

增强型地热系统环境地质影响现状研究与对策建议

甘浩男^{1,2}, 王贵玲^{1,2}, 蔺文静^{1,2}, 张 薇^{1,2}, 秦向辉³, 张重远³
GAN Haonan^{1,2}, WANG Guiling^{1,2}, LIN Wenjing^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, QIN Xianghui³, ZHANG Chongyuan³

1. 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 河北 石家庄 050000;

2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050000;

3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081
1. *Geothermal & Hot dry rock Exploration and Development Innovation Center, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050000, Hebei, China;*

2. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050000, Hebei, China;*

3. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*

GAN H N, WANG G L, LIN W J, et al. , 2020. Research on the status quo of environmental geology impact of enhanced geothermal system and countermeasures [J]. Journal of Geomechanics, 26 (2): 211-220 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.02.020

Abstract: Enhanced geothermal system (EGS) is the hotspot of geothermal resource development and utilization. Its power generation is almost impervious to the external environment and it cause little pollution and damage to the environment. In recent years, it has been found that in the process of EGS development, the geothermal reservoir reconstruction and water injection operation can lead to a large number of microseismic events. The water injection processes of a few EGS projects are obviously related to the local earthquakes of magnitude 3 or above, causing close attention of researchers. This paper introduces the principle, technology and development and utilization status of the enhanced geothermal system. And the main EGS related environmental impact events at home and abroad are sorted out and analyzed. On this basis, the current research progress of EGS environmental impact is summarized, and the coutermeasures in the next step are put forward, which provide effective reference for the site selection and development of EGS projects in China.

Key words: enhanced geothermal system; induced seismicity; risk mitigation; Pohang; Basel

摘 要: 增强型地热系统 (EGS) 是目前地热资源开发利用的前沿热点, 其发电几乎不受外界环境影响, 且几乎不对人类环境产生污染和破坏, 因而备受关注。近年来学者们发现 EGS 开发过程中, 热储改造注水运行可导致大量的微震事件出现, 少数 EGS 工程的注水过程与当地 3 级以上地震明显相关, 需要密切关注。文章对增强型地热系统的原理、技术以及开发利用现状进行介绍, 并对国内外主要的 EGS 相关环境影响事件进行了整理分析, 在此基础上, 总结了目前的 EGS 环境影响研究进展, 提出了下一步可以采取的措施, 可以为国内 EGS 工程选址及开发提供有效借鉴。

关键词: 增强型地热系统; 诱发地震; 风险降低; 韩国浦项; 瑞士巴塞爾

中图分类号: P314 **文献标识码:** A

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20190138); 中国地质科学院基本科研业务费项目 (SK201906, SK201902)

第一作者简介: 甘浩男 (1988-), 男, 硕士, 主要从事地壳热结构相关研究。E-mail: 348008416@qq.com

通讯作者: 王贵玲 (1964-), 男, 博士, 主要从事深部地热勘查开发相关研究工作。E-mail: guilingw@163.com

收稿日期: 2019-11-09; 修回日期: 2020-01-30; 责任编辑: 吴芳

引用格式: 甘浩男, 王贵玲, 蔺文静, 等. 2020. 增强型地热系统环境地质影响现状研究与对策建议 [J]. 地质力学学报, 26 (2): 211-220 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.02.020

0 引言

当前人类面临着越来越严峻的能源紧缺问题和环境污染问题。地热资源作为清洁的可再生能源，与其他能源相比具有零排放、持续性好等显著优势（汪集旻等，2012）。积极推广地热资源的开发利用，对中国实现节能减排目标与能源结构调整战略具有重要意义。干热岩是最具潜力的地热资源，是地热能的未来发展方向（Tester et al., 2006; 甘浩男等，2015）。干热岩指不含或仅含少量流体，温度高于 180 ℃，其热能在当前技术经济条件下可以利用的岩体（国家能源局，2018）。增强型地热系统（Enhanced Geothermal Systems, EGS）在干热岩技术基础上提出，是采用人工形成地热储层的方法，从低渗透性岩体中经济地采出深层热能的人工地热系统（Tester et al., 2006）。随着研究的不断深入，一些传统的地热储层（如温度较高的富水岩层）也可以经过适当改造形成增强型地热系统而加以利用（许天福等，2018）。世界各国开展 EGS 研究已有近 50 年的历史。1974 年美国洛斯·阿拉莫斯（Los Alamos）国家实验室在美国新墨西哥州开展 Fenton Hill 项目的 EGS 试验研究，拉开了干热岩勘查开发研究序幕（Tester et al., 2006）。随后法国、瑞士、日本、英国、澳大利亚、德国等国家相继建立 EGS 工程示范基地，开展干热岩开发相关技术与装备研究（许天福等，2012，2018）。

干热岩资源开发前景可期。2015 年世界地热大会对 EGS 开发应用前景进行了预测，到 2050 年 EGS 发电装机容量将达到 7 万兆瓦（Lu，2018）。随着干热岩地热资源开发利用前景的逐步明朗，越来越多的国家加入了全球干热岩勘查开发、角逐新能源制高点的行列。目前国外有 8 个国家、14 个项目实现了干热岩发电。从 1974 年至今，全球投入建设的 EGS 工程数量总体上不断增加。影响较大的有美国新墨西哥州 Fenton Hill 项目，英国康沃尔 Rosemanowes 项目，法国莱茵地堑内 Soultz 项目，瑞士 Basel 项目，日本 Hijiori 项目和 Ogachi 项目，澳大利亚 Cooper 盆地项目等（Kolditz and Clauser, 1998; Hori et al., 1999; Tester et al., 2006; Häring et al., 2008; Tenma et al., 2008; Wyborn, 2010），均取得了较好效果。

