

增强型地热系统开发中诱发地震的机制、 监测与风险管控研究综述

苗璇

辽宁大学环境学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年11月7日; 录用日期: 2026年2月15日; 发布日期: 2026年3月27日

摘要

本文系统综述了增强型地热系统(EGS)开发过程中诱发地震活动的机制、实验研究现状、数值模拟研究及预测挑战。随着全球向清洁能源转型,干热岩地热资源因其储量大、稳定性高等优势成为重点开发方向,但其水力压裂过程中诱发的地震事件已成为制约EGS技术商业化应用的关键问题。分析了全球多个EGS项目的地震案例,表明诱发地震主要与孔隙压力变化、孔隙弹性效应、热应力和断层活化等机制相关。其中,流体注入导致的孔隙压力增加是触发断层滑动的直接因素,而注水速率、地质构造背景及先存断层分布是影响地震活动规模的核心参数。研究指出,通过微震监测、数值模拟和实时应力场分析可实现风险预警,但EGS地震的滞后效应和复杂耦合机制仍待深入探索。最后,需结合地质力学建模与现场监测数据,制定科学的注水策略以平衡地热开发效率与地震风险控制。

关键词

干热岩, 水力压裂, 激活断层, 诱发地震, EGS

Review on the Mechanism, Monitoring and Risk Management of Earthquakes Induced during Enhanced Geothermal System Development

Xuan Miao

School of Environment, Liaoning University, Shenyang Liaoning

Received: November 7, 2025; accepted: February 15, 2026; published: March 27, 2026

Abstract

This paper systematically reviews the mechanisms, experimental research status, numerical simulation studies and prediction challenges of earthquake activities induced during the development of Enhanced Geothermal Systems (EGS). As the world transitions towards clean energy, dry hot rock geothermal resources with large reserves and high stability have become a key development direction. However, the earthquake events induced during the hydraulic fracturing process of dry hot rock have become a key issue restricting the commercial application of EGS technology. Analyzing the earthquake cases of multiple EGS projects worldwide, it is found that the induced earthquakes are mainly related to pore pressure changes, pore elastic effects, thermal stress and fault activation mechanisms. Among them, the increase in pore pressure caused by fluid injection is the direct factor triggering fault sliding, while the injection rate, geological structure background and pre-existing fault distribution are the core parameters affecting the scale of earthquake activities. The study points out that risk warnings can be achieved through microseismic monitoring, numerical simulation and real-time stress field analysis, but the lag effect and complex coupling mechanism of EGS earthquakes still need to be further explored. Finally, it is necessary to combine geological mechanics modeling and on-site monitoring data to formulate scientific injection strategies to balance the efficiency of geothermal development and earthquake risk control.

Keywords

Dry Hot Rock, Hydraulic Fracturing, Activated Faults, Induced Earthquakes, EGS

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

随着全球经济不断增长，能源消耗量也在增加，这导致环境问题日益严重。因此，各国都在制定能源战略，以发展可再生清洁能源并提高其利用效率。根据 EIA (Energy Information Administrator) 2017 年的调查分析，预计到 2050 年，总能源消耗量将增加超过 10%。科技进步和政策导向将推动天然气和可再生能源的开发和利用效率。在全球向多元化新能源时代转型的大趋势下，中国作为能源消费大国和负责任大国，肩负着促进地区能源转型、实现绿色低碳可持续发展的重任。作为巴黎气候协定的缔约方，中国积极应对气候变化，提出了 2030 年碳达峰、2060 年碳中和的远景目标。国家“十四五”规划明确提出“推动能源清洁低碳安全高效利用”，并在中央财经委员会第九次会议上把“双碳”目标纳入了我国生态文明建设整体布局，大力开发清洁可再生能源，契合我国能源重大战略需求。

与此同时，传统能源如煤的消耗将保持相对稳定。随着全球对环境保护意识的提高，可再生能源和油气将成为未来社会和经济发展的主导力量。地热资源是一种可再生能源，具有巨大的潜力。自 20 世纪 70 年代以来，美国、欧洲和日本一直在深入研究地热能的应用潜力。近年来，随着技术的飞速发展，地热能的开发在全球范围内掀起了一股热潮，其开发量也逐年攀升。地热能作为一种重要的清洁可再生能源，具有低碳环保、稳定高效等特点，与风能、太阳能等能源相比，不受季节、气候、昼夜等外界因素干扰，发电利用效率达 73%，约为太阳能的 5.2 倍、风能的 3.5 倍，是一种现实并具有竞争力的新能源。

