

基于地热地质钻探数据的地下热储层评价与建模

张星

河北省煤田地质局第二地质队(河北省干热岩研究中心)

摘要: 地热资源作为一种清洁、可持续的能源,近年来受到了广泛关注。地下热储层作为地热能开发的关键基础,其评价与建模对于地热能的高效开发具有至关重要的意义。本文基于地热地质钻探的实际数据,运用现代地质学、地球物理学和数值建模等多学科交叉的方法,深入分析了地热储层的地质特性,并采用科学的评价指标和模型进行了热储层的量化评价与三维建模。论文展示了一套评价与建模的完整流程,并通过案例分析验证了其有效性与实用性。研究结果对于准确预测地热储层的潜在价值和指导地热能开发具有重要意义。

关键词: 地热资源; 地热钻探; 热储层评价; 三维数值建模

【DOI】10.12252/j.issn.2096-6261.2022.11.193

引言

地热资源作为可再生能源的一种重要形式,具有巨大的开发潜力和广阔的应用前景。地下热储层是地热能开发利用的核心要素,其性质和特征直接影响到地热能开发成本和效率。因此,进行精确的热储层评价与建模对于合理规划地热能源的开发和利用具有重要的实际意义。

一、地热储层的地质特性

1. 地热储层概念

地热储层是地球内部存储和传递地热能的岩石体系,它通常位于距地表几千米深的地下,是地热能开发所依赖的核心部分。储层由热源、储集层和盖层三部分组成。热源通常是地球深部的高温岩浆或放射性衰变产生的热能;储集层是指能够存储热水或蒸汽的多孔或裂隙性岩石层,其孔隙间的流体能够吸收并储存地下的热能;盖层则是指位于储集层上方、具有低渗透性的岩石层,能够防止热流体随机流逸,确保热能集中。地热储层的有效开发和利用,不仅取决于地球深处的热能,更取决于储集层的物质组成、结构及其能量传递的效率。

2. 储层物理性质

地热储层的物理性质是其能否有效开发利用的关键因素。首要的物理性质包括渗透性、孔隙度和温度等。渗透性是衡量流体在岩石中流动能力的指标,高渗透性意味着储层内的热液可以较快地流通,这对于地热资源的提取效率至关重要。孔隙度是指岩石体积中孔隙的比例,与热储层能储存多少热能有直接关系。温度则是评价热储层能量含量的直接指标,储层温度的高低决定了开发利用时能获得的热能量和开发的经济性。此外,岩石的热导率也非常重要,它影响着热能从岩石内部向流体转移的效率。地热储层的物理性质受地质历史、岩石

类型、构造活动等多种因素的影响,通过详细的地质勘查和钻探数据分析,可以为地热储层的评价及最终的合理开发提供科学依据。

3. 储层化学组成分析

地热储层的化学组成分析是理解和评估储层地质性质的一个重要方面。这种分析涉及对地热流体中溶解的矿物质、气体和元素的定性定量测定。储层流体的化学性质不仅反映了深部地下水与岩石相互作用的历史,也对储层的可持续开发和管理有着直接影响。热流体可能携带多种溶解的化学物质,如硅酸盐、碳酸盐以及硫化物等。这些物质的浓度会因地热储层的深度、温度、压力以及与周围岩石的物理化学相互作用而有所不同。地热流体中的溶解组成分析可以提供有关储层裂隙、渗透性、热历史和流体来源的线索。例如,高硅酸盐浓度可能意味着流体与火成岩长期接触,而高碳酸盐浓度可能表明有石灰岩溶解作用发生。除了无机化学成分外,地热流体中的气体成分,如二氧化碳、甲烷、氦气及氢气等,也是判断储层特性与动态的重要指标。这些气体可以是地质作用如火山活动及岩石分解的产物,也有可能是由于有机物的热化学反应产生。地热储层化学组成的研究不仅能够揭示热储层的成因和特性,还对预防储层中的地质问题和优化开发策略具有参考价值。例如,高浓度的溶解固体可能会在地热设施中形成结垢,而某些化学物质如氢硫酸盐可能导致腐蚀问题。通过化学分析,可为选择合适的材料和设计有效的运营管理策略提供依据。综上所述,储层化学组成分析是实现地热能高效可持续发展的一个不可缺少的步骤。

