

花岗岩型干热岩储层信息获取方法 及控震压裂技术介绍

陈秋^{1,2}, 刘一凡^{1,2}, 金雪², 林睿², 潘曰卓³,
解经宇^{*2,4}, 杨现禹⁵, 蒋国盛⁵, 乔伟²

(1. 中国矿业大学孙越崎学院, 江苏徐州 221116;
2. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221116;
3. 中国矿业大学安全科学与工程学院, 江苏徐州 221116;
4. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;
5. 中国地质大学(武汉), 湖北武汉 430074)

摘要:干热岩型地热作为一种大储量的清洁能源,在日趋严峻的环保形势下,正在逐渐影响着世界能源格局,并成为学术界、政府和企业关注的焦点。开发花岗岩型干热岩需要建立增强型地热系统(EGS),其核心是向储层钻井并压裂形成一定规模的裂缝网络,构建注入井和生产井的循环回路来提取热能发电。从瑞士Basel EGS工程、韩国Pohang EGS工程等花岗岩型干热岩EGS压裂工程案例可以发现,诱发地震已成为制约花岗岩型干热岩开发的关键因素,其原因在于未明确大尺寸高倾角结构面的具体位置,无法预测压裂液在压裂过程中的流动方向,导致压裂液进入此类结构面造成结构面滑移从而诱发地震。本文将针对此问题通过查明干热岩所在储层的信息对开发花岗岩型干热岩控震压裂人工热储建造方法进行介绍。

关键词:花岗岩型干热岩;增强型地热系统;诱发地震;水力压裂;矩张量反演;信息获取;控震压裂

中图分类号:P314;TE37 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0050-06

Introduction of information acquisition method and controlled seismic fracturing technology for granite-type hot dry rock reservoir

CHEN Qiu^{1,2}, LIU Yifan^{1,2}, JIN Xue², LIN Rui², PAN Yuezhao³,
XIE Jingyu^{*2,4}, YANG Xianyu⁵, JIANG Guosheng⁵, QIAO Wei²

(1. Sun Yueqi College, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China;
2. School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China;
3. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China;
4. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;
5. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China.)

Abstract: As a kind of clean energy with large reserves, hot dry rock geothermal is gradually affecting the world energy pattern under the increasingly severe environmental protection situation, and has become the focus of academia, government and enterprises. The development of granite-type hot dry rock requires the establishment of Enhanced

收稿日期:2023-05-03; 修回日期:2023-07-23 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.008

基金项目:国家自然科学基金青年基金“结构面影响下干热岩水力裂缝扩展行为特征及能量释放机制研究”(编号:42102353)、“纳米颗粒钻井液离散元流固耦合模拟与页岩孔隙封堵机理研究”(编号:42002311);中国博士后科学基金面上项目“低渗油藏CO₂地质封存THM耦合模拟与砂岩破裂机制研究”(编号:2021M703512)

第一作者:陈秋,女,汉族,2001年生,本科,地质工程专业,江苏省徐州市大学路1号中国矿业大学南湖校区,05191634@cumt.edu.cn。

通信作者:解经宇,男,汉族,1991生,副教授,博士,地质工程专业,江苏省徐州市大学路1号中国矿业大学南湖校区,xiejingyu@cumt.edu.cn。

引用格式:陈秋,刘一凡,金雪,等.花岗岩型干热岩储层信息获取方法及控震压裂技术介绍[J].钻探工程,2023,50(S1):50-55.

CHEN Qiu, LIU Yifan, JIN Xue, et al. Introduction of information acquisition method and controlled seismic fracturing technology for granite-type hot dry rock reservoir[J]. Drilling Engineering, 2023,50(S1):50-55.

Geothermal Systems (EGS) and the core of EGS is to drill into and fracture the reservoir to form a certain scale of fracture network, and construct a circulation circuit of injection wells and production wells to extract thermal energy for power generation. From the EGS fracturing engineering cases of granite-type hot dry rock such as Basel EGS project in Switzerland and Pohang EGS project in South Korea, it can be found that the induced earthquake has become a key factor restricting the development of granite-type hot dry rock because the specific location of large-size and high-inclination structural plane is not clear, and the flow direction of fracturing fluid in the fracturing process cannot be predicted, which leads to the slip of structural plane caused by fracturing fluid entering such structural plane and inducing earthquake. This article will focus on this problem by identifying the information of the reservoir where the hot dry rock is located and furthermore introduce the construction method of seismic control and fracturing to build artificial heat reservoir for the development of granite-type hot dry rock.

