

## 干热岩勘查开发进展及展望

文冬光, 张二勇, 王贵玲, 张林友, 王 璜, 张森琦, 叶成明, 王稳石, 金显鹏, 刘东林, 贾小丰, 李胜涛, 吴海东, 连晟, 冯庆达

### Progress and prospect of hot dry rock exploration and development

WEN Dongguang, ZHANG Eryong, WANG Guiling, ZHANG Linyou, WANG Huang, ZHANG Senqi, YE Chengming, WANG Wenshi, JIN Xianpeng, LIU Donglin, JIA Xiaofeng, LI Shengtao, WU Haidong, LIAN Sheng, and FENG Qingda

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202304011>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 涡轮取芯钻进工艺在干热岩钻井中的应用

A study of the application of turbine coring drilling technology to hot dry rock drilling

谭现锋, 王景广, 赵长亮, 王稳石, 翁炜, 段隆臣 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 195–202

#### 井筒自循环技术开采干热岩地热的试验研究

Experimental study on influence factors of wellbore self-circulation mining hot dry rocks

亓兆伟, 闫方平, 傅大庆, 邱建强 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 198–208

#### 国际水文地质学家协会进展

Progress of International Association of Hydrogeologists

韩再生, 王皓, 倪增石 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 173–178

#### 共和盆地干热岩体人工裂隙带结构的控热机理与产能优化

Heat control mechanism and productivity optimization of artificial fracture zone structure of dry hot rock in Gonghe Basin

陈炫沂, 姜振蛟, 徐含英, 冯波 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 191–199

#### 玄武岩封存CO<sub>2</sub>技术方法及其进展

Research progress on key technologies of CO<sub>2</sub> storage in basalts

李万伦, 徐佳佳, 贾凌霄, 马冰, 陈晶 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 164–173

#### 渗透率对于干热岩开采过程储层变化规律的影响

#{suggestArticle.titleEn}

崔翰博, 唐巨鹏, 姜昕彤 水文地质工程地质. 2020, 47(1): 171–180



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202304011

文冬光, 张二勇, 王贵玲, 等. 干热岩勘查开发进展及展望 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(4): 1-13.

WEN Dongguang, ZHANG Eryong, WANG Guiling, *et al.* Progress and prospect of hot dry rock exploration and development[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 1-13.

## 干热岩勘查开发进展及展望

文冬光<sup>1</sup>, 张二勇<sup>1</sup>, 王贵玲<sup>2</sup>, 张林友<sup>1</sup>, 王 璜<sup>3</sup>, 张森琦<sup>1</sup>, 叶成明<sup>1</sup>, 王稳石<sup>4</sup>,  
金显鹏<sup>1</sup>, 刘东林<sup>1</sup>, 贾小丰<sup>1</sup>, 李胜涛<sup>1</sup>, 吴海东<sup>1</sup>, 连 晟<sup>1</sup>, 冯庆达<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 天津 300309; 2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061; 3. 中国地质调查局, 北京 100037; 4. 中国地质调查局勘探技术研究所, 河北廊坊 065000)

**摘要:** 清洁能源开发利用是当前全球可持续发展共同关注的资源环境问题。干热岩指埋藏于地球深部、内部不存在或仅存在少量流体, 温度高于 180 °C 的高温岩体, 作为未来人类可持续利用的重要战略可接替清洁能源, 其开发利用备受关注。文章在梳理总结国内外典型干热岩勘查与开发利用进展的基础上, 针对干热岩资源研究方向提出几点思考, 希望对我国未来干热岩勘查与开发工作起到有益参考借鉴作用。自 20 世纪 70 年代提出干热岩概念以来, 世界各国开展了多处勘查开发工程探索, 在取得大量理论技术突破的同时, 也存在不少失败的案例。虽然全球投入建设的干热岩开发工程数量总体上不断增加, 为干热岩勘查开发积累了宝贵经验, 但是迄今为止尚未建造有商业规模的储层, 由于缺乏持续经费支持、水力压裂诱发微地震等问题, 多数被迫终止。目前来看, 全球干热岩开发正逐渐进入新的探索阶段, 欧美各国纷纷加强相关基础理论和技术攻关。我国近年来在干热岩资源调查评价和勘查开发方面取得了重要阶段性成果, 编制了大地热流、居里面深度、控热构造等系列基础图件, 初步估算了我国陆域干热岩资源潜力, 并在青海共和、福建漳州、广东惠州、河北马头营、山西大同、江苏兴化等地区相继开展了干热岩勘查开发探索。其中, 青海共和盆地恰卜恰地区在 4 000 m 深度探获超过 200 °C 的高温干热岩体。2019 年在青海共和启动我国首个干热岩勘查试采示范工程, 2020 年完成干热岩储层规模化建造, 有效改造体积超千万立方米, 并于 2021 年实现试验性发电并网, 在干热岩深部探测、高温硬岩钻探、规模化储层建造、循环连通、有机朗肯循环发电等方面取得了系列基础成果, 推动了我国干热岩在勘查开发方面的实质性进展。总体来看, 全球干热岩勘查开发取得了长足进展, 实践证明干热岩资源是一种十分有发展前途的绿色能源, 有望未来成为全球重要战略能源。然而, 干热岩现有开发利用路径及其配套技术、装备与商业化开发预期相比还存在较大差距。我国干热岩资源开发尽管实现了从“0”到“1”的突破, 但距离国际水平还有较长的路要走, 仍需要在高温硬岩钻完井、深部储层精细刻画、安全规模化储层建造、高效换热取热等方面推动颠覆性技术创新, 破解规模化、经济性开发难题。

**关键词:** 干热岩; 勘查开发; 进展; 展望

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)04-0001-13

## Progress and prospect of hot dry rock exploration and development

WEN Dongguang<sup>1</sup>, ZHANG Eryong<sup>1</sup>, WANG Guiling<sup>2</sup>, ZHANG Linyou<sup>1</sup>, WANG Huang<sup>3</sup>,  
ZHANG Senqi<sup>1</sup>, YE Chengming<sup>1</sup>, WANG Wenshi<sup>4</sup>, JIN Xianpeng<sup>1</sup>, LIU Donglin<sup>1</sup>, JIA Xiaofeng<sup>1</sup>,  
LI Shengtao<sup>1</sup>, WU Haidong<sup>1</sup>, LIAN Sheng<sup>1</sup>, FENG Qingda<sup>1</sup>

收稿日期: 2023-04-11; 修订日期: 2023-04-25

投稿网址: [www.swdzedz.com](http://www.swdzedz.com)

基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金(重大科技示范 BE2022859); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190131; DD20190135; DD20211336); 国家自然科学基金项目(42202336)

第一作者: 文冬光(1964-), 男, 博士, 研究员, 主要从事水文地质、环境地质及地热资源调查研究等工作。

E-mail: [wdongguang@mail.cgs.gov.cn](mailto:wdongguang@mail.cgs.gov.cn)

通讯作者: 张林友(1987-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地热资源调查研究及数值模拟等工作。E-mail: [zhanglinyou@mail.cgs.gov.cn](mailto:zhanglinyou@mail.cgs.gov.cn)

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Tianjin 300309, China; 2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 3. China Geological Survey, Beijing 100037, China; 4. Institute of Exploration Techniques, China Geological Survey, Langfang, Hebei 065000, China)

**Abstract:** The exploitation and utilization of clean energy is a resource and environmental issue of common concern for global sustainable development. As a vital strategic and sustainable future energy, hot dry rock (HDR) has attracted more and more attention. In this paper some thoughts on the future research direction of HDR resources in China are provided based on a worldwide experience summary, hoping to provide a useful reference for the future exploration and engineering development of HDR. Since the concept of HDR was put forward in the 1970s, the number of worldwide HDR construction has been increasingly growing. Although a lot of theoretical and technical breakthroughs have been made, only a small fraction of projects still in operation due to the lack of sustained financial support, induced microearthquakes and other issues. At present, the global development of HDR is gradually entering a new stage of exploration, and the basic theories of HDR to tackle the key problems are strengthening around the world. Since 2012, the China Geological Survey has organized and implemented the nationwide terrestrial HDR resources survey, evaluation, exploration and development, and significant stage progress has been achieved. A series of fundamental maps have been compiled, such as terrestrial heat flow value, curie surface depth, distribution of acidic rock, and heat-controlling structure in China. The resource potential of terrestrial HDR in China has been preliminarily estimated and a sounding basis for the target site selection is provided. HDR exploration and evaluation have been carried out in typical areas of Qinghai, Shandong, Hebei, Shanxi and Jiangsu provinces, and a breakthrough has been achieved in the Gonghe Basin of Qinghai. The first HDR resources exploration and production demonstration project in China was carried out in 2019, which made a series of meaningful outcomes in deep HDR exploration, high-temperature hard rock drilling, large-scale reservoir stimulation, reservoir connectivity and flow circulation, organic Rankine cycle (ORC) power generation, etc. The large-scale reservoir stimulation was carried out in 2020, and the first power generation test was completed in 2021. In general, the global exploration and development of HDR has made great progress. Practice has proved that HDR resources are a promising green energy and are expected to become an inexhaustible energy support for the world in the future. However, there is still a large gap between the existing path of HDR development and utilization and the economics of its supporting technologies compared with commercial development expectations at present. Although the development of HDR resources in China has achieved a breakthrough from “0” to “1”, there is still a long way to go from the international level. In order to solve the problems of large-scale and economic development, it is still needed to promote disruptive technological innovation in high temperature hard rock drilling and completion, fine characterization of deep reservoirs, safe large-scale reservoir construction, efficient heat transfer and heat recovery and other aspects.

