



## 增强地热系统研究现状：挑战与机遇

亢方超 唐春安 李迎春 李天娇 门金龙

### Challenges and opportunities of enhanced geothermal systems: A review

KANG Fang-chao, TANG Chun-an, LI Ying-chun, LI Tian-jiao, MEN Jin-long

引用本文:

亢方超, 唐春安, 李迎春, 李天娇, 门金龙. 增强地热系统研究现状：挑战与机遇[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(10): 1767–1777. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2022.04.07.004

KANG Fang-chao, TANG Chun-an, LI Ying-chun, LI Tian-jiao, MEN Jin-long. Challenges and opportunities of enhanced geothermal systems: A review[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(10): 1767–1777. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2022.04.07.004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.04.07.004>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### THMC多场耦合作用下岩石物理力学性能与本构模型研究综述

A review of the research on physical and mechanical properties and constitutive model of rock under THMC multi-field coupling  
*工程科学学报*. 2020, 42(11): 1389 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.07.29.003>

#### 仿生扑翼飞行器的视觉感知系统研究进展

Research progress on visual perception system of bionic flapping-wing aerial vehicles  
*工程科学学报*. 2019, 41(12): 1512 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.03.08.001>

#### 金属矿深部开采现状与发展战略

Current status and development strategy of metal mines  
*工程科学学报*. 2019, 41(4): 417 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.04.001>

#### 深部开采安全机理及灾害防控现状与态势分析

Current status and future trends of deep mining safety mechanism and disaster prevention and control  
*工程科学学报*. 2017, 39(8): 1129 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.08.001>

#### 热冷循环下外墙外保温系统耐候性能数值模拟

Numerical simulation of the weathering performance of an exterior wall external insulation system under heating-cooling cycles  
*工程科学学报*. 2018, 40(6): 754 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.06.014>

#### 基于人机协同的车道保持辅助系统研究进展

Overview of lane-keeping assist system based on human-machine cooperative control  
*工程科学学报*. 2021, 43(3): 355 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.10.13.001>

# 增强地热系统研究现状: 挑战与机遇

亢方超<sup>1,2)</sup>, 唐春安<sup>2)</sup>, 李迎春<sup>2)</sup>✉, 李天娇<sup>2)</sup>, 门金龙<sup>1)</sup>

1) 广东石油化工学院机电工程学院, 茂名 525000 2) 大连理工大学深地工程研究中心, 大连 116000

✉通信作者, E-mail: [yingchun\\_li@dlut.edu.cn](mailto:yingchun_li@dlut.edu.cn)

**摘要** 开发地热资源, 尤其是深部干热岩地热资源, 是加快能源结构转型, 顺利实现“双碳”目标的重要途径。增强地热系统经历了 50 余年的发展, 在深部地热资源开采方面取得了丰富的研究成果和施工经验。回顾增强地热系统的发展历程, 总结热储特征、储层改造以及示范项目的终止原因, 分析商业化面临的挑战, 探讨未来的探索方向和发展机遇, 能够有效服务我国深部地热资源开发和示范项目的建设。在经历研究和开发阶段后, 增强地热系统进入示范和商业化的飞速发展阶段, 截至 2021 年末, 世界累计的增强地热系统数量已达 41 个, 累计发电装机量为 37.41 MW; 储层地质条件的复杂性和差异性以及现有改造技术对储层原位地质环境的依赖性, 难以形成“可复制”的热储改造模式, 由此导致的热储质量差等问题是制约增强地热系统发展的主要原因; 建立典型的干热岩增强地热系统示范项目或探索基于采矿技术的增强地热系统, 突破热储改造对原位地质条件的依赖性, 形成“可复制”的深部地热资源开采体系, 是增强地热系统未来的发展方向, 也是实现深部地热资源大规模商业化的关键出路。

**关键词** 深部地热能; 增强地热系统; 干热岩; 热储改造; 热矿共采

**分类号** TD803

## Challenges and opportunities of enhanced geothermal systems: A review

KANG Fang-chao<sup>1,2)</sup>, TANG Chun-an<sup>2)</sup>, LI Ying-chun<sup>2)</sup>✉, LI Tian-jiao<sup>2)</sup>, MEN Jin-long<sup>1)</sup>

1) College of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China

2) Deep Underground Engineering Research Center, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

✉ Corresponding author, E-mail: [yingchun\\_li@dlut.edu.cn](mailto:yingchun_li@dlut.edu.cn)

**ABSTRACT** Exploiting geothermal resources, especially hot dry rock (HDR), is essential to reduce carbon emissions to build an acceptable energy structure. The enhanced geothermal system (EGS) for mining HDR has experienced more than 50 years since it was proposed in 1970, obtaining rich research results and construction experience. It is of great significance to review the EGS history, which includes discussing the project site selection and thermal storage stimulations, summarizing the reasons for the shutdown of demonstration projects, and indicating the key factors restricting EGS development. Based on this, the future development direction of EGS is clarified, which can help explore deep geothermal energy and construct associated demonstration projects in China. The overall development of EGS is divided into two stages, namely, the research and development stage before 2000 (a total of 14 EGS projects) and the demonstration and quasi-commercialization stage since 2000 with a rapid development speed (a total of 27 EGS projects). By the end of 2021, the cumulative number of EGS worldwide has increased to 41. However, the cumulative installed capacity of power generation only reaches 37.41 MW. EGS is still on the learning curve, resulting in a long way to go to realize the large-scale commercialization of HDR geothermal energy. The factors restricting the commercialization of EGS are the lack of policy support and capital investment, the limitations of technical difficulty, and the unpredictability of the geological condition of the thermal reservoir, which weakens EGS development and even causes its suspension or termination. Because of the complex geological environment of thermal reservoirs, the

收稿日期: 2022-04-07

基金项目: 中国工程院重点咨询项目(2019-XZ-16); 广东石油化工学院人才引进项目(XJ2022000801)

fracture network and associated reservoir quality induced by hydraulic stimulations are uncontrollable, causing the fractured quality of the thermal reservoir to be lower than its critical value. It results in numerous adverse problems in most EGS projects, including insufficient thermal reservoir volume, an unstable fracture network, associated heat exchange area, severe fluid loss, and induced unacceptable earthquakes. Thus, the fundamental reason for EGS's inability to commercialize is that it is challenging to form a reproducible thermal reservoir stimulation model induced by the difference in thermal reservoir geological conditions and the dependence of the existing stimulation technologies on the *in situ* reservoir geological environment. Establishing the database of HDR and EGS plays an urgent role in EGS development by forming an accurate quantitative system of reservoir geological conditions to explore the relationship between geological conditions and reservoir reconstruction and then build a replicable thermal reservoir reconstruction technology. Focusing on new and demonstration stimulations for the thermal reservoir, such as the enhanced geothermal system based on caving technology (EGS-E), FORGE, and DEEPEGS projects, may provide an acceptable way to break through the dependence of thermal reservoir stimulation on *in-situ* geological conditions and form the "reproducible" deep-geothermal resource mining system to realize the large-scale commercialization of deep-geothermal resources.