Key words: granite-type hot dry rock; enhanced geothermal system; induced earthquake; hydraulic fracturing; moment tensor inversion; information acquisition; seismic control and fracturing

0 引言

随着气候变暖等全球性挑战的加剧,能源的短缺正在变得更加突出,是影响我国经济和社会发展的关键性障碍^[1]。为了减少人类对化石能源的严重依赖,缓解环境污染问题,早日实现碳中和目标,开发新的和可替代能源的任务正变得越来越紧迫。为应对环境问题,改善能源利用结构,人们对地热能资源认识不断深化,世界各国纷纷将目光聚焦于潜力巨大且对环境友好的干热岩能源上^[2]。

干热岩(Hot Dry Rock,缩写为HDR)是储量巨大的新型能源^[3],一般指温度 $>180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且内部不存在或仅含少量流体的高温岩体^[4]。据估算,3~10 km深处的干热岩拥有 $2.5\times 10^{25}\text{ J}$ 的超强能量,这一数字是世界上石油、天然气和煤炭等化石能源的30倍^[5],干热岩不仅拥有换热效率高的利用效果,而且还没有污染,拥有遍及世界各地极其丰富的储量,并且具有良好的长期稳定性,它已经成为21世纪替换传统化石燃料的一种可靠、环境友好的最佳清洁能源,也将成为地热能发展史上一个重要里程碑^[6]。

开发干热岩有三大关键步骤,分别是钻井,压裂,循环发电或供暖。增强型地热系统(Enhanced Geothermal Systems, EGS)是开发干热岩资源的具体工程手段,在注入井和生产井中循环地热水,通过热交换提取裂缝中的地热能,从而达到地热发电和综合供暖利用的目标^[7]。详细来说就是干热岩储层的开发是通过钻井和水力压裂建立人工热储构造,即建立增强型地热系统,通过钻完井建立注入井和生产井,并通过水力压裂建成裂缝沟通,最终形成“人造地热田”。利用地热水循环提取热量,达到地

热发电和供暖综合利用的目标。

近年来,研究人员发现,EGS开发过程中,如果进行了热储改造和注水操作,就有引起小规模地震的可能。少数EGS工程的注水操作与3级及更高级别的地震有相关性,必须加以重视^[8]。由于干热岩层深入到地下3~10 km,在使用常规的EGS开发技术时,会受到地表应力的影响,从而引起更高级别的地震,故在开采时必须加倍小心,避免受到不利影响。由于可能导致严重的自然灾害和社会危机,因此必须采取有效的措施来进行科学的应对^[9]。

Troiano等^[10]提出通过建立水-热耦合的多物理模型和非饱和水热输运模型能够有效地识别出自电场的存在,从而有效预测和识别出潜在的地震危机。Mukuhira等^[11]指出在关井之前孔隙压力的变化会对周边的裂缝和断层造成较为严重的影响,一旦这些裂缝和断层达到临界应力,其他的孔隙压力也会随之增加,从而导致潜在的危害。局部剪切滑移有可能导致严重的灾害,甚至会造成重大的破坏。Barth等^[12]提出的统计预测模型被认为可有效评估关井后注入诱发地震的发生概率。Shapiro等^[13]提出的震级-频度分布曲线技术虽然能够提供一个较为准确的结果,但是由于忽略了地热储层的孔隙压力的变化,故无法作为关井阶段的重要指标。除此之外,他们还开发出一种新的发震指数技术,以更准确的反映出地震的发生概率,但这种技术需要确保所创建的关系曲线的斜率与发震指数的稳定才有效^[14]。McGarr^[15]认为,当流体注入时,流体的体积变化会引起断层的有效法向应力变化,局部的地震活动被限定在流体注入的范围内,为此他建

立了一个基本的假设,即最高的震级和净注入的体积(ΔV)存在一定的线性相关,从而可以预测出诱发地震的震矩强度上限。但由于忽略了注入流体在储层内外扩散的方式或位置等流体力学细节,该方法的适用性受到了限制^[16]。Galis等^[17]通过考虑了包括孔隙压力、摩擦参数和应力状态对破裂传播的作用,建立量化的物理模型来估计由孔隙压力扰动引起的最大破裂尺度。但是由于干热岩开采过程涉及到固-液-热-化学等多场耦合问题,进行诱发地震的前瞻性预测难度较大。

