自然电位测井等；声波测井包括声波时差测井、声幅测井等；放射性测井包括自然伽马测井、中子测井等。

1.2 测井方法的物理基础

测井方法的物理基础主要包括电学、声学、放射性等原理。电法测井利用岩层的导电性差异测量电阻率，声波测井通过测量声波在岩层中的传播速度研究岩层的孔隙度和渗透率，放射性测井则利用岩层的天然放射性或人工放射性源测量岩层的放射性强度。这些物理原理为测井方法提供了坚实的理论基础，使得测井技术能够在地热储层识别与评价中发挥重要作用。

2 地热储层的基本特征

地热储层通常具有高温、高压、含水的特点，其岩石类型、孔隙结构、渗透率等特性对地热能的开采具有重要影响。地热储层的岩石类型多样，包括火成岩、沉积岩和变质岩等。孔隙结构复杂，包括孔隙、裂缝和

溶洞等。渗透率是地热流体在岩层中流动能力的重要指标，对地热能的开采效率具有直接影响。

3 测井方法在地热储层识别中的应用

3.1 电阻率测井

电阻率测井，作为测井技术中的经典之作，其核心在于通过测量地层中岩石和流体的电阻率差异来识别地热储层。在地热储层中，高温地热流体富含矿物质，具有良好的导电性，导致储层电阻率相较于周围岩石显著降低。电阻率测井仪通过向地层发射电流，并测量回路的电压降，进而计算出地层的电阻率。在实际操作中，电阻率测井通常采用多种电极系组合测量，如侧向测井、感应测井等，以获取不同深度、不同范围的地层电阻率信息。这些电极系的设计旨在减少环境因素的影响，提高测量精度。通过对比不同深度、不同位置的电阻率数据，可以绘制出电阻率测井曲线，低阻异常区往往指示着地热储层的位置^[1]。电阻率测井的优势在于其能够直接反映地层中流体的性质，如流体的矿化度、温度等，这些信息对于评估地热储层的开采潜力至关重要。然而，电阻率测井也存在一定的局限性，如受地层水矿化度、岩石骨架导电性等因素的影响，可能导致测量结果的偏差。

3.2 声波测井

声波测井，作为另一种重要的测井方法，通过测量声波在岩层中的传播速度、衰减等参数，来研究岩层的孔隙度、渗透率等物理性质。在地热储层中，由于孔隙度较大且含有高温流体，声波在传播过程中会受到更多的散射和吸收，导致传播速度降低、衰减增大。声波测井仪通过向地层发射声波信号，并接收反射或透射回来的声波信号，进而计算出声波的传播速度、衰减等参数。这些参数与岩层的孔隙度、渗透率等物理性质密切相关。通过对比不同深度、不同位置的声波测井数据，

可以绘制出声波测井曲线,低速、高衰减异常区往往指示着地热储层的位置。声波测井的优势在于其能够直接测量岩层的孔隙度和渗透率,这些参数对于评估地热储层的开采条件至关重要。同时,声波测井还能提供关于岩层弹性性质的信息,有助于判断储层的力学稳定性。然而,声波测井也受地层岩性、孔隙结构等因素的影响,可能导致测量结果的误差。

3.3 放射性测井

在地热储层中,由于岩石类型和热液活动的差异,放射性强度可能发生变化,形成放射性异常区。这些异常区不仅有助于识别地热储层,还能提供关于储层热液活动、岩石类型以及地质构造等方面的信息。放射性测井仪通过测量地层中放射性元素(如钾、铀、钍等)发射的伽马射线或中子射线的强度,来计算地层的放射性强度。这些放射性元素在地球岩石中广泛存在,其含量和分布受地质构造、岩石类型等因素的影响。通过对比不同深度、不同位置的放射性测井数据,可以绘制出放射性测井曲线,异常区往往指示着地热储层或与之相关的地质构造。放射性测井的优势在于其能够探测到深部地热储层,对于那些埋藏较深、常规测井方法难以识别的储层具有重要意义^[2]。同时,放射性测井还能提供关于岩石类型、地质构造等方面的信息,有助于判断储层的成因和演化历史。然而,放射性测井也受地层中放射性元素含量、分布以及测量仪器精度等因素的影响,可能导致测量结果的误差。