**KEY WORDS** deep-geothermal energy; enhanced geothermal system; hot dry rock; thermal reservoir stimulation; co-mining of geothermal and mineral resources

加快降低碳排放步伐,持续推进能源结构调整<sup>[1-2]</sup>,大力发展非碳基能源,是达成“双碳”目标的首要任务. 地热能因其储量丰富、分布广泛,且满足基本负荷的电力需求,具有广阔的开发前景和发展潜力,有望填补化石燃料逐步退出的短缺<sup>[1,3]</sup>,成为能源结构转型的最终方向<sup>[4-6]</sup>. 地热资源研究和开发热度逐渐上升<sup>[7-8]</sup>,截至 2020 年末,开发和利用地热能的国家 and 地区已达到 88 个,地热能的直接利用量和累计发热装机量增加到了 1020887 TJ·a<sup>-1</sup> 和 107727 MW<sup>[9]</sup>.

我国地热资源丰富,开发潜力巨大<sup>[1]</sup>. 水热型地热资源基数为 280 EJ,相当于 95 亿吨标准煤;深部地热资源基数为  $2.09 \times 10^7$  EJ,相当于 856 万亿吨标准煤<sup>[10-11]</sup>,约为浅层地热资源近 10 万倍. 按照深部地热资源开采率的下限(2%)进行计算<sup>[12]</sup>,深部地热资源可开采量为 17.1 万亿吨标准煤,相当于 2021 年能源消耗总量 52.4 亿吨的 3267 倍. 因此,研究与开发深部地热资源,是解决我国能源结构问题,实现“双碳”目标的有效途径<sup>[10,12]</sup>.

水热型地热资源是人类利用最早、使用最广泛的地热资源<sup>[8]</sup>,具有巨大的开发优势;但是其总储量有限且可再生速度非常缓慢,具有明显的规模化瓶颈<sup>[7]</sup>. 岩热型地热资源(主要指深部干热岩地热资源)的研究与开发起步较晚且进展缓慢,但具备明显的储量优势,其开发潜力是水热型地热资源的 100~1000 倍<sup>[13]</sup>. 增强(型)地热系统(Enhanced geothermal system, 缩写为 EGS)是为了利用工程技术手段开采干热岩地热资源或强化开采低渗性热储地热能而建造的人工地热系统,其原理是在高温低渗的干热岩体中,采用以水力措施为主

的人工技术对热储岩体进行改造,增强其渗透性和流体流量,然后驱动低温工质流经改造形成的裂隙网络进行热能的提取和利用<sup>[14-15]</sup>. 自美国启动首个试验项目以来,EGS 已经历了近 50 年的发展,不同国家和地区开展了大量的科研和试验工程,取得了丰富的研究成果和开发经验,但却始终未能实现深部干热岩地热能的大规模商业化开发<sup>[16]</sup>. 因此,回顾 EGS 发展历程,探讨制约其发展的关键因素和面临的挑战,阐明未来探索的方向和发展机遇,可以有效服务于我国示范项目的建设和深部干热岩地热能的大规模开发<sup>[6]</sup>.

## 1 统计方法

### 1.1 增强地热系统

增强地热系统由美国 Los Alamos 国家实验室研究人员于 1971 年首次提出的,其目的是为了开采干热岩型地热资源<sup>[17]</sup>. 随着时间的推移和技术的推广,其外延逐渐增加,不同机构对其内涵的定义和解释也出现了偏差,这种差异化不利于增强地热系统关键技术的攻关,也不利于政府对其制定针对性的扶持和补贴政策<sup>[16]</sup>. 为了便于统计和分析,本文采用了国家能源局《地热能术语》(NB/T 10097—2018)中关于干热岩和增强地热系统的定义,即,干热岩是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;增强地热系统是为利用工程技术手段开采干热岩地热能或强化开采低孔渗性热储地热能而建造的人工地热系统.

### 1.2 数据来源与统计标准

(1)项目选择. 统计项目包括所有为开采干热岩或低孔渗性热储而建立的增强地热系统,但不

包括单纯为增加水热型地热产能而建立的热储改造工程。

(2)项目完成度。统计项目具备完整的地热系统(注入井、生产井、热储改造、井间流体联通等)或者计划建立完整的地热系统且至少完成一口钻井;仅为开展勘探或者试验的单井项目,以及计划未来实施的项目不在本文统计之列。

(3)数据来源。统计项目的数据来源以期刊论文、会议论文和专业书籍为准。当三者存在冲突时,以期刊论文数据为准。

## 2 发展历程与现状

### 2.1 发展历程

1973年,为验证干热岩资源开发的可行性<sup>[15]</sup>,美国政府在新墨西哥州 Fenton Hill 启动了世界范围内首个 EGS 项目<sup>[18]</sup>。该项目最大钻井深度为 4391 m,最高储层温度为 327 °C,热储规模达到 10 MW。虽然后期因流体损失严重而关闭,但其论证了采用 EGS 提取干热岩型地热能的可行性,开启了深部热能开采的先河<sup>[19]</sup>。截至 2020 年末,世界范围内共开展或者正在开展的 EGS 项目共计 41 个,主要分布于美国、德国、英国、澳大利亚

和中国等 14 个国家和地区。

EGS 的发展整体分为两个阶段,如图 1 所示。2000 年以前是 EGS 的研究和开发阶段,共开展了 15 个试验项目,主要目的是评估 EGS 的可行性及关键技术的研发。这期间,美国、德国、英国、法国和日本等国家在不同区域、不同热储条件下开展了大量的试验和技术攻关,为后续 EGS 的发展奠定了基础<sup>[16]</sup>。该阶段开展 EGS 试验的国家中,多数以资金或人员的形式参与了 Fenton Hill 项目,掌握了当时最先进的技术和丰富的现场数据,为他们在各自的国家启动 EGS 试验提供了必要的技术支持。2000 年以后,鉴于能源危机和寻求新能源的热潮,EGS 取得了蓬勃的发展,逐渐进入示范和准商业化阶段。相关技术日趋成熟,项目数量取得了飞速的增长。2001 年至 2005 年新增项目为 6 个,2005 年至 2010 年则增至 13 个,几乎与第一阶段(近 30 年)的项目总和持平。项目的增多原因一方面是研究和开发阶段取得成功经验的国家加大了投资力度,相继启动了许多新的项目,如美国,2000 年以后新增了 8 个 EGS 项目;另一方面是一些干热岩资源丰富的新兴国家,如中国<sup>[20]</sup>、韩国<sup>[21]</sup>等,相继启动了首个 EGS 试验项目。