本文旨在通过对瑞士 Basel EGS 和韩国 Pohang EGS 等花岗岩型干热岩压裂工程的分析研究,探讨控震压裂人工热储的开发方法,并详细阐述其实施方式和步骤。

1 开发干热岩诱发地震工程简介

1.1 瑞士 Basel EGS 工程

在 2006~2007 年间,由于 EGS 工程的持续实施,瑞士 Basel 发生了多达 3500 次的微震事件^[18]。由于注水流速逐渐加大,井口压力不断增加,微震的产生次数和震级也不断上升。在热储工程建设期间,发生了一次地震,震级达到 2.6 级,在此之后,注水工作被提前叫停,随后项目开展地区又连续发生两次地震,震级可达 2.7 级和 3.4 级,这致使项目被叫停并进行灾害补偿^[18-19]。这也让人们意识到重新审视增强地热项目安全的重要性。

1.2 Pohang EGS 工程

Pohang EGS 项目包括 2 口钻井,井深 >4000 m,井口径距 6 m,井底延伸约 600 m^[20-21]。在压裂过程中,井周断层导致 PX-2 井的最大井口压力高达 89.2 MPa,而 PX-1 井的最大压力只有 27.7 MPa^[22]。压裂施工项目结束 6 个月后,韩国沿海城市浦项发生 Mw5.5 的地震。地震发生后,韩国政府十分重视,为了调查清楚地震起因,特地成立了调查研究团。调查团经过 1 年的详细调查,得到初步结论:地震是由于地热发电所在压裂过程中向地热井注入高压水而引起的。在韩国此次地震发生之前,世界各地已经发生过多次与地热开发有关的较强地震。

1.3 其余干热岩开发诱发地震事件

除了瑞士和韩国的 EGS 建设外,全球各地不同地质背景下 EGS 工程建设造成的微震事件还有很多。例如美国 Geysers、萨尔瓦多柏林地区、澳洲

Cooper 盆地等地也曾出现过 3~5 级地震^[23-24]。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^[25];法国 Soultz 工程项目在注水过程中,发生了 200 个微震事件^[26-27];而在 2013 年 7 月,瑞士的 St.Gallen 地热工程建设项目中,在第一口深井激发时,诱发了里氏 3.5 级地震,当地民众能直接感受到震感^[28]。

2 花岗岩型干热岩储层信息获取方法

通过对上述 EGS 项目的分析发现:诱发地震已是限制花岗岩型干热岩开发的重要因素。在开发过程中,虽然开发过程中诱发的地震震级没有断层活化诱发的地震震级大,但在压裂过程中由于压裂液的进入,孔隙压力效应会使较大尺寸的天然结构面发生滑移,导致地层能量急剧释放,这可能诱发具有潜在破坏性的地震。因此,在花岗岩型干热岩压裂的基础上,如何在岩体中压裂形成一定规模的裂缝网络,同时又能最大限度的防止因地层能量急剧释放而诱发的有感地震,已成为开发花岗岩型干热岩的关键。

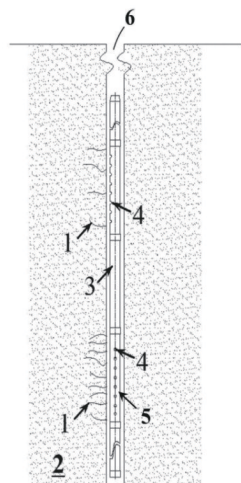
为了实现这一目的,需要先查明花岗岩型干热岩储层信息,即查明是否存在大尺寸高倾角的结构面,其方法如下:

利用三维地震勘探技术,在花岗岩型干热岩的有利区域进行勘探,在断层不发育区域开发靶点并钻直井到达目的层。直井开展成像测井,选择发育层段作为压裂段,采用组合管柱完井。为了更准确地测试储层压裂情况,开展小液量储层压裂测试,通过微地震技术来监测岩石破裂所产生的能量波,并使用矩张量反演来获取岩石破裂的准确位置及“沙滩球”。随后检测判断压裂段中是否存在未被发现的大尺寸高倾角的自然结构面,如果存在,就使用石英砂进行封堵,并对位于致密层段的无孔套筒予以射孔。配合压裂材料,通过多液性压裂液开展水力压裂。根据储层岩性的不同,干热岩型地热可以分为花岗岩型、碳酸盐岩型和砂岩型干热岩,其中,花岗岩型干热岩的分布范围最广,在相同埋深下,温度也最高。本方法旨在针对花岗岩型干热岩进行设计,而花岗岩型干热岩开发有利区是指通过野外地质调查,并结合已有钻探、物探等技术手段初步筛选出的场区,在此场区内开展三维地震勘探主要是为探明花岗岩型干热岩储层内的断层发育情况。在花

