

地球深部热储参数的测定和分析

卢建荣

山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院) 山东德州 253015

摘要:测定和分析地球深部热储参数是利用、开发地热能资源的重要内容,基于科学准确的测定分析结果可对地热资源的富集程度、开发潜力和可利用性有较为准确的认识和了解。本文重点分析测定和分析地球深部热储参数的方法,为进一步研究和应用地热能提供参考和指导。

关键词:地球深部热储;参数测定;参数分析

引言:

地热能被视为一种可再生的清洁能源,具有巨大的潜力。而了解深部热储的参数对于地热资源的开发利用、地球动力学过程的理解以及地质灾害评估都具有重要意义。地球深部热储参数的测定和分析,是研究地球内部热能分布和流动特性的重要工作,通过测定和分析结果,可获取地下热能分布和传导特性的数据,为地热资源的开发利用和地球科学的深入研究提供基础数据和理论依据。

一、地球深部热储参数测定和问题分析

(一) 数据获取问题

由于地下深处不易直接观测,地球深部热储参数的数据往往比较稀缺,使得研究人员在对地球内部热能分布和流动特性的研究受到限制。测定地球深部热储参数时,通常需要开展钻探或物探等工作手段,这些工作手段成本高昂且具有不确定性,使得观测过程变得困难,且观测设备需要耐受高温、高压等极端条件,若是处理不当会造成数据结果准确性下降。由于地下结构的复杂性和不均匀性,地球深部热储参数的空间分辨率通常较低,在获取数据时无法获得足够详细的信息来描述地下热能的分布和流动特性^[1]。受到地壳演化、地震活动等多种因素影响,地球深部热储参数在时间上发生变化。

(二) 数据质量问题

通常使用的物探测量仪器可能存在精度不高、漂移、校准不准确等问题,导致获取的数据质量下降。观测环境可能受到电磁干扰、振动、温度变化等因素的影响,测量结果产生误差或噪声。设备故障、人为误操作、突发事件等因素发生,也会造成数据出现异常值,影响数据质量。在数据采集过程中遗漏某些关键数据点或信息,会降低数据完整性,影响分析和解释的准确性。数据处理期间计算错误、单位转换错误、插值方法选择错误产

生结果的偏差,试验条件、仪器设置等方面引起同一位置多次观测的结果之间差异较大。不恰当的数据存储和管理方式使数据丢失、混淆或错误。地球深部热储参数的测量和分析过程中,由于地下结构复杂性、观测限制等因素,存在一定的数据不确定性。

(三) 参数选取问题

地球深部热储是复杂的非线性系统,其行为和特性难以完全用简单的模型描述。如果所使用的模型假设与实际情况存在较大差异,或者模型参数选择不准确,参数选取结果会不准确。选择不适当的参数估计方法也会增加估计结果的偏差度。地球深部热储参数选取过程中,数据的限制和缺失影响结果,有限的观测点数目、数据空间分辨率不足或时间分辨率不一致等都增加了参数选取的不确定性。参数选取过程中,不确定性处理的不恰当也会对估计结果产生影响,若数据误差和模型假设的不确定性没有进行合理的处理和评估,参数选取结果将偏离真实值^[2]。

二、热储参数测试方法

(一) 物探

在收集区域地质资料和地球物理资料基础上,采用大地电磁测深(MT)等物探方法和手段,是以天然交变电磁场为场源,在地表接收与地下介质电性有关的正交电场、磁场分量,应用傅里叶变换将时间序列信号转换为频率域信号,通过阻抗张量计算得到不同频率的视电阻率、相位等参数。由于场源频带范围很宽($10^{-4}\text{Hz} \sim 10^3\text{Hz}$)和电磁场的趋肤效应,高频电磁场穿透浅、低频电磁场穿透深,所以通过研究大地对不同频率电磁场的频率响应,即可达到测深的目的,其勘探深度可达到数十至数百公里,进而解决相应的地质构造问题。不同地层的岩性一般不同,不同岩性一般会呈现不同的电阻率特性,电阻率的不同为划分地层提供了有利的依据。

在实际资料解释过程中，首先确定各地层岩性电阻率，判断电阻率的相对高低，找出标志电性层，根据地质资料确定各地层大概空间位置及形态^[3]。

（二）钻探

根据物探测量结果，选择合适的钻探位置和钻探深度。钻探过程中要设计合适的钻探方案，明确钻探深度、直径和位置等参数，获取代表性的热储参数数据。在钻探前期进行必要的现场勘查和地质调查，选择适当的钻探设备和钻探方法，满足测试所需的要求，了解热储层地层结构和特征。在钻孔过程中，根据需要采集热储参数样品并进行测试，以查明深部热储地质结构和物理、化学特性参数。

（三）物探测井

在钻探终孔后，我们会进行物探综合测井，同时校正钻孔深度，测井项目主要有自然伽玛、视电阻率、自然电位、声波、井温及井斜等，测井曲线可以清晰反应地层层序、厚度、含水层及厚度。在解译过程中我们通常选取测井标志层，这些标志层岩性、物性、层位和曲线特征都比较稳定和明显，厚度变化不大或有规律变化，反映在测井曲线上异常突出或特征明显，通常曲线反应高电阻率对应低伽马。测井曲线为进行地层的划分，岩性的识别、研究热储层分布的规律及地热井的成井下管提供了依据。

（四）抽水试验

进行抽水试验的目的是为了查明深部热储层的渗透性能、富水性、热储温度，确定单井流量，求取可靠的地热流体渗透系数、有效孔隙度或弹性释水系数、压力传导系数等相关水文地质参数，确定地热水流量与水位降深的关系，为地热资源评价和制定开发利用规划提供依据。