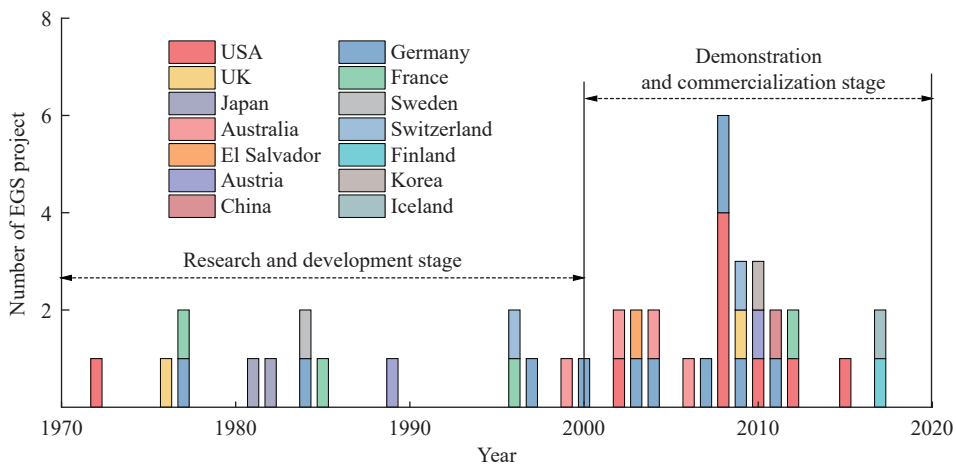


图 1 增强地热系统项目发展趋势

Fig.1 Development of the time and area distribution of EGS projects in the world

### 2.2 钻井深度与储层温度

钻孔深度和储层温度与 EGS 项目的运营成本和热能产出密切相关。图 2 统计了 41 个 EGS 项目的钻孔深度与储层温度分布情况。如图所示,研究和开发阶段 EGS 项目的钻孔深度和储层温度整体较低,随着时间的推移,后续 EGS 的钻孔深度和储层温度均呈现逐渐增加的趋势。研究和开发阶段项目深度和储层温度低是因为在 Fenton Hill 项目之后,许多国家开展了浅部 EGS 试验项目,例如:

德国的 Falkenberg 项目<sup>[22-23]</sup>、日本的 Ogachi 项目<sup>[24]</sup>、法国的 Le Mayet 项目<sup>[16]</sup>等,这些项目钻井深度多数位于 1500 m 以浅,储层温度多低于 100 °C。试验结果否定了浅层开发干热岩地热能的可能性,同时随着钻井和储层改造技术的发展与完善,后续 EGS 项目更倾向于增加钻井深度以获得合适的储层温度。现阶段钻井深度最大的芬兰 Otaniemi 项目<sup>[25]</sup>,其注入井深度达到了 6100 m;热储温度最高的是冰岛的 Reykjanes 项目<sup>[26-27]</sup>,井底温度高达 452 °C。

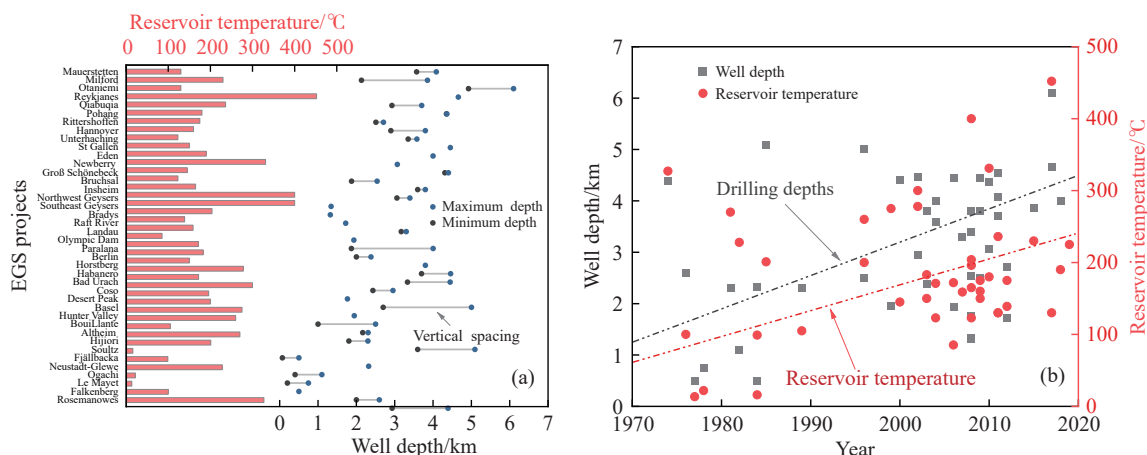


图 2 增强地热系统钻井深度与储层温度分布。(a) 项目分布明细;(b) 随项目时间的发展趋势

Fig.2 Depth and reservoir temperature variations of EGS projects: (a) single EGS; (b) varying with the operation time

图 3 统计了 41 个项目的钻井深度和储层温度分布特征。如图所示,项目深度主要分布于 2~5 km, 占项目总数的 70.8%, 其中:深度位于 4~5 km 的项目最多, 占项目总数的 26.8%; 低于 2 km 和超过 5 km 的项目分别占项目总数的 24.4% 和 7.3%。钻井深度低于 1 km 的项目主要是前期浅部 EGS 试验项目, 如德国 Falkenberg 项目 (500 m)<sup>[23]</sup>。项目的储层温度主要分布于 100~300 °C, 其项目数量占总数的 75.7%, 其中, 温度处于 100~200 °C 的项目最

多, 达到总数的 50%; 低于 100 °C 的项目有 5 个, 多数为浅部 EGS 试验项目, 如英国 Rosemanowes 项目 (79~100 °C)<sup>[28]</sup>, 德国 Neustadt-Glewe 项目 (99 °C)<sup>[29]</sup>; 高于 300 °C 的项目有 6 个, 占总数的 14.6%, 该类项目多依托于浅层的水热型地热能项目或者位于火山发育地区, 地温梯度较大, 例如, 美国 Northwest Geysers 项目 (浅层水热, 400 °C) 和 Newberry 项目 (火山发育, 331 °C)<sup>[30]</sup>, 冰岛 Reykjanes 项目 (浅层水热, 452 °C)<sup>[27]</sup>。

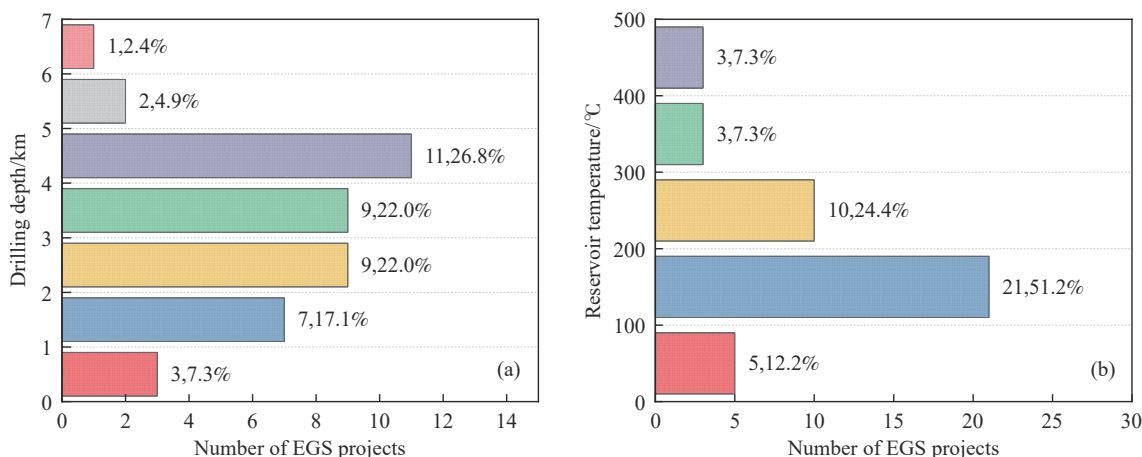


图 3 增强地热系统钻井深度与储层温度分布

Fig.3 Depth and reservoir temperature distribution of EGS projects around the world