地球的地热资源潜力巨大，根据地热能的开采方式，主要分为水热型和干热岩型(HDR)。干热岩是一

种没有水或蒸汽的热岩体，主要包括花岗岩和变质岩，其特点是孔隙度低、渗透性差，目前我国地热能开发仍以水热型为主，普遍埋藏于距地表 3~10 km 的地层深处，在此深度处开采的干热型地热能量已达到 200×10^{18} EJ。其分布温度范围很广，在 150°C ~ 650°C 之间，所蕴含的能量相当于全球石油、天然气和煤炭总能量的 30 倍。中国科学院对中国大陆 3~10 km 深处的干热岩资源进行了评估，总储量据估算达到 2.09×10^{25} J，相当于 860 万亿吨标准煤。地层深度在 3.5~7.5 km 范围内的温度约为 150°C ~ 250°C ，可利用的地热能量相当于中国 2010 年能源总消耗的 5300 倍。然而，尽管水热型地热能占已探明储量的 10%，但大量未被开发的地热潜能隐藏在干热岩中，我国中低温地热直接利用居世界首位，而高温干热岩地热开发尚处于起步阶段。EGS 的研究与开发已有 40 年的历史，美国、英国、法国、日本、澳大利亚等发达国家是早期的研究主体，我国的研究才刚刚起步。目前 HDR 的开发面临诸多挑战，如大体积人工裂隙热储的建造等，因此 EGS 实现商业化还需要进行大量的研究和技术开发。

目前，增强型地热系统(Enhanced Geothermal System, EGS)被认为是一种被广泛研究和应用的地热开采方法。截至 2023 年，国际上已开展的 EGS 项目约有 41 个[1]。EGS 采用人工形成地热储层的方法，从低渗透岩体中经济地提取深层热能，形成人工地热系统。通过采用人工手段，例如大规模水力压裂，形成具有一定导流能力的地热储层，从而实现对于干热岩的经济高效开采、用于发电。根据美国能源部 2008 年颁布的增强型地热系统技术评估报告，对 EGS 技术的评估需要关注地质条件、经济可行性以及 EGS 在其他技术领域的适用性，最终通过耦合模型预测评估能源开发的可行性。然而，EGS 开发过程中存在着钻井施工、热储建造、循环试验和电厂运行等方面的诸多问题，甚至可能会引发地震活动，这对于地热资源的可持续开发和安全运营构成了挑战，因此 EGS 项目的探索任重道远。许天福和陆川等人[2] [3]分别对增强型地热系统的发展现状进行了综述，并简要介绍了其中的关键技术，例如资源靶区定位、水力压裂储层改造、热流循环示踪监控等。

总的来说，干热岩水力压裂是一个极其复杂的多相流固热耦合过程，涉及施工参数、地质力学参数、裂隙、孔隙以及岩体等多种介质。由于各物理过程之间存在强耦合效应，尤其是在地质条件复杂、尺度大、范围广的现场情况下，很难通过简单的理论分析和室内物理模型试验来模拟、测量和研究水力压裂所引发的强震过程。因此，必须依靠数学计算模型来进行深入分析和研究。本综述将探讨干热岩水力压裂诱发地震的机制、实验研究现状、数值模拟研究以及预测地震活动性所面临的挑战[1]。

2. EGS 诱发地震的机制研究

EGS 是一种利用地下岩石的热能来产生电力或热能的技术。虽然 EGS 被认为是一种可持续的清洁能源，但其开发过程可能会导致地震事件。EGS 诱发地震的机制是一个复杂的问题，涉及多种因素的相互作用。研究人员对 EGS 诱发地震的机制进行了广泛的研究。

2.1. 孔隙压力变化

EGS 注入流体会改变岩石孔隙中的压力分布，从而影响岩石的力学性质。EGS 系统中通过向地下注入高压流体来增加岩石的渗透性，这种方法会显著增加岩层的孔隙压力。当孔隙压力增加到足以克服周围岩石的摩擦力时，原有的或新形成的断层可能会滑动，从而诱发地震。孔隙压力的变化直接影响断层的稳定性，是 EGS 诱发地震的一个关键因素。流体注入导致断层带内的孔隙压力增加从而减少断层的有效正应力诱发地震。

EGS 过程中，通过向地下岩石层注入高压水来刺激岩石裂缝并提高地热能的产出。当水被注入到岩石层中时，它会填满岩石的孔隙和裂缝，增加了孔隙中的压力。这种增加的压力可能导致周围岩石层的应力状态发生变化，进而引发地震(见图 1)。此外，EGS 过程中不断注入的水压可能会超过岩石层的承受