**Keywords:** hot dry rock; exploration and development; progress; prospects

干热岩资源是指埋藏在深部不含或微含流体、高温( $\geq 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ )岩体内蕴藏的可被当前技术利用的巨大能源,因具有分布广泛、基荷无需储存即可输送、占地少、清洁无污染等优点成为未来理想可获取的持续性绿色能源<sup>[1-2]</sup>。国际上,干热岩主要通过增强型或工程型地热系统(enhanced/engineering geothermal system, EGS)进行开发利用,工艺流程主要包括注采井施工、

人工热储建造、循环换热、发电利用等,通常用水作为换热载体,经深井注入到人工压裂形成的岩石裂隙带中,通过与高温岩体接触加热,再返回地面进行地热能发电利用<sup>[3]</sup>。

美国洛斯·阿拉莫斯(Los Alamos)国家实验室于 20 世纪 70 年代在美国新墨西哥州的芬顿山(Fenton Hill)拉开了干热岩勘查开发研究序幕<sup>[4]</sup>,随后英国、德国、

法国、日本、澳大利亚、韩国、中国等国家相继开展了相关探采试验工作,并取得积极进展<sup>[5-7]</sup>。经过 50 余年的不断探索,干热岩在基础理论研究与工程开发实践方面均取得了长足进步,资源开发前景进一步明朗,越来越多的国家加入到全球干热岩勘查开发行列<sup>[5, 8]</sup>。

我国干热岩勘查与开发工作起步较晚,其成功实施将对改变我国传统能源结构、促进生态文明建设具有重要意义。2012 年以来,中国地质调查局及有关省地勘队伍相继在青海、山东、福建、广东、海南、河北、山西、江苏等重点地区开展了干热岩资源勘查工作<sup>[9-10]</sup>,探获了一批高温地热资源,并评估了我国陆区干热岩资源潜力。其中,在青海共和盆地先后施工了多眼钻井,显示在 4 000 m 深度温度超过了 200 °C<sup>[11]</sup>。2019 年,中国地质调查局与青海省人民政府合作组织在青海共和盆地启动了我国首个干热岩资源调查与勘查试采示范工程建设,并于 2021 年成功实现干热岩试验性发电并网,推动了我国干热岩在勘查开发方面的实质性进展,在深部探测、高温硬岩钻探、规模化储层建造、循环连通等方面取得了系列成果<sup>[12]</sup>。

随着我国干热岩勘查开发持续深入,在成因机制<sup>[13-15]</sup>、勘查选址<sup>[16-18]</sup>、储层建造<sup>[19-21]</sup>、监测评价<sup>[22-23]</sup>、钻完井工艺<sup>[24-26]</sup>、环境影响<sup>[27-29]</sup>等基础理论、技术工艺方面不断有所突破。本文旨在梳理国内外干热岩开发利用进展的基础上,对我国干热岩地热资源未来研究方向提供几点思考,并提出开发利用前景及展望,以期对我国未来干热岩勘查与工程开发工作提供有益的参考借鉴。

## 1 国际干热岩勘查开发进展

干热岩资源勘查开发是世界新能源探索的前沿,近年来,随着全球能源需求与日俱增,干热岩开发利用的呼声日益强烈。据统计,全球投入建设的干热岩相关 EGS 工程数量总体上不断增加,美国、英国、德国、法国、澳大利亚、瑞士、瑞典、日本、中国等多个国家已建立超过 60 处 EGS 工程,然而由于资金支撑、微震活动、钻井或电厂运行等原因,很多 EGS 工程已停止运行,尚在运行的多为干热岩-水热混合型 EGS 工程,其中法国苏尔茨(Soultz) EGS 工程实现了兆瓦级发电<sup>[28, 30-31]</sup>。2019 年,美国启动 FORGE(Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy)干热岩研究计划,旨在通过关键技术研发以实现 EGS 的商业性开发,使干热岩成为清洁、可靠、灵活和可再生新能源的代表<sup>[32]</sup>。2020 年,欧盟启动实施了地平线计划(Horizon Europe),计划在 10 a 内分 3 个阶段投入 18 亿欧元支持干热岩等深部地热技术创新,促进欧洲清洁能源开发利用。

国际上主要 EGS 场地多集中在板块边界、新生代裂谷区等区域(图 1),该区域地质构造活动强烈,地震、岩浆活动频发,为高温地热异常的形成提供了重要条件<sup>[13]</sup>。目前,已知分布在板缘地热带内的典型 EGS 场地主要有:美国的芬顿山和米尔福德、日本的肘折和雄胜,韩国的浦项,以及法国的苏尔茨等。相对板缘,分布在板块内部的 EGS 工程,其高温地热资源的形成主要与局部活跃构造、高放射性等相关。已

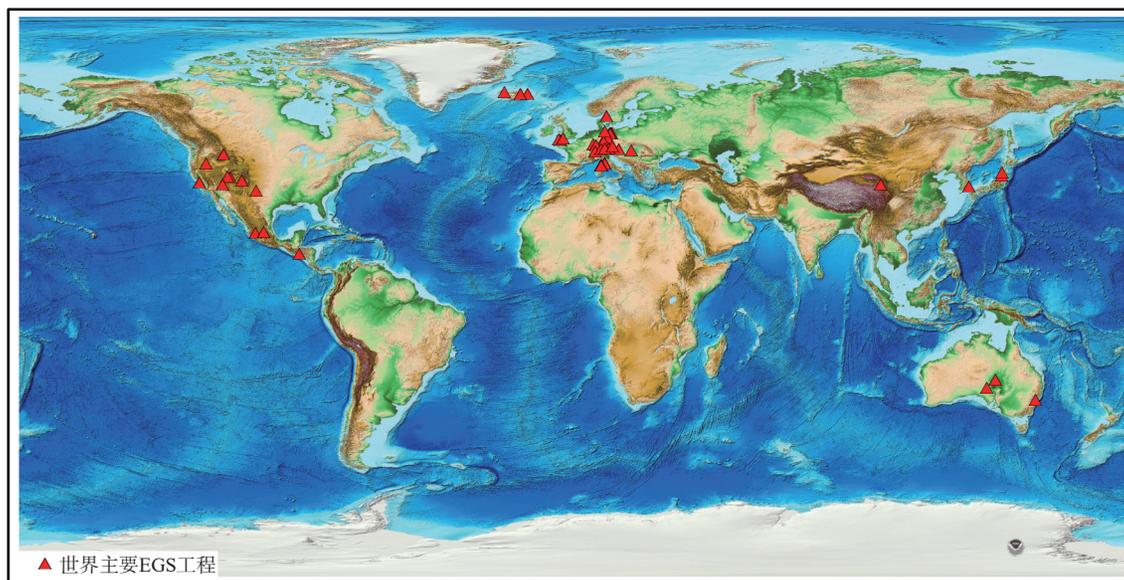


图 1 世界主要 EGS 工程分布(据文献 [31] 修改)

Fig. 1 Distribution of the major EGS projects in the world (modified after Ref. [31])