4 测井方法在地热储层评价中的应用

4.1 渗透率测井

渗透率是描述流体在岩石中流动难易程度的物理量,它直接反映了岩石的孔隙结构和流体通道的情况。常用的渗透率测井方法包括微电阻率成像测井、核磁共振测井等。微电阻率成像测井通过测量岩层中微小电阻率的变化,来反映岩石的孔隙结构和渗透率。这种方法具有高分辨率、高灵敏度的特点,能够清晰地显示出岩层中的孔隙、裂缝等流体通道。而核磁共振测井则利用原子核在磁场中的共振现象,来测量岩石中流体的分布和渗透率。这种方法具有非破坏性、测量范围广的优势,能够准确地评估岩层的渗透率。渗透率测井的优势在于其能够直接反映岩层的孔隙结构和渗透率,为地热井的产能预测和开采方案设计提供重要依据。通过渗透率测井,可以了解地热储层中流体的流动通道和流动能力,进而评估储层的开采效率和可持续性。例如,高渗透率储层通常具有更好的流体通道和更高的开采效率,而低渗透率储层则可能需要采取特殊的开采措施来提高

产能。然而,渗透率测井也存在一定的挑战。例如,岩层的渗透率可能受到地层压力、流体性质等因素的影响,导致测量结果的误差。

4.2 孔隙度测井

孔隙度是描述岩石中孔隙体积与岩石总体积之比的物理量,它直接反映了岩石的储水能力和开采潜力。常用的孔隙度测井方法包括密度测井、中子测井等。密度测井通过测量岩石的密度来推算其孔隙度。在测井过程中,会向井内注入一种已知密度的流体(如重水),并测量流体与岩石混合后的密度。通过对比混合前后的密度变化,可以计算出岩石的孔隙度。而中子测井则利用中子与岩石中原子核的相互作用来测量孔隙度。中子测井仪器会向井内发射一束中子束,并测量中子与岩石相互作用后产生的散射或吸收信号。通过处理这些信号,可以得到岩石的孔隙度信息。孔隙度测井的优势在于其能够直接反映地热储层的储水能力和开采潜力。通过孔隙度测井,可以了解储层中孔隙的分布情况和储水能力,进而评估储层的开采价值和经济效益。例如,高孔隙度储层通常具有更大的储水空间和更高的开采潜力,而低孔隙度储层则可能需要采取特殊的开采技术来提高产能。然而,孔隙度测井也存在一定的局限性。例如,岩层的孔隙度可能受到地层压力、流体性质以及岩石类型等因素的影响,导致测量结果的偏差。

4.3 热容量测井

热容量是描述物质吸收或释放热量能力的物理量,它与岩石的比热、密度、孔隙度等因素有关。通过热容量测井,可以了解地热储层的热储能能力,为地热能的开采和利用提供重要依据。热容量测井通常采用热导率测井仪器进行测量。这种仪器会向井内发射一束热流,并测量热流在岩石中传播的速度和衰减情况。通过处理这些测量数据,可以得到岩石的热导率和热容量信息。热导率反映了岩石传导热量的能力,而热容量则反映了岩石吸收或释放热量的能力。热容量测井的优势在于其能够全面评估地热储层的热储能潜力和长期开采潜力。通过热容量测井,可以了解储层中岩石的热储能能力,进而评估储层的热能储量和开采潜力。例如,高热容量储层通常具有更大的热能储量和更高的开采潜力,而低热容量储层则可能需要采取特殊的开采技术或提高开采效率来弥补其热储能能力的不足^[3]。然而,热容量测井也存在一定的挑战。例如,岩层的热容量可能受到地层温度、岩石类型以及孔隙结构等因素的影响,导致测量结果的误差。

