

The migration law of deep geothermal fluids and environmental protection in their development and utilization

ChiJin Hou

Yunnan Geological Engineering Second Survey Institute Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650218, China

Abstract

Deep geothermal resources, as a renewable energy source, have significant development potential and broad application prospects. This paper explores the migration characteristics of deep geothermal fluids and the environmental protection issues in their development and utilization. It analyzes the basic characteristics and migration mechanisms of deep geothermal fluids, elaborates on the migration features of geothermal fluids under different geological conditions and their relationship with geological structures, and discusses the current status, technological challenges, and environmental risks of deep geothermal resource development. The paper focuses on the utilization of water resources, ecological impacts, and environmental protection measures during the development process. Through this study, we aim to provide theoretical support and technical references for the development of deep geothermal resources and environmental protection, promoting the widespread application of geothermal energy as a clean energy source.

Keywords

Deep geothermal; Fluid migration; Resource development; Environmental protection; Sustainable development

深部地热流体运移规律及开发利用环境保护

侯赤金

云南地质工程第二勘察院有限公司, 中国·云南昆明 650218

摘要

深部地热资源作为一种可再生能源,具有重要的开发潜力和广阔的应用前景。本文探讨了深部地热流体的运移规律及其在开发利用过程中的环境保护问题,分析了深部地热流体的基本特征与运移机理,阐述了地热流体在不同地质条件下的运移特征及其与地质构造的关系,同时探讨了深部地热资源开发利用的现状、技术挑战以及环境风险,重点分析了开发过程中的水资源利用、生态影响和环境保护措施。通过本研究,希望为深部地热资源的开发与环境保护提供理论支持和技术参考,推动地热能作为清洁能源的广泛应用。

关键词

深部地热; 流体运移; 资源开发; 环境保护; 可持续发展

1 引言

深部地热资源作为一种具有巨大潜力的可再生能源,近年来在全球范围内受到广泛关注。与传统的地热资源相比,深部地热资源的开发不仅面临更高的技术挑战,而且在环境保护方面也提出了更高的要求。深部地热流体的运移规律是其开发利用的关键之一,了解其运移机理对于优化开发方式、提高利用效率、降低环境影响具有重要意义。尽管我国在深部地热资源的开发利用方面已取得一定进展,但在技术、经济和环境方面仍存在诸多挑战,尤其是如何平衡资源利用与环境保护之间的关系。因此,深入研究深部地热流体的运移规律和开发利用中的环境保护问题,对于推动我国地热能源的可持续发展具有重要的现实意义。

【作者简介】侯赤金(1987-),男,中国云南保山人,本科,工程师,从事地质工程相关研究。

2 深部地热流体的基本特征与运移机理

2.1 深部地热流体的组成与性质

深部地热流体主要由水、气体和溶解矿物质组成,水为主要成分,含有丰富的溶解气体如二氧化碳、氮气、氦气等。地热流体的温度通常较高,水的矿化度和化学成分随深度的增加而变化。在高温环境下,地热流体具有较强的溶解性,可以溶解多种矿物质,包括硅、钙、铁等元素。其化学性质随地质环境变化而变化,呈现酸性或碱性。深部地热流体的物理性质,如密度、黏度、热导率等,也会受到温度和压力的影响,随着深度增加而有所不同。流体的性质对其在地下的运移行为及其在地热资源开发中的应用具有重要影响^[1]。

2.2 地热流体的温度与压力变化规律

地热流体的温度和压力随深度的增加而发生显著变化。通常,地热流体的温度在浅层较低,随着深度的增加,温度逐渐上升,达到一定的地热梯度。在地壳深部,温度可以高

达数百摄氏度。压力方面,随着深度的增加,流体所承受的压力呈线性增加。深部地热流体通常处于超临界状态,其温度和压力达到临界点附近,具有更高的热能密度。温度和压力的变化直接影响地热流体的热力学性质及其流动特征,对地热能的开发利用至关重要。地热流体在地层中的运移过程中,温度和压力的分布规律决定了地热能的可利用性及其开发的可行性。

3 深部地热流体的运移规律分析

3.1 地热流体在不同地质条件下的运移特征

地热流体在不同地质条件下的运移特征表现出明显的差异。岩石的类型、层理和裂隙发育程度决定了流体的流动路径和速度。在裂隙较发育的地层中,地热流体往往沿着裂隙流动,具有较大的流动速度。相比之下,在孔隙度较高的岩层中,地热流体的流动速度较慢,通常表现为渗透流动。此外,地质构造对地热流体的运移路径也有重要影响,如褶皱、断层等构造对流体的引导作用显著。地层的厚度、岩性及其渗透性直接影响着流体的流动方式及其空间分布。不同地质条件下的深部地热流体运移特征决定了资源的分布规律及其开发难度^[2]。