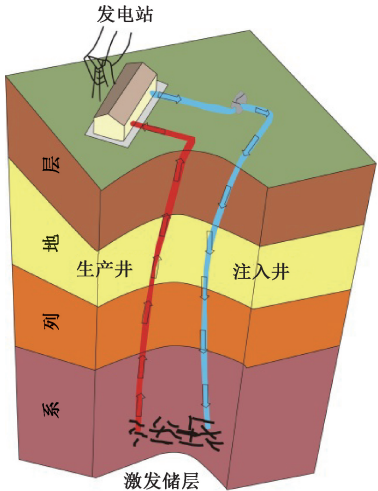
总体而言，目前全球干热岩开发正逐渐进入

蓬勃发展的时期，但同时也应看到，干热岩开发还存在大量的技术风险。从国际上终止的干热岩开发项目来看，主要有以下几方面原因：一是部分项目由于缺乏持续经费支持而终止，如美国 Fenton Hill、澳大利亚 Cooper 盆地等项目（Wyborn, 2010）；二是部分项目因水力压裂诱发的微地震问题而被迫终止，如瑞士 Basel 项目（Häring et al., 2008）；三是部分项目为纯粹的试验研究项目，试验目的达到后自然终止，如日本的 Hijiori 和 Ogachi 项目（Hori et al., 1999; Tenma et al., 2008; Lu et al., 2018）。以上这些项目虽然因为各种原因没有继续进行，但也为全球后续干热岩开发积累了宝贵的经验。在此基础上，本文从 EGS 技术入手总结了目前 EGS 环境影响研究进展，拟提出可采取的措施，为中国 EGS 工程选址及开发提供有效借鉴。

1 EGS 工作原理与主要技术

1.1 工作原理

增强型地热系统的工作原理是从不含天然裂缝的致密岩石中抽取热量，而通常致密岩石的渗透率非常低，需要以水或 CO₂ 等作为工质，通过注入井将循环工质泵入热岩进行热交换，再从开采井提取出高温工质进行热电交换（Tester et al., 2006; 许天福等，2018）（图 1）。



红色管—生产井（热流体）；蓝色管—注入井（冷流体）

图 1 增强型地热系统示意图（Tester et al., 2006）

Fig. 1 Schematic representation of an EGS reservoir (Tester et al., 2006)

发达国家试验研究表明，利用 EGS 工程发电，

几乎不受外界环境影响,基本不对人类环境产生污染和破坏,而且这种能源非常丰富,被证明是对人类十分友好的洁净新能源 (Baria et al., 1999; Tester et al., 2006)。2006 年麻省理工学院组织一个专家组对 EGS 的各方面优缺点做了全面评价,得到非常乐观的结论,美国能源部对此非常关注并大力资助 EGS 研究,从而迎来一波研究 EGS 的热潮 (Tester et al., 2006)。

增强型地热系统的主要缺陷在于关键技术还不成熟,尤其是人工储层建造难度巨大,目前国际上仍在研究如何高效进行储层建造的技术,此外前期高昂的成本投入也是限制增强型地热系统发展的重要原因之一。

1.2 EGS 主要技术

干热岩资源有着巨大的开发潜力,但在国内外的干热岩开发利用过程中存在很多科学和工程问题,其主要技术关键在于以下几个方面:资源靶区定位技术、储层建造技术、微震示踪监控技术、资源评价技术、地下高温岩体多场耦合技术、能源转换效率技术、示范试验现场建立等。本文重点介绍储层建造技术、微震监测技术及高效换热技术。

1.2.1 储层建造技术

储层建造是 EGS 工程的关键技术之一。储层建造方法主要有水力压裂法、爆炸法、热应力法和化学刺激法等 (Gérard et al., 2006; Zimmermann and Reinicke, 2010; Siratovich et al., 2015; Luo et al., 2018)。此外,化学爆炸/溶解破裂、气体破裂,甚至地下核爆炸破裂也被用来制造人工热储。但目前的研究结果表明,水力压裂法仍是最优的选择。

过去国际上通常采用水力压裂技术开展干热岩人工热储建造,即在干热岩体中至少施工两眼钻孔,再分段封隔,通过地面注入高压流体产生垂直裂缝,实现井间连通,所形成的压裂缝网就构成了人工热储。高温花岗岩水力压裂造缝受地应力控制,裂缝的扩展方向一般都垂直于最小主应力方向 (伍亚等, 2014; Zhang et al., 2017; 曾治平等, 2019)。因此,确切掌握干热岩开发层段的天然地应力状态又是建造人工热储的重要环节 (Warpinski et al., 2009)。为此,在注采井施工顺序上,苏尔茨干热岩发电项目开创性地采取了钻井→造储→再钻井的方法,解决了早期先钻两眼

井再压裂造储,导致储层未能连通的问题 (Tester et al., 2006; Valley et al., 2007; Genter et al., 2010)。近年来,美国主要采用水力剪切压裂法,以激活和连通先存已有裂隙为目标 (Zemach et al., 2009; Smith et al., 2015)。

1.2.2 微震监测技术

压裂过程中和压裂结束后对裂隙发育/发展情况、空间分布、连通状况、裂隙密度、裂隙走向等要素进行识别、描述,是评价人工流体通道与热资源交换空间大小的重要工作,压裂诱发的微地震前后同样会引起地应力状态发生变化 (秦向辉等, 2018)。微地震监测是当前压裂监测中最重要的一种地球物理手段,通过裂缝破裂事件定位可以提供裂缝的空间形态,监测水力压裂所形成的人工储层的规模、形状和裂隙网络结构,推断地应力特征,这已成为国际上实施高温岩体开发计划的重要研究内容 (Maurer et al., 2015; Cladouhos et al., 2016)。

1.2.3 高效换热技术

迄今,美国、日本和欧洲尝试发展干热岩发电都是利用水作为热传递载体,但也存在严重的缺陷。水的一个不利属性是在高温下会成为溶解岩石矿物的溶剂,与水接触的裂隙岩石发生强烈的溶解和沉淀作用,使得干热岩资源难以稳定开发 (Xu et al., 2004; Yanagisawa et al., 2008; 鲍新华等, 2014)。此外,在热循环中不可避免的水量流失也会造成经济损失。