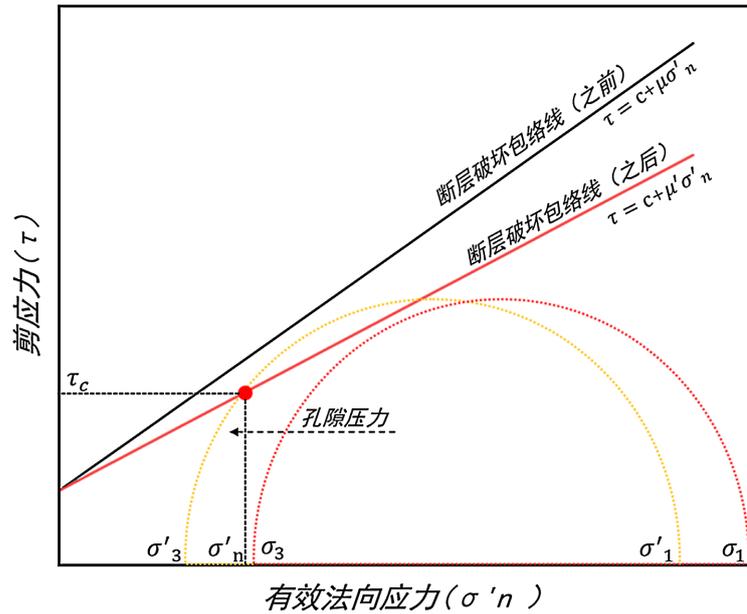


Figure 1. Schematic diagram illustrating the activation of faults caused by changes in pore pressure
图 1. 孔隙压力变化引起断层活化示意图

能力，导致岩石的破裂和变形，进一步增加了地下孔隙的压力。这种压力的积累可能在岩石层达到临界点时引发地震事件。因此，孔隙压力的变化在 EGS 诱发地震的机制中起着至关重要的作用。深入研究孔隙压力变化对地震的影响，有助于科学家更好地理解地下岩石层的响应和行为，从而制定更有效的地震监测与管理策略，减少地震风险，确保 EGS 技术的可持续发展和环境安全。

Yeo 等人[4]以 2017 年韩国浦项增强型地热系统附近 M_w 5.5 诱发地震为例，提出了注入诱发地震的多过程因果机制。孔隙压力模型揭示了孔隙压力变化在临界应力断层上引发地震活动，库仑静态应力传递模型揭示了地震相互作用促进了持续的地震活动，从而导致更大的事件。基于这些结果提出了诱发地震活动的因果机制：孔隙压力增加和地震相互作用导致断层减弱，并最终在过程后期引发更大的地震。实时评估孔隙压力变化、初始地震活动位置以及进行早期地震活动的库仑静态应力转移时减少地震带来的损害的策略。Schultz 等人[5]-[8]通过对 Fox Creek、Alberta 的水力压裂数据诱发地震，探索注入参数与地-震活动响应的关系，认为诱发地震与使用较大注入量的完井有关，并且地震生产率与注入量成线性关系，注入压力和注入速率与地震响应的相关性不显著。进一步的研究结果表明，地质因素在地震生产率中起着重要作用，空间相关性证明了这一点。该结果通过地震指数修正的频率-幅度分布进行量化，为预测诱发地震活动提供了一个框架。

一般伴随着工业注水活动注水量的增加，诱发地震活动速率会有明显的增加。如 2010 年开始，在俄克拉荷马州观测到的诱发地震活动伴随废水回注的增加显著增加，在 2010~2015 年期间加拿大诱发地震活动速率随着水力压裂注水的增加显著增加。Schultz 等人(2018) [7]对大量注水诱发地震活动进行统计，发现注水操作期间地震活动增加最快，统计各地的诱发地震活动与水力压裂井场的关系，发现 90% 以上的诱发地震活动发生在注水操作期间，震级最大的诱发地震活动也在此。

注水期间产生的孔隙压力是响应沿先前存在的断层的水力压裂增产而触发的。同样的现象在中国四川盆地南部也可以观测到，Tan 等人[9]研究认为页岩气区块 N5 井场附近的地震活动发生时间与水力压裂操作时间紧密相关。Tan 等人利用页岩气区块内局部地震网络的监测数据，研究了页岩气生产井附近的地震，这些井具有详细的注入数据。通过比较所研究井场的地震发生时间和增产时间表，发现地震活动与水

力压裂之间存在明显的相关性。地震速度层析成像结果表明，由于流体扩散导致的原有断层的重新激活是观测到的地震的主要原因。

地震诱发通常由于深层基底中先前存在的断层被诱导活化，重新激活造成的。Raleigh 等人[10]在科罗拉多州兰奇利的一个 Rangely 油田进行的实验表明了地震控制的可行性。他们指出，地震活动的变化是由地震活跃区流体压力的受控变化产生的。地震聚集在断层周围，该断层经过二次恢复作业产生高孔隙压力带。对储层岩石摩擦特性的实验室测量和在地震带附近进行的原位应力测量用于预测在预先存在的裂缝上触发地震所需的流体压力。流体压力是通过交替注入和从穿透地震带的井中回收水来控制的。对观察井中的流体压力进行监测，并利用储层的计算机模型推断注入井附近的流体压力分布。这个实验结果证实了流体压力对地震活动的预测影响，并表明在断裂带控制流体压力，可以起到控制地震的作用。但在增强型地热系统也有观测到注水期间并未产生有感诱发地震活动的现象。尹欣欣等人(2021) [11]认为，在注水操作期间没有发生有感地震与该区域缺少大规模断层分布有关。但是，在诱发地震活动的结束时间一般在水力压裂注水操作结束之后，也有地震活动开始活跃的案例，这种现象称为滞后效应。例如 Yeo 等人[4]发现韩国浦项的 EGS 项目在压裂关井后的 2 个月后发生了最大的 M_w 5.5 地震。