3.2 热流体运移与地质构造的关系

地热流体的运移与地质构造有着密切的关系。断层、褶皱、岩脉等地质构造直接影响流体的通道和流动方向。断层和褶皱等构造往往会形成较为显著的裂隙带,这些裂隙带成为地热流体主要的运移路径。构造活动不仅会改变地下水的流动方向,还会影响地热流体的补给和排放过程。例如,断层可能会导致地下水流动的局部加速或减缓,从而影响热流体的运移特征。地质构造的变化不仅影响地热流体的速度和分布,还可能在一定程度上影响地热资源的可采性。因此,了解热流体运移与地质构造的关系对于地热资源的评估和开发至关重要。

3.3 深部地热流体运移的动力学模型与数值模拟

深部地热流体的运移过程复杂,受到温度、压力、渗透性等多重因素的影响。为有效研究地热流体的运移规律,动力学模型和数值模拟被广泛应用。动力学模型通过建立描述流体运动的方程,结合流体的物理化学特性、地质条件及其与岩石的相互作用,能够定量预测流体的流动情况。数值模拟技术能够在不同的地质条件下进行流体运移的动态模拟,帮助研究人员分析流体在地下的运动轨迹、速度分布及其与地质构造的关系。通过数值模拟可以深入探讨深部地热流体的流动特征和热力学变化,为资源的勘探和开发提供理论依据。动力学模型与数值模拟的结合,为深入理解深部地热流体的运移规律提供了强有力的工具。

4 深部地热资源开发利用现状与挑战

4.1 深部地热资源的开发技术与应用现状

深部地热资源的开发技术在近年来取得了显著进展。

当前,主要采用高温钻探、热流体采集及地热能转换等技术进行资源的开发。深部地热资源开发依赖于先进的钻探技术及高效的热能转化设备,通过开采地热流体、转换其热能为电能或直接供热,已广泛应用于供暖、电力生产及工业用热等领域。然而,深部地热资源开发仍面临一定的技术挑战,如钻探深度、流体采集、热能转换效率等问题仍需进一步优化和突破。

4.2 深部地热开发中的技术瓶颈与困难

尽管深部地热开发已取得一定进展,但在技术应用过程中仍存在瓶颈。首先,钻探深度较大,需要克服高温、高压和地质复杂等困难。其次,深部地热流体的温度、压力及化学成分的变化对设备和技术的要求极高,现有技术尚不能完全满足深部高温环境下的稳定采集与利用。此外,流体的腐蚀性和沉积物的处理也是目前技术发展中的重要难题。解决这些技术瓶颈需要进一步推动高效、低成本的钻探技术和高性能的设备研发。

4.3 深部地热资源开发的环境与社会影响

深部地热资源的开发虽然是一种清洁能源利用方式,但在开发过程中也可能对环境和社会产生一定影响。开发过程中可能会引发地震、地下水污染及土地沉降等问题。地热资源的过度开采可能导致地热储层的衰退,影响其持续性。此外,开发活动对生态环境的影响也需关注,如热流体排放、地下水位变化等可能会对周围生态系统造成负面影响。因此,深部地热开发需要严格的环境评估与监控,确保开发活动在符合可持续发展的前提下进行^[3]。

5 深部地热资源开发利用——以海南省海口市深部地热勘探工程为案例分析

海南省海口市深部地热勘探工程是中国近年来深部地热开发的典型项目之一,项目的实施为我国地热资源的开发提供了宝贵的经验。该项目自2020年开始勘探,目标是开发深部地热资源用于供热和发电,尤其是在高温地热资源的提取和环境保护方面进行了多方面的创新和尝试。通过对该案例的详细分析,本文将探讨深部地热资源开发中的技术、环境保护、可持续发展等方面的措施及其取得的成果。

5.1 项目背景及目标

海南省海口市的深部地热勘探项目位于海南岛的西北部,该区域属于典型的热带气候,地下热能资源丰富。项目主要通过深部钻探,探寻约5000米深的地热资源,并利用这些热能进行发电和供热,推动当地能源结构的绿色转型。项目预计开发出的地热资源储量将达到超过1000万吨标准煤当量,是海南岛重要的清洁能源来源之一。