鉴于水作为热载体存在的问题,近年来国内外学者和相关机构开展了利用超临界二氧化碳作为循环工质的研究,在实现二氧化碳资源化利用的同时,又能使其部分存储于地下介质中 (Brown et al., 2000; 陆川和王贵玲, 2015)。目前该项研究在国际上刚刚起步,未来可能成为干热岩开发的重要新兴研究领域。

2 环境地质影响事件

2.1 诱发地震事件

EGS 中热储需要改造和注水运行,这导致大量的微震事件出现 (Bethmann et al., 2012),此现象过去 40 年间在印度尼西亚 (Silitonga et al., 2005; Mulyadi, 2010)、日本 (Nagano et al., 1994)、南北美洲 (Henderson et al., 1999)、澳大利亚

(Baisch et al., 2006) 等地均有发生。在瑞士 Basel, 由于 EGS 开发, 2006—2007 年间发生了 3500 次微震事件 (Bethmann et al., 2012)。随着注水流量以及井口压力的增大, 微震发生频率和震级持续增加。在热储中发生震级 2.6 级地震后, 注水工作提前叫停, 然而随后连续发生 2.7 级和 3.4 级地震, 致使项目被叫停并进行灾害补偿 (Bachmann et al., 2011; Bethmann et al., 2012)。这也促使人们重新审视增强地热项目的安全性。

除瑞士 Basel 之外, 已观测到不同地质背景的 EGS 工程微震事件还有很多。美国 Fenton Hill 项目在 1983 年进行热储刺激试验, 监测到 11000 次微地震事件 (Brown, 2009)。法国 Soultz 工程在注水过程中也监测到 200 个微震事件 (Gérard et al., 2006; Zimmermann and Reinicke, 2010); 德国 Landau 工程在 2009 年 8 月地热流体循环期间发生 2.9 级地震 (Bönnemann et al., 2010); 2013 年 7 月瑞士的 St. Gallen 地热项目在第一口深井激发时引发了里氏 3.5 级地震, 当地民众有震感 (Edwards et al., 2015)。在韩国 Pohang 5.4 级地震发生之前, 与地热开发相关的较大震级地震事件包括美国 Geysers 在 1982 年发生的 4.6 级地震、萨尔瓦多柏林地区在 2003 年发生的 4.4 级地震、澳大利亚 Cooper 盆地在 2003 年发生的 3.7 级地震等 (Asanuma et al., 2009; Benato et al., 2016)。

2017 年韩国 Pohang 发生的地震事件, 学者认为与当地的地热发电注水活动有关。2017 年 11 月 15 日, 韩国庆尚北道 Pohang 市北部发生 5.4 级地震 (Lee et al., 2010; Zang et al., 2014; Kim et al., 2017, 2018; Grigoli et al., 2018; Choi et al., 2019), 这是韩国 1978 年有检测记录以来震级排名第二的地震, 余震达到 100 多次。据韩国中央灾难安全对策本部发表的统计结果, 地震没有造成严重的生命损失, 但是带来直接经济损失 546 亿余韩元, 当年韩国高考也因地震灾情而延后。Pohang 发生 5.4 级地震后, 当地地热发电项目被暂停 (Kim et al., 2017; Grigoli et al., 2018)。Pohang 地震是迄今为止推测与 EGS 工程相关震级最高的地震, 产业界普遍认为将对 EGS 工程的发展产生深远影响。

2.2 地下水环境影响

目前国内外关于增强型地热系统对地下水污染的相关报道论述相对较少。但地热流体注入井内经过地下深循环, 与围岩进行化学物质交换,

长期的水岩作用下地热流体中可能含有多种重金属等微量元素, 此类携带重金属元素等对环境有害的地热流体的不当处理与排放, 可能对地下水循环等造成相应的环境影响。

原则上而言, EGS 工程由于生产的热流体会循环注入, 因此产生地表环境污染的可能性不大, 但较大的实物或地表管道破裂可能会导致局部地区的环境受到影响。

3 目前环境影响问题研究进展

目前增强型地热系统的环境影响问题研究主要集中在诱发地震风险分析方面。根据已发表的研究成果, 尽管尚未有确凿证据直接表明增强型地热系统开发导致地震发生, 然而学界普遍认为流体注入活动会增加诱发地震的风险, 对微震数据与 EGS 激发行为的统计分析显示, 流体注入与观测到的最大微震震级具有较为明显的关系 (图 2, Zang et al., 2014)。

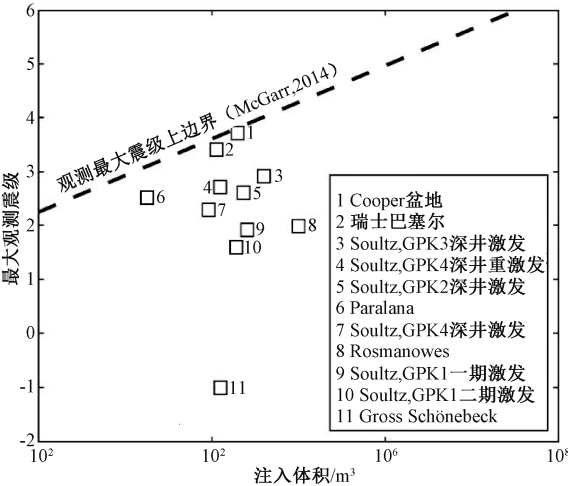


图 2 地热工程流体注入体积与观测最大震级微震关系图 (据 Zang et al., 2014 修改)

Fig. 2 Relation diagram of fluid injection volume in geothermal engineering and maximum magnitude of observed micro-earthquake (modified after Zang et al., 2014)