花岗岩型干热岩开发有利区中,最重要的评估参数是:岩石温度高于 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$,埋深低于 4500 m 。断层不发育区域是指花岗岩型干热岩储层中没有断层的区域。三维地震勘探是本领域的已有常规地球物理勘探手段。成像测井是一种已经成熟的本领域技术,它可以通过声成像或电成像来获取测井结果,这些结果能够帮助我们解释花岗岩型干热岩储层中的天然裂隙,并借此区分发育层段和致密层段等。在花岗岩型干热岩储层中,天然裂隙(天然裂缝)较为发育的部分为发育层段,反之致密层段。在自然界中,天然结构面是自然形成的天然裂缝,而通过人类利用水力作用,水力压裂形成的裂缝,为水力压裂裂缝。通过上述方法即可查明花岗岩型干热岩储层中结构面的位置信息从而进行压裂设计。

3 控震压裂步骤

在查明花岗岩型干热岩储层中结构面的位置信息后,进行控震压裂人工热储建造,详细实施步骤如图1所示。



1—天然裂隙;2—花岗岩型干热岩储层;3—无孔套管;4—出水孔;5—打孔管;6—直井

图1 控震压裂人工热储建造方法的实施步骤示意

(1)利用三维地震勘探技术,在花岗岩型干热岩的有利区域进行勘探,以此更好地了解花岗岩型干热岩储层的断层发育情况,并在断层不发育的区域进行精准的靶点开发,最终实现对目标层的精准钻探。

(2)通过对直井进行成像测量,可以根据此结

果获得井周围的自然裂隙发育状况,进而在花岗岩型干热岩储层中选取最具发展潜力的层段(天然裂隙较为发育的发育层段),作为压裂段,其他层段则被看作致密层段,最后采用组合管柱完井,其中:组合管柱由上下拼接成一体几个打孔管和几个无孔套管构成,管道的宽度与直井的井径相匹配,以便顺利下放入井,打孔管、无孔套管的长度、数量应分别根据发育层段的长度、个数合理设计,合理地调整打孔管和无孔套管的尺寸和比例,以便使打孔管与压裂段相对,而无孔套管则与致密层段相对。

(3)通过改变排量的方法,开展小液量储层压裂测试,同时利用微地震技术监测在小液量储层压裂测试过程中岩石破裂事件(微地震事件)伴随产生的能量波,并利用这些获得的能量波波形数据(用于描述地层破裂产生的含有能量的波形)进行矩张量反演(矩张量反演^[29]作为一种可以获取岩石/岩体破裂矩震级、震源机制、应力状态等信息的方法,被广泛地应用于地震、水压致裂、地热开发、煤矿开采、山体垮塌、室内岩石力学试验等项目中),从而可以准确的获取岩石破裂发生的位置,以及包含破裂机制信息(张性、剪切、压缩)和裂缝面形态参数信息(走向、倾角、开度等)的反演事件震源机制“沙滩球”(见图2)。

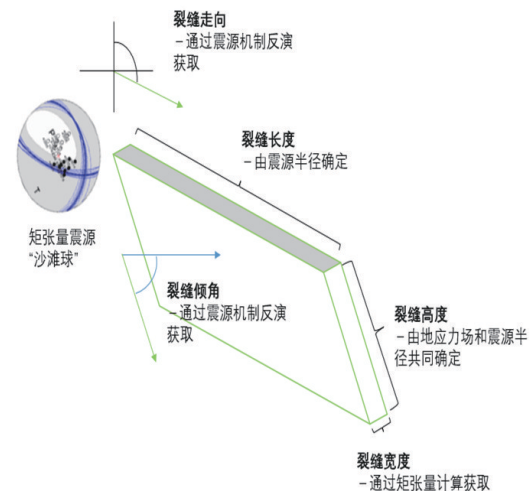


图2 反演事件震源机制“沙滩球”及其信息获取过程示意

微地震技术是监测小液量储层压裂测试过程中储层岩石破裂信号的有效方法,它可以检测出岩层裂缝产生时形成的能源波信号。通常,这种技术是在地面或地表浅层(深度 $<20\text{ m}$)的井中安装检波

