

# 干热岩地热资源开采技术现状与挑战

李根生<sup>1</sup>, 武晓光<sup>1</sup>, 宋先知<sup>1</sup>, 周仕明<sup>2</sup>, 李铭辉<sup>3</sup>, 朱海燕<sup>4</sup>, 孔彦龙<sup>5</sup>, 黄中伟<sup>1\*</sup>

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101

3 深圳大学深地科学与地热能开发利用广东省重点实验室, 深圳 518060

4 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610059

5 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

\* 通信作者, huangzw@cup.edu.cn

收稿日期: 2022-05-09

国家自然科学基金重大项目(52192620)和重点国际(地区)合作项目(52020105001)联合资助

**摘要** 干热岩地热是一种具有独特优势的清洁可再生能源, 具有储量大、分布广、低碳环保、稳定高效等特点, 实现干热岩地热资源的高效开发对于推动我国能源结构转型和绿色低碳发展具有重要意义。本文从干热岩地热资源分布和成因类型出发, 介绍了我国干热岩地热资源禀赋和热源机制, 阐述了干热岩地热的主要开采方式和国内外研究现状, 结合已建和在建的增强型地热系统(EGS)示范工程, 系统剖析了干热岩EGS开采所面临的钻井建井、压裂造储及取热优化3大挑战, 并从基础科学研究层面给出了未来攻关思路: 以“岩体表征—钻井建井—压裂造储—流动取热—集成调控”为主体路线, 探究干热岩破碎动态力学响应特征与缝网连通机理, 阐明热储取热过程中热—流—固—化多场耦合关联机制, 形成干热岩钻井建井、压裂造储与取热调控理论及新方法, 为干热岩地热资源高效开采奠定理论和方法基础。

**关键词** 干热岩; 地热; 钻井完井; 压裂; 传热

## Status and challenges of hot dry rock geothermal resource exploitation

LI Gensheng<sup>1</sup>, WU Xiaoguang<sup>1</sup>, SONG Xianzhi<sup>1</sup>, ZHOU Shiming<sup>2</sup>, LI Minghui<sup>3</sup>, ZHU Haiyan<sup>4</sup>, KONG Yanlong<sup>5</sup>, HUANG Zhongwei<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China

3 Guangdong Provincial Key Laboratory of Deep Earth Sciences and Geothermal Energy Exploitation and Utilization, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

4 State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

5 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Abstract** Hot dry rock geothermal energy, as an unique renewable energy, is characterized with abundant reserves, wide

引用格式: 李根生, 武晓光, 宋先知, 周仕明, 李铭辉, 朱海燕, 孔彦龙, 黄中伟. 干热岩地热资源开采技术现状与挑战. 石油科学通报, 2022, 03: 343-364

LI Gensheng, WU Xiaoguang, SONG Xianzhi, ZHOU Shiming, LI Minghui, ZHU Haiyan, KONG Yanlong, HUANG Zhongwei. Status and challenges of hot dry rock geothermal resource exploitation. Petroleum Science Bulletin, 2022, 03: 343-364. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.031

distribution, carbon-free, stable and efficient supply. High-efficient development of hot dry rock geothermal energy is of great significance to promote the transformation of China's energy structure and pursuit of low-carbon development. In this paper the distribution and petrogenesis of hot dry rock was presented, and the endowment and heat source mechanism of geothermal resources in China were introduced. Additionally, the main development methods of hot dry rock geothermal energy were elaborated including drilling and well completion, hydraulic fracturing, and heat extraction. Afterward, a future research outline was proposed aiming at fundamental scientific research. It was suggested that a combined theory of "rock mass characterization-drilling and completion-hydraulic fracturing-heat extraction-integrated regulation" would be worked as the main research route to investigate dynamic damage mechanisms and fracture network connection of hot dry rock, and the multiphase coupling mechanism of the thermal-hydraulic-mechanical-chemical effect in the heat extraction process would be elucidated. Finally, a new method of drilling, fracturing, heat extraction, and synthetical control theory of hot dry rock were formed, which was expected to provide a theoretical foundation for the efficient development of geothermal energy in hot dry rock.

**Keywords** hot dry rock; geothermal; well drilling and completion; fracturing; heat extraction

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.031

## 0 引言

在全球向多元化“新能源时代”转型的大趋势下,中国作为能源消费大国和负责任大国,肩负着促进地区能源转型、实现绿色低碳可持续发展的重任。作为巴黎气候协定的缔约方,中国积极应对气候变化,提出了2030年碳达峰、2060年碳中和的远景目标<sup>[1]</sup>。国家“十四五”规划明确提出“推动能源清洁低碳安全高效利用”,并在中央财经委员会第九次会议上把“双碳”目标纳入了我国生态文明建设整体布局,大力开发清洁可再生能源,契合我国能源重大战略需求<sup>[2]</sup>。

地热能作为一种重要的清洁可再生能源,具有低碳环保、稳定高效等特点<sup>[3]</sup>,与风能、太阳能等能源相比,不受季节、气候、昼夜等外界因素干扰,发电利用效率(Capacity factor)达73%,约为太阳能的5.2倍、风能的3.5倍<sup>[4]</sup>,是一种现实并具有竞争力的新能源。“发展安全、清洁、高效的地热能等现代能源技术”已被列入《国家创新驱动发展战略纲要》。中共中央、国务院《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》,更是明确提出要“大力发展风能、太阳能、生物质能、海洋能、地热能等”。地热能主要包含水热型(含水)和干热岩型(不含水)两类,目前我国地热能开发仍以水热型为主,中低温地热直接利用居世界首位,而高温干热岩地热开发尚处于起步阶段<sup>[5]</sup>。

干热岩是指埋深位于3~10 km、温度高于180 °C、含有少量或不含水的低渗岩体<sup>[6-7]</sup>。我国干热岩地热能储量丰富,资源量为 $2.52 \times 10^{25}$  J,合856万亿t标煤<sup>[8]</sup>,约占世界资源总量的1/6。其中,3~5 km深干热岩资源约为150万亿t标煤<sup>[9]</sup>,为我国化石能源总量的80倍。按2‰资源开采量计算,3~5 km干热岩地

热能即可贡献“碳中和”减排目标的17.7%,开发潜力巨大。实现干热岩地热能的高效开发利用,对于改善我国能源结构、减少温室气体排放和控制环境污染具有重大意义。本文从干热岩地热资源分布和成因类型出发,阐述了我国干热岩地热资源禀赋和开采潜力,介绍了干热岩地热的主要开采方式和国内外研究现状,并系统剖析了干热岩开采中所面临的钻井建井、压裂造储及取热优化3大难题挑战,从基础科学研究层面提出了攻关思路和研究建议。