4.4 温度测井

温度测井,作为地热储层评价中的核心方法之一,通过测量井内不同深度的温度,来推断地热储层的温度分布。温度测井仪器通常采用高精度温度传感器,能够实时、准确地记录井内温度的变化。在测井过程中,随着井深的增加,温度测井曲线会呈现出明显的变化趋势,其中高温异常区往往指示着地热储层的存在。温度测井的优势在于其能够直接反映地热储层的温度特征,这是地热资源评价的重要参数之一。通过温度测井曲线,可以直观地看到地热储层的温度分布,进而估算出储层的平均温度、温度梯度等关键参数。这些参数对于评估地热能的开采效率和经济效益具有重要意义。例如,高温储层通常具有更高的热能储量和开采潜力,而温度梯度则反映了储层中热能的分布规律和传递效率。然而,温度测井也存在一定的局限性。例如,井内温度可能受到地层水流动、岩石导热性等因素的影响,导致测量结果的偏差。

5 测井方法在地热储层识别与评价中的优势与挑战

5.1 优势

测井方法作为地热储层识别与评价的重要手段,其高效性、准确性和非破坏性三大优势尤为突出。首先,高效性体现在测井技术能够在极短的时间内,通过井筒这一“窗口”,迅速捕获地下深处丰富的地质信息。这不仅极大地缩短了勘探周期,还显著提高了地热储层评价的时效性,为地热资源的快速开发提供了有力支撑。准确性则是测井方法的另一大亮点。测井仪器能够精准测量岩层的电阻率、密度、中子孔隙度、声波时差等多种物理参数,这些参数间接反映了岩层的成分、结构、孔隙度、渗透率及温度等关键特性。通过综合分析这些测井数据,能够更加准确地识别地热储层,评估其储热能力和开采潜力,为地热资源的合理开发提供科学依据^[4]。非破坏性则是测井方法的独特优势。与传统的钻探取样相比,测井技术不会对地下地质结构造成任何破坏,既保护了地热储层的完整性,又避免了因钻探而导致的环境污染问题。这种非破坏性的勘探方式,使得测

井方法在地热资源勘探中更具优势。

5.2 挑战

一是环境适应性:地热钻孔内高温、高压、潮湿的环境对测井仪器和测井方法提出了更高要求。需要研发耐高温、高压的测井仪器和适应复杂环境的测井方法。二是多解性:单一的测井方法可能具有多解性,即同一测井曲线可能对应多种地质解释。因此,需要综合多种测井方法进行解释和评价,以提高解释结果的准确性和可靠性。三是数据处理:测井数据处理和解释需要较高的专业知识和技能。随着测井技术的不断发展和测井数据的不断增加,对数据处理和解释能力提出了更高的要求。需要加强对测井数据处理和解释技术的研究和培训,提高技术人员的专业水平和解释能力。

结语

测井方法在地热储层识别与评价中发挥着重要作用。通过合理利用测井方法,能够高效、准确地识别地热储层并评价其特性参数。然而,面对地热钻孔内复杂的环境条件和技术挑战,需要不断研发新的测井仪器和方法以提高测井效果。未来,随着地球物理勘探技术的不断发展和完善,测井方法在地热资源勘探开发中的应用前景将更加广阔。同时,加强测井数据处理和解释技术的研究和培训也是提高测井效果的重要途径之一。通过不断的技术创新和应用实践,测井方法将为地热资源的开发利用提供更加精准、高效的技术支持。

参考文献

- [1]宋启文,刘翔宇.物探测井在贵州省瓮安县草塘镇地热勘查井中的应用研究[J].石化技术,2024,31(09):182-184.
- [2]张松,郝伟林,胡先才,等.地热井温度测井在热储层分析中的应用[J].世界核地质科学,2023,40(03):843-851.
- [3]杨武,张应文,王亮.贵州遵义北郊某地热测井解释方法[J].中国地质调查,2022,9(02):83-90.
- [4]王亚璐.流量测井在新疆中深层地热资源勘查中的应用[J].地下水,2022,44(02):41-43.