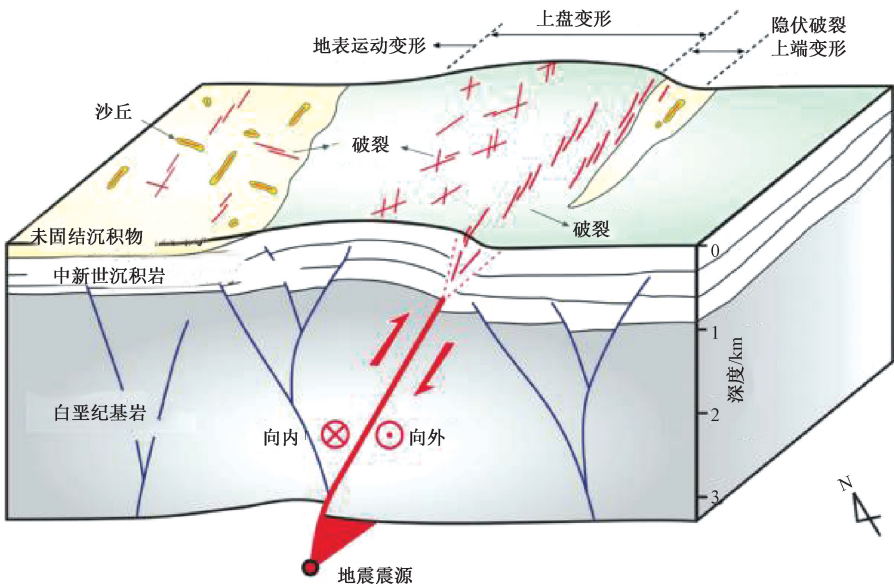
3.1 韩国 Pohang EGS 诱发地震研究进展

Pohang 地区是高热流地区, 该地区的地热研究始于 2003 年 (Lee et al., 2015)。相关大地电磁测量结果显示, 在 Pohang EGS 场址地下存在朝西倾向的导水特征带, 该特征带被解释为破碎带, 且被作为地热开发的潜在热交换目标区带 (潜在可利用热交换通道) (Ellsworth et al., 2019)。尽

管 EGS 开发前期的钻探现场调查工作没有能识别出 EGS 开发项目附近的活断层, 但是也表明 EGS 开发场区地应力处于临界状态, 是能够产生中等或大地震的 (Haring et al., 2008)。

地震发生后, 韩国政府成立了调查研究团调查地震起因, 经过近一年的工作, 调查团得出初步结论, 认为 Pohang 地热发电所向地热井注入高压水的作业触发了 Pohang 地震。Kim Kwang-Hee 通过地球物理与地质研究推测 Pohang 地震是由于增强型地热系统流体注入导致, 同时流体的注入量远小于理论预测所能引发该级别地震的流体量 (Kim et al., 2017)。其研究发现, Pohang 地震主震深度为 4.5 km, 一系列地震震源空间分布与

EGS 工程地点具有密切关联, 且 EGS 工程建立之前该地区并未收集到地震情况 (Kim et al., 2017)。Grigoli 研究发现地震向周围较大的断层传递静载荷, 增加了区域的地震风险 (Grigoli et al., 2018)。Choi 对地震发生原因进行研究, 得到两点认识, 一是复杂的二次地表变形由隐伏陡倾断裂造成, 这些隐伏断裂是受先存正断层系统逆向激活控制 (图 3); 二是局部地表条件可能引发或增大地表变形和相关的地震破坏 (Choi et al., 2019)。结合近两年该地区地震观测, Ellsworth 等 (2019) 认为, 引发地震的原因是流体注入激活了先存的未知断层, 引发了主要的地震活动; 该断层的倾向与区域内其他断层相似。



图中显示出 2017 年 Pohang 地震地表变形分布和推测的隐伏倾斜走滑断裂关联变形机制

图 3 韩国 Pohang 地震断裂机制推测模型图 (据 Choi et al., 2019 修改)

Fig. 3 Conjectural model of fracture mechanism of Pohang earthquake in Korea, showing the surface deformation and conjectural deformation mechanism associated with hidden inclined strike-slip faults (modified after Choi et al., 2019)

3.2 瑞士 Basel EGS 诱发地震研究进展

巴塞尔干热岩开发始于 1996 年, 由 GeoPower Basel 财团主导, 2006 年以前主要开展前期技术与储备工作。巴塞尔 EGS 开发场址区位于巴塞尔市区, 开发主井为 BASEL 1 井, 井深 5000 m。钻探资料表明, 其上部 2411 m 为第四纪、第三纪、中生代和二叠纪沉积层, 其下为约 100 m 厚的二叠纪粉砂岩和风化花岗岩地层, 于 2507 m 左右进入结晶基底, 基底绝大部分为花岗岩; 钻孔套管下至 4629 m, 4629~5000 m 深度为裸孔 (Haring et al., 2008)。在 2557~5000 m 间开展了声学成像测

井工作, 测井资料揭示, 测井深度范围内共有 984 条原生裂隙/破裂面存在, 基底浅部原生裂隙的密度为 0.95 条/m, 在钻孔的下部, 其密度为 0.2~0.3 条/m, 天然裂隙的优势走向为北西—南东至北北西—南南东, 倾角超过 60° (Valley and Evans, 2006)。另外, 在 4700 m 和 4835 m 深度处存在两条大型裂隙破碎带, 且破碎带内存在泥质蚀变现象 (主要受蒙脱石, 伊利石影响)。因孔径原因, 声学成像测井设备无法测试这两个破碎带的方向, 无法获得其确切几何学特征参数。BASEL 1 井中多方法测试结果表明, BASEL 1 井 5000 m 深度储层

温度为 190 ℃ (Braun, 2007)。

通过对 2600~5000 m 深度范围内的钻孔崩落和诱发张裂缝的成像资料分析,认为 BASEL 1 井的最大水平主应力方向为 $144 \pm 14^\circ$ (即 $N54 \pm 14^\circ W$) (Braun, 2007),与区域结果及相邻钻孔结果一致;应力类型为走滑型 (即 $S_{Hmax} > S_V > S_{Hmin}$);由 RSCOS (Rock Anisotropy Characterization on Samples) 法给出的 4911 m 深度 S_{Hmin} 应力值为下限为 84 MPa,由 RSCOS 和断层摩擦强度给出的 S_{Hmax} 值范围为 160~255 MPa (Braun, 2007)。

瑞士 Basel 深层地热项目通过注入高压水至地下 5 km 以增大岩石的渗透率,该项目在发生 3.4 级地震后被叫停 (Cladouhos et al., 2016)。研究表