## 1 资源分布与成因类型

地热资源的分布与板块构造有着密切联系,板块构造运动对全球地热带形成和分布规律有明显的控制作用。全球高温地热资源主要沿板块生长/开裂的大洋扩张脊和板块碰撞/衰亡的消减带等大地构造板块边缘狭窄地带展布,延伸可达数千千米,形成了著名的全球地热带<sup>[10]</sup>。目前普遍将全球划分为4个地热带<sup>[7, 11-12]</sup>:环太平洋地热带、红海—亚丁湾—东非离散板内地热带、地中海—喜马拉雅地热带(又称特提斯汇聚板缘地热带)与大西洋中脊地热带。全球已查明的地热资源绝大多数分布在环太平洋地热带与地中海—喜马拉雅地热带上,集中在北美洲西海岸、中美洲、中国东南沿海和青藏高原地区以及德国、法国等欧洲国家。在红海—亚丁湾—东非离散板内地热带内,地热资源以中—高温水热型为主要存在形式,且主要分布在非洲东部。大西洋中脊地热带的地热资源主要位于冰岛,以水热型为主,存在少量干热岩地热资源。此外,在4大地热带以外(澳大利亚、新西兰)也存在部分水热型和干热岩型地热资源,主要热源为壳源放射性元素放热。

地热资源作为一种埋藏于地下的矿产资源,与构造条件、地层、岩性、地下水等条件息息相关,不同的热源组成及成因模式使全球地热资源形成了独特的成因规律和分布特征<sup>[13]</sup>。对全球已开发利用的干热岩场地进行分类评价,如图1所示,可以发现:位于板块边缘的干热岩场地多达32个,并且以地幔余热(14个)、幔源岩浆(11个)和构造热事件(5个)为主要热源<sup>[14]</sup>。幔源岩浆型地热系统主要分布在环太平洋地热带,地幔余热型地热系统主要分布在欧洲地区,构造热事件型地热系统的分布则比较分散。板块内部的干热岩场地相对很少,仅在中国的共和盆地(1个部分熔融型)以及澳大利亚(2个放射性产热型)存在。

根据地质构造背景,中国的干热岩资源通常划分为高放射性产热型、沉积盆地型、近代火山型和强烈构造活动带型等4种典型成因类型<sup>[7, 15-18]</sup>。高放射性产热型干热岩资源主要分布于华南地区,以放射性元素的衰变热为主要热源,岩性主要为花岗岩;沉积盆地型干热岩资源主要分布于东部的华北、松辽等中/新生代沉积盆地,盆地内基岩面起伏相间的构造格局,对

区域地温场和地表热流的分布起着控制作用,典型区块如唐山马头营凸起区<sup>[16-17]</sup>;近代火山型干热岩资源主要分布于腾冲、雷琼、长白山以及五大连池等近代火山群分布区,琼北花东1R井在深度4387m处钻获超过185℃的优质高温岩体,属于典型的近代火山型干热岩<sup>[17]</sup>;西南藏滇地区以及台湾地区是我国强烈构造活动带型干热岩的主要赋存区域,由于我国地处环太平洋板块地热带西太平洋岛弧型板缘地热带以及地中海—喜马拉雅陆陆碰撞型板缘地热带的交汇部位,构造活动剧烈,干热岩资源具有与水热型地热系统同源共生的特征,如羊八井地热田的ZK4002井,即为典型的高温水热系统翼部伴生的干热型地热系统<sup>[19]</sup>。

## 2 干热岩增强型地热系统

增强型地热系统(Enhanced Geothermal Systems, 简称EGS)是目前开发干热岩的主要手段<sup>[20-21]</sup>,原理如图2所示,即通过水力压裂等方法在高温地层中人工造储,形成裂缝网络沟通注入井和生产井,之后循环

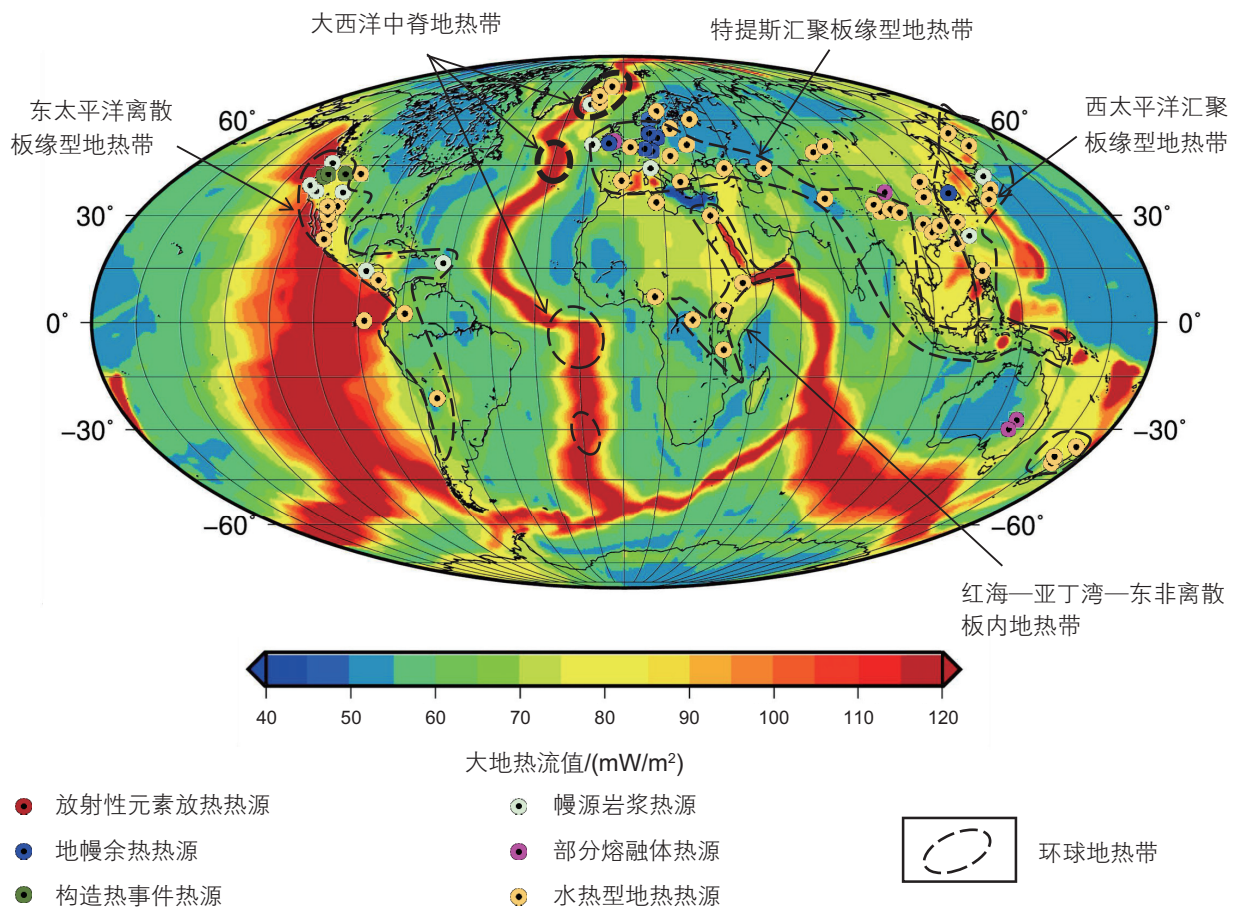


图1 全球主要地热资源分布<sup>[14]</sup>

Fig. 1 Global distribution of major geothermal resources<sup>[14]</sup>



工质取热,进行发电和综合利用。干热岩EGS已成为国际能源领域的研究热点,美、英、日、法、德等相继实施了大规模EGS地热项目<sup>[22-24]</sup>。我国干热岩地热资源分布广泛,近年来在藏南、滇西、川西、东南沿海等地区相继取得了重大勘探突破<sup>[25]</sup>,并开始着手建