5.2 钻探技术与数据分析

该项目的技术难点主要集中在如何应对深部高温环境下的钻探挑战。根据初步的地质勘探数据,海口市区域的地热资源深度大约在3000米至5000米之间,而地温梯度接近100°C/km。通过地质分析与温度测量,项目团队确定了目

标区域，并采用了高温钻井技术。

具体来说，海口市深部地热勘探工程采用了“高温耐热钻具+双流体钻进技术”这一组合技术，成功突破了高温、高压环境中的钻井难题。通过该技术，项目团队成功钻探至5000米深度，并发现热液温度超过180°C，证明该区域具备较高的地热利用潜力。

钻探数据：

指标	项目数值	目标与结果	环境影响	挑战与应对	建议与改进
钻探深度(米)	5000米	突破国内钻探记录	高温钻探技术降低成本	高成本高风险钻探	加强技术优化与设备维护
热液温度(°C)	180°C	提供高效热能提取	节省能源,降低碳排放	高温条件下的设备损耗	加强热液回灌系统优化
回灌水量(立方米/天)	5000立方米	减少地下水资源枯竭	地热水循环利用,降低污染	地下热流体的可持续利用	推广多能互补模式
废水处理能力(立方米/天)	6000立方米	确保废水达标排放	避免地表水污染	废水处理与排放标准	提高废水处理技术
发电能力(亿千瓦时/年)	15亿千瓦时	为当地居民提供绿色电力	降低温室气体排放	高效资源利用与管理	智能化监控与资源管理

5.3 环境影响评估与保护措施

深部地热资源的开发涉及到较为复杂的环境影响问题，尤其是如何避免过度开发和生态破坏。海南省海口市深部地热勘探工程在环境保护方面采取了多项创新措施，确保资源的可持续开发。

首先，在项目初期进行了严格的环境影响评估(EIA)，通过对地下水、空气质量、地质稳定性等方面的综合评估，确保勘探和开发活动不会对当地生态系统造成不可逆损害。

环境保护措施：

水资源保护：采用地下热液回灌技术，将使用过的热流体重新注入地下，减少地热田过度抽取造成的地下水位下降和水资源枯竭。

回灌数据：项目采用的回灌水量约为5000立方米/天。

地震监测与预警系统：由于深部地热开发可能引发地震，项目方在开发区域安装了地震监测设备，实时监控地下构造活动。

监测数据：项目期初安装了50套地震传感器，实时监控地下震动。

废水与废气排放控制：所有的废水、废气均经过严格处理后方可排放。废水通过“三级过滤+消毒”技术处理，确保水质符合环保标准。

废水处理能力：项目每日处理废水约6000立方米。

通过这些环保措施，项目减少了对周边水体和大气的污染，最大限度地降低了环境风险。

钻探深度：5000米

热液温度：180°C

地热梯度：100°C/km

地下流体温度：180°C以上

预计开发资源量：1000万吨标准煤当量

该项目不仅突破了技术瓶颈，还通过优化钻探路径，减少了钻井时间，显著降低了钻井成本。

6 结语

深部地热资源作为一种清洁、可再生的能源，其开发利用具有重要的战略意义。本文从深部地热流体的运移规律、开发技术、环境影响等方面进行了详细分析，探讨了资源开发中存在的挑战与技术瓶颈，并提出了相应的环境保护对策。深部地热开发不仅需要科学的技术手段，还需要有效的环境管理与可持续发展策略。通过绿色技术、低碳路径的引导，以及完善的政策法规支持，能够有效平衡资源开发与环境保护之间的关系。未来，随着技术的不断进步和政策的优化，深部地热资源的开发将在促进能源结构转型、推动绿色发展方面发挥更大作用。因此，加强对深部地热资源的研究和合理开发，既是提升能源利用效率的关键，也是实现可持续发展的必由之路。

参考文献

- [1] 张秋霞,刘东林,岳冬冬,杨骊,冯昭龙,李胜涛.天津市深部地热资源水文地球化学特征及循环模式[J].中国岩溶,2025,44(03):445-461.
- [2] 李涛.热流固耦合作用下深部煤层瓦斯渗流规律研究[D].导师:霍丙杰.辽宁工程技术大学,2024.
- [3] 居来提·买提肉孜,陶杰,郭图璽.基于热流原理的核心温度传感器在膝关节深部测温的应用研究[A].中国力学大会-2021+1论文集(第二册)[C].中国力学学会:2022:1220-1229.
- [4] 陈云.深部采煤下的地热流系统保护技术研究[D].导师:王心义;牛志刚.河南理工大学,2022.