明:①随着持续流体注入,微震向远离钻井位置逐渐迁移,这一行为可以被离散过程所预测,停止注入后,地震活动集中在储层激发体积的外围边缘;②在储层激发停止 1~2 个月内,井中水压逐渐恢复的情况下,又发生了 4 次较强烈的地震事件;③这次地震事件是高角度陡倾的西北西—东南东右旋走滑断裂运动引起,这一断层指向与区域地应力场相一致 (图 4);④大部分的地震发生在地层中的水压值接近最小压应力之前和之后的这段时间内。注入流体压力的增加,在区域构造应力条件下,引发了先存断层的剪切错位,导致了地震的发生 (Bachmann et al., 2011; Choi et al., 2019)。

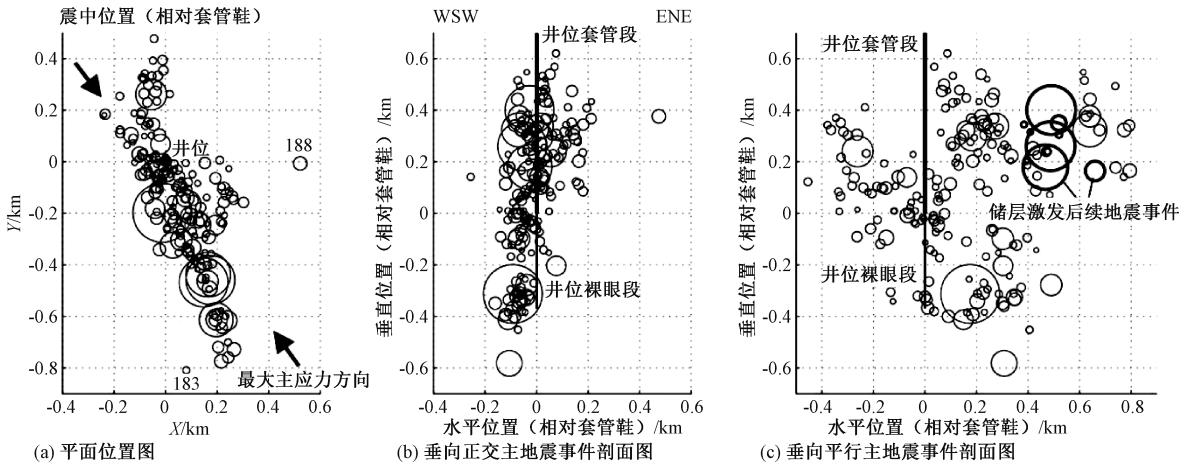


图 4 瑞士 Basel 深层地热项目震中位置分布图 (据 Deichmann and Giardini, 2009 修改)
Fig. 4 Epicenter location map of the deep geothermal project in Basel, Switzerland (modified after Deichmann and Giardini, 2009)

3.3 减震策略研究进展

为了监测地震活动,瑞士 GEL (Geothermal Explorers Limited) 组织首次提出“交通指示灯”系统,为可能的灾害应急做准备 (Valley and Evans, 2006),“交通指示灯”系统分为四个阶段,基于三方面的内容,即民众反映、观测的当地震级和地表位移量峰值 (PGV)。随后, Håring 等 (2008) 对不同的阶段进行了详细的分析描述,简单而言,注入的流体状态①按照计划继续注入 (绿灯);②继续注入但不再增加流量 (黄灯);③停止注入并开始释放激发压力 (橙灯);④停止注入并释放至最小井口压力 (红灯)。“交通指示灯”系统主要基于专家的评判 (陆川和王贵玲, 2015)。

有研究人员提出“软激发” (soft stimulation) 概念,即在最小化环境影响 (包括地震在内) 的条件下,进行热储激发以获得增强型热储产能

(Braun, 2007; Deichmann and Giardini, 2009)。在欧洲委员会建立的地平线 2020 计划中,循环“软激发”在 2017 年 8 月首次应用于韩国 Pohang 增强型地热系统的实际场地上,以测试其制约注入活动引发最大震级的能力 (Hofmann et al., 2019)。震级阈值根据 MSS01 观测站获取的地表位移量峰值 (PGV) 转化得到,PGV 数值用于作为警示启动参数,震级用于对照生效对应的“交通指示灯”系统,并将原先 4 个阶段根据实际情况调整为 5 个阶段 (图 5, Hofmann et al., 2019)。中国对 EGS 触发微震减震方法研究较少,大部分减震方法仍处在定性阶段。