热储岩体的温度会随着储层深度的增加而升高, 但是对于不同项目, 储层温度和钻井深度没有直接的相关关系。例如, 德国 Mauerstetten 项目<sup>[31]</sup>的钻井深度为 4050 m, 其储层温度仅有 130 °C, 而日本 Ogachi 项目<sup>[24]</sup>的钻井深度仅有 1100 m, 其储层温度已达到 228 °C。造成这种差异性是因为储层温度不仅取决于埋藏深度, 还取决于其所在位置的大地热流值、地温梯度等参数。此外, 储层改

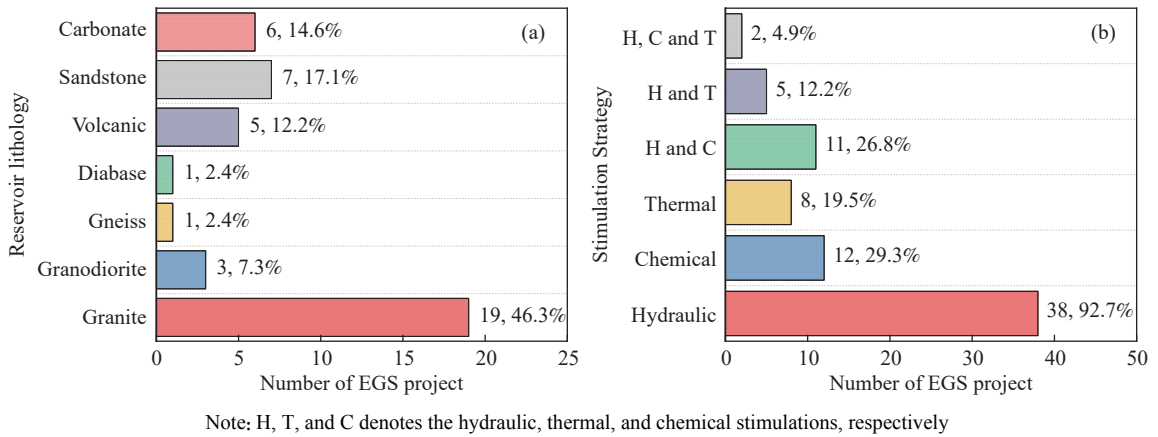
造与热储岩性、构造应力场和天然裂隙发育特征密切相关, 热储热补充能力与居里面埋深、火山岩浆活动等因素相关<sup>[32]</sup>, 因此, 仅以储层温度和钻井深度评价一个 EGS 项目的开发潜能是不合理的, 需要建立科学合理的评价指标和评价体系。

### 2.3 储层岩性与热储改造

图 4 统计了 41 个 EGS 项目的热储岩性与热储改造方式分布情况。如图所示, EGS 的储层岩性

主要以花岗岩为主,在统计的41个项目中,花岗岩类热储项目占总数的53.6%,其次是砂岩和碳酸盐岩热储项目,分别占到总数的17.1%和14.6%。EGS的热储改造方式以水力激发为主,在统计的41个项目中,有38个项目采用了水力激发措施,

占总数的92.7%;采用化学激发和温度激发的项目为12项和8项,分别占项目总数的29.3%和19.5%;而且,为了提升热储改造效果,有18个项目同时采用了2种及以上的改造措施。



Note: H, T, and C denotes the hydraulic, thermal, and chemical stimulations, respectively

图4 增强地热系统热储岩性与热储改造方式分布情况

Fig.4 Reservoir lithology and stimulation of EGS projects around the world

热储岩性与EGS的发展历程表现出一定的相关性。如图5所示,研究与开发阶段的EGS项目的岩性主要以花岗岩类为主,随着时间的推移,花岗岩类热储的比例逐渐降低。这是因为花岗岩类岩体结构致密,渗透性极低,在钻井和压裂过程中容易诱发地震,导致项目造储难度和运营成本居高不下,为了降低改造难度和运营成本,后续的项目逐渐转向了其他处于高温背景下且易于改造的岩石<sup>[32]</sup>,导致砂岩和碳酸盐岩热储逐渐增多。值得注意的是,碳酸盐岩因为具有很好的化学活性,可以采用酸性溶液进行溶蚀以获得优质的改造效果,逐渐成为目前深部热能开发的优选储层<sup>[32]</sup>。因此,花岗岩类热储的占比从1970—1980年的100%,下降到1980—1990年的66%,再到1990—2000

年的50%,2000年以后已经降低到40%左右;相反,碳酸盐岩热储在EGS项目中占比逐渐增高,到2010年以后已经达到了33%。需要说明的是,2010年后,花岗岩热储比例有所回升(56%),一方面是全球开启了新一轮的EGS试验,比如中国和韩国的首个EGS项目的热储岩性均为花岗岩;另一方面是典型EGS示范项目的开展,比如美国“前沿瞭望台研究计划”<sup>[33]</sup>,选择的岩性也是花岗岩。

热储改造方式与储层岩性和储层温度也表现出一定的相关性。花岗岩中的天然孔隙通道较少,化学激发和温度激发的改造效果较差<sup>[32]</sup>,而水力激发的主要作用是诱发储层内天然裂隙的滑移和剪胀,增加储层的渗透性,因此多数花岗岩储层仅采用水力激发措施。在统计的19个花岗岩项目中,有16个项目仅采用单一的水力激发措施。碳酸盐岩容易与酸性溶液产生反应使矿物组分发生溶解,扩大岩石中的孔隙空间<sup>[32]</sup>,因此,碳酸盐岩储层改造通常采用水力激发和化学激发相结合方式进行,本文统计的6个碳酸盐岩热储项目均采用了化学激发的方式。此外,热储岩体温度越高,与压裂工质的温差越大,产生的温度应力就越大,越容易诱发岩体的损伤<sup>[34-35]</sup>,改善热储的改造效果,因此,热储岩体温度较高的项目,例如美国Northwest Geysers和Newberry项目、冰岛Reykjanes项目等,通常采用温度激发的方式,尽可能地降低压裂工质的温度对热储岩体进行的冷冲击,