2.2. 孔隙弹性效应

岩石的孔隙弹性效应是另一个重要因素，它是在岩石受到压力变化时，孔隙中的流体压力对岩石本身的微小变形产生影响，这种微小变形可能是地震发生的前兆。在岩石受到压裂压力时，孔隙的弹性变化会影响岩石的渗透性和裂缝的扩展模式。岩石中的孔隙在受到压力时会发生压缩，这可能导致孔隙度的减小，从而影响岩石的渗透性的孔隙压缩效应。孔隙的弹性响应与岩石固体矩阵的弹性响应相互耦合，产生孔隙弹性耦合效应。这种相互作用可能导致非线性效应的产生，如孔隙度与应力之间的非线性关系。研究这种耦合效应有助于更准确地预测岩石在水力压裂过程中的行为。孔隙弹性效应也可以影响裂缝的扩展方向。在岩石中存在着各向异性，孔隙弹性会影响裂缝扩展的路径和速度。因此，对孔隙弹性效应的深入理解有助于优化压裂设计，实现更有效的地热能源开发。通过数值模拟和实验验证，可以进一步探究孔隙弹性效应对岩石水力压裂的影响。

钱永胜等人[12]通过数值分析认为由注入流体引起的孔隙弹性效应与断层的位置和方向息息相关。而井口附近断层应力变化受孔隙压力主导，致使库伦应力增加，从而引起地震活动率增加。Raleigh 等人[10]的理论忽略了流体注入引发的孔隙弹性效应，在此基础上，Rozhko 等人[13]提出孔隙压力和应力的单向耦合，并认识到在距离注入井相对较远的点处，剪应力变化可能会超过孔隙压力的变化。在完整的孔隙弹性理论中，孔隙压力的变化产生了应力，而平均正应力的变化引起孔隙压力的变化[14][15]。孔隙弹性描述了岩石变形的物理过程以及通过可变形孔隙的流体流动，并且更准确地估计地壳内的应力和孔隙压力的变化。此外，最近关于孔隙弹性耦合的研究也表明，应力的间接传递可以沿着断层引发地震事件，特别是关闭注入后也可能引起地震事件的增加[16]。因此，现在引起断层活化的关键机制被主流认为是作用在断层上的孔隙压力和应力的扰动[17]。

2.3. 热应力

EGS 通过注入水或其他工质来增加岩石中的热量以提高地热能源的开采效率。注入的高温流体会改变岩石的温度分布，进而引起岩石的热应力变化，从而影响地下应力场的分布，进而影响地下岩层的稳定性。热应力主要来自于温度的梯度变化以及岩石的热膨胀和热收缩。这种热应力变化可能导致地下岩石的破裂和滑动，引发地震。当岩石受到较大的热应力影响时，可能会引发地震事件，特别是在已存在微小裂缝或地质断层的区域。热应力与地下地质结构的耦合效应是研究 EGS 诱发地震机制的重要方面之

一[18]-[20]。

2.4. 地震滑动或储层蠕变

EGS 活动可能会诱发岩石的地震滑动或储层的蠕变,进而导致地震事件的发生[21][22]。地震滑动是指地下断层或裂缝在应力作用下发生位移的过程,是地震事件的直接结果。在 EGS 项目中,通过水力压裂施工可能会增加地下岩石的应力,进而诱发地震滑动。这种滑动可能发生在已存在的地质断层上,也可能导致新的断层形成。当岩石受到持续性应力作用时,会发生蠕变现象,即岩石在长时间内发生形变而不破裂的现象。储层蠕变可能会导致地下岩石的稳定性下降,增加地震发生的风险。地震滑动、储层蠕变和其他因素之间存在复杂的相互关系。例如,热应力可能会影响岩石的蠕变特性,从而进一步影响地震的发生和扩散。因此,需要进行综合的研究,深入探讨不同因素之间的耦合效应[23],以全面评估地震风险并采取相应的管理措施。