4 总结与建议

增强型地热系统近年来在国际上迅猛发展,在技术不断升级革新的同时,也存在不可忽视的

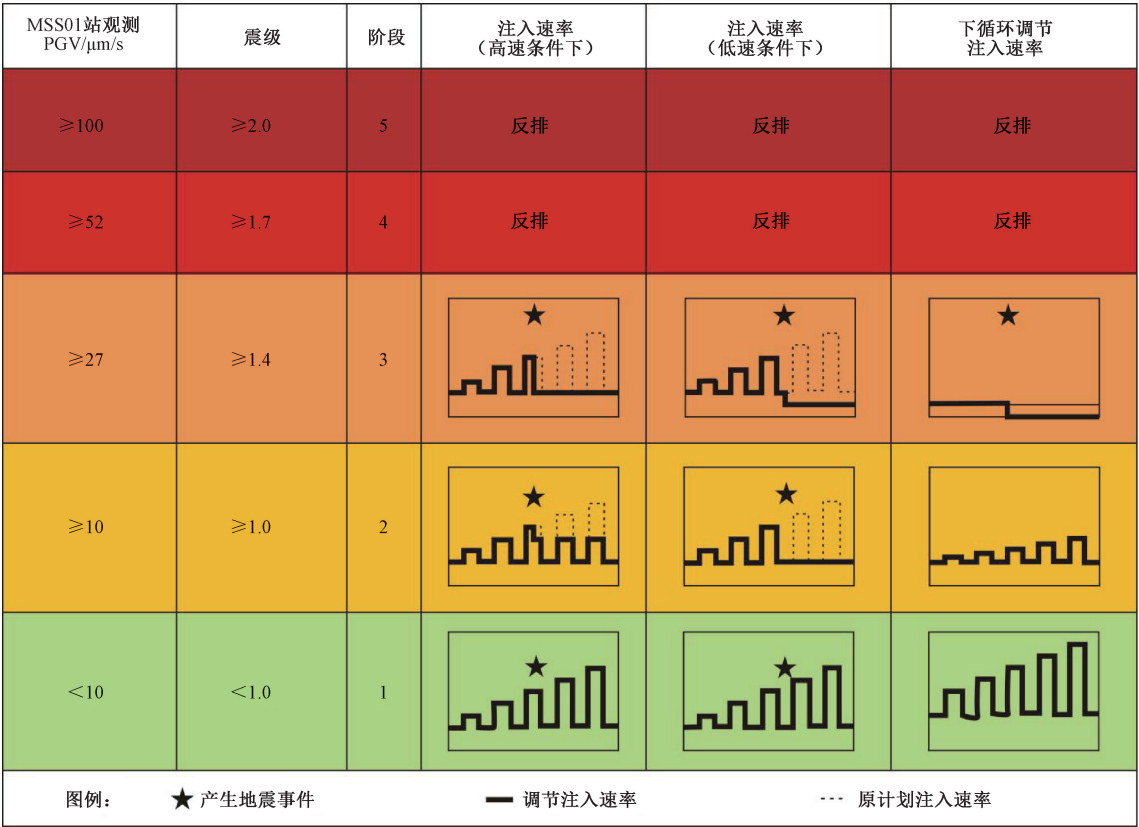


图 5 交通指示灯系统用于 PX-1 井示意图（据 Hofmann et al. , 2019 修改）

Fig. 5 Seismic traffic light system (TLS) used for the cyclic soft stimulation treatment in well PX-1 (modified after Hofmann et al. , 2019)

环境地质影响问题，如 EGS 工程注入诱发地震、尾水回灌对地下水环境影响等，都需要在 EGS 工程开发过程中采取全面监测和预警措施。目前 EGS 工程的环境地质影响以诱发地震为主，根据瑞士 Basel、韩国 Pohang 等项目的经验教训，研究人员在减震策略研究上取得一定的进展。对于中国而言，中国地质调查局在青海共和盆地启动实施国内首个干热岩科技攻坚战，在开展储层激发过程中，学习国际先进监测预警系统，并结合工程开发实地特征采取因地制宜的措施，是国内 EGS 工程开发探索研究的当务之急。对此，提出如下建议：

（1）系统梳理国际已有的干热岩及商业示范性地热开发项目，以及国内外注水诱发地震、干热岩开发/水力压裂诱发地震典型案例，总结干热岩开发诱发地震机理的研究进展，以及国内外干热岩开发诱发地震风险评价方法、减少或避免诱发地震的主要措施等。通过系统地分析研究，梳理中国开展增强型地热系统可能面临的环境影响

风险点。

（2）建立区域性微震监测网络及预警机制，合理布设地表和地下微震监测点，持续观测钻孔机压裂过程中裂隙形态变化与微地震情况，研究微地震发生等级和数量与压裂过程中压力变化的关系，评价主要工程措施的潜在诱发地震可能性，探索适合中国 EGS 开发的微震监测手段和解译方法，形成多场地球物理表征方法，建立 EGS 开发环境影响评价与监测技术方法体系，评价 EGS 开发过程中对地质环境的影响。

（3）针对青海共和盆地干热岩科技攻坚战，参考国际同类 EGS 工程经验，开发研究团队需要充分掌握区域以往地震数据对现存断层的指示，压裂施工尽可能避开隐伏的深部断层，避免断层活化诱发地震风险，并在开展水力压裂前做好及时且充分的微震监测、数据分析准备工作。在此基础上，向相关部门提供地震风险的评估预案。鉴于国际 EGS 工程引发微震频率，微震监测的周期建议持续两年以上。