知的板内干热岩体主要有澳大利亚库珀盆地夏宾奴干热岩体、青海共和盆地恰卜恰干热岩体等。据评价,全球范围内在较浅层(3~10 km)的干热岩资源中,蕴藏的热能是全球石油、天然气和煤炭储藏能量的 30 倍<sup>[33-34]</sup>。

### 1.1 国际典型 EGS 勘查开发案例

#### (1) 美国芬顿山

美国芬顿山项目是世界上建造深部干热岩热储

的首次尝试,场地位于新墨西哥州中北部里奥格兰德裂谷带北端的 Valles 火山口边缘(图 2)。在深度为 720 m 以上的沉积岩地层中,试验场地地温梯度高达 100 °C/km,之下的花岗岩体温度梯度为 50~70 °C/km,对应的热流达 160 mW/m<sup>2</sup>。该地区温度异常可能与新生代火山岩浆活动有密切的关系,浅部的热异常还可能与流体扰动有关<sup>[35]</sup>。

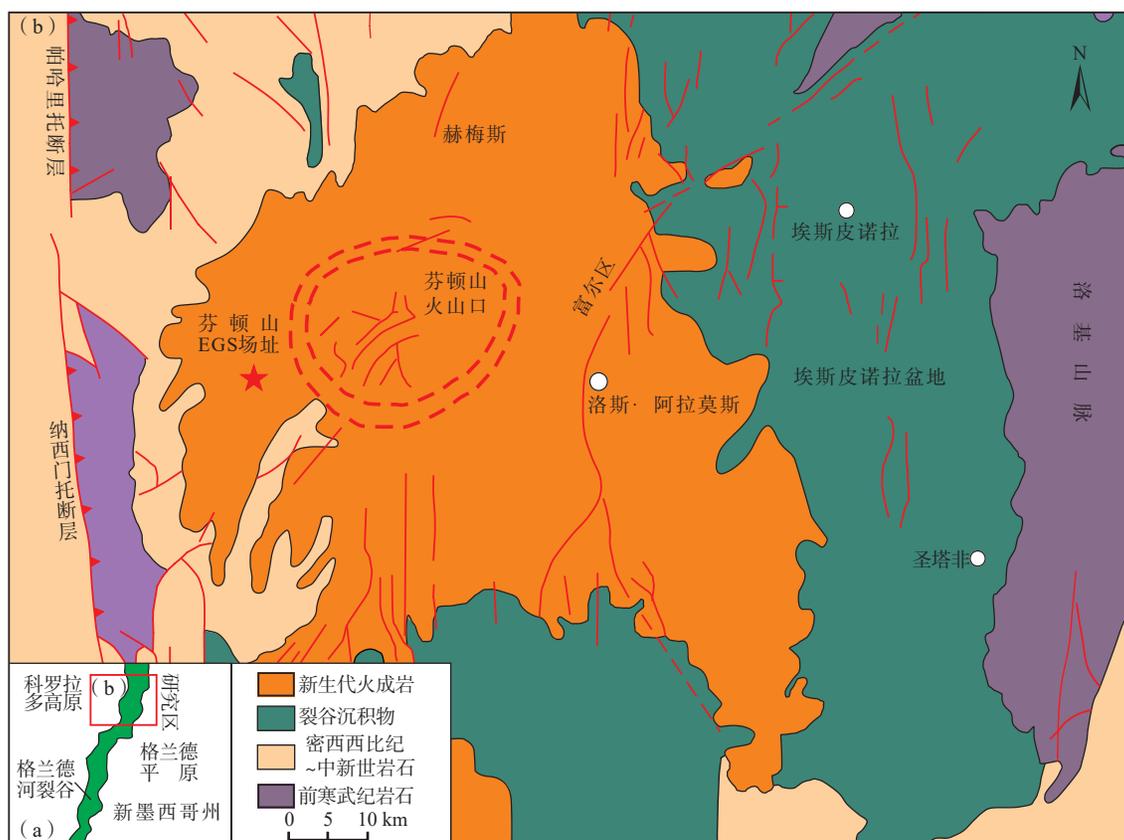


图 2 芬顿山场地位置及区域地质图 (据文献 [36])

Fig. 2 Location map of the Fenton Hill HDR site and simplified geological map around the site (adapted from Ref. [36])

芬顿山项目初期对 3 000 m 深、约 200 °C 的热储岩体开展了实地开发相关基础研究。1974 年,芬顿山在钻完第一眼井(GT-2, 原为 2 042 m, 后加深至 2 932 m)后进行了水力压裂试验,随后完成了深度为 3 064 m 的第二眼井(EE-1)钻探工作<sup>[37]</sup>,并进行了附加的水力压裂,但钻井所连通的热储被认为规模不够大,遇到了反复压裂难以连通的问题。经分析认为,再多的压裂也不会创造所需的储层连通,因此决定,通过侧钻打到由压裂造成的裂隙系统中,最终实现了有效连通,产出的热量使 60 kW 双循环涡轮发电机发电。然而,虽然芬顿山项目后期又增加了新的、更深

的钻井,并在多个深度段进行了水力压裂,储层规模进一步扩大,但随着持续资金资助前景低迷,无法维持对干热岩热储进行循环注入试验,也无法进行必要的钻孔修复和设备维护等,芬顿山所有野外试验在 2000 年终止,其后场址也被废弃<sup>[38]</sup>。尽管芬顿山项目未能商业化开发,但作为世界上第一个成功实现发电的干热岩工程,首次证实了利用现有工程、钻探等技术建造干热岩热储进行发电利用是可行的,对后期干热岩勘查开发具有重要的促进意义<sup>[39]</sup>。

#### (2) 法国苏尔茨

得益于芬顿山项目,一些欧洲国家也计划开展类

似的试验。在欧盟委员会的协调下, 通过对比研究, 最终决定在法国苏尔茨实施干热岩项目。苏尔茨处于欧洲最大的地热异常带中部, 法国上莱茵峡谷内(图 3), 该地堑在 45 Ma 开始活动, 至今仍然活跃<sup>[40]</sup>, 热流值在  $140 \text{ mW/m}^2$  以上。长期的石油勘探工作使该地区的地质结构比较清楚。苏尔茨干热岩开发目标

层为古生代花岗岩岩基( ~331 Ma), 埋深 1 400 ~ 1 550 m, 之上被三叠纪和古近 ~ 新近纪沉积层覆盖<sup>[41]</sup>。热源可能来自更深部的花岗岩岩基, 浅部等温线受莱茵河谷地堑构造结构和深部的热水对流影响, 深度 1 000 m 处的温度即达到了  $100^\circ\text{C}$ 。