3. 地热系统开采引发的地震事件对比分析

地热系统开采引发的地震事件是一个备受关注的话题。地热能作为一种清洁可再生能源,受到了广泛的关注和利用。然而,地热能的开采过程中可能会对地下岩石层造成压力变化,从而触发地震事件。这些地震事件的规模和频率可能会因地热能开采的方式、地下地质条件以及地震监测与管理措施的不同而有所不同。有些地震可能只是微小的震动,而另一些可能会达到较大的震级,对周围地区造成不同程度的影响。人类工业活动导致的地震,一般认为都是外部因素改变了断层面的应力状态从而诱发地震,如水库蓄水因增加断层荷载或者改变孔隙压产生地震,废水回注因增大孔隙压力而产生地震。随着 EGS 水力压裂技术在工程中的广泛应用,引发的地震事件也随之增多,大多数事件震级较小,但是一些较大震级的诱发事件也在全球发生,例如 2017 年、2018 年以及 2019 四川盆地页岩气水力压裂引发的断层再激活和震级高达 M_w 4.7 [24]、 M_w 5.7 以及 M_w 5.4; 2018 年 5 月 28 日吉林省松原市发生 M_w 5.7 地震[14]; 2019 年加拿大西部盆地发生 Red Greek 4.2 级地震; 2015 年 2 月 8 日 Fox Greek 地区发生了 M_w 3.0 地震; 2021 年 5 月 21 日,青藏高原东巴彦哈尔区块发生 M_w 7.4 级地震[15]; 2013 年 12 月 16 日的巴东县 M_w 5.1 级地震[16]都被证实与流体注入有关。海口 EGS 场地[12]的微震分析表明,流体注入通过改变地下应力场,可能激活原有的断层,导致地震活动。同时在研究区的流体注入会导致附近断层的应力发生改变,致使可能引起微小的断层活化现象,但由此产生的地震震级较小,工程风险较低。张海宽[25]推测前端流体压力以及应力传递是引起停水后仍诱发微震的两方面原因;注水方式、注水速率以及裂缝与主应力夹角对诱发地震的影响较大。此外,地热井的钻探和压裂操作本身也可能触发微震,尤其是当操作接近或穿过活跃断层线时。

EGS 项目通常能直接观测到水力压裂操作期间产生的微震地震活动,目前也已积累了大量关于 EGS 项目诱发的微震活动的研究成果。针对美国 Coso 项目,Julian 等人(2010) [24]研究发现注水压裂期间,微震活动丛集发生且其展布方向与井附近先存断层的走向基本一致。Cladouhos 等人发现美国 The Newberry Volcano EGS 项目的诱发地震活动,水平方向集中分布在井附近 100~200 m 的范围内,同时分析得到 2014 年的水力压裂操作期间诱发地震事件的 b 值约为 1,根据地震活动发生的时间和迁移距离拟合的水力扩散系数约为 $0.006 \text{ m}^2/\text{s}$ 。在 4 周的水力刺激期间,在 195 bar 的最大井口压力注入了 250 万加仑地下水。注入量变化、热剖面 and 地震活动表明,NWG55-29 井的裂缝渗透性得到了增强。15 个站位的微地震阵列(MSA)定位了 398 个事件,震级从 M_0 到 $M_{2.26}$ 。注入热降解区域隔离材料(TZIM)后的温度记录表明,由于分流器,至少有两个流动区被阻塞,并且打开了一个或两个新区域。在回流液中检测到了 TZIM 的分解产物,表明该材料按预期降解。这项工作成功地证明了大容量低压刺激与非机械分流器技术和微

地震监测相结合用于油藏测绘的可行性。许天福等人(2012) [2]总结 Raft River 场地的微震事件沿着该区域的断层发展, 说明原先地层中的先存断层结构会影响到水力压裂制造储层的效果。

综上, 流体注入诱发地震活动空间分布特征主要受到诱发地震活动发震机制、区域构造背景以及操作井的位置、流体注入深度等综合因素的影响, 因此诱发地震活动的水平分布、深度分布都与操作井的位置、作业储层的深度以及该区域先存断层的分布综合相关, 主要特征呈现近井孔、深度较浅, 丛集的诱发地震活动簇沿先存断层分布。基于上述框架, 将各项目的关键参数与地震特征汇总于表 1。

基于表 1 的对比分析, 可归纳出以下规律:

1) 先存断层是控制中强震发生的一级因素。Basel 和 Pohang 项目均存在明确先存断层, 且 Pohang 断层处于临界应力状态, 最终诱发 M_w 5.5 级破坏性地震; 而 Newberry、Cooper Basin 等项目因缺乏大规模断层分布, 即使注入量更大, 最大震级仍控制在 M_L 3.0 以下。这表明, 断层存在本身并非决定性因素, 断层的应力状态才是关键变量。

2) 注入参数与地震响应的相关性具有阈值效应。Schultz 等人(2018) [7]对加拿大 Fox Creek 地区的研究表明, 地震生产率与注入量呈线性关系, 但表 1 数据显示, 单纯高注入量(如 Cooper Basin 的 20,000 m^3)并不必然导致强震, 而高注入压力(如 Pohang 的 89 MPa)与临界应力断层组合则显著放大风险。因此, 注入压力 - 断层应力耦合关系比单一注入量更具预测价值。