三、地热性能参数测试

（一）钻探与取样

确定测量的深度范围和地点，综合考虑地热资源的分布情况、地质构造、地下水位等因素。了解目标区域的不同岩层的类型、结构、厚度、岩性等特征，选择合适的钻探设备和钻进方法。根据使用钻探数据的具体目的，确定工程要求，判断是否需要取得连续的岩心样本、岩石物性测定的精度要求、需要测量的孔隙度或渗透率范围等。按照目标深度和地质条件选择合适的钻探设备，不同类型的钻机和钻具适用于不同类型的地质条件和需要。选择钻探方法之前要勘查地质条件和观察工程要求，每种方法都有其适用的地质条件和特点。钻井操作必须

遵守相关的安全规范和操作规程，在选定的地点进行钻孔操作，通常会使用旋转钻头或钻杆来钻进地下，钻井过程中，岩层样本和水体样本会随着钻探设备返回到地面。当钻进到特定深度或遇到感兴趣的地层时，停止钻进并提取钻具。此时，取出的岩层样本可以通过岩心管或其他采样装置进行保护，并对每个样本进行编号和记录。将取样的岩层样本进行分类、描述和打包，妥善保存以防止污染或损失，水体样本可以通过采集装置进行收集和储存。

（二）实验室分析

气体置换法通过让气体充满岩石样本中的孔隙空间，并测量与岩石样本相互作用后的气体体积来计算孔隙体积。液体置换法使用液体替代岩石样本中的孔隙空间，并测量所需液体的体积来计算孔隙体积。经过孔隙度测量后，可以计算出岩石中孔隙体积与总体积之比，从而确定岩石的孔隙度，在评估地球深部热储层的渗透性和储存能力时，这个参数具有重要意义。恒压法通过施加恒定的压力差，测量流体在岩石样本中的流动速度来计算渗透率。恒流法通过保持恒定的流体流量，测量所需的压力或压差来计算渗透率。

热导仪测定法使用热导仪设备，通过测量岩石样本在稳态条件下的热传导确定导热系数。装置包含一个热源和两个温度传感器，其中一个传感器位于热源附近，另一个传感器距离热源一定距离处。将岩石样本夹持在两个传感器之间，并通过热源向岩石样本施加恒定的热流，然后测量两个传感器之间的温度差。根据热流、温度差以及样品尺寸和几何形状等参数，可以计算出岩石样本的导热系数^[4]。

传统的玻璃温度计是一种常见的测量水样温度的工具，通过读取液体中的液柱高度确定温度。电子温度计使用电子传感器测量温度，通过数字显示屏显示结果。最常见的类型是基于热敏电阻（RTD）或热电偶（thermocouple）原理的温度计。红外线温度计可以通过测量物体发出的红外辐射来确定其表面温度。热电阻传感器是一种常见的热敏电阻传感器，特别适用于测量液体中的温度。

离子色谱仪是用于分析水样中离子的浓度和组成的常用设备，使用柱色谱技术和离子交换树脂来分离并检测不同的离子。准确的色谱柱和检测器，可测量钠离子（ Na^+ ）、钾离子（ K^+ ）、镁离子（ Mg^{2+} ）以及其他离子的含量。原子吸收光谱仪（AAS）是一种常用的分析仪器，可用于测量水样中金属离子的含量。通过将水样中的离

子转化为气态或溶液状态，使用特定元素的特征吸收光谱进行测量，测量钠、钾、镁等离子含量。一般情况下，水样需要经过过滤、稀释或酸化等预处理步骤，适应仪器的要求，提高测量结果准确。在进行离子含量测量之前，需要校准仪器，使用标准溶液建立各个离子的浓度与检测信号之间的关系。根据测量结果和校准曲线，计算水样中不同离子的浓度，并进行数据分析和解释。

（三）岩石热导率测试

使用热导仪等设备测量岩石样本的导热系数可以帮助评估岩石的导热性能，从而确定地热储层的传热能力。导热系数是描述物质导热性能的参数，它衡量了岩石在温度梯度下传递热量的能力。地热系统中的热传导：了解地热储层岩石的导热特性，可以帮助我们理解地热系统中热量如何传导和分布。

基于测得的导热系数模拟传热和优化分析，评估地热储层的传热效率和优化热能开采方案。测量导热系数确定热源与热井之间的距离，有效传递和利用地热能。在进行导热系数测量时，确保岩石样本的表面光滑平整，没有明显的气孔或裂缝，以避免热传导的影响。使用热

导仪等设备，在稳态条件下施加恒定的热流，测量样本两端的温度差，计算导热系数。样品的尺寸和几何形状对测量结果有影响，根据实验要求选择合适的样品尺寸。

四、结语

地球深部热储参数的测定和分析是提高能源利用效率的关键步骤，通过钻探取样、实验室分析和岩石热导率分析，更好地理解热储的工作原理和性能特点。持续监测和分析热储参数，不断改进和优化系统的性能，实现更可靠、高效的地热能利用，为可再生能源领域的发展和全球能源转型做出重要贡献。

参考文献：

- [1] 计志鑫. 低温地热分流热源双级ORC系统性能分析及优化研究[D]. 辽宁工程技术大学, 2021.
- [2] 王福. 某机场能源站供暖系统多热源智能调度策略研究[D]. 西安建筑科技大学, 2021.
- [3] 石宇. 多分支井循环二氧化碳开采地热机理与参数研究[D]. 中国石油大学(北京), 2020.
- [4] 刘建. 增强型废弃油气井地热利用系统研究[D]. 中国科学技术大学, 2018.