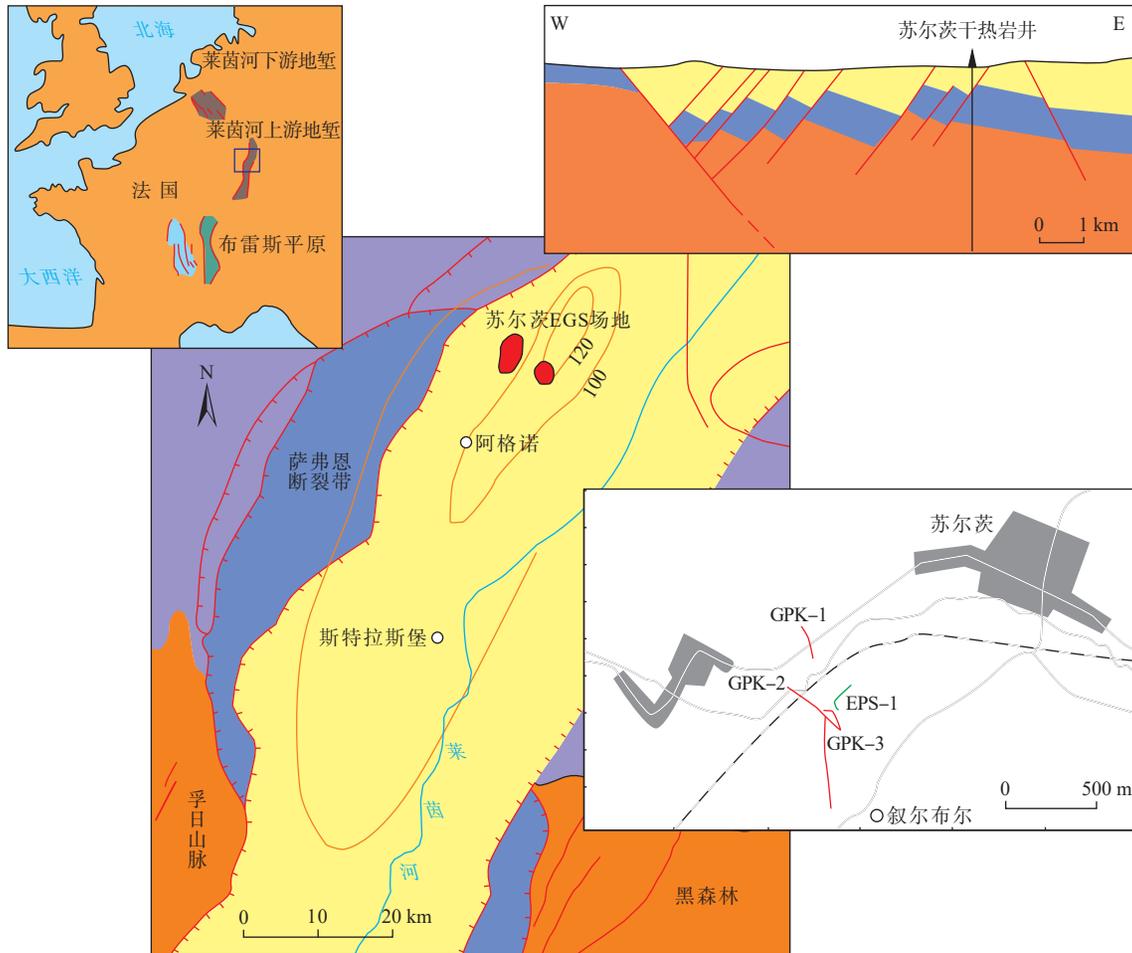


图 3 Soutz 场地位置、区域地质及钻井轨迹平面 (据文献 [41])

Fig. 3 Location of the EGS Soutz site, geology of the Upper Rhine Graben and well trajectories (adapted from Ref. [41])

苏尔茨 EGS 工程主要分 3 个阶段实施: 第一阶段(1987—2007 年), 实施场地勘查, 由于在储层发现了大量流体, 工程由原先的干热岩工程更名成了 EGS 工程, 完成了 4 口深井(最大钻深约 5 000 m, 井底温度约  $200^\circ\text{C}$ , 井组地表的距离为 6 m, 井底的距离为 600 m, 图 3)的钻完井、储层建造以及水力循环测试等工作<sup>[42]</sup>, 单井最大注入液量达到  $3.66 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 井口压力在 15 ~ 20 MPa; 第二阶段(2007—2009 年), 持续开展循环连通, 采用有机朗肯循环装置建成 1.5 MW 增强型地热系统示范电厂; 第三阶段(2009 年至今), 开展 EGS 发电的并网长期循环测试与监测<sup>[43-44]</sup>。在工程运行期

间, 最大诱发地震为里氏 2.9 级。由于结垢问题, 苏尔茨曾一度停止, 为了阻止结垢, 后续通过加入深井高压循环泵, 保持一定的井口压力, 有效解决了这一问题。苏尔茨作为能实现自运行的兆瓦级 EGS 发电工程, 是目前世界上较为成功的 EGS 示范案例, 展示了在天然裂隙发育的岩体中不需要通过大规模高压即可建造大型热储的可能性, 增强了国际开发干热岩资源的信心, 其勘查开发经验与运行模式为后续工程提供了宝贵借鉴。

### (3) 日本肘折(Hijiori)

肘折是日本首个 EGS 试验场地, 位于更新世

Gassan 火山附近的肘折火山口南缘, 约在  $1 \times 10^4$  a 前有过一次喷发<sup>[45]</sup>。选择该位置是想利用最近的火山活动在这个区域形成的高地温。工程实施前期在工程场地及周缘完成了大范围地质填图, 并实施了一些探孔来验证地温场信息。肘折干热岩储层岩体为花岗闪长岩, 埋深在 300 m 以下, 2 205 m 深度, 温度高于  $250^\circ\text{C}$ <sup>[46]</sup>。

1989—1992 年肘折场地完成了 1 个注入井 (SKG-2) 和 3 个生产井 (HDR-1、HDR-2 和 HDR-3) 钻完井施工, 钻井深度在 1 800 ~ 2 300 m 之间, 均穿过基底。在 1 800 m 深度, SKG-2 到 HDR-1 的距离约为 40 m, 到 HDR-2 的距离约为 50 m, 到 HDR-3 的距离约为 55 m<sup>[45]</sup>(图 4)。注采试验过程中, 共注入液体  $4.45 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 而仅产出  $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 损失达 70% 以上。1991—1995 年, 将注采井进行了加深, 井间距扩大到了 90 ~ 130 m<sup>[45]</sup>, 在 1995 年的循环试验中, 共注入  $5.15 \times 10^4 \text{ m}^3$  水, 产出  $2.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 回收率约为 50%。随后在 1996—2002 年进行了附加和长期循环试验, 在试验结束时, 注采流体实现了 130 kW 容量的双循环发电机。采出井在长期试验中从初始温度  $163^\circ\text{C}$  急剧冷却到约  $100^\circ\text{C}$ , 试验由此而终止<sup>[37]</sup>。与美国的芬顿山场地类似, 肘折项目也在火山口边缘进行, 虽然只需相对较浅的钻井就会获得很高的温度, 使工程实施更具有经济性, 但是在这样的区域内, 地质构造、地应力场和天然裂隙系统非常复杂, 使得工程在注采井组设计、储层建造和维护等方面具有更大的挑战。

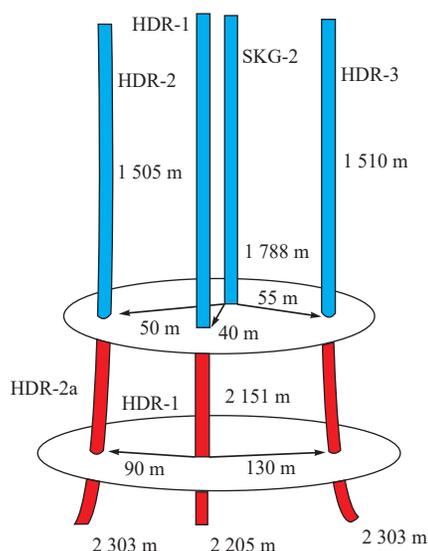


图 4 日本肘折 EGS 系统 (据文献 [45])

Fig. 4 Schematic view of the Hijiori EGS system (adapted from Ref. [45])

#### (4) 韩国浦项 (Pohang)

浦项项目开始于 2010 年, 场址位中新世早期弧后扩张形成的浦项沉积盆地, 由新生代半固结黏土、白垩纪砂岩、泥岩和流纹岩、二叠纪花岗岩基底以及白垩~二叠纪期间喷出的安山岩构成(图 5)。钻探资料显示, 浦项地区存在地热异常, 最高热流值为  $83 \text{ mW/m}^2$ <sup>[47]</sup>, 目标储层深度为 4 500 ~ 5 000 m, 预测温度为  $180^\circ\text{C}$ 。地球物理探探资料显示, 可能存在断裂将深部的热传递到浅部<sup>[48]</sup>。浦项 EGS 开发前期的钻探现场调查工作没能识别出场地附近的活断层, 但表明开发场区地应力处于临界状态。

浦项 EGS 示范发电项目包括 2 口井, 其中 PX-1 井设计井深 4 127 m, 由于在 4 000 m 发生了卡钻, 随后进行了侧钻, 完井深度 4 362 m; PX2 井完井深度在 4 340 m, 2 口井的钻完井工作于 2015 年 11 月完成, 井组地面间距 6 m, 井底相距约 600 m<sup>[49]</sup>。该项目的水力刺激(压裂)开始于 2016 年 1 月, 分 5 个阶段以  $1.00 \sim 46.83 \text{ L/s}$  的速度注入超过  $1 \times 10^4 \text{ m}^3$  的流体。在最后一次水力刺激试验约 2 个月后, 韩国浦项发生 5.4 级地震, 推测可能与浦项 EGS 相关<sup>[50]</sup>, 民众反应强烈, 因此该项目也被迫终止。