3) b 值可作为发震机制的诊断指标。Soulzt 项目 GPK2 井($b = 1.23$)与 GPK3 井($b = 0.94$)的差异具有典型意义: 高 b 值对应孔隙压力扩散主导的微震活动, 低 b 值对应断层活化主导的事件序列。Dorbath 等人(2009) [26]认为这一差异源于 GPK3 井直接切割断层带。因此, b 值演化可作为识别发震机制转换的敏感指标。

4) 滞后效应的强度与孔隙弹性效应及断层几何相关。Pohang (滞后 2 个月)和 Basel (滞后数天)的滞后地震均发生在先存断层发育区, 而 Newberry 等无断层项目未见显著滞后。Chang 等人(2020) [15]的数值模拟表明, 孔隙弹性应力传递可在停注后持续改变远端断层荷载, 其效应强度取决于断层渗透率与注采井的空间配置。

Table 1. Comparison of geological background, engineering parameters and seismic response characteristics of major EGS projects worldwide

表 1. 全球主要 EGS 项目地质背景、工程参数与地震响应特征对比

项目名称	国家	岩性	先存断层	注入深度 (km)	最大震级 (M_w/M_L)	地震响应特征	滞后效应
Basel	瑞士	花岗岩	发育	4.5~5.0	M_L 3.4	压裂期间地震活跃, 停注后仍发生主震	显著(停注后主震)
Soulzt GPK2	法国	花岗岩	较发育	4.4~5.0	M_L 2.9	微震持续, $b = 1.23$, 扩散型	较弱
Soulzt GPK3	法国	花岗岩	发育 (切割断层)	4.5~5.1	M_L 3.1	地震活跃, $b = 0.94$, 断层活化主导	中等
Pohang	韩国	花岗岩	发育 (临界应力)	4.2~4.3	M_w 5.5	注水期微震, 停注后 2 月发生主震	极显著 (最大滞后)
Newberry	美国	火山岩	不发育	3.0~3.2	M_L 2.3	微震集中在井周 200 m, $b \approx 1.0$	不显著
Cooper Basin	澳大利亚	花岗岩	不发育	4.2~4.5	M_L 3.0	注水即活跃, 无滞后	不显著
Ogachi	日本	花岗岩	较发育	1.0~1.1	M_L 2.4	低活动性, 扩散慢	不显著
Hijiori	日本	火山岩	不发育	1.8~2.2	M_L 2.2	活动性低, 无有感地震	不显著
Landau	德国	沉积岩	不发育	3.0~3.3	无有感地震	几乎无微震	-

综上所述, EGS 诱发地震并非单一机制主导, 而是地质背景与工程参数耦合作用的结果。其中, 断层临界度是决定最大震级的开关, 注入压力是触发器, 而孔隙弹性效应则控制着滞后地震的定时炸弹风险。

4. EGS 诱发地震的监测技术与风险管控策略

EGS 开发中诱发地震的不可避免性决定了监测技术是风险管控的基础, 而风险管控策略则是将监测数据转化为工程决策的核心手段, 二者的结合是实现 EGS 开发高效性与安全性平衡的关键。本节系统论述 EGS 诱发地震的监测技术体系, 包括传统微震监测网络的设计与数据处理、分布式声波传感(DAS)等新技术的应用, 同时评述交通灯系统(TLS)为主的风险管控策略的原理、实施案例与局限性, 探讨基于监测数据实时反馈的工程方案动态调整方法。

4.1. EGS 诱发地震的监测技术体系

EGS 诱发地震的监测以微震监测为核心, 辅以测井、应力监测等手段, 近年来分布式声波传感等新技术的出现进一步提升了监测的精度和空间分辨率。监测技术的核心目标是实现对地震事件的实时定位、震级计算、震源机制分析, 以及对地下应力场、裂隙扩展的动态反演, 为风险管控提供精准、及时的数据支撑。

4.1.1. 微震监测网络的设计与数据处理

微震监测是 EGS 项目中应用最成熟的诱发地震监测技术, 通过布置地震检波器阵列, 捕捉水力压裂及热交换过程中岩体破裂、断层滑动产生的微震信号, 实现对地震事件的量化分析。