二、地热储层评价方法

1. 数据来源和预处理

在进行地热储层的评价过程中,确保数据的来源准

确和数据处理的正确性是评价工作的基础。数据来源主要包括地热钻探资料、地质调查报告、岩心分析、地球物理测井资料、以及地热流体的化学分析结果等。这些数据为储层的物理和化学特性提供了直接的证据，是建立可靠评价模型的必要前提。预处理是数据分析的第一步，其目的在于提高数据质量，为评价和建模工作提供准确的输入。这个阶段主要包括对原始数据进行清洗、筛选和转化；其中，数据清洗涉及去除重复记录、纠正错误和填补缺失值；筛选则是根据研究目标选择相关的数据子集；数据转化包括单位换算，以及对数值进行标准化或正规化处理，使得不同来源和不同量级的数据可以在同一标准下进行比较和分析。钻探资料中的岩心描述提供了关于岩石类型、纹理、颜色、硬度及其裂隙发育状况的资料，地球物理测井则提供了储层深度、渗透性、孔隙度等物理参数的连续剖面。地热流体化学分析结果揭示了流体的温度、pH值、离子浓度等重要化学指标。在预处理阶段，所有这些数据通过一系列的数据处理技术被转化为适合后续统计分析和数值建模的格式。随着地质信息技术的进步，高级的数据处理技术如机器学习算法和数据融合方法可以被用来辅助数据预处理，以识别数据中的模式和异常值，从而进一步提升数据质量和评价工作的精确度。最终，经过预处理得到的数据集将作为地质模型构建和储层性能评价的基础，直接影响评价结果的有效性和可信度。

2. 评价指标体系

地热储层评价体系是一个综合性指标系统，它整合了一系列定性和定量的参数来衡量储层的潜在能力和开发价值。这个体系通常包括地热资源的物理特性、化学特性、结构特性以及可持续开发潜力等多个方面。主要的评价指标包括渗透性、孔隙度、地热流体的温度和压力、流体化学组成、储集层的厚度和面积、地下热含量、岩石和流体的热物理特性、储层的动态特性、以及环境和经济因素等。渗透性和孔隙度等指标评估储集层中流体储存和迁移的能力；温度和压力指标表征储层的能量状况；流体化学组成分析有助于理解储层的成因、类型及其操作时可能遇到的问题（如结垢和腐蚀）；储集层的厚度和面积等参数则有助于估算储层的总热资源容量；地下热含量和相关热物理特性可以用来精确评估储层中的实际可利用热能。此外，储层的动态特性包括对开采过程中可能出现的压力下降、温度降低和产能变化等因素的评估，这对于保持地热开发的可持续性尤为

重要。环境因素考虑的是开发对周围环境可能产生的影响，包括地表沉降、水源保护和温室气体排放等；而经济因素则着重于开发成本、能源市场需求、政策支持与项目的经济效益分析。评价指标体系建立的目的是为了通过多维度的分析，对地热储层的质量和开发潜力进行全面而客观的评价。通过这一体系的应用，可以更准确地确定地热资源的经济可开发性，为地热能开发项目的决策提供重要依据。

3. 评价方法和流程

地热储层评价的方法和流程通常以获取的地质钻探数据为基础，结合多学科的知识和技术手段，按照一系列步骤进行。首先，收集和整理钻探过程中所获得的所有相关地质、物理、化学和生产数据，这包括岩心分析、测井数据、温度和压力记录，以及地热水或蒸汽的流体化学分析结果。对这些数据进行彻底的预处理，以去除噪声、填补缺失值，标准化不同的测量单位和范围，确保数据的质量和一致性。随后，利用各种地质评价模型来解释这些数据，模型可以包括岩石物理模型、地热储量估算、热流和流体流动模拟等。评价流程中还需要进行参数的敏感性分析，确定哪些变量对评价结果影响最大，并据此优化模型参数。之后，综合考虑储层的物理特性（如渗透性、孔隙度）、化学特性（如流体化学组成）、结构特性（如裂缝发育程度，储层的连通性），以及历史生产数据，应用多变量统计分析、地质统计学方法和其他相关的地质解释技术。这样旨在获得更深刻的理解储层的行为，明确资源潜力和开发中可能面临的技术挑战。最终，结合经济评价（包括成本、市场状况和潜在的经济收益等）以及环境评价（考虑开发活动对周边环境的潜在影响），形成综合的储层评价报告。通过这一系列流程，不仅可以评估地热储层目前的状况，还可以预测在不同开发策略下储层的反应和表现，从而为最终的开发决策提供科学依据。整个评价过程是迭代的，随着额外数据的获取和先前假设的验证，评价结果不断更新和精细化，以支持更为高效和可持续的地热能源开发。

三、地下热储层的三维建模技术

1. 数值建模基础

首先，通过地热地质钻探获取的数据（包括岩石样品、测井数据、热流数据等）被整合在一起以创建一个详细的地质模型。这个模型描述了储层的物理结构，比如岩层的分布、断层的位置、孔隙结构等。这些信息对