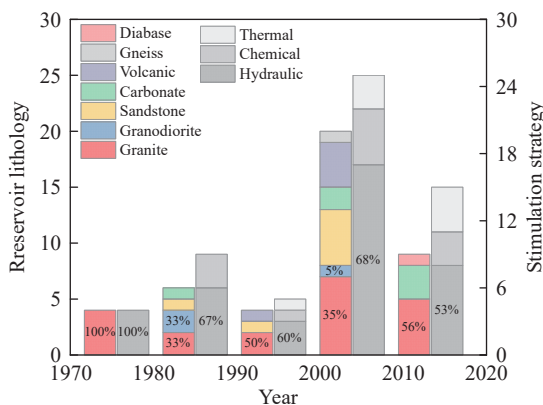


图5 热储岩性与热储改造方式发展趋势

Fig.5 Variations of reservoir lithology and stimulation of EGS projects

以期最大化提高热储渗透率和流体流量<sup>[36]</sup>。

### 3 商业化与面临的挑战

#### 3.1 理想热储与商业化

深部地热资源具有巨大的储量和良好的开发前景, 虽然储层渗透率低、开发难度大<sup>[5]</sup>, 但通过 EGS 改造构建商业化热储(各项指标详见表 1)<sup>[3]</sup>, 可以提供持续 25 年以上不间断的 3~10 MW 的发电能力<sup>[16, 37]</sup>, 因此被认为具有填补化石能源空缺的潜能。然而遗憾的是, 经历了近 50 年的发展, 世界上仍未能构建一个理想的商业化热储; 即便成功运行的 EGS 项目也仅能通过高成本维持兆瓦级的

发电量。截至 2021 年末, 世界范围内 EGS 项目的累计发电装机量(包含计划装机量)仅为 37.41 MW, 分布于 7 个国家的 16 个项目(表 2), 其中最成功的是法国的 Soultz 项目。该项目启动于 1987 年, 共有 4 口地热井(两注、一回、一监测), 钻井最大深度为 5093 m, 最高温度为 200 °C, 在经过两次水力激发和化学激发后, 成功实现了稳定发电, 是 EGS 发电项目的里程碑。目前总装机量为 1.5 MW, 可以实现满负荷发电, 并已于 2013 年实现了并网<sup>[16]</sup>。然而, 巨大开发潜力和兆瓦级发电装机量的鲜明对比, 表明 EGS 距离大规模商业化仍有很长的路要走<sup>[16]</sup>。

表 1 商业化 EGS 热储参数取值区间<sup>[3]</sup>

Table 1 Critical value of thermal reservoir parameters in a commercial EGS<sup>[3]</sup>

Parameters	Critical value	Parameters	Critical value
Flow rate/(L·s <sup>-1</sup> )	50–100	Thermal reservoir volume/m <sup>3</sup>	>2×10 <sup>8</sup>
Outlet temperature/°C	150–200	Fluid resistance/(MPa·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	<0.1
Effective heat exchange area/m <sup>2</sup>	>2×10 <sup>6</sup>	Water loss/%	<10

表 2 EGS 项目发电装机容量一览表

Table 2 Total installed power generation capacity of EGS projects

Countries	Projects	Installed capacity of power /MW	Countries	Projects	Installed capacity of power /MW
USA	Fenton Hill	0.06	Germany	Neustadt-Glewe	0.21
France	Soultz	1.5	Germany	Landau	3.6
Japan	Hijiori	0.13	Germany	Insheim	4.8*
Australia	Altheim	1.0	Germany	Bruchsal	0.55
USA	Desert Peak	1.7	Germany	Groß Schönebeck	1.0
Australia	Habanero	1.0	Germany	Unterhaching	3.36*
El Salvador	Berlin	6.0	USA	Raft River	5.0*
USA	NW Geysers	3.5*	UK	Eden	4.0*

Note: \* denotes planned installed capacity, MW.

#### 3.2 面临的挑战

制约 EGS 商业化发展的原因主要有以下几个方面: 首先是政策扶持和资金投入不足。虽然许多国家提倡开发和利用深部地热能源, 但可替代的清洁能源(如水热型地热能、风能、太阳能等)储量充足, 政府对于 EGS 项目的关注度并不高, 相关的政策扶持相对较少; 而且 EGS 项目前期投资较大, 资金风险高且回收率低, 政府资金和民间投资均相对较少<sup>[38]</sup>。其次是开发难度较大, 技术要求高。EGS 项目的成功案例非常稀少, 未能形成“可复制”的开发模式, 新增 EGS 项目能够借鉴的经验和技术相对有限, 仍需要进行大量的自主创新<sup>[16]</sup>。

第三是以水力激发为主的热储改造技术过度依赖储层的原位地质环境<sup>[39]</sup>。热储之间地质环境的差异性造成热储的改造质量低于预期要求<sup>[18]</sup>, 导致试验工程出现热储规模小、换热网络不足、工质流失严重、诱发地震等问题<sup>[16, 40]</sup>, 影响 EGS 的发展速度, 严重时甚至造成项目的暂停或终止。表 3 详细统计了已经终止或暂停的 20 个项目, 其原因大致可以分为热储质量问题、诱发地震、钻井事故、资金政策匮乏等, 其中, 热储质量问题最多, 占项目总数的 35%, 其次是诱发地震, 占总数的 20%, 钻井压裂事故、资金政策匮乏和其他原因各占总数的 15%。

表3 已终止的 EGS 项目概况一览表

Table 3 Overview of the closed EGS projects

Countries	Projects	Lifespan	Reasons for suspension or closure
USA	Fenton Hill	1972—1993	Insufficient heat reservoir scale; Severe fluid loss
UK	Rosemanowes	1976—1992	Severe fluid loss (above 70%); Earthquake ( $M_w$ 3.1)
Germany	Falkenberg	1977—1986	Low fluid temperature
France	Le Mayet	1978—1986	Low fluid temperature
Japan	Ogachi	1982—2002	Severe fluid loss (75%—90%)
Sweden	Fjällbacka	1984—1995	Severe fluid loss (50%)
Japan	Hijiori	1981—1986	Severe fluid loss (70%); Sudden drop in fluid temperature
Australia	Hunter Valley	1999—2015	Lack of funds and policy support
Switzerland	Basel	1996—2006	Earthquake ( $M_w$ 3.4)
USA	Desert Peak	2008—2013	End of test
USA	Coso	2002—2012	Drilling fracturing accident
Germany	Bad Urach	2006—2008	Drilling fracturing accident
Australia	Habanero	2002—2013	Lack of funds and policy support
Germany	Horstberg	2003—2017	End of test
Australia	Paralana	2004—2014	Lack of funds and policy support
Germany	Landau	2007—2014	Earthquake
USA	Brady	2008—2015	End of test
USA	Southeast Geysers	2008—2009	Borehole collapse
Switzerland	St Gallen	2009—2014	Earthquake ( $M_w$ 3.4); Insufficient flow rate
Korea	Pohang	2015—2017	Earthquake ( $M_w$ 5.4)

Note:  $M_w$  denotes the earthquake magnitude.