#### (5) 美国 FORGE 计划

FORGE 是目前由政府资助的最为前沿的干热岩勘查开发研究计划, 旨在建立一个现场实验场地来开展干热岩/增强型地热系统的前沿研究及试验测试, 以形成可降低工程开发风险和促进干热岩产业化的可推广、可复制技术路径, 另外, FORGE 计划还致力于先进设备的研发、数据的采集、以及数据的发布, 以实时获取和共享相关数据和工作成果, 在开展创新性研究的同时, 努力建立一个创新性的合作与管理平台<sup>[51]</sup>。FORGE 计划主要目标是建造一个能长期高效地提取热能又不显著降低储层温度的裂隙网络, 已实现经济流速 ( $\geq 40 \text{ L/s}$ ), 并缓解有危害的诱发地震事件。

FORGE 场地储层主要由破碎的渐新~中新世花岗岩组成, 并出露于附近 Mineral 山脉, 测井显示地应力状态为正应力型, 储层天然裂缝发育密集<sup>[52]</sup>。FORGE 计划主要分 3 个阶段: 第一阶段(2015 年), 分别在加利福尼亚州、爱达荷州、内华达州、俄勒冈州和犹他州筛选 5 个场地, 构建场地地质模型, 编制实施计划; 第二阶段(2016—2018 年), 2016 年选择 2 个地方开展环境评价、储层和场地表征以及初步地震监测选定, 2018 年选定犹他州 Milford 附近作为 FORGE 计划的实施场地; 第三阶段(2018 年至今), 在 Milford 开展干

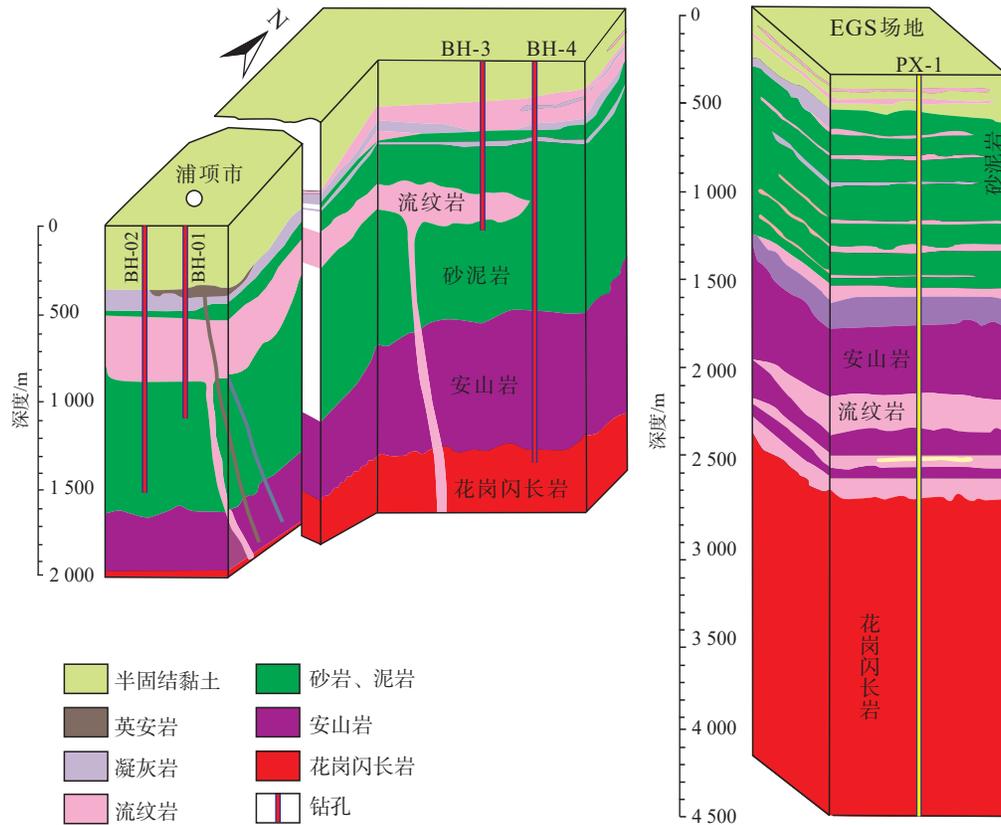


图5 韩国浦项盆地及PX-1试采场地地质特征(据文献[48])

Fig. 5 Geologic map of the Pohang Basin and PX-1 well drilled in the EGS project (adapted from Ref. [48])

热岩开发的最前沿研究<sup>[32]</sup>。目前, FORGE 已完成场地勘查, 整合了三维地震、重力、水文、土壤气体和钻井等结果, 获取了有关地下应力方向、应力梯度、地下渗透性、温度、岩石类型、以及裂缝分布的数据资料, 并开展了场地基础设施建设<sup>[53]</sup>; 2021年2月, FORGE项目仅用50d完成了第一眼大斜度井(16A(78)-32)的钻完井、测井、地应力测试等工作, 该井先钻至垂深1810m, 然后从垂直方向偏斜65°, 最终钻至3349m(垂深2609m), 井底温度超过220°C, 花岗岩体段平均机械钻速超过10m/h。2022年4月在16A(78)-32井中完成了全尺度、多阶段刺激改造作业。与此同时, 在该阶段, FORGE还开展了应力分析、场地表征、储层刺激改造、高分辨率监测、以及热-水-力-化学模拟等专题研究和高温封隔器等工具装备研发。

总体而言, 目前世界上的干热岩工程仍处于试验探索阶段, 其商业性开发还面临着基础理论、技术方法、材料装备、资金支持、政策导向和民众接受程度等诸多方面的挑战<sup>[31]</sup>, 其中干热岩热储地球物理探测、高效人工储层建造、诱发地震防控等方面基础理论和技术方法的突破是实现干热岩产业化开发的前提。另外, 高温测井仪器和注采工具(如封隔器、桥

塞、滑套等)是建造干热岩储层优先要解决的问题。

## 2 我国干热岩勘查开发进展

“十二五”之前, 我国主要开展了干热岩相关基础性试验和理论研究等方面工作<sup>[16]</sup>。“十二五”期间, 中国地质调查局组织开展了我国陆区干热岩资源评价, 修编了大地热流图, 绘制了陆域居里面深度图、酸性岩浆岩体分布图、控热构造图以及典型剖面, 反映了深层构造格局及区域地温场变化规律, 及中国大陆热源与新构造关系, 提出不同类型干热岩资源成因机制<sup>[54]</sup>。通过分析中国陆区大地热流、不同深度岩石热导率、生热率等物性参数, 计算了陆区不同深度温度, 在此基础上利用体积法等, 初步估算了我国干热岩资源家底, 结果表明, 我国大陆埋深3~10km干热岩资源量约为 $2.5 \times 10^{25}$ J(折合 $8.56 \times 10^{14}$ 亿吨标准煤), 其中埋深在5.5km以浅的资源量约为 $3.1 \times 10^{24}$ J(折合106万亿吨标准煤)<sup>[53-57]</sup>。

“十三五”期间, 在全国干热岩资源调查评价基础上, 陆续开展了山东利津、青海共和、东北长白山、东南沿海、江苏苏北、山西大同等典型地区的干热岩勘查工作, 实施干热岩钻探10余处, 取得了多项突破<sup>[56]</sup>。

其中在青海共和盆地,通过开展区域地热地质调查、综合地球物理勘查等工作,圈定了干热岩勘查开发目标靶区<sup>[58-59]</sup>,实施的 GR1 干热岩勘探井在深度 3 705 m 处成功探获国内同等深度温度最高的干热岩体<sup>[60]</sup>,实现干热岩勘查重大突破;东南沿海广东惠州在 3 009 m 探获 127.7 °C 高温水热资源,其下部无水层段具备干热岩资源潜力;雷州半岛徐闻县 3 150 m 测得井温 146.4 °C,推算 4 000 m 处温度可达 180 °C<sup>[9]</sup>;苏北盆地兴化市实施的地热勘探井井深 4 701.68 m 处温度达到 155 °C,探获高温碳酸盐岩热储,显示苏北盆地深层蕴藏丰富的干热岩资源<sup>[61]</sup>;冀东平原马头营凸起区 M-1 干热岩钻孔显示,在 3 965 m 深度温度达 150 °C,平均地温梯度为 3.46 °C/100 m<sup>[62]</sup>;山西大同盆地天镇县地热勘探井井深 1 585.3 m 处温度 167.94 °C,1 624 m 处探获高温高压地热流体,井口流体温度高达 160.2 °C。