References

- ASANUMA H, KENMOKU Y, NITSUMA H, et al., 2009. Interpretation of reservoir creation process at Cooper Basin by microseismic multiplet analysis [J]. *GRC Transactions*, 33: 149-153.
- BACHMANN C E, WIEMER S, WOESSNER J, et al., 2011. Statistical analysis of the induced Basel 2006 earthquake sequence: introducing a probability-based monitoring approach for Enhanced Geothermal Systems [J]. *Geophysical Journal International*, 186 (2): 793-807.
- BAISCH S, WEIDLER R, VÖRÖS R, et al., 2006. Induced seismicity during the stimulation of a geothermal HFR reservoir in the Cooper Basin, Australia [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96 (6): 2242-2256.
- BAO X H, WU Y D, WEI M C, et al., 2014. Impact of water/CO₂-rock interactions on formation physical properties in EGS [J]. *Science & Technology Review*, 32 (14): 42-47. (in Chinese with English abstract)
- BARIA R, BAUMGÄRTNER J, RUMMEL F, et al., 1999. HDR/HWR reservoirs: concepts, understanding and creation [J]. *Geothermics*, 28 (4-5): 533-552.
- BENATO S, HICKMAN S, DAVATZES N C, et al., 2016. Conceptual model and numerical analysis of the Desert Peak EGS project: Reservoir response to the shallow medium flow-rate hydraulic stimulation phase [J]. *Geothermics*, 63: 139-156.
- BETHMANN F, DEICHMANN N, MAI P M, 2012. Seismic wave attenuation from borehole and surface records in the top 2.5 km beneath the city of Basel, Switzerland [J]. *Geophysical Journal International*, 190 (2): 1257-1270.
- BRAUN R, 2007. Analyse gebirgsmechanischer Versagenszustände beim Geothermieprojekt Basel [R]. Report to Geopower Basel AG for Swiss Deep Heat Mining Project Basel. Dr. Roland Braun. Basel, Switzerland: Consultancy in Rock Mechanics, 30.
- BROWN D W, 2000. A hot dry rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO₂ instead of water [C] //Proceedings of the twenty-fifth workshop on geothermal reservoir engineering. Stanford: Stanford University, 233-238.
- BROWN D W, 2009. Hot dry rock geothermal energy: important lessons from Fenton hill [C] //Proceedings of the thirty-fourth workshop on geothermal reservoir engineering. Stanford: Stanford University.
- CHOI J H, KO K, GIHM Y S, et al., 2019. Surface deformations and rupture processes associated with the 2017 M_w 5.4 Pohang, Korea, Earthquake [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109 (2): 756-769.
- CLADOUHOS T T, PETTY S, SWYER M W, et al., 2016. Results from Newberry Volcano EGS Demonstration, 2010-2014 [J]. *Geothermics*, 63: 44-61.
- DEICHMANN N, GIARDINI D, 2009. Earthquakes induced by the stimulation of an enhanced geothermal system below Basel (Switzerland) [J]. *Seismological Research Letters*, 80 (5): 784-798.
- EDWARDS B, KRAFT T, CAUZZI C, et al., 2015. Seismic monitoring and analysis of deep geothermal projects in St Gallen and Basel, Switzerland [J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 201 (2): 1022-1039.
- ELLSWORTH W L, GIARDINI D, TOWNEND J, et al., 2019. Triggering of the Pohang, Korea, earthquake (MW 5.5) by enhanced geothermal system stimulation [J]. *Seismological Research Letters*, 90 (5): 1844-1858.
- GAN H N, WANG G L, LIN W J, et al., 2015. Research on the occurrence types and genetic models of hot dry rock resources in China [J]. *Science & Technology Review*, 33 (19): 22-27. (in Chinese with English abstract)
- GÉRARD A, GENTER A, KOHL T, et al., 2006. The deep EGS (Enhanced Geothermal System) project at Soultz-sous-Forêts (Alsace, France) [J]. *Geothermics*, 35 (5-6): 473-483.
- GENTER A, EVANS K, CUENOT N, et al., 2010. Contribution of the exploration of deep crystalline fractured reservoir of soultz to the knowledge of enhanced geothermal systems (EGS) [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 342 (7-8): 502-516.
- GRIGOLI F, CESA S, RINALDI A P, et al., 2018. The November 2017 M_w 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea [J]. *Science*, 360 (6392): 1003-1006.
- HÄRING M O, SCHANZ U, LADNER F, et al., 2008. Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system [J]. *Geothermics*, 37 (5): 469-495.
- HENDERSON J R, BARTON D J, FOULGER G R, 1999. Fractal clustering of induced seismicity in The Geysers geothermal area, California [J]. *Geophysical Journal International*, 139 (2): 317-324.
- HOFMANN H, ZIMMERMANN G, FARKAS M, et al., 2019. First field application of cyclic soft stimulation at the Pohang Enhanced Geothermal System site in Korea [J]. *Geophysical Journal International*, 217 (2): 926-949.
- HORI Y, KITANO K, KAIEDA H, et al., 1999. Present status of the Ogachi HDR Project, Japan, and future plans [J]. *Geothermics*, 28 (4-5): 637-645.
- KIM K H, REE J H, KIM Y, et al., 2017. Assessing whether the 2017 M_w 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event [J]. *Science*, 360 (6392): 1007-1009.
- KIM K I, MIN K B, KIM K Y, et al., 2018. Protocol for induced microseismicity in the first enhanced geothermal systems project in Pohang, Korea [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91: 1182-1191.