EGS 项目的热储质量与热储规模、有效换热面积、裂隙网络质量、流体流量与出口温度等参数密切相关。热储质量的好坏直接决定了其热能提取能力与规模。受到热储原位地质条件和热储改造技术的限制, EGS 的热储规模普遍较小<sup>[15]</sup>, 难以满足工质持续换热的需求。美国 Fenton Hill 项目虽然在压裂时取得了非常好的效果, 但其热储体积仅为 0.035 km<sup>3</sup>, 远未达到商业化开发所需的最低热储体积 (0.2 km<sup>3</sup>); 虽然后期进行了 3 次补充压裂, 但均未取得良好的增容效果<sup>[15]</sup>。热储质量差还会造成工质流失严重、流体流量小、热突破时间早、出口温度低等问题, 因为此类问题被终止的项目占关闭项目总数的 35%。例如, 英国 Rosemanowes 项目<sup>[28]</sup> 和日本 Ogachi 项目<sup>[24]</sup> 运行后期的工质损失量已达到 70% 以上<sup>[16]</sup>; 日本 Hijiori 项目<sup>[41]</sup> 过早出现热突破, 出口温度从 163 °C 骤降到 100 °C 以下。

EGS 钻井和压裂活动形成的应力扰动会导致热储岩体的损伤、破坏和失稳, 并伴随相应能量的

微震事件。虽然大部分的微震事件因能量较小而无法被感知, 但仍有极少数的高震级事件对地面建设造成了巨大的经济损失, 甚至导致了 EGS 项目暂停或中止, 例如, 瑞士 Basel 项目<sup>[42]</sup> ( $M_w$  3.4)、德国 Landau 项目<sup>[16]</sup> ( $M_w$  2.7) 和韩国 Pohang 项目 ( $M_w$  5.4)<sup>[43]</sup>。在有震级记录的 17 个 EGS 项目中 (表 4), 有 13 个项目的最大震级超过了 2.0 级, 更有 6 个项目超过了 3.0 级。震级最大的韩国 Pohang 项目, 因在实施水力压裂时导致热储边界的未知断层发生了大规模滑移诱发了 5.4 级地震<sup>[44]</sup>, 被韩国政府叫停<sup>[43]</sup>。

钻井活动中严重的井壁坍塌、钻杆折断事故也会导致 EGS 项目的终止。比如, 美国的 Southeast Geysers 项目因钻井井壁的坍塌而终止<sup>[16]</sup>, 德国的 Bad Urach 因钻井过程中钻杆折断造成设备的损坏而暂停<sup>[45]</sup>。

此外, 现有 EGS 项目存在明显的规模化瓶颈。在现有的技术条件下, 成功运行的 EGS 项目的发电量仅能达到兆瓦级 (法国 Soultz 项目为 1.5 MW)<sup>[39]</sup>,



表 4 EGS 项目微震或地震活动明细表

Table 4 Details of microseismic or earthquake activity in EGS projects<sup>1</sup>

Country	Project	Magnitude	Lithology	Country	Project	Magnitude	Lithology
UK	Rosemanowes	3.1	Granite	USA	NW Geysers	2.8	Sandstone
France	Soultz	2.9	Granite	Germany	Insheim	2.4	Granite
Switzerland	Basel	3.4	Granite	Germany	Groß Schönebeck	1.8	Sandstone
USA	Desert Peak	1.7	Granite	Switzerland	St Gallen	3.5	Carbonate
USA	Coso	2.8	Granite	Germany	Hannover	1.8	Sandstone
Australia	Habanero	3.7	Granite	Korea	Pohang	5.4	Granite
El Salvador	Berlin	4.4	Volcanic	Finland	Otaniemi	1.8	Granite
Australia	Paralana	2.6	Granite	USA	Milford	2.0	Granite
Germany	Landau	2.7	Granite				

等同于村镇级别的日常用电量。如果为地级市级别提供动辄百亿千瓦时的用电量,则需要数千、甚至过万的钻井量,施工规模和开发成本与其他可再生能源相比显然是无法接受的。

综上所述,EGS 仍处于研究和开发阶段,距离大规模商业化仍有很长的路要走,需要持续在热储改造、地震控制、发电规模等方面加大科研和投资力度,取得关键技术的突破,才能实现深部地热能的规模化开采。

## 4 未来方向与发展机遇

### 4.1 超临界项目: DEEPEGS 项目

DEEPEGS(Deployment of deep enhanced geothermal systems for sustainable energy business, 缩写为 DEEPEGS)是欧盟多个国家 2016 年联合启动的深部地热能项目,其目的是研究不同地质条件下超深储层(目标深度为 5 km)热储改造技术并建立示范工程,提升欧洲全区的深部地热能资源贡献度。项目总投资 4400 万欧元,计划进行 3 个深部地热项目的试验和研究,目前正在开展的冰岛 Reykjanes 项目<sup>[27, 46]</sup>,最大钻探深度为 4659 m,储层温度为 452 °C,是目前储层温度最高的 EGS 项目,可以实现超临界机组发电,预计发电装机量为 30 MW。该项目或可为相似条件下的地热项目提供经验,大幅提升 EGS 单井发电规模。

### 4.2 典型干热岩 EGS 示范项目: FORGE 计划

FORGE 计划<sup>[47]</sup>(Frontier observatory for research in geothermal energy, 缩写为 FORGE)是美国能源部 2015 年开始实施的典型 EGS 示范工程,旨在开展干热岩储层表征、储层建造、储层监测等前沿尖端技术的研发和应用,以形成一套“可复制”的典型干热岩开发体系。该项目总投资 2 亿美元,目

前已完成第一阶段的地质勘探和第二阶段的场地优选,选定犹他大学能源与地质研究院的 Milford 项目进入第三阶段的研究<sup>[48]</sup>。该阶段计划投资 1.3 亿美元,以资助完成钻井、压裂、井间流体连通等工程及相关的科研和试验工作。Milford 项目钻探深度 2133.6~3854 m,地温梯度为 50~65 °C·km<sup>-1</sup>,储层温度 175~230 °C;该项目为典型的花岗岩热储,属于发育于高温水热型地热田旁侧的干热岩热能聚集系统,具有一定的“可复制性”,因此,项目或能形成行之有效的典型干热岩地热能开发模式,为世界典型干热岩地热能的开发提供“可复制”的经验,进而推进深部地热资源的大规模商业化。

### 4.3 新型 EGS: 基于开挖的增强地热系统 (EGS-E)

储层物理力学特征和地质环境的差异性造成不同热储改造差异化的主要原因,因此需要突破热储改造技术对热储地质条件的依赖性,形成“可复制”的热储改造技术,才能实现干热岩地热能的商业化开发。采矿技术经历了百余年的发展,具有完善的装备体系、成熟的施工经验和丰富的人才储备,可以突破地质条件的限制,在绝大多数地质环境中构建“可复制”的采矿系统,完成目标矿物的开采。基于此提出的开挖型增强地热系统(Enhanced geothermal system based on excavation, 简称 EGS-E)<sup>[40, 49-50]</sup>采用开挖、爆破和崩落等采矿技术取代了水力激发技术进行热储改造,采用开挖竖井铺设换热管道的方式取代地热钻井技术进行热能提取,或可以有效克服传统增强地热系统对热储地质条件和裂隙发育特征的依赖性,为深部地热能资源开发提供一种“可复制”的解决方案<sup>[40]</sup>。