器,并在邻近的井(深度 $>1500\text{ m}$)安装检波器,检波器包括地面星型排列测线检波器、浅井检波器台站和深井阵列检波器,检波器用于接收储层岩石破裂所产生的能量波。矩张量为包含了6个独立分量的矩阵,通过矩张量反演,借由各个独立分量可以推断出岩层裂缝的机理和裂缝的形态参数等信息。例如,可以根据震源半径来确定裂缝面长度,而震源半径通过矩张量的某一个独立分量计算获得。

在实际设计中,矩张量反演是一种用于研究地质构造的技术,矩张量反演的具体步骤为:首先,对采集到的能量波波数据滤除岩石破裂信号频率域之外的噪声信号,并通过人工拾取信号波形初至的方式,依据声波时差准确定位岩石破裂事件发生的位置,然后,针对已定位的岩石破裂事件,利用格林函数综合波形位移、振幅和极性参数,基于P波振幅和极性的震源机制矩张量反演,获得包含破裂机制信息(张性、剪切、压缩)和裂缝面形态参数信息(走向、倾角、开度等)的反演事件震源机制“沙滩球”。“沙滩球”为反演事件震源机制的常见表示方式。

(4)根据相邻的连续多个岩石破裂事件所对应的“沙滩球”,检测判断压裂段中是否存在未被发现的大尺寸高倾角的自然结构面:若不存在,则进入步骤6;若存在,将使用石英砂进行封堵此天然结构面对应的打孔管上的出水孔,防止水力压裂时压裂液喷向此天然结构面,然后进入下一步骤。

(5)为弥补由于压裂段缩短所导致的热储规模减小,对致密层段的无孔套管进行了射孔。

(6)通过使用特定的压裂材料(如暂堵剂等),采用控排量的泵注方法,通过多液性的压裂液开展水力压裂(水力压裂是在花岗岩型干热岩储层中建造人工热储的主要手段),继而水力压裂在花岗岩型干热岩储层中产生水力压裂裂缝,以完成人工热储建造。

在实际实施中,花岗岩型干热岩深部储层中的部分大尺寸、高倾角天然结构面难以通过三维地震勘探手段进行识别,但这类天然结构面在压裂作用下发生的滑移仍可能诱发有感地震,本方法采用了“沙滩球”的判断机制来解决。具体来说,在步骤4中,如果观察到相邻的连续多个岩石破裂事件对应的“沙滩球”所指代的天然结构面走向、倾角非常接近,且各岩石断裂的强度超过了预期的阈值,则判定储层深部(深度通常大于 3500 m ,即通过三维地震

勘探未探明的深部)压裂段存在三维地震勘探未探明的大尺寸(长度 $>100\text{ m}$)、高倾角(倾角 $>50^\circ$)的天然结构面。

4 结语

通过分析瑞士 Basel EGS 和韩国 Pohang EGS 等花岗岩型干热岩压裂工程可以发现:开发干热岩诱发地震的问题是阻碍其发展的主要因素之一,是因为在干热岩开发的过程中由于压裂液的进入,大尺寸高倾角的结构面上方的应力会发生明显变化导致滑移,由于结构面滑移而诱发地震。故在开发干热岩时应该查明此类结构面的位置,使用该花岗岩型干热岩控震压裂人工热储建造方法通过“沙滩球”模型即可查明干热岩储层信息,在泵注压裂液时使用暂堵剂等工艺封堵大尺寸高倾角的结构面出水孔进行压裂,既可在花岗岩型干热岩储层中水力压裂形成所需规模的裂缝网络,又可在水力压裂花岗岩型干热岩过程中极大减小诱发有感地震风险,可为花岗岩型干热岩地热开发提供可靠保障,完善干热岩开发技术,从而有望推动干热岩开发进程,进而推动能源结构优化、实现“双碳”战略目标、地热能商业化开发和规模化利用进程。

参考文献:

- [1] 李德威,王焰新.干热岩地热能与开发的若干重大问题[J].地球科学(中国地质大学学报),2015,40(11):1858-1869.
- [2] 宫天琦.基于岩石物理的皖北干热岩地震响应特征研究[D].中国矿业大学,2021.
- [3] 许天福,张延军,于子望,等.干热岩水力压裂实验室模拟研究[J].科技导报,2015,33(19):35-39.
- [4] 谢紫霄,黄中伟,熊建华,等.天然裂缝对干热岩水力压裂裂缝扩展的影响规律[J].天然气工业,2022,42(4):63-72.
- [5] 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.
- [6] Tester J W, Anderson B J, Batchelor A S, et al. The future of geothermal energy-impact of enhanced geothermal system (EGS) on the United States in the 21 century[M]. Cambridge MA: MIT Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [7] 周舟,金衍,卢运虎,等.干热岩地热储层钻井和水力压裂工程技术难题和攻关建议[J].中国科学:物理学力学天文学,2018,48(12):97-102.
- [8] 甘浩男,王贵玲,蔺文静,等.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,2020,26(2):211-220.
- [9] 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.
- [10] Troiano A, Di Giuseppe M G, Monetti A, et al. Fluid injection in Enhanced Geothermal Systems: A study on the detectability of self-potential effects and on their correlation with induced seismicity[J]. *Geothermics*, 2017, 65: 280-294.
- [11] Mukuhira Y, Dinske C, Asanuma H, et al. Pore pressure behavior at the shut-in phase and causality of large induced seismicity at Basel, Switzerland [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(1): 411-435.
- [12] Barth A, Wenzel F, Langenbruch C. Probability of earth quake occurrence and magnitude estimation in the post shut-in phase of geothermal projects [J]. *Journal of Seismology*, 2013, 17(1): 5-11.
- [13] Shapiro S A, Dinske C, Langenbruch C, et al. Seismogenic index and magnitude probability of earthquakes induced during reservoir fluid stimulations [J]. *The Leading Edge*, 2010, 29(3): 304-309.
- [14] Shapiro S A, Krüger O S, Dinske C, et al. Magnitudes of induced earthquakes and geometric scales of fluid-stimulated rock volumes [J]. *Geophysics*, 2011, 76(6): 55-63.
- [15] McGarr A. Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(2): 1008-1019.
- [16] Van Der Elst N J, Page M T, Weiser D A, et al. Induced earthquake magnitudes are as large as (statistically) expected [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(6): 4575-4590.
- [17] Galis M, Ampuero J P, Mai P M, et al. Induced seismicity provides insight into why earthquake ruptures stop [J]. *Science Advances*, 2017, 3(12): 7528.
- [18] Bethmann F, Deichmann N, Mai P M. Seismic wave attenuation from borehole and surface records in the top 2.5 km beneath the city of Basel, Switzerland [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 190(2): 1257-1270.
- [19] Bachmann C E, Wiemer S, Woessner J, et al. Statistical analysis of the induced Basel 2006 earthquake sequence: introducing a probability-based monitoring approach for Enhanced Geothermal Systems [J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 186(2): 793-807.
- [20] Kim H, Xie L M, Min K B, et al. Integrated in situ stress estimation by hydraulic fracturing, borehole observations and numerical analysis at the EXP-1 borehole in Pohang, Korea [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50: 3141-3155.
- [21] Grigoli F, Cesca S, Rinaldi A P, et al. The November 2017 Mw5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea [J]. *Science*, 2018, 360: 1003-1006.
- [22] Kim K H, Ree J H, Kim Y H, et al. Assessing whether the 2017 Mw5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event [J]. *Science*, 2018, 360: 1007-1009.
- [23] Sanuma H, Kenmoku Y, Niitsuma H, et al. Interpretation of reservoir creation process at Cooper Basin by microseismic multiplet analysis [J]. *GRC Transactions*, 2009, 33: 149-153.
- [24] Benato S, Hickman S, Davatzes N C, et al. Conceptual model and numerical analysis of the Desert Peak EGS project: Reservoir response to the shallow medium flow rate hydraulic stimulation phase [J]. *Geothermics*, 2016, 63: 139-156.
- [25] Brown D W. Hot dry rock geothermal energy: important lessons from Fenton hill [C]. *Proceedings of the Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford: Stanford University, 2009.
- [26] Grard A, Genter A, Kohl T, et al. The deep EGS (Enhanced Geothermal System) project at Soultz-sous-Forêts (Alsace, France) [J]. *Geothermics*, 2006, 35(5-6): 473-483.
- [27] Zimmermann G, Reinicke A. Hydraulic stimulation of a deep sandstone reservoir to develop an Enhanced Geothermal System: Laboratory and field experiments [J]. *Geothermics*, 2010, 39(1): 70-77.
- [28] Edwards B, Kraft T, Cauzzi C, et al. Seismic monitoring and analysis of deep geothermal projects in St Gallen and Basel, Switzerland [J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 201(2): 1022-1039.
- [29] 任义, 高永涛, 吴顺川, 等. 基于矩张量反演的传感器校准方法应用和对比 [J]. *岩土力学*, 2022, 43(6): 1738-1748.

(编辑 王文)