2019 年中国地质调查局联合青海省人民政府组

织实施青海共和干热岩勘查与试采科技攻坚战,同年完成场地精细勘查,设计实施了第一眼干热岩试采井 GH-01 井,钻探深度 4 002 m,于 1 360 m 钻遇花岗岩,井底温度达 209 °C;2020 年,成功实施了我国首例干热岩储层安全规模化建造,最大注入压力为 48.1 MPa,有效改造体积超千万立方米,根据规模化压裂后裂缝展布特征,设计施工了 2 眼定向井,即 GH-02 井和 GH-03 井,构建形成“1 眼直井+2 眼定向井”的干热岩井组(图 6);2021 年实施井间循环连通并成功实现了国内首例干热岩试验性发电并网,开采井出水温度在 110.4 ~ 125.7 °C,初步建立了我国首个干热岩地质调查、资源评价、物探、钻探、压裂、监测、发电等勘查开发全流程技术体系<sup>[12]</sup>。此外,山西大同、河北马头营、江苏兴化等多地也相继开展不同地质背景条件下的试验性发电探索。



图 6 青海共和干热岩勘查试采现场

Fig. 6 HDR exploration and production demonstration project in the Gonghe Basin in Qinghai

目前,我国干热岩勘查与开发利用相关科研研发计划和项目等不断增加,国内已有 10 余家实验室正在开展干热岩勘查开发相关的基础理论和技术方法等研究。对深层高温地热勘查开发理论与技术探索的不断加深,使得我国在干热岩探测、深部钻探、储层建造、发电等技术方面取得了长足进展,多项常规技术已经取得较大突破,与国外差距在逐步减小,为我国干热岩勘查开发提供了理论支撑与技术储备。

### 3 干热岩勘查开发展望

#### 3.1 干热岩勘查方面

##### (1) 干热岩成因机制

干热岩相对水热而言脱离了对自然流体的依赖,理论上世界各地如果不考虑经济因素,只要钻到足够深度,均能满足地热发电需求。然而现阶段,寻找经济可行的开发场地仍是干热岩勘查开发的首要环节。我国构造体系复杂,不同构造背景下的干热岩分

布规律、控热机理、成藏机制存在较多基础地质问题未解决,普遍提到的干热岩热量来源主要有高放射性生热、部分熔融(岩浆囊)、深部地幔、构造活动热<sup>[13-14]</sup>,从干热岩热量来源及控热地质背景角度出发,中国干热岩资源的赋存类型可分为近代火山型、沉积盆地型、高放射性产热型、强烈构造活动带型和部分熔融型。但目前,干热岩成因机制研究仍停留在定性判断为主的阶段,量化分析不足,难以指导干热岩靶区选址。从定性描述到半定量-量化研究,构建一套集热源机制、控热机理、空间分布等一体化的干热岩成因模式可能是未来干热岩成因机制研究的重点之一。

### (2) 干热岩调查评价方法

地热地质调查评价是地热能源勘查开发的基础。随着埋深超过3 000 m的深部水热、干热岩、油田伴生热等多种深部地热能源受到关注,开展多种地热能源综合调查评价与开发利用成为未来发展的趋势。人们对干热岩勘探的需求从宏观的资源评价向热储精细评价转变。基于机器学习等的定量资源评价与分布预测模型目前尚处在探索阶段,不足以支撑资源的可持续开发利用和管理,需建立一套集热储三维可视化高精度三维地质模型、地热资源综合评价与预测、多场耦合模拟预测、工程优化设计、资源配置管理等为一体的评价管理系统。

### (3) 干热岩勘探技术

地球物理勘查在开展深部地热探测与开发的各个环节均具有重要作用。三维可视化、量化勘探是地球物理探测技术的发展趋势。对于相对复杂的深层地热系统而言,热储地球物理响应特征认识不清,高温探测多解性问题突出,储层天然裂隙刻画精度难以满足工程需求。拓展探究重、磁、电、震等多元信息融合的深部地热探测技术方法仍是国内外地热资源勘查开发技术领域的前沿。构建深部地质体“透明化”有效探测的地球物理勘查技术体系,解决深部热储温度预测等关键技术的需求迫切。另外,随着干热岩勘探开发的不断深入,干热岩测井面临重大机遇,展现出良好的应用前景,同时,在高温高压测井技术(包括常规测井、成像测井和随钻测井等)和资料解释评价方面面临巨大的挑战。现有测井装备在高压高温条件下难以长期获取稳定可靠数据,并且储层岩体小尺度裂隙刻画技术方法还不完善,因此无法准确了解储层组构特征,制约了干热岩有效开发。因此,亟需大力推进深层高温高压测井关键技术与材料自主研

发,从而实现深层干热岩热储层裂缝精细刻画和随钻超前探测,为干热岩产业化发展提供技术与装备保障。

## 3.2 干热岩开发技术方面

### (1) 干热岩钻完井技术

高温硬岩可钻性差、钻进效率低、成本高,完井工艺及配套工具不足,安全高效成井困难,机械钻速与国际还有较大的差距,导致了我国干热岩钻完井成本居高不下。因此,仍需持续攻关高温随钻测量、耐高温长寿命钻头、孔底动力钻具、超高温钻井液及冷却、高温固井等关键技术,不同地质条件下的高温硬岩快速钻进工艺需要不断探索。

### (2) 干热岩热储建造技术

国际实践结果显示,目前水力压裂法仍是当前干热岩储层建造的主要手段。然而,干热岩裂缝扩展与导流机理、循环注采与岩石力学作用机制、热储建造裂缝定向控制技术的基础理论、技术还不清楚;耐高温封隔器等压裂材料和耐高温电潜泵等长周期循环注入设备需要研发和配套;二氧化碳、液氮等新型介质造储及循环开发技术、井内闭式循环(closed loop)换热等新型取热工艺方法值得探索。

### (3) 干热岩储层建造实时监测与效果评价

微震定位精度尚不能满足注采井组设计需求,高精度微震数据采集仪需要研发配套,微震自动定位处理还需精细开发,基于震源机制反演连续裂缝网络,定量评价储层渗透率的精度还不够;诸如电磁法监测等储层流体监测技术仍需完善,储层反演与定量评价压裂液时空分布有待提高;微震、电磁、分布式光纤、试井、示踪等方法综合解释热储裂隙网络的精度和可靠性还不足,基于多元数据融合的复杂裂缝建模与热储三维可视化技术还需完善。

### (5) 干热岩开发防震控震机理及措施

干热岩压裂施工均不同程度的诱发微地震,因此建立断层活化分析评价体系和诱发地震控制与反馈机制是保证干热岩项目顺利开展的前提。目前,干热岩开发环境影响效应不完全清楚,以井口压力、总液量以及水力能为反馈调节的控震机制认识还不足,以诱发地震力学机制为基础的前瞻性综合震级预测模型为主的红绿灯管控系统尚待完善。

### (6) 干热岩储层维护

由于缺乏长周期开发试验,我国干热岩开发全生命周期的储层管控措施还有待建立。

## 3.3 干热岩利用方面

目前整体来看,我国干热岩发电与综合利用实践

经验欠缺,发电机组、综合利用模式等亟待深化探索。

#### (1) 热电转换技术设备

在地热发电技术方面,美国、冰岛、德国等发达国家处于世界前列,普遍采用干蒸汽发电、闪蒸汽发电、双工质发电等涡轮发电技术。目前,干热岩发电工程存在的主要问题是,多采用单一发电模式,产能较低;干热岩电站建设成本过高,投资回收期过长;设备易腐蚀,井口-发电机组多出现结垢。因此,需要研发攻关干热岩高效发电热力循环系统、原位发电新技术、热光伏发电新材料等。

#### (2) 多能源互补利用

干热岩资源可以结合其它不同形式清洁能源,实现多能互补、优势互补的综合利用。根据干热岩从高温到低温的利用顺序,开展地热发电、地热干燥、地热供热、地热洗浴、地热温室、地热水产养殖等多级利用工程应用示范研究。

#### (3) 深部地热储能

深部地热储能是利用具有保温性能好、渗流速度缓慢、热量不易散失等特点的地下热储作为储能介质,采用井管回灌的方式将风电、光伏等清洁能源以“热”形式储存在热储中,在需要时抽取使用的一种方法。深部地热储能规模大,能够实现跨季节长时间能量存储,一定程度上提升新能源电力系统高效稳定安全运行消纳能力,提高供能和供热系统的灵活性、经济性。深部地热储能实施、运行、推广的关键在于储能位置的选择、储能过程与环境的作用、储能系统的安全性、可靠性和经济性等关键技术问题,需进一步打通光热转化、热储调蓄、采灌均衡、高效开发、实施监测、智慧控制等技术路径。