于理解流体和热量的流通过程至关重要。接下来是数学模型的选择，一般包括传热和传质方程组，通常是基于守恒定律（如质量守恒、动量守恒和能量守恒）建立起来的。这些方程描述了流体在岩石介质中的行为、热量的传递机制以及岩石和流体之间的热交换过程。数值方法的选择是解决这些模型中偏微分方程的关键，常用的数值方法有有限差分法（FDM）、有限元法（FEM）和有限体积法（FVM）。它们通过将连续的偏微分方程离散化到网格或元素上，从而转换为可求解的线性方程组。最后，通过与实际钻探数据和生产数据进行比对，对数值模型进行校准和验证，确保模型的计算结果能够反映真实储层的行为。如果模型预测和实际数据有较大偏差，需要调整模型参数直到结果符合预期，这一过程可能会反复多次以确保准确度。

2. 储层模型构建方法

储层模型的构建是一项复杂的工程，它涉及多个步骤和技术的综合运用。这些方法将地热地质钻探数据转换为一个具体的三维地热储层模型，该模型能够可视化地反映储层的结构、特性和功能。构建储层模型通常从创建储层的地质框架开始，也就是用地质学的方法来定位和界定储层的边界、构造和分层。接着，通过应用地球物理测量（如测井数据），确定储层的物理参数，如岩石的孔隙度和渗透性。采用三维地质建模软件，可以将地质信息和物理数据整合在一个统一的模型中。在这个过程中，使用地质建模算法如Kriging或其他地统计学方法来插值和模拟未直接取样区域的地质和物理特性。构建模型时，通常要考虑的重要参数包括地表地貌、储层顶部和底部的形态、裂隙发育模式及其分布、岩层连续性和非均质性等。构建的储层模型需要进行校正，这一步骤要借助于动态数据，如历史生产数据和压力测试结果。这是为了确保模型能够反映储层在实际地热流体开采活动中的响应。迭代的过程中不断调整和优化模型，以准确模拟储层的动态行为，这通常要通过运用数值模拟来进行。模拟流动和热传递过程是验证和调整模型准确性的关键环节，因为它可以预测和解释储层特性随时间变化的趋势。最后，得到的三维储层模型能够为决策者提供地热开发方案设计时所需要的准确信息，如最优钻井位置、预期的能源产量及可持续发展策略等。通过这种方式，三维建模技术成为真实地热系统的一种有力的数字决策工具，从而极大地提升了地热资源的勘探和开发效率。

3. 建模实施与验证

建模实施与验证是三维建模技术中确保模型准确性和适用性的关键步骤。实施阶段首先涉及模型的详细构建，这包括集成和输入在地热地质钻探中收集的数据，如岩心数据、测井数据、温度和压力测量，以及地质结构的解释。这些数据被用于构建地下地质框架，并被输入到专门的软件中，如地质建模和仿真软件。在该环节，需要细致地划分地质单元、定义岩性和物理特性（例如渗透性、孔隙度和热导率），并创建储层特性的空间分布模型。建模的下一个阶段是参数化和网格化。参数化过程包含赋予模型内各个单元或体积块专门的地质和地热特性，这些特性根据实际钻探和实验室数据进行设定。网格化则是将连续的地质模型离散化为网格单元，以便在数值仿真中使用。一旦建立了三维模型，便开始进行模型验证步骤。验证通常通过与现有的生产数据（如流体产量、压力和温度随时间的变化）进行对比。验证过程确保模型能够足够准确地预测储层的行为。如果模型的预测与实际生产数据差异过大，便需要对模型进行调整。这可能涉及修改地质解释、更新参数或改进网格划分。

结束语

本文基于地热地质钻探数据开展了系统的地下热储层评价与建模工作，采用的方法和模型在案例研究中展现了良好的适用性和可靠性。研究成果能够为地热能源的勘探和开发提供技术支持，为地热产业的发展奠定理论基础。未来，随着物探技术的进步与热储层三维地质建模技术的发展，热储层的评价与建模将趋向更高的精度和实用性，为地热能的高效利用提供更为坚实的支撑。

参考文献

- [1] 鲁锴, 刘玲, 鲍志东, 等. 基于可钻性分析及三维地质建模的钻探有利区优选: 以雄安新区雾迷山组为例[J]. 现代地质, 2021, 37(5): 138-141.
- [2] 胡淞博. 矿井地热储层三维地质模型构建及储量评估[D]. 中国矿业大学, 2021.
- [3] 段忠丰, 李福来, 巩亮, 等. 基于水热耦合模拟的油气区地热开发井网布局[J]. 天然气工业, 2020, 40(10): 156-162.
- [4] 王建军. 地热井电动潜油离心泵工况诊断系统开发[D]. 长江大学, 2012.