- KOLDITZ O, CLAUSER C, 1998. Numerical simulation of flow and heat transfer in fractured crystalline rocks: Application to the Hot Dry Rock site in Rosemanowes (U.K.) [J]. *Geothermics*, 27 (1): 1-23.
- LEE Y, PARK S, KIM J, et al., 2010. Geothermal resource assessment in Korea [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (8): 2392-2400.
- LEE T J, SONG Y, PARK D W, et al., 2015. Three dimensional geological model of Pohang EGS pilot site, Korea [C] // *Proceedings of the world geothermal congress*. Melbourne, Australia. 19 to 25 April.
- LU C, WANG G L, 2015. Current status and prospect of hot dry rock research [J]. *Science & Technology Review*, 33 (19): 13-21. (in Chinese with English abstract)
- LU S M, 2018. A global review of enhanced geothermal system (EGS) [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81: 2902-2921.
- LUO J, ZHU Y Q, GUO Q H, et al., 2018. Chemical stimulation on the hydraulic properties of artificially fractured granite for enhanced geothermal system [J]. *Energy*, 142: 754-764.
- MAURER V, CUENOT N, GAUCHER E, et al., 2015. Seismic monitoring of the Rittershoffen EGS Project (Alsace, France) [C] // *Proceedings world geothermal congress 2015*. Melbourne, Australia. 19 to 25 April.
- NAGANO K, MORIYA H, ASANUMA H, et al., 1994. Downhole AE measurement of hydraulic fracturing in Ogachi HDR model field [J]. *Journal of the Geothermal Research Society of Japan*, 16 (1): 85-108.
- National Energy Administration, 2018. Terminology of geothermal energy: NB/T 10097-2018 [S]. Beijing: China Petrochemical Press. (in Chinese)
- QIN X H, CHEN Q C, MENG W, et al., 2018. Valuating measured in-situ stress state changes associated with earthquakes and its implications: a case study in the Longmenshan fault zone [J]. *Journal of Geomechanics*, 24 (3): 309-320. (in Chinese with English abstract)
- SILITONGA T H, SIAHAAN E E, SUROSO, 2005. A Poisson's ratio distribution from Wadati diagram as indicator of fracturing of Lahendong geothermal field, North Sulawesi, Indonesia [C] // *Proceedings world geothermal congress 2005*. Antalya, Turkey. 24 to 29 April.
- SIRATOVICH P A, VILLENEUVE M C, COLE J W, et al., 2015. Saturated heating and quenching of three crustal rocks and implications for thermal stimulation of permeability in geothermal reservoirs [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 80: 265-280.
- SMITH J T, SONNENTHAL E L, CLADOUHOS T, 2015. Thermal-hydrological-mechanical modelling of shear stimulation at Newberry Volcano, Oregon [C] // *49th U.S. rock mechanics/geomechanics symposium*. San Francisco, California: American Rock Mechanics Association.
- TENMA N, YAMAGUCHI T, ZYVOLOSKI G, 2008. The Hijiori hot dry rock test site, Japan: Evaluation and optimization of heat extraction from a two-layered reservoir [J]. *Geothermics*, 37 (1): 19-52.
- TESTER J W, ANDERSON B J, BATCHELOR A S, et al., 2006. The future of geothermal energy-impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century [M]. Cambridge MA: MIT Massachusetts Institute of Technology.
- VALLEY B, EVANS K F, 2006. Stress orientation at the Basel geothermal site from wellbore failure analysis in BS1 [R]. Report to Geopower Basel AG for Swiss Deep Heat Mining Project Basel. ETH Report Nr.: ETH 3465/56. Ingenieurgeologie ETH Zürich, Switzerland, 29.
- VALLEY B, DEZAYES C, GENTER A, 2007. Multi-scale fracturing in the Soultz-Sous-Forêts basement from borehole images analyses [C] // *Proceedings, Soultz Scientific Meeting*. Orleans: Geothermal Energy Division.
- WANG J Y, HU S B, PANG Z H, et al., 2012. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental Area of China [J]. *Science & Technology Review*, 30 (32): 25-31. (in Chinese with English abstract)
- WARPINSKI N R, MAYERHOFER M J, VINCENT M C, et al., 2009. Stimulating unconventional reservoirs: maximizing network growth while optimizing fracture conductivity [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 48 (10): 39-51.
- WU Y, DAI J S, GU Y C, et al., 2014. Numerical simulation of present geo-stress field and its effect on hydraulic fracturing of Fuyu reservoir in Gaotaizi oilfield [J]. *Journal of Geomechanics*, 20 (4): 363-371. (in Chinese with English abstract)
- WYBORN D, 2010. Update of development of the geothermal field in the granite at Innamincka, South Australia [C] // *Proceedings world geothermal congress*. Bali, Indonesia (pp. 25-30).
- XU T F, APPS J A, PRUESS K, 2004. Numerical simulation of CO₂ disposal by mineral trapping in deep aquifers [J]. *Applied Geochemistry*, 19 (6): 917-936.
- XU T F, ZHANG Y J, ZENG Z F, et al., 2012. Technology progress in an enhanced geothermal system (Hot Dry Rock) [J]. *Science & Technology Review*, 30 (32): 42-45. (in Chinese with English abstract)
- XU T F, HU Z X, LI S T, et al., 2018. Enhanced geothermal system: International progresses and research status of China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 92 (9): 1936-1947. (in Chinese with English abstract)
- YAMABE T H, HAMZA V M, 1996. Geothermal investigations in an area of induced seismic activity, Northern São Paulo State, Brazil [J]. *Tectonophysics*, 253 (3-4): 209-225.

YANAGISAWA N, MATSUNAGA I, SUGITA H, et al., 2008. Temperature-dependent scale precipitation in the Hijiori Hot Dry Rock system, Japan [J]. Geothermics, 37 (1): 1-18.

ZANG A, OYE V, JOUSSET P, et al., 2014. Analysis of induced seismicity in geothermal reservoirs-an overview [J]. Geothermics, 52: 6-21.

ZEMACH E, DRAKOS P S, ROBERTSON-TAIT A, 2009. Feasibility evaluation of an “In-Field” EGS project at Desert Peak, Nevada [J]. Transactions-Geothermal Resources Council, 33: 257-267.

ZENG Z P, LIU Z, MA J, et al. A NEW METHOD FOR FRACRABILITY EVALUATION IN DEEP AND TIGHT SANDSTONE RESERVOIRS [J]., 2019, 25 (2): 223-232DOI: 10.12090/j. issn. 1006-6616.2019.25.02.021.

ZHANG C Y, CHEN Q C, QIN X H, et al., 2017. In-situ stress and fracture characterization of a candidate repository for spent nuclear fuel in Gansu, northwestern China [J]. Engineering Geology, 213: 218-229.

ZIMMERMANN G, REINICKE A, 2010. Hydraulic stimulation of a deep sandstone reservoir to develop an Enhanced Geothermal System: Laboratory and field experiments [J]. Geothermics, 39 (1): 70-77.

鲍新华, 吴永东, 魏铭聪, 等, 2014. EGS 载热流体水岩作用对人工地热储层裂隙物性特征的影响 [J]. 科技导报, 32 (14): 42-47.

甘浩男, 王贵玲, 蒯文静, 等, 2015. 中国干热岩资源主要赋存类型与成因模式 [J]. 科技导报, 33 (19): 22-27.

国家能源局, 2018. 地热能术语: NB/T 10097-2018 [S]. 北京: 中国石化出版社.

陆川, 王贵玲, 2015. 干热岩研究现状与展望 [J]. 科技导报, 33 (19): 13-21.

秦向辉, 陈群策, 孟文, 等, 2018. 大地震前后实测地应力状态变化及其意义: 以龙门山断裂带为例 [J]. 地质力学学报, 4 (3): 309-320.

汪集暘, 胡圣标, 庞忠和, 等, 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估 [J]. 科技导报, 30 (32): 25-31.

伍亚, 戴俊生, 顾玉超, 等, 2014. 高台子油田扶余油层现今地应力数值模拟及对水力压裂的影响 [J]. 地质力学学报, 20 (4): 363-371.

许天福, 张延军, 曾昭发, 等, 2012. 增强型地热系统 (干热岩) 开发技术进展 [J]. 科技导报, 30 (32): 42-45.

许天福, 胡子旭, 李胜涛, 等, 2018. 增强型地热系统: 国际研究进展与我国研究现状 [J]. 地质学报, 92 (9): 1936-1947.

曾治平, 刘震, 马骥, 等, 2019. 深层致密砂岩储层可压裂性评价新方法 [J]. 地质力学学报, 25 (2): 223-232.

附中文参考文献

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