## 4 结语

总体来看,当今世界干热岩勘查开发仍然处于试验探索阶段,还存在大量理论技术难题和环境风险。我国干热岩资源开发尽管实现了从“0”到“1”的突破,多项常规技术已经取得较大进展,但在高温硬岩钻完井、热储建造与循环试采等方面的关键技术与工具装备距离国际水平还有较大差距。

干热岩现有开发利用技术路径及其配套技术、装备与商业化开发预期相比还存在较大差距,仍需要在高精高分定量化勘查评价、高温硬岩钻完井、深部储层精细刻画、安全规模化储层建造、高效取热换热等方面推动颠覆性技术创新,破解规模化、经济性开发难题。

## 参考文献 (References) :

- [ 1 ] JIANG Fangming, CHEN Jiliang, HUANG Wenbo, et al. A three-dimensional transient model for EGS subsurface thermo-hydraulic process[J]. *Energy*, 2014, 72: 300 - 310.
- [ 2 ] 许天福, 张伟. 增强型地热工程国际发展和我国前景展望[J]. 石油科学通报, 2016, 1(1): 38 - 44. [ XU Tianfu, ZHANG Wei. Enhanced geothermal systems: International developments and China's prospects[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2016, 1(1): 38 - 44. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] GRANT M A, BIXLEY P F. *Geothermal Reservoir Engineering*[M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2011.
- [ 4 ] SMITH M C. The Los Alamos scientific laboratory dry hot rock geothermal project (LASL Group Q-22)[J]. *Geothermics*, 1975, 4(1/2/3/4): 27 - 39.
- [ 5 ] BREEDE K, DZEBISASHVILI K, LIU Xiaolei, et al. A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: Past, present and future[J]. *Geothermal Energy*, 2013, 1(1): 1 - 27.
- [ 6 ] KUMARI W G P, RANJITH P G. Sustainable development of enhanced geothermal systems based on geotechnical research—A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 199: 102955.
- [ 7 ] 廖志杰, 万天丰, 张振国. 增强型地热系统: 潜力大、开发难[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 335 - 344. [ LIAO Zhijie, WAN Tianfeng, ZHANG Zhenguo. The enhanced geothermal system (EGS): Huge capacity and difficult exploitation[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 335 - 344. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] LU S M. A global review of enhanced geothermal system (EGS)[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 2902 - 2921.
- [ 9 ] 蔺文静, 王贵玲, 邵景力, 等. 我国干热岩资源分布及勘探: 进展与启示[J]. 地质学报, 2021, 95(5): 1366 - 1381. [ LIN Wenjing, WANG Guiling, SHAO Jingli, et al. Distribution and exploration of hot dry rock resources in China: Progress and inspiration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(5): 1366 - 1381. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] MA Feng, WANG Guiling, SUN Hongli, et al. Indication of hydrogen and oxygen stable isotopes on the characteristics and circulation patterns of medium-low temperature geothermal resources in the Guanzhong Basin, China[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2022, 10(1): 70 - 86.
- [ 11 ] 张超, 张盛生, 李胜涛, 等. 共和盆地恰卜恰地热区现

- 今地热特征[J]. 地球物理学报, 2018, 61(11): 4545 – 4557. [ZHANG Chao, ZHANG Shengsheng, LI Shengtao, et al. Geothermal characteristics of the Qiabuqia geothermal area in the Gonghe Basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(11): 4545 – 4557. (in Chinese with English abstract) ]
- [12] ZHANG Eryong, WEN Dongguang, WANG Guiling, et al. The first power generation test of hot dry rock resources exploration and production demonstration project in the Gonghe Basin, Qinghai Province, China[J]. *China Geology*, 2022, 5(3): 372 – 382.
- [13] KONG Yanlong, PAN Sheng, REN Yaqian, et al. Catalog of enhanced geothermal systems based on heat sources[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 2021, 95(6): 1882 – 1891.
- [14] 张超, 胡圣标, 黄荣华, 等. 干热岩地热资源热源机制研究现状及其对成因机制研究的启示[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(5): 1907 – 1919. [ZHANG Chao, HU Shengbiao, HUANG Ronghua, et al. Research status of heat source mechanism of the hot dry rock geothermal resources and its implications to the studies of genetic mechanism[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(5): 1907 – 1919. (in Chinese with English abstract) ]
- [15] LIN Wenjing, WANG Guiling, GAN Haonan, et al. Heat source model for enhanced geothermal systems (EGS) under different geological conditions in China[J/OL]. *Gondwana Research*, (2022-08-19)[2023-03-20]. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.08.007>.
- [16] 冉恒谦, 冯起赠. 我国干热岩勘查的有关技术问题[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(10): 17 – 21. [RAN Hengqian, FENG Qizeng. Some technical issues on hot dry rock exploration in China[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2010, 37(10): 17 – 21. (in Chinese with English abstract) ]
- [17] 杨冶, 姜志海, 岳建华, 等. 干热岩勘探过程中地球物理方法技术应用探讨[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(4): 1556 – 1567. [YANG Ye, JIANG Zhihai, YUE Jianhua, et al. Discussion on application of geophysical methods in hot dry rock(HDR) exploration[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(4): 1556 – 1567. (in Chinese with English abstract) ]
- [18] 何治亮, 张英, 冯建赞, 等. 基于工程开发原则的干热岩目标区分类与优选[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 81 – 93. [HE Zhiliang, ZHANG Ying, FENG Jianyun, et al. Classification of geothermal resources based on engineering considerations and HDR EGS site screening in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(1): 81 – 93. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 郭建春, 肖勇, 蒋恕, 等. 深层干热岩水力剪切压裂认识与实践[J]. 地质学报, 2021, 95(5): 1582 – 1593. [GUO Jianchun, XIAO Yong, JIANG Shu, et al. Understanding and practice of hydraulic shearing in deep hot dry rocks[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(5): 1582 – 1593. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] 陈作, 张保平, 周健, 等. 干热岩热储体积改造技术研究及试验[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(6): 82 – 87. [CHEN Zuo, ZHANG Baoping, ZHOU Jian, et al. Research and test on the stimulated reservoir volume technology of hot dry rock[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(6): 82 – 87. (in Chinese with English abstract) ]
- [21] 王璜, 王贵玲, 岳高凡, 等. 天然裂缝影响下的花岗岩水力裂缝扩展数值模拟[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 2124 – 2130. [WANG Huang, WANG Guiling, YUE Gaofan, et al. Numerical simulation of granite hydraulic fracture propagation under the influence of natural fractures[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(7): 2124 – 2130. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] 徐胜强, 张旭东, 张保平, 等. 测斜仪监测技术在共和盆地干热岩井压裂中的应用研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(2): 42 – 48. [XU Shengqiang, ZHANG Xudong, ZHANG Baoping, et al. Application of inclinometer monitoring technology in Gonghe hot dry rock well fracturing[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(2): 42 – 48. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] MAJER E L, PETERSON J E J E. The impact of injection on seismicity at The Geysers, California Geothermal Field[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2007, 44(8): 1079 – 1090.
- [24] 张杰, 谢经轩. 多分支井增强型地热开发系统设计及产能评价[J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 179 – 188. [ZHANG Jie, XIE Jingxuan. Design and productivity evaluation of multi-lateral well enhanced geothermal development system[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(3): 179 – 188. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 苏长寿, 阴文行, 冯红喜, 等. 液动潜孔锤技术应用于干热岩钻井的可行性探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(3): 14 – 16, 266. [SU Changshou, YIN Wenhong, FENG Hongxi, et al. Feasibility study on application of hydraulic hammer technology in hot dry rock drilling[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2017, 44(3): 14 – 16. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] CAPUANO L, HUH M, RAYMOND D W, et al. Enhanced geothermal systems (EGS) well construction