立我国首个干热岩EGS示范工程。

从1974年全球首个干热岩EGS示范工程至今,世界范围内已经陆续开展了60余项EGS开发示范项目(图3)<sup>[26]</sup>,包括美国的Fenton Hill、英国的Rosemanowes、日本的Hijiori、澳大利亚的Cooper

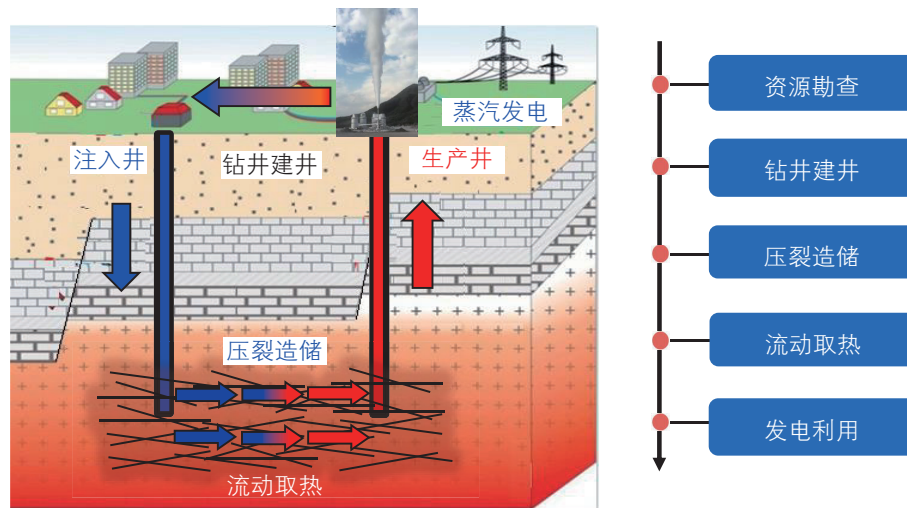


图2 干热岩增强型地热系统示意图

Fig. 2 Schematic of enhanced geothermal system in hot dry rock



图3 全球64个EGS示范工程地点<sup>[26]</sup>, (a) 全球干热岩EGS工程分布; (b) 北美EGS密集分布区放大图, 绿色区域; (c) 欧洲EGS密集分布区放大图, 蓝色区域

Fig. 3 The 64 EGS project sites around the world<sup>[26]</sup>, (a) Global distribution of hot dry rock EGS projects; (b) Enlarged view of the dense distribution area of EGS in North America, green area; (c) Enlarged view of the dense distribution area of EGS in Europe, blue area



Basin、法国的Soulitz和德国的Landau等<sup>[22, 27-28]</sup>，并相继实现了兆瓦级试验。其中仍在运行和在建的EGS项目29个<sup>[26]</sup>，法国Soulitz是目前公认的商业化运行最为成功的EGS工程<sup>[29-30]</sup>。近几年，美国能源部可再生能源办公室资助了多个EGS示范项目，主要包括Desert-Peak项目(内华达州)、Geysers项目(加利福尼亚州)和Raft River项目(爱达荷州)。2015年，美国能源部正式启动了全球最大的干热岩示范项目“地热能研究前沿瞭望台”(FORGE)计划，参加团队包括爱达荷国家实验室、西北太平洋国家实验室、桑迪亚国家实验室和犹他大学，致力于EGS现场应用、钻完井技术测试等前沿研究<sup>[31-32]</sup>。干热岩资源的优越性和EGS开发的可行性得到了国际认可。

我国干热岩地热研究起步较晚。2012年初，在中科院组织起草的《科技发展新常态与面向2020年的战略选择》报告中，“深层地热能将成为主要可再生能源之一”被列入其中，成为“十二五”和“十三五”期间着重突破的重大科技问题之一<sup>[25]</sup>。同年，国家高技术研究发展计划(863计划)启动了“干热岩热能开发与综合利用关键技术研究”项目<sup>[21]</sup>。2013年，制定了《全国干热岩勘查与开发示范实施方案》，在青藏高原、东南沿海、华北平原和松辽盆地开展了干热岩资源调查，初步拟定了我国干热岩地热勘察开发的关键

技术体系。2016年开始实施“全国地热资源调查评价与勘查示范工程”，先后在青海共和、海南琼北、福建漳州等地区钻遇优质干热岩体，干热岩资源潜力得到验证<sup>[17]</sup>。然而，根据国际地热协会(IGA)数据，截至2021年，全球累计地热发电装机容量为15.85 GW，而中国地热发电能力约为45.46 MW，占比仅为0.29%，亟需形成干热岩高效钻采与调控技术，推动我国深层高温地热开发利用进程。为此，2021年国家自然科学基金委启动了地热领域首个重大项目“干热岩地热资源开采机理与方法”，项目由中国石油大学(北京)牵头，旨在借鉴油气行业成熟的钻采理论和技术，超前部署，开展多学科交叉和综合性研究，提升我国干热岩地热基础研究的源头创新能力。

### 3 重大挑战与技术现状

快速钻达地热储层(建井)、形成稳定的热储通道(造储)以及循环工质高效取热(开采)是干热岩EGS的3大技术关键。然而，相比于油气和中低温地热储层，干热岩储层地质条件复杂，具有典型的“四高”特征：(1)高温：干热岩温度高于180℃，美国大部分干热岩储层温度基本都在200℃以上(图4)，美国Geysers以及冰岛的EGS示范项目部分储层甚至高达