监测网络的设计原则: 微震监测网络分为地面阵列和井下阵列, 设计需结合 EGS 开发场地的地质构造、井位分布和施工范围, 遵循高覆盖、高分辨率、高灵敏度原则。对于地面阵列, 检波器通常布置在以压裂井为中心的圆形或网格状区域, 间距根据监测精度要求设置为 50~500 m, 覆盖范围不小于施工影响半径的 2 倍, 以捕捉近井孔及远场的微震信号; 对于井下阵列, 检波器通常布置在邻井的目的层段, 深度与压裂层位匹配, 可有效提升深部微震信号的接收精度, 减少地面噪声的干扰。如美国 Newberry Volcano EGS 项目布置了 15 个站位的微地震阵列(MSA), 实现了 398 个微震事件的精准定位[26]; 法国 Soultz-sous-Forêts 项目通过井下检波器阵列, 捕捉到了深度 5 km 处的微震活动, 为断层活化分析提供了关键数据[27]。此外, 监测网络的设计需考虑场地的地形条件、噪声背景, 对于城市或工业区域, 需增加检波器的密度并采用抗干扰检波器, 确保微震信号的有效识别。

4.1.2. 分布式声波传感(DAS)新技术的应用

分布式声波传感(DAS)是基于光纤光栅和瑞利散射原理的新型地震监测技术, 近年来被逐步应用于 EGS 诱发地震监测, 弥补了传统微震监测的局限性。DAS 技术通过将通信光纤改造为分布式的传感单元, 实现对地震波信号的连续、高空间分辨率监测, 其空间分辨率可达 1 m, 监测距离可达数十公里, 可实现对压裂井周围裂隙扩展和微震活动的精细化捕捉。与传统微震监测相比, DAS 技术具有三大优势: 一是监测范围广、分辨率高, 可实现从井口到深部储层的全井段连续监测, 捕捉传统检波器难以识别的微小震级事件; 二是抗干扰能力强, 光纤传感单元不受电磁、振动等噪声的影响, 适用于复杂的工业施工环境; 三是部署成本低、灵活性高, 可利用现有油气管井的光纤进行改造, 无需额外布置检波器阵列。目前, DAS 技术已在北美、欧洲的多个 EGS 和页岩气压裂项目中得到应用, 如美国 Raft River EGS 项目通过 DAS 技术, 实现了对水力压裂裂隙扩展方向和范围的实时监测, 反演了裂隙与先存断层的相互作用关系; 加拿大 Fox Creek 区块将 DAS 与传统微震监测结合, 提升了诱发地震事件的检测效率和定位精度。但 DAS 技术仍存在一定局限性, 如其监测的地震波信号以横波为主, 纵波信号较弱, 对震源机制反演的

精度有一定影响,且数据量巨大,对实时处理算法的要求较高。

4.2. EGS 诱发地震的风险管控策略

交通灯系统(TLS)是基于诱发地震的震级、频次等监测指标,将工程施工的地震风险划分为不同等级,并对应采取不同的施工调控措施的分级管控策略,因其操作简单、标准化程度高,被广泛应用于全球 EGS、页岩气压裂等能源开发项目。

5. 结论

5.1. 诱发地震的不可避免性与可控性

EGS 开发中诱发地震是流体注入改变地下应力场的直接结果,但多数事件震级小于 3.0 为微震,仅少数案例(如韩国浦项 M_w 5.5 地震)显示较大风险。地震活动与注水参数及地质条件强相关,通过优化注水方案和实时监测可有效降低风险。

5.2. 多机制耦合作用需综合研究

诱发地震并非单一机制所致,而是孔隙压力扩散、孔隙弹性应力调整、热应力和断层蠕变等多过程耦合的结果。例如,孔隙弹性效应可能导致停注后应力持续传递,引发滞后型地震;热应力则可能在循环采热阶段影响断层稳定性。未来需发展多物理场耦合数值模型,量化各机制的贡献权重。