- technology evaluation report[R]. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, 2008.
- [27] 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. [GAN Haonan, WANG Guiling, LIN wenjing, et al. Research on the status quo of environmental geology impact of enhanced geothermal system and countermeasures[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(2): 211 - 220. (in Chinese with English abstract) ]
- [28] 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. [YIN Xinxin, JIANG Changsheng, ZHAI Hongyu, et al. Review of induced seismicity and disaster risk control in dry hot rock resource development worldwide[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(11): 3817 - 3836. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] FRYER B, SIDDIQI G, LALOUI L. Injection-induced seismicity: Strategies for reducing risk using high stress path reservoirs and temperature-induced stress preconditioning[J]. Geophysical Journal International. 2020, 220(2): 1436 - 1446.
- [30] OLASOLO P, JUÁREZ M C, MORALES M P, et al. Enhanced geothermal systems (EGS): A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 56: 133 - 144.
- [31] POLLACK A, HORNE R, MUKERJI T. What are the challenges in developing enhanced geothermal systems (EGS)? Observations from 64 EGS Sites[C]// Reykjavik: Proceedings World Geothermal Congress, 2021.
- [32] 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[J]. 地学前缘, 2019, 26(2): 321 - 334. [ZHANG Senqi, WEN Dongguang, XU Tianfu, et al. The US Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy Project and comparison of typical EGS site exploration status in China and US[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(2): 321 - 334. (in Chinese with English abstract) ]
- [33] 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. [XU Tianfu, ZHANG Yanjun, ZENG Zhaofa, et al. Technology progress in an enhanced geothermal system (hot dry rock)[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 42 - 45. (in Chinese with English abstract) ]
- [34] 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. [LU Chuan, WANG Guiling. Current status and prospect of hot dry rock research[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19): 13 - 21. (in Chinese with English abstract) ]
- [35] HARRISON T M, MORGAN P, BLACKWELL D D. Constraints on the age of heating at the Fenton Hill Site, Valles Caldera, New Mexico[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1986, 91(B2): 1899 - 1908.
- [36] KELKAR S, WOLDEGABRIEL G, REHFELDT K. Lessons learned from the pioneering hot dry rock project at Fenton Hill, USA[J]. Geothermics, 2016, 63: 5 - 14.
- [37] LAUGHLIN A W, EDDY A C, LANEY R, et al. Geology of the Fenton Hill, New Mexico, hot dry rock site[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1983, 15(1/2/3): 21 - 41.
- [38] MIT-led Interdisciplinary Panel. The future of geothermal energy-impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century[R]. 2006.
- [39] LAUGHLIN A W, PETTITT R A, WEST F G, et al. Status of the Los Alamos experiment to extract geothermal energy from hot dry rock[J]. Geology, 1977, 5(4): 237 - 240.
- [40] AICHHOLZER C, DURINGER P, ORCIANI S, et al. New stratigraphic interpretation of the Soultz-sous-Forêts 30-year-old geothermal wells calibrated on the recent one from Rittershoffen (Upper Rhine Graben, France)[J]. Geothermal Energy, 2016, 4(1): 1 - 26.
- [41] HOOIJKAAS G R, GENTER A, DEZAYES C. Deep-seated geology of the granite intrusions at the Soultz EGS site based on data from 5 km-deep boreholes[J]. Geothermics, 2006, 35(5/6): 484 - 506.
- [42] VIDAL J, GENTER A. Overview of naturally permeable fractured reservoirs in the central and southern Upper Rhine Graben: Insights from geothermal wells[J]. Geothermics, 2018, 74(1): 57 - 73.
- [43] GÉRARD 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.
- [44] SCHILL E, GENTER A, CUENOT N, et al. Hydraulic performance history at the Soultz EGS reservoirs from stimulation and long-term circulation tests[J]. Geothermics, 2017, 70: 110 - 124.
- [45] TENMA N, YAMAGUCHI T, ZYVOLOSKI G. The Hijiori hot dry rock test site, Japan: Evaluation and optimization of heat extraction from a two-layered reservoir[J]. Geothermics, 2008, 37(1): 19 - 52.
- [46] KURIYAGAWA M, TENMA N. Development of hot dry rock technology at the Hijiori test site[J]. Geothermics, 1999, 28(4/5): 627 - 636.

- [47] LIM W, HAMM S Y, LEE C, et al. Geothermal characteristics of deep wells using geophysical logs in Pohang area, Korea[C]// AGU Fall Meeting Abstracts, 2016.
- [48] LEE T J, SONG Y, JEON J, et al. Three dimensional geological model of Pohang EGS Pilot Site, Korea[C]// Melbourne: Proceedings World Geothermal Congress, 2015.
- [49] ELLSWORTH W L, GIARDINI D, TOWNEND J, et al. Triggering of the Pohang, Korea, earthquake ( $M_w$  5.5) by enhanced geothermal system stimulation[J]. *Seismological Research Letters*, 2019, 90(5): 1844 – 1858.
- [50] 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[J]. *Science*, 2018, 360: 1003 – 1006.
- [51] MCKITTRICK A. FORGE ahead-roadmap released for DOE's Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy[J]. *Bulletin*, 2019, 48: 36 – 38.
- [52] SIMMONS S F, KIRBY S, ALLIS R, et al. The current geoscientific understanding of the Utah FORGE site[C]// Reykjavik: Proceedings World Geothermal Congress, 2021.
- [53] MOORE J, MCLENNAN J, ALLIS R, et al. The Utah Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy (FORGE): An international laboratory for enhanced geothermal system technology development[C]// California: Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 2020.
- [54] 甘浩男, 王贵玲, 蔺文静, 等. 中国干热岩资源主要赋存类型与成因模式[J]. *科技导报*, 2015, 33(19): 22 – 27. [GAN Haonan, WANG Guiling, LIN Wenjing, et al. Research on the occurrence types and genetic models of hot dry rock resources in China[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(19): 22 – 27. (in Chinese with English abstract)]
- [55] 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[J]. *科技导报*, 2012, 30(32): 25 – 31. [WANG Jiyang, HU Shengbiao, PANG Zhonghe, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. *Science & Technology Review*, 2012, 30(32): 25 – 31. (in Chinese with English abstract)]
- [56] 蔺文静, 刘志明, 马峰, 等. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. *地球学报*, 2012, 33(5): 807 – 811. [LIN Wenjing, LIU Zhiming, MA Feng, et al. An estimation of HDR resources in China's mainland[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(5): 807 – 811. (in Chinese with English abstract)]
- [57] 自然资源部中国地质调查局, 国家能源局新能源和可再生能源司, 中国科学院科技战略咨询研究院, 等. 中国地热能发展报告(2018年)[R]. 北京: 中国石化出版社, 2018. [China Geological Survey, Ministry of Natural Resources, New and Renewable Energy Department, National Energy Administration, Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, et al. China geothermal energy development report[R]. Beijing: China Petrochemical Press, 2018. (in Chinese)]
- [58] 张森琦, 付雷, 张杨, 等. 基于高精度航磁数据的共和盆地干热岩勘查目标靶区圈定[J]. *天然气工业*, 2020, 40(9): 156 – 169. [ZHANG Senqi, FU Lei, ZHANG Yang, et al. Delineation of hot dry rock exploration target area in the Gonghe Basin based on high-precision aeromagnetic data[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(9): 156 – 169. (in Chinese with English abstract)]
- [59] 张森琦, 李旭峰, 宋健, 等. 共和盆地壳内部分熔融层存在的地球物理证据与干热岩资源区域性热源分析[J]. *地球科学*, 2021, 46(4): 1416 – 1436. [ZHANG Senqi, LI Xufeng, SONG Jian, et al. Analysis on geophysical evidence for existence of partial melting layer in crust and regional heat source mechanism for hot dry rock resources of Gonghe Basin[J]. *Earth Science*, 2021, 46(4): 1416 – 1436. (in Chinese with English abstract)]
- [60] 张森琦, 严维德, 黎敦朋, 等. 青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征[J]. *中国地质*, 2018, 45(6): 1087 – 1102. [ZHANG Senqi, YAN Weide, LI Dunpeng, et al. Characteristics of geothermal geology of the Qiabuqia HDR in Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 2018, 45(6): 1087 – 1102. (in Chinese with English abstract)]
- [61] 鲁辉. 苏北盆地东台坳陷碳酸盐岩热储层特征研究与评价[J]. *中国煤炭地质*, 2022, 34(4): 32 – 38. [LU Hui. Dongtai depression carbonate rock geothermal reservoir features research and assessment in North Jiangsu Basin[J]. *Coal Geology of China*, 2022, 34(4): 32 – 38. (in Chinese with English abstract)]
- [62] XU Jianan, FENG Bo, CUI Zhenpeng, et al. Comparative study of acid and alkaline stimulants with granite in an enhanced geothermal system[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2021, 95(6): 1926 – 1939.

编辑: 汪美华  
刘真真