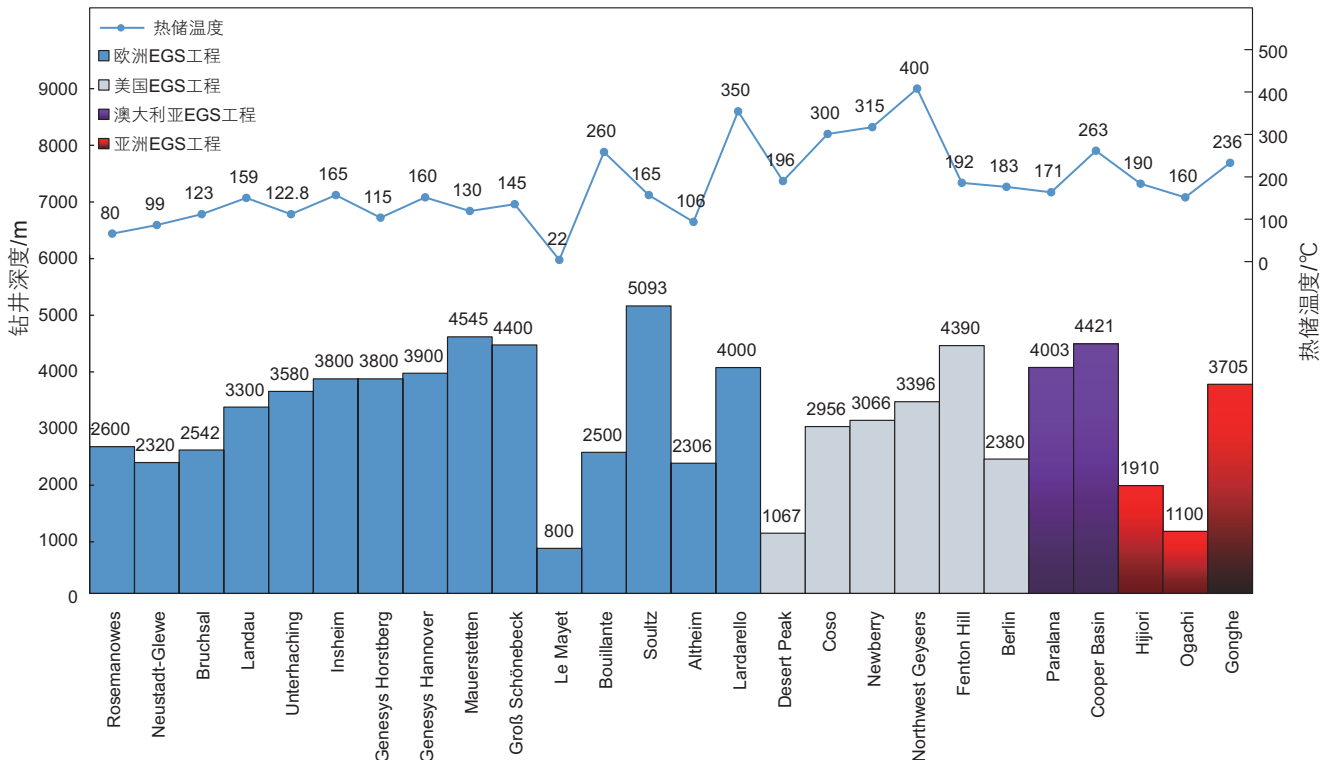


图4 世界典型EGS工程井深与热储温度<sup>[22]</sup>

Fig. 4 Well depth and reservoir temperature of typical EGS projects in the world<sup>[22]</sup>

400 °C<sup>[33]</sup>; (2)高硬度:干热岩资源主要赋存于高温坚硬的花岗岩和变质岩中,埋深大部分超过3000 m,部分地层岩石单轴抗压强度在200 MPa以上<sup>[34]</sup>,可钻性达10级,研磨性极强;(3)高应力:因构造运动活跃,最大水平主应力当量钻井液密度超过2.8 g/cm<sup>3</sup>,是常规泥页岩的2倍以上;(4)高致密:地层岩石密度大(2.8~3.1 g/cm<sup>3</sup>)、孔隙度和渗透率极低(<10<sup>-3</sup> mD)。上述复杂地质条件,使得干热岩地热开采在钻井建井、压裂造储和流动取热等关键环节面临重大难题和技术挑战。

### 3.1 钻井建井

钻达地热储层、形成稳定井眼是实现深部地热资源开采的先决条件。钻井是干热岩资源开发的主体技术(约占总投资的35%~60%),在超高温、异常坚硬的储层中建成可靠的循环注采井筒通道,是地热资源勘探、提高产量、降低成本最主要的工程环节。然而,由于深部地热储层岩体高温、高强度、耐研磨等特点,干热岩钻完井面临以下几方面的技术挑战:

(1)干热岩硬度高、耐研磨,地层可钻性极差,导致钻头磨损严重。青海共和盆地进尺2497 m消耗钻头50余只<sup>[35-36]</sup>,单只钻头平均进尺不足40 m,美国Geysers地热田花岗岩地层单只钻头甚至不足30 m。

(2)机械钻速低,建井周期长、成本高,严重制约了干热岩的商业化开发。美国芬顿山EE-2井(4660 m)建井周期410天<sup>[37]</sup>,冰岛IDDP-1井(2096 m)钻井周期402天<sup>[38]</sup>,我国青海共和GH01井中钻进花岗岩井段平均钻速仅1.43 m/h,建井周期长达430天<sup>[35-36]</sup>。

(3)钻井液体系在高温下流变性和稳定性发生劣化,高温井眼清洁效果差,护壁和携岩能力降低,加之地层裂缝和断层发育,导致钻井液漏失严重,容易诱发井下安全事故<sup>[39-40]</sup>。

(4)高温引起水泥浆固结缓慢和水泥石强度衰退,造成套管挤压变形和密封失效,影响成井安全,如肯尼亚OW-36A井和法国Saultz干热岩项目,均出现了水泥环高温失效导致的套损问题<sup>[41-43]</sup>。此外,传统水泥浆体系未考虑隔热作用,导致EGS注采过程中井筒沿程热损失严重,影响热能发电和综合利用效率<sup>[44]</sup>。

#### 3.1.1 高温硬地层高效破岩及钻井提速技术

岩石可钻性评价是实现钻头选型和个性化设计的基础。现有可钻性评价主要针对砂岩或泥页岩等常规沉积岩地层,鲜有关于高温花岗岩可钻性等钻井关键参数的评价报道,缺乏高温高压(>200 °C)条件下硬岩

可钻性等钻井参数的评价方法和体系,钻头选型及参数设计缺乏理论依据。

钻头作为破岩的主要工具,是实现干热岩优快钻井的关键。为适应干热岩井下高温环境,国内外对钻头进行结构优化和材料升级,贝克休斯牙轮钻头最高耐温能力达到288 °C,国民油井Reed-Hycalog超硬热稳定PDC可钻穿抗压强度达到280 MPa的硬地层,并具有很强的耐磨性和抗冲击性<sup>[45]</sup>。国内采用金属轴承密封系统、耐高温润滑介质、顶齿掌背强化等技术手段,开发了耐260 °C牙轮钻头<sup>[46]</sup>。虽然国内耐高温牙轮钻头可一定程度上满足干热岩钻井需求,但高温高压下轴承寿命问题无法解决,在干热岩井中工作时长和稳定性得不到保障,掉牙轮情况频发,井下风险高,且提速效果不理想。干热岩地层中钻速低的主要原因是常规破岩手段能量不足,对于花岗岩等硬地层钻头齿吃入深度有限,难以形成体积破碎,同时钻头工作状态不稳定,持续处于黏滑和振动等不利工作环境中,牙齿崩裂磨损严重。异形齿PDC钻头在高强度、高研磨性地层钻井中展现出良好的适用性,可通过采用新材料增强其耐温和抗冲击性能,近年来引起了各大油服公司和国内外学者的广泛关注<sup>[47-50]</sup>。针对锥形齿、斧型齿、三棱齿等异型齿(图5)破岩机理开展了大量研究<sup>[48-52]</sup>,实验结果表明:锥形齿等异形齿破岩性能和吃入岩石能力均优于常规PDC齿,可大幅降低破岩比能、提高机械钻速。因此,基于异型齿混合布齿的个性化自适应PDC钻头,配合耐温耐冲击增强型材料,有望为干热岩硬地层破岩效率低的问题提供解决思路。

在动力钻具和提速方法方面,螺杆钻具在高温下橡胶部件老化,导致在干热岩中应用受限,我国高温螺杆钻具耐温一般不超过180 °C<sup>[53-54]</sup>。贝克休斯正在研发耐高温300 °C动力钻具系统,包括Kymera钻头、全金属螺杆钻具、螺杆用金属间润滑剂等。相比于螺杆钻具,涡轮钻具由于其全金属的结构特点,耐温能力普遍可以达到260 °C<sup>[55]</sup>,配合孕镶金刚石钻头,可大幅提高机械钻速。对于随钻测量等含电子元件工具,目前耐温能力普遍不超过180 °C,特别是对于空气钻井或泡沫钻井,工具抗高温性能尚难以满足干热岩高温环境<sup>[34]</sup>。旋转冲击器和扭力冲击器在油气井中提速效果好,采用金属密封结构能够适应260 °C以上高温环境,但目前未规模化应用于干热岩钻井工程。旋冲钻井和扭冲钻井利用了硬岩脆性强、冲击易碎的特点,实现切削与冲击破岩的结合,提高了PDC齿吃入地层的深度,同时增大了岩屑破碎体积,有望有效提高硬

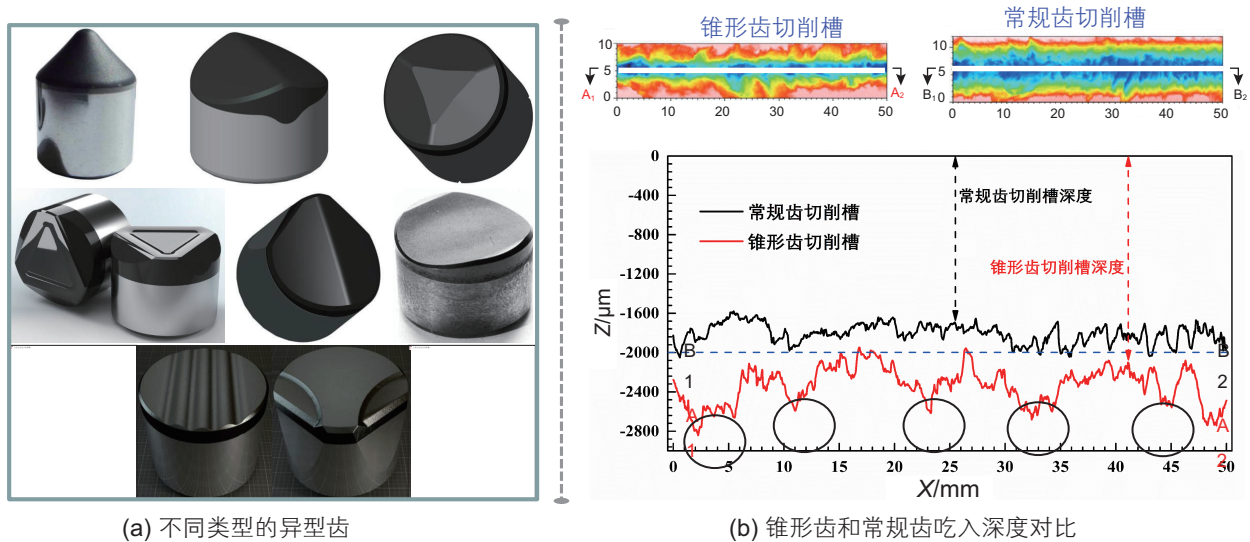


图5 异型齿类型及破岩特征对比<sup>[52]</sup>, (a)不同类型的PDC异型齿; (b)锥形齿和常规齿吃入深度对比

Fig. 5 Axe-shaped cutters and comparison in rock-breaking performances, (a) Various types of axe-shaped PDC cutters; (b) Comparison in cutting depth between conical cutter and conventional cutter<sup>[52]</sup>

地层的机械钻速<sup>[55-56]</sup>。建议后续加强高温高应力下轴扭耦合破岩机理研究,探索多维冲击耦合破碎干热岩方法的可行性。

### 3.1.2 耐高温钻井液及高温护壁/携岩方法

如何在高温环境下保持钻井液性能,维持其携岩及稳定井壁的能力,是确保干热岩安全高效建井的关键。高温下钻井液体系流变性和稳定性易发生劣化,护壁和携岩能力降低,井眼清洁效果变差,容易引发压持效应。目前主流的抗高温钻井液大多以磺化材料为主<sup>[39-40]</sup>,抗温能力可达到230~260℃,我国贵德ZR1井和漳州干热1井中即使用了抗高温聚磺钻井液<sup>[57-58]</sup>。但磺化体系中含有较多的铬离子和甲醛等有害物质,环境污染问题较为严重,而其他抗高温钻井液体系例如甲酸盐钻井液等,成本较高,难以广泛应用,抗高温、经济环保的新型钻井液体系尚有待研发。

干热岩储层通常发育有天然裂缝及断层,因此钻井过程中存在钻井液恶性漏失的风险,容易诱发井下安全事故。如西藏羊八井ZK201井钻井过程中从井深几十米几乎漏到井底,日本Ogachi干热岩钻井时井底钻井液漏失量高达90%<sup>[59-60]</sup>。钻遇裂缝性和破碎性地层时如何维护井壁稳定,实现高温高压条件下有效防漏和堵漏是干热岩钻井亟待解决的问题之一。当前针对高温堵漏材料研究较少,通常采用空气钻井和耐高温泡沫钻井液来缓解恶性漏失<sup>[36]</sup>。目前,300℃高温泡沫钻井液技术已经基本成熟,中石油长城钻探采用高温泡沫钻井液在肯尼亚OLKARIA区块钻成一口地

热井,地层温度高达350℃<sup>[40-42]</sup>。在井筒携岩方面,由于井筒内高温环境下存在气液固多相流动,钻井液密度、黏度等物性参数随温度分布而发生变化,钻井液在井筒内流动传热的瞬态温压特性复杂,高温环境下考虑钻井液漏失的三维井眼环空岩屑运移规律尚不明晰,仍缺乏干热岩钻井井筒高效携岩理论和方法。

### 3.1.3 高温固井水泥石强度衰退与控制方法

固井不仅决定着干热岩全生命周期井筒质量,还影响到后续的EGS工程建设。干热岩高温环境对水泥浆浆体稳定性、失水量和稠化时间具有影响,长期强度易发生衰退<sup>[61-62]</sup>。肯尼亚地热井OW-36A井固井水泥浆体系未充分考虑高温、注采循环的影响,致使72%井段发生长效密封失效,套管严重挤毁变形,井口套压超过20 MPa,造成该井报废<sup>[41-43]</sup>。美国俄勒冈州的Newberry也发生了类似的问题,大部分压裂液在套管鞋附近流出,导致初始改造不成功<sup>[63]</sup>。2017年,冰岛Reykjanes也发生了套管固井泄漏,导致后续热储流量测试被延迟<sup>[64]</sup>。

高温是影响水泥石强度衰退的主要因素,存在温度阈值。通常当温度达到110℃时,水泥石会产生强度下降,到达230℃时可能会完全丧失强度。普通的油井水泥是由硅酸二钙、硅酸三钙组成,约占总量的80%,温度较低主要利于生成水化硅酸二钙和一定量的碳酸钙和氢氧化钙,这些物质稳定、力学性能好。但是在高温条件下,水化硅酸二钙的晶体形态发生转变,生成了C<sub>2</sub>SH(A)和C<sub>2</sub>SH(C)为主体的混合物,而



且固体状态下的晶体形态改变也造成水泥石的内部结构发生改变,导致水泥石强度急剧下降<sup>[65-68]</sup>。此外,不同于油气井固井过程,地热井要求固井水泥石具有一定的隔热性能,以降低注采过程中的热损量<sup>[44]</sup>。然而,当前地热井大多沿用油气井固井水泥浆体系,未考虑隔热保温作用,因此形成的水泥石导热系数较高,约为 $1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,保温性能较差,导致EGS注采过程中井筒沿程产生较大的热损失,井口水温较储层温度下降明显,大幅降低了地热资源的梯级利用效率<sup>[44, 69]</sup>,部分热损严重的井甚至会丧失发电能力,严重影响其有效利用价值。综上,为确保干热岩井筒的完整性和安全性,需研制高温环境下性能稳定、低失水量、稠化时间可调、低导热系数的固井水泥浆体系,同时探究超高温水泥石热损伤机理与强度稳定性控制方法,提高干热岩井筒水泥环耐温性与耐久性。

### 3.2 压裂造储

压裂造储是干热岩EGS开发的核心步骤,直接决定着干热岩地热开采的成败及整体经济效益。干热岩造储要求形成大规模连通的复杂立体缝网(图6),造缝要求高、改造难度大,注采井沟通困难,油气行业传统的水力压裂技术无法照搬到深层地热<sup>[7, 23]</sup>。截至2020年底,全球累计建设示范性EGS工程项目逾60项,但目前实施的EGS项目中储层改造效果仍不理想、储层改造方法和注采井沟通方案仍不成熟,主要面临以下难题:

(1)岩石强度大,起裂压力高,存在诱发地震风险。澳大利亚Habanero和韩国Pohang干热岩EGS储层改造中地层破裂压力均超过了 $100\text{ MPa}$ ,其中2017年

11月韩国Pohang发生的 $M_w 5.4$ 级地震,被认为由干热岩压裂所导致,2006年瑞士的巴塞塞尔干热岩试验项目也因诱发地震而被迫关停<sup>[60, 70]</sup>。

(2)裂缝单一,难以形成缝网,容易引起热短路。大规模的复杂立体缝网是EGS高效换热的基础,然而日本Hijiori、德国Groß Schönebeck、英国Rosemanowes等EGS项目表明<sup>[25]</sup>,干热岩储层人工压裂形成的裂缝通常较为单一、换热面积有限,注采井间容易形成高渗通道,发生热短路,导致造储失败。

(3)裂缝延伸不可控,注采井沟通困难。干热岩储层改造过程应力扰动复杂,强温差热应力和天然裂缝综合影响下水力裂缝扩展预测难度大,美国Fenton Hill项目在3个阶段的储层改造工作中,经历8次钻井、5次压裂才实现发电<sup>[71-72]</sup>,但最终仍由于人工裂缝未有效沟通注采井、循环工质严重流失等原因而被迫终止,此外英国的Rosemanowes和日本的Hijiori干热岩项目中也出现过注采井无法连通的问题<sup>[73]</sup>。

要建成安全、经济、高效的人工热储并非易事,如何采用“柔性造储”的方式有效沟通注采井,避免纯粹靠提高压力改造储层是构建EGS系统的重大难题与需求。柔性造储是指通过热力交变、压力/排量振荡以及化学刺激等相结合的方法,诱导岩体疲劳损伤和裂缝剪切滑移,沟通天然裂缝,在降低起裂压力、提升缝网尺度和复杂度的同时,有效降低诱发地震的风险。以构建复杂立体缝网、降低地震风险为目标,近年来学者从传统水力压裂造缝和造储新方法两方面开展了大量研究,探索了剪切压裂、循环/疲劳压裂、化学刺激、径向井压裂以及超临界二氧化碳和超低温液氮压裂等干热岩热储改造新思路,但总体上技术仍不

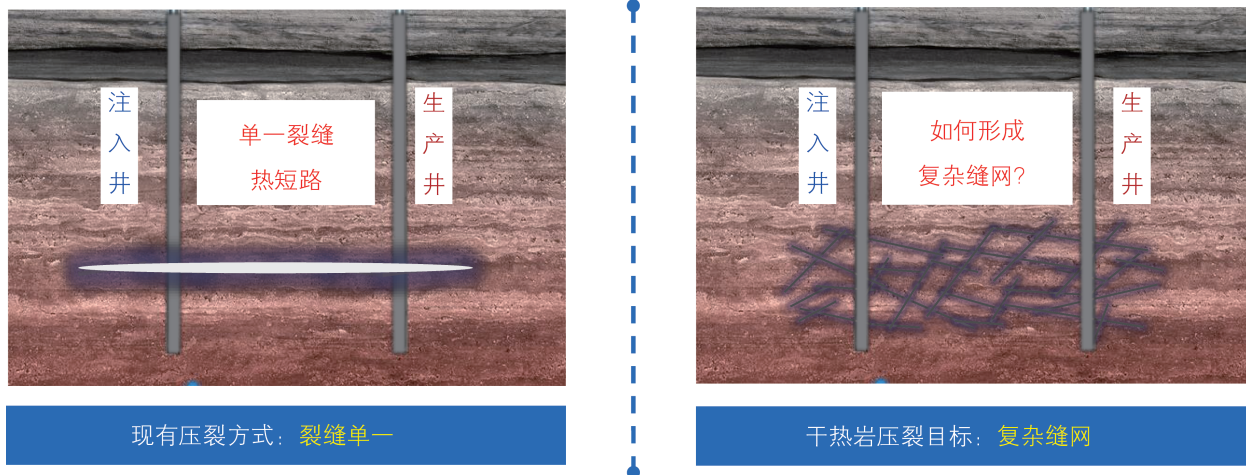


图6 干热岩人工造储难题示意图

Fig. 6 Schematic of the difficulties of creating artificial geothermal reservoir in hot dry rock

成熟, 尚未形成一种“可复制”的干热岩高效造储方法。

### 3.2.1 水力压裂

尽管水力压裂技术已成熟应用于油气领域, 但由于干热岩储层具有高温、高应力等特点, 加大了储层改造的难度和不确定性。不同于油气储层压裂, 干热岩水力压裂是基岩形变、流体流动和热量交换的热一流一固多物理场耦合过程<sup>[74-75]</sup>, 压裂过程受低温流体诱导的热应力与流体静压共同作用, 裂缝起裂和扩展过程相比于传统油气压裂更为复杂。干热岩储层在构造应力和局部断层的影响下通常发育有天然裂缝<sup>[27, 76]</sup>, 利用水力压裂沟通天然裂缝形成相互连通的复杂缝网, 是提高EGS热储改造体积和工质换热效率的有效途径。法国的Soulzt是目前全球商业化运营最成功的EGS示范工程, 该项目以裂缝型地层为主要靶区, 通过水力压裂成功激活和沟通储层中的天然裂缝, 实现了注采井的有效连通。天然裂缝的存在对水力裂缝的走向具有重要影响<sup>[77-80]</sup>, 尽管前人针对干热岩压裂裂缝起裂及扩展等开展了一定研究, 但热应力和天然裂缝共同干扰下的水力裂缝扩展机理鲜有报道, 热应力影响下水力裂缝与天然裂缝的相互作用行为和力学机制仍不明确, 缺乏干热岩水力压裂裂缝捕获/交汇等行为的判定准则, 现有压裂理论难以有效指导干热岩缝网改造。此外, 值得注意的是, 尽管天然裂缝对形成大规模复杂缝网具有重要作用, 但同时也容易引起取热工质严重流失的问题。日本的Ogachi注采试验中, 97%的工质流失在储层中, 直接导致项目终止。Hijiori的注采回收率在45%~70%<sup>[81]</sup>, 瑞典的Fjällbacka注采回收率仅为50%<sup>[82]</sup>, 德国的Falkenberg工质流失量达到60%至100%<sup>[26]</sup>。如何有效借助天然裂缝形成立体缝网, 同时避免取热工质恶性漏失, 是水力压裂造储的关键难题。

水力裂缝能否长期保持有效的渗透率, 是评价干热岩造储效果的重要指标。然而, 有时热储渗透率的改善并非永久性的, 2002年德国的Bad Urach储层改造后, 初期流量测试显示注入率增加了2.9倍, 但一年后的注采试验显示, 地层导水系数又恢复到接近原来的水平<sup>[83]</sup>。干热岩压裂裂缝渗透性的保持通常基于2种方式: 一种是通过长期注入冷水进行热激发, 诱导裂缝剪切滑移, 使裂缝通过缝面不整合形成自支撑; 另一种是通过注入支撑剂, 防止裂缝闭合, 目前支撑剂已应用在多个干热岩项目中, 如East Mesa、Raft River、Baca、Le Mayet、Fenton Hill、Groß Schönebeck、Hachimantai、Bad Urach和Rosemanowes

等<sup>[81, 83-85]</sup>, 大多显示效果良好, 能够有效降低注入压力和工质流失率, 但同时支撑剂的使用也存在加剧热短路的风险<sup>[81]</sup>。

### 3.2.2 剪切压裂

前期干热岩EGS的经验表明, 能否充分激活天然裂缝、剪切成网是干热岩热储获得良好改造效果的关键<sup>[76, 86]</sup>。早在1972年, 美国芬顿山EGS发现, 注水过程中天然裂缝会发生剪切滑移, 扩展沟通了地下原有的裂缝网络, 增强了热储的导流能力。随后, 这一现象被美国Newberry和Desert Peak、德国Landau、法国Soulzt, 澳大利亚Cooper Basin等EGS工程相继验证, 由此提出了水力剪切增渗的概念。不同于传统的水力压裂方法, 剪切压裂是以低于地层最小主应力的流体压力进行注入, 通过热应力和压力震荡等方法降低裂缝面上的有效应力, 在抑制单一拉伸裂缝的发展的同时, 诱导天然和人工裂缝发生剪切扩容和不整合自支撑, 从而永久增大储层换热面积和裂缝导流能力。对于天然裂隙丰富和断层发育的地层, 水力剪切增渗效果更为显著<sup>[87-89]</sup>。围绕干热岩水力剪切增渗机理, 国内外学者开展了裂缝滑移和导流能力测试等相关的室内实验和数值模拟研究。研究结果表明<sup>[90-91]</sup>: 干热岩的水力剪切受热应力、化学溶蚀、排量、地应力等多重因素的综合影响, 压裂液与干热岩温差诱导的热应力有利于促进天然裂缝发生剪切滑移, 增加裂缝的有效导流开度(图7所示)。

### 3.2.3 循环/疲劳压裂

水力压裂诱发地震活动已经成为世界各地EGS工程可持续开发的重要限制因素之一。为解决这一问题, 有学者提出了利用循环压裂(Cyclic soft stimulation)和疲劳水力压裂(Fatigue fracturing)改造储层的新思路<sup>[93]</sup>。循环压裂以控制排量为主要特点, 即采用交变排量的泵注方式, 使岩石不断地经受加载—卸载的过程, 激活天然裂缝的同时, 诱导岩石产生大量微裂缝, 从而降低干热岩的起裂压力及诱发地震的强度。大量室内试验和数值模拟结果表明<sup>[94]</sup>, 相较常规压裂, 循环压裂可降低储层起裂压力达20%, 且声发射信号的最大振幅减小了13.7 dB。不同于循环压裂, 疲劳水力压裂以压力控制为主, 即采用交变/脉动压力的泵注方式改造储层, 通过不断加载—释放裂缝尖端的应力, 诱导岩石产生疲劳破坏, 同样具有降低起裂压力和地震风险, 提升干热岩储层改造效果的作用<sup>[95]</sup>。瑞典Aspo硬岩实验室(Hard Rock Laboratory, HRL)针对疲劳水力压裂方法进行了场地级现场试验, 以花岗岩地层为研究对象, 开展了不同泵注循环和压力脉动模



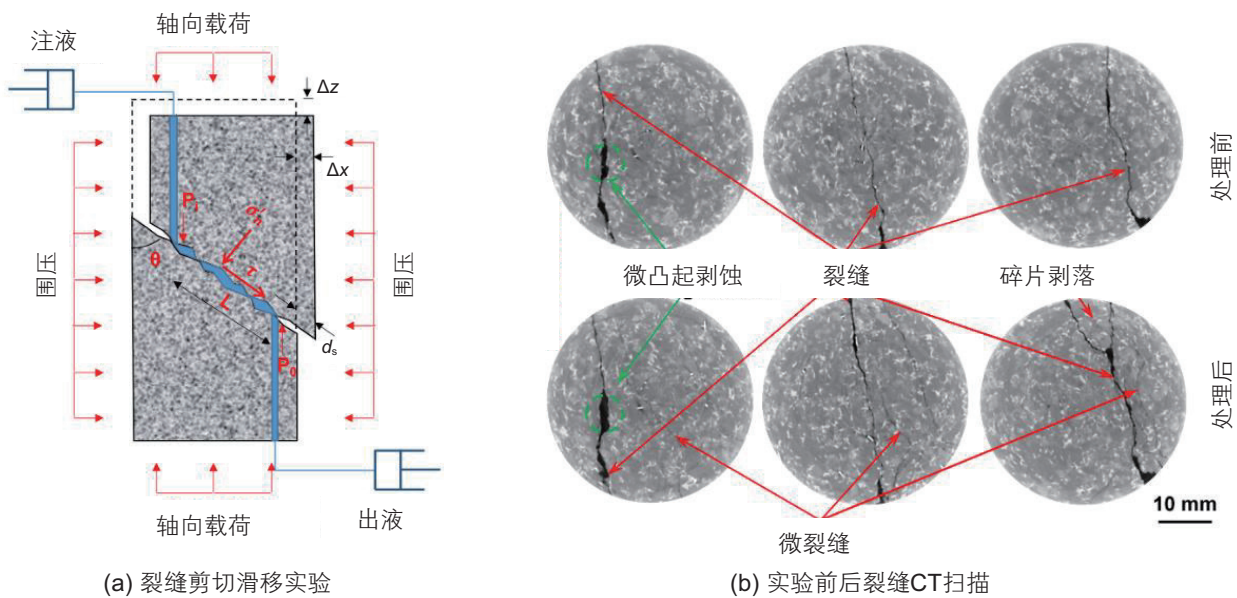


图7 花岗岩裂缝剪切膨胀和增产效果<sup>[92]</sup>, (a) 围压下花岗岩裂缝剪切滑移实验示意图; (b) 实验前后裂缝CT扫描对比图, 经历剪切后裂缝宽度增大, 并在原裂缝周围形成了微裂缝