参考文献

- [1] 王丹. 干热岩开发循环试验的研究进展和发展建议[J]. 地质科技通报, 2025, 44(5): 153-164.
- [2] 许天福, 张延军, 曾昭发, 等. 增强型地热系统(干热岩)开发技术进展[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 42-45.
- [3] 陆川, 王贵玲. 干热岩研究现状与展望[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 13-21.
- [4] Yeo, I.W., Brown, M.R.M., Ge, S. and Lee, K.K. (2020) Causal Mechanism of Injection-Induced Earthquakes through the M_w 5.5 Pohang Earthquake Case Study. *Nature Communications*, **11**, Article No. 2614. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16408-0>
- [5] Schultz, R., Stern, V., Novakovic, M., Atkinson, G. and Gu, Y.J. (2015) Hydraulic Fracturing and the Crooked Lake Sequences: Insights Gleaned from Regional Seismic Networks. *Geophysical Research Letters*, **42**, 2750-2758. <https://doi.org/10.1002/2015gl063455>
- [6] Schultz, R., Wang, R., Gu, Y.J., Haug, K. and Atkinson, G. (2017) A Seismological Overview of the Induced Earthquakes in the Duvernay Play near Fox Creek, Alberta. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **122**, 492-505. <https://doi.org/10.1002/2016jb013570>
- [7] Schultz, R., Atkinson, G., Eaton, D.W., Gu, Y.J. and Kao, H. (2018) Hydraulic Fracturing Volume Is Associated with Induced Earthquake Productivity in the Duvernay Play. *Science*, **359**, 304-308. <https://doi.org/10.1126/science.aao0159>
- [8] Schultz, R., Skoumal, R.J., Brudzinski, M.R., Eaton, D., Baptie, B. and Ellsworth, W. (2020) Hydraulic Fracturing-Induced Seismicity. *Reviews of Geophysics*, **58**, e2019RG000695. <https://doi.org/10.1029/2019rg000695>
- [9] Tan, Y., Hu, J., Zhang, H., Chen, Y., Qian, J., Wang, Q., et al. (2020) Hydraulic Fracturing Induced Seismicity in the Southern Sichuan Basin Due to Fluid Diffusion Inferred from Seismic and Injection Data Analysis. *Geophysical Research Letters*, **47**, e2019GL084885. <https://doi.org/10.1029/2019gl084885>
- [10] Raleigh, C.B., Healy, J.H. and Bredehoeft, J.D. (1976) An Experiment in Earthquake Control at Rangely, Colorado. *Science*, **191**, 1230-1237. <https://doi.org/10.1126/science.191.4233.1230>
- [11] 尹欣欣, 蒋长胜, 翟鸿宇, 等. 全球干热岩资源开发诱发地震活动和灾害风险管控[J]. 地球物理学报, 2021, 64(11): 3817-3836.
- [12] 钱永胜, 张延军, 孙少游. 基于海口 EGS 场地的微震分析及震级预测[J]. 世界地质, 2024, 43(1): 128-135.
- [13] Rozhko, A.Y. (2010) Role of Seepage Forces on Seismicity Triggering. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **115**, B11314. <https://doi.org/10.1029/2009jb007182>
- [14] Wang, H. (2000) Theory of Linear Poroelasticity with Applications to Geomechanics and Hydrogeology. Princeton

University Press.

- [15] Chang, K.W., Yoon, H., Kim, Y. and Lee, M.Y. (2020) Operational and Geological Controls of Coupled Poroelastic Stressing and Pore-Pressure Accumulation along Faults: Induced Earthquakes in Pohang, South Korea. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 2073. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58881-z>
- [16] Rubinstein, J.L. and Mahani, A.B. (2015) Myths and Facts on Wastewater Injection, Hydraulic Fracturing, Enhanced Oil Recovery, and Induced Seismicity. *Seismological Research Letters*, **86**, 1060-1067. <https://doi.org/10.1785/0220150067>
- [17] Kolawole, O. and Ispas, I. (2019) Interaction between Hydraulic Fractures and Natural Fractures: Current Status and Prospective Directions. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **10**, 1613-1634. <https://doi.org/10.1007/s13202-019-00778-3>
- [18] Atkinson, G.M., Eaton, D.W. and Igonin, N. (2020) Developments in Understanding Seismicity Triggered by Hydraulic Fracturing. *Nature Reviews Earth & Environment*, **1**, 264-277. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0049-7>
- [19] 康玲, 王时龙, 李川. 增强地热系统 EGS 的人工热储技术[J]. 机械设计与制造, 2008(9): 141-143.
- [20] National Research Council, Division on Earth, Life Studies, *et al.* (2013) Induced Seismicity Potential in Energy Technologies. National Academies Press.
- [21] 孙知新, 李百祥, 王志林. 青海共和盆地存在干热岩可能性探讨[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(2): 119-124, 129.
- [22] 解经宇, 王丹, 李宁, 等. 干热岩压裂建造人工热储发展现状及建议[J]. 地质科技通报, 2022, 41(3): 321-329.
- [23] Zhuang, L. and Zang, A. (2021) Laboratory Hydraulic Fracturing Experiments on Crystalline Rock for Geothermal Purposes. *Earth-Science Reviews*, **216**, Article ID: 103580. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103580>
- [24] Julian, B.R., Foulger, G.R., Monastero, F.C. and Bjornstad, S. (2010) Imaging Hydraulic Fractures in a Geothermal Reservoir. *Geophysical Research Letters*, **37**, L07305. <https://doi.org/10.1029/2009gl040933>
- [25] 张海宽. 干热岩水力压裂诱发能量释放的数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [26] Dorbath, L., Cuenot, N., Genter, A., *et al.* (2009) Seismic Response of the Fractured and Faulted Granite of Soultz-Sous-Forêts (France) to 5 km Deep Massive Water Injections. *Geophysical Journal International*, **177**, 653-675.
- [27] Cuenot, N., Dorbath, L., Frogneux, M., *et al.* (2010) Microseismic Activity Induced under Circulation Conditions at the EGS Project of Soultz-sous-Forêts (France). *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, 25-29 April 2010, 1-9.