### 4.4 深部资源共采: 深部地热与矿产资源协同开采

深部矿产和地热资源共采,是向地球深部进军,实现深部采矿可持续发展的重要举措<sup>[51-53]</sup>。基

于开挖型增强地热系统所构建的深部矿产与地热资源协同开采体系, 为解决深部矿产资源开采的高温问题和深部地热资源的高成本问题提供了一种解决方案<sup>[54]</sup>。矿热协同开采体系以围岩温度为标尺, 将地质资源类型分为低温资源(50 ℃ 以下)、中温资源(50~100 ℃)和高温资源(100 ℃ 以上), 针对性地提出了低温矿产开采模式, 中温“矿热共采”模式和高温地热开采模式。低温资源采用传统的采矿方法, 以矿产资源开采为主, 同时构建中深部中高温资源开采所需的基础工程; 中温资源采用先采热后采矿的热矿共采模式, 在利用中温型地热资源的同时, 增加可采矿产资源储量; 高温资源则基于开挖型增强地热系统(EGS-E), 采用独特的热储致裂和热能交换技术实现深部地热资源的大规模开采。深部地热与矿产资源协同开采模式将传统采矿技术与增强地热系统相结合, 以低温区域矿产资源开采缓解深部地热资源开发的巨额投资压力, 以中高温地热资源的开采弥补矿产资源开采因温度升高引起的成本激增, 既能消除中高温区域的热害影响, 提高矿产资源的安全储量, 保证矿产资源安全开采, 又能实现中温区域地热资源的利用以及高温区域地热资源的大规模开采, 为深部矿产和地热资源安全高效开发提供一种经济可行的方案<sup>[51]</sup>。

## 5 结论及建议

随着钻井技术和储层改造技术的发展, EGS 取得了蓬勃的发展, 截至 2021 年末, 世界累计 EGS 项目已达到 41 个, 累计发电装机量已达到 37.41 MW。然而, EGS 仍处于研究与发展阶段, 距离深部干热岩地热能的大规模商业化仍有很长的路要走。储层地质条件的差异性和复杂性以及现有改造技术对储层原地质环境的依赖性, 致使 EGS 发展过程中无法形成“可复制”的造储技术, 由此导致的热储质量差、诱发地震等问题是制约其发展的根本原因。

建立健全深部地热资源数据库, 形成精确的储层地质条件量化体系, 探寻地质条件与储层改造、裂隙演化、热能提取等的相关关系, 研发“可复制”的热储改造技术, 是深部地热能开发的当务之急; 加大政府政策和资金扶持力度, 引领典型 EGS 项目的关键技术攻关和示范工程建设, 同时多措并举, 积极推进开挖型增强地热系统和矿热协同共采等模式的研究和开发, 形成“可复制”深部地热能开采体系, 是早日实现深部地热资源大

规模商业化, 解决深部资源开采与能源结构转型的关键出路。

## 参 考 文 献

- [1] Li D W, Wang Y X. Major issues of research and development of hot dry rock geothermal energy. *Earth Sci*, 2015, 40(11): 1858  
(李德威, 王焰新. 干热岩地热能研究与开发的若干重大问题. *地球科学*, 2015, 40(11): 1858)
- [2] Zhu J L, Hu K Y, Lu X L, et al. A review of geothermal energy resources, development, and applications in China: Current status and prospects. *Energy*, 2015, 93: 466
- [3] Rybach L. Geothermal energy: Sustainability and the environment. *Geothermics*, 2003, 32(4-6): 463
- [4] Hu J, Su Z, Wu N Y, et al. Analysis on temperature fields of thermal-hydraulic coupled fluid and rock in Enhanced Geothermal System. *Prog Geophys*, 2014, 29(3): 1391  
(胡剑, 苏正, 吴能友, 等. 增强型地热系统热流耦合水岩温度场分析. *地球物理学进展*, 2014, 29(3): 1391)
- [5] Liao Z J, Wan T F, Zhang Z G. The enhanced geothermal system (EGS): Huge capacity and difficult exploitation. *Earth Sci Front*, 2015, 22(1): 335  
(廖志杰, 万天丰, 张振国. 增强型地热系统: 潜力大、开发难. *地学前缘*, 2015, 22(1): 335)
- [6] Xu T F, Hu Z X, Li S T, et al. Enhanced geothermal system: International progresses and research status of China. *Acta Geol Sin*, 2018, 92(9): 1936  
(许天福, 胡子旭, 李胜涛, 等. 增强型地热系统: 国际研究进展与我国研究现状. *地质学报*, 2018, 92(9): 1936)
- [7] Lund J W, Boyd T L. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 2016, 60: 66
- [8] Lund J W, Freeston D H, Boyd T L. Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. *Geothermics*, 2011, 40(3): 159
- [9] Lund J W, Toth A N. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, 2021, 90: 101915
- [10] Wang G L, Liu Y G, Zhu X, et al. The status and development trend of geothermal resources in China. *Earth Sci Front*, 2020, 27(1): 1  
(王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势. *地学前缘*, 2020, 27(1): 1)
- [11] Wang G L, Zhang W, Liang J Y, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China. *Acta Geosci Sin*, 2017, 38(4): 449  
(王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价. *地球学报*, 2017, 38(4): 449)
- [12] Wang J Y, Hu S B, Pang Z H, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China. *Sci Technol Rev*, 2012, 30(32): 25  
(汪集旻, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估. *科技导报*, 2012, 30(32): 25)
- [13] Kruger P, Otte C. *Geothermal Energy: Resources, Production,*