Fig. 7 Shear expansion of granite and corresponding permeability enhancement<sup>[92]</sup>, (a) Schematic of fracture shear slip experiments of granite under confining pressure; (b) Comparison in CT images of fractures before and after experiment, the width of the fracture grew after shearing, and micro-cracks were created around the original fracture

式下裂缝扩展特征的研究<sup>[96]</sup>, 结果如图8所示。研究发现, 相比于恒定持续注入的压裂方式相比, 疲劳压裂(压力控制)可在岩石内部形成更多分支微裂缝, 且主裂缝缝宽更大, 同时监测到的微震信号幅值显著降低; 对比不同的压力控制模式, 采用阶梯脉动模式下疲劳压裂增产能力改善效果更好, 注入能力最高可提升15倍, 且增产倍数明显高于循环压裂(排量控制), 对可为热储内高效换热提供有利条件<sup>[97-98]</sup>。

### 3.2.4 化学刺激

化学刺激在油气工程中最先应用在碳酸盐地层的酸化改造, 近年来学者提出采用化学刺激辅助水力压裂来提高干热岩热储的渗透性。根据化学剂种类, 化学刺激可分为酸性刺激(土酸、螯合酸、转向酸等)和碱性刺激技术(NaOH、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、螯合碱和 $\text{NH}_3$ 等), 以酸性刺激剂居多。其刺激原理为: 通过管柱向热储层泵入酸性或碱性溶液, 刺激溶液在注入压力作用下沿着热储裂隙不断溶蚀堵塞矿物, 并逐渐向前推进, 扩大裂隙通道的张开度和延伸距离, 进而影响热储的渗透率和取热效率<sup>[99]</sup>。1976年, 美国Fenton Hill首次将化学刺激应用于EGS项目中,  $190\text{ m}^3$ 的化学刺激剂 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 被注入人工热储中用于溶解堵塞在裂隙中的矿物, 试验中大约有1000 kg的石英被溶解<sup>[100]</sup>。此后, 法国Soultz、美国Coso、瑞典Fjällbacka以及德国Groß

Schönebeck等EGS工程<sup>[101-104]</sup>也将化学刺激技术应用到热储改造中, 针对热储中堵塞矿物的不同, 使用不同配比的化学刺激剂对热储层进行溶蚀解堵, 刺激结果显示热储产率均在一定程度上得到提升。菲律宾Bacman的PN-2RD井进行化学刺激处理后, 注入率提高了367%, 初期注水速率达到了 $187\text{ kg/s}$ <sup>[105]</sup>。

尽管化学刺激已在世界多个地热田被证明是成功的, 但由于作用机理认识不清、刺激剂匹配不合理等原因, 在一些地热田未能产能预期的增产效果, 如Geysers和Baca等<sup>[106]</sup>。化学溶液刺激效果受到多种因素的控制, 储层矿物的类型、刺激剂的种类与配方、注入速率以及地层温度等均会影响干热岩渗透率的变化<sup>[107-112]</sup>。基于实验研究结果, 学者们建立场地尺度一维热储化学刺激模型, 围绕热储孔渗变化、有效刺激距离和矿物组分变化等问题<sup>[113-114]</sup>, 探索了针对特定地热储层最优化学刺激改造方案。此外, 学者还建立了二维和三维THMC多场耦合数值模型<sup>[115]</sup>, 分析了注入流体化学组分对热储渗透率和裂隙孔径的影响规律, 获取了长期注入条件下地热储层的流场动态和热采动态<sup>[116-118]</sup>, 为EGS工程化学刺激方案设计提供了理论依据。然而, 需要指出的是, 化学刺激剂也会对套管和固井质量造成负面影响, 甚至可能造成井筒失稳。美国Desert Peak化学激发后井底出现了坍塌<sup>[106]</sup>,



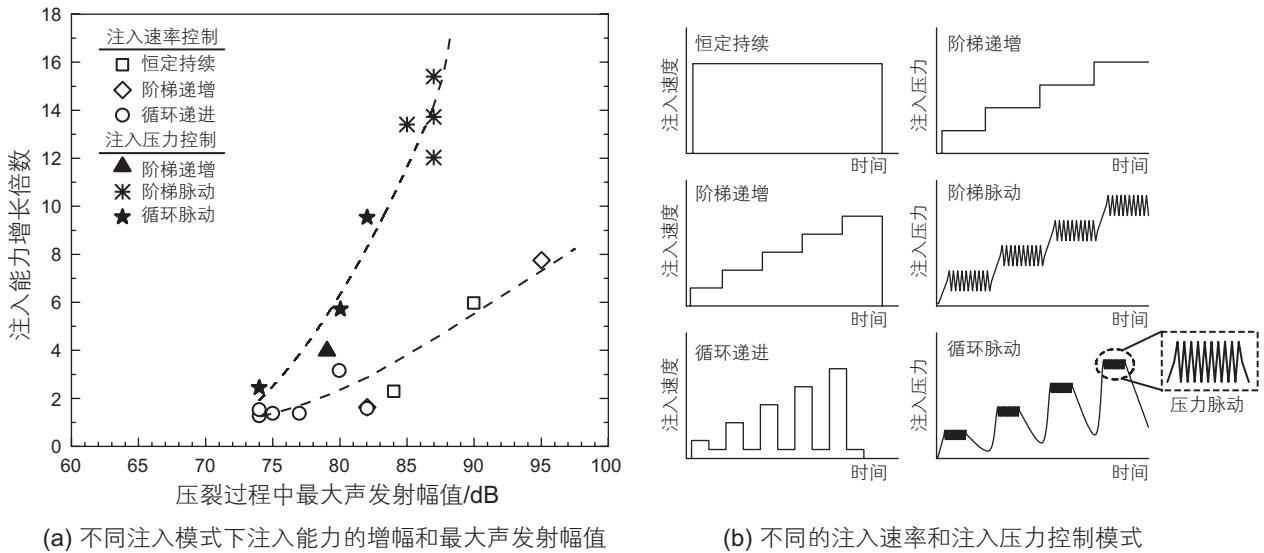


图 8 循环软压裂和疲劳压裂增渗效果对比<sup>[98]</sup>

Fig. 8 Comparison in the permeability growth between cyclic soft fracturing and fatigue fracturing<sup>[98]</sup>

冰岛 Seltjarnarnes 的液压井激发过程中也出了 3 次井眼坍塌<sup>[107]</sup>。

### 3.2.5 径向井压裂

针对干热岩造储过程中裂缝难控制、注采井难沟通的问题，学