- Stimulation*. Stanford: Stanford University Press, 1973
- [14] Bertani R. Geothermal power generation in the world 2010—2014 update report. *Geothermics*, 2016, 60: 31
- [15] Whetten J T, Dennis B R, Dreesen D S, et al. The US hot dry rock project. *Geothermics*, 1987, 16(4): 331
- [16] Breede K, Dzebisashvili K, Liu X L, et al. A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: Past, present and future. *Geotherm Energy*, 2013, 1(1): 1
- [17] McClure M W, Horne R N. An investigation of stimulation mechanisms in Enhanced Geothermal Systems. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2014, 72: 242
- [18] Olasolo P, Juárez M C, Morales M P, et al. Enhanced geothermal systems (EGS): A review. *Renew Sustain Energy Rev*, 2016, 56: 133
- [19] Brown D W, Duchane D V, Heiken G, et al. *Mining the Earth's Heat: Hot Dry Rock Geothermal Energy*. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012
- [20] Zhang C, Jiang G Z, Jia X F, et al. Parametric study of the production performance of an enhanced geothermal system: A case study at the Qiabuqia geothermal area, northeast Tibetan plateau. *Renew Energy*, 2019, 132: 959
- [21] Kim K I, Min K B, Kim K Y, et al. Protocol for induced microseismicity in the first enhanced geothermal systems project in Pohang, Korea. *Renew Sustain Energy Rev*, 2018, 91: 1182
- [22] Kappelmeyer O, Jung R. HDR experiments at falkenberg/Bavaria. *Geothermics*, 1987, 16(4): 375
- [23] Nemat-Nasser S, Abé H, Hiraoka S. *Hydraulic Fracturing and Geothermal Energy*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1983
- [24] Ito H. Inferred role of natural fractures, veins, and breccias in development of the artificial geothermal reservoir at the Ogachi Hot Dry Rock site, Japan. *J Geophys Res*, 2003, 108(B9): 2426
- [25] Avouac J P, Vrain M, Kim T, et al. A convolution model for earthquake forecasting derived from seismicity recorded during the ST1 geothermal project on otaniemi campus, Finland // *Proceedings World Geothermal Congress. Reykjavik*, 2020: 1
- [26] Friðleifsson G Ó, Elders W A, Bignall G. A plan for a 5 km-deep borehole at Reykjanes, Iceland, into the root zone of a black smoker on land. *Sci Drill*, 2013, 16: 73
- [27] Sigurjónsson H Æ, Cook D, Davíðsdóttir B, et al. A life-cycle analysis of deep enhanced geothermal systems: The case studies of Reykjanes, Iceland and Vendenheim, France. *Renew Energy*, 2021, 177: 1076
- [28] Richards H G, Parker R H, Green A S P, et al. The performance and characteristics of the experimental hot dry rock geothermal reservoir at Rosemanowes, Cornwall (1985—1988). *Geothermics*, 1994, 23(2): 73
- [29] Seibt P, Hoth P. The neustadt-glewe geothermal station: Form surveys to active operation. *Therm Eng*, 2004, 51(6): 494
- [30] Bargar K E, Keith T E C. *Hydrothermal Mineralogy of Core from Geothermal Drill Holes at Newberry Volcano, Oregon*. Washington, US Government Printing Office, 1999
- [31] Mraz E, Moeck I, Bissmann S, et al. Multiphase fossil normal faults as geothermal exploration targets in the Western Bavarian Molasse Basin: Case study Mauerstetten. *Z Dt Ges Geowiss*, 2018, 169(3): 389
- [32] Pang Z H, Luo J, Cheng Y Z, et al. Evaluation of geological conditions for the development of deep geothermal energy in China. *Earth Sci Front*, 2020, 27(1): 134  
(庞忠和, 罗霖, 程远志, 等. 中国深层地热能开采的地质条件评价. *地学前缘*, 2020, 27(1): 134)
- [33] Zhang S Q, Wen D G, Xu T F, et al. The US Frontier Observatory For Research in Geothermal Energy project and comparison of typical EGS site exploration status in China and US. *Earth Sci Front*, 2019, 26(2): 321  
(张森琦, 文冬光, 许天福, 等. 美国干热岩“地热能前沿瞭望台研究计划”与中美典型EGS场地勘查现状对比. *地学前缘*, 2019, 26(2): 321)
- [34] Shao S S, Ranjith P G, Wasantha P L P, et al. Experimental and numerical studies on the mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite at high temperatures: An application to geothermal energy. *Geothermics*, 2015, 54: 96
- [35] Kang F C, Li Y C, Tang C A. Grain size heterogeneity controls strengthening to weakening of granite over high-temperature treatment. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2021, 145: 104848
- [36] Zhang W, Guo T K, Qu Z Q, et al. Research of fracture initiation and propagation in HDR fracturing under thermal stress from meso-damage perspective. *Energy*, 2019, 178: 508
- [37] Tomac I, Sauter M. A review on challenges in the assessment of geomechanical rock performance for deep geothermal reservoir development. *Renew Sustain Energy Rev*, 2018, 82: 3972
- [38] Sanyal S K, Morrow J W, Butler S J, et al. Is EGS commercially feasible? *Trans Geotherm Resour Counc*, 2007, 31: 313
- [39] Schill E, Genter A, Cuenot N, et al. Hydraulic performance history at the Soultz EGS reservoirs from stimulation and long-term circulation tests. *Geothermics*, 2017, 70: 110
- [40] Kang F C, Tang C A. Overview of enhanced geothermal system (EGS) based on excavation in China. *Earth Sci Front*, 2020, 27(1): 185  
(亢方超, 唐春安. 基于开挖的增强型地热系统概述. *地学前缘*, 2020, 27(1): 185)
- [41] Sasaki S. Characteristics of microseismic events induced during hydraulic fracturing experiments at the Hijiori hot dry rock geothermal energy site, Yamagata, Japan. *Tectonophysics*, 1998, 289(1-3): 171
- [42] Dyer B C, Schanz U, Ladner F, et al. Microseismic imaging of a geothermal reservoir stimulation. *Lead Edge*, 2008, 27(7): 856
- [43] Kim K H, Ree J H, Kim Y, et al. Assessing whether the 2017  $M_w$  5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event. *Science*, 2018, 360(6392): 1007
- [44] Grigoli F, Cesca S, Rinaldi A P, et al. The November 2017  $M_w$  5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea. *Science*, 2018, 360(6392): 1003

- [45] Mao X, Guo D B, Luo L, et al. The global development process of hot dry rock (enhanced geothermal system) and its geological background. *Geol Rev*, 2019, 65(6): 1462  
(毛翔, 国殿斌, 罗璐, 等. 世界干热岩地热资源开发进展与地质背景分析. *地质论评*, 2019, 65(6): 1462)
- [46] Ásmundsson R, Pezard P, Sanjuan B, et al. High temperature instruments and methods developed for supercritical geothermal reservoir characterisation and exploitation —The HiTI project. *Geothermics*, 2014, 49: 90
- [47] Moore J, McLennan J, Allis R, et al. The Utah frontier observatory for geothermal research (FORGE): results of recent drilling and geoscientific surveys // *Geothermal Resources Council 42nd Annual Meeting-Geothermal Energy*. Reno, 2018(42): 1034044
- [48] Xing P J, McLennan J, Moore J. *In-situ* stress measurements at the Utah frontier observatory for research in geothermal energy (FORGE) site. *Energies*, 2020, 13(21): 5842
- [49] Zhao J, Tang C A, Wang S J. Excavation based enhanced geothermal system (EGS-E): Introduction to a new concept. *Geomech Geophys Geo-energ Geo-resour*. 2020, 6(1): 6
- [50] Tang C A, Zhao J, Wang S J. An EGS-E conceptual model of enhanced geothermal system based on excavation technology. *Geotherm Energy*, 2019(1): 17  
(唐春安, 赵坚, 王思敬. 基于开挖技术的增强型地热系统EGS-E概念模型. *地热能*, 2019(1): 17)
- [51] Cai M F, Dor J, Chen X S, et al. Development strategy for Co-mining of the deep mineral and geothermal resources. *Strateg Study CAE*, 2021, 23(6): 43  
(蔡美峰, 多吉, 陈湘生, 等. 深部矿产和地热资源共采战略研究. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 43)
- [52] Cai M F, Xue D L, Ren F H. Current status and development strategy of metal mines. *Chin J Eng*, 2019, 41(4): 417  
(蔡美峰, 薛鼎龙, 任奋华. 金属矿深部开采现状与发展战略. *工程科学学报*, 2019, 41(4): 417)
- [53] Guo Q F, Cai M F, Wu X H, et al. Technological strategies for intelligent mining subject to multifield couplings in deep metal mines toward 2035. *Chin J Eng*, 2022, 44(4): 476  
(郭奇峰, 蔡美峰, 吴星辉, 等. 面向2035年的金属矿深部多场智能开采发展战略. *工程科学学报*, 2022, 44(4): 476)
- [54] Song J, Tang C A, Kang F C. Synergetic mining mode of deep mineral and geothermal resources. *Met Mine*, 2020(5): 124  
(宋健, 唐春安, 亢方超. 深部矿产与地热资源协同开采模式. *金属矿山*, 2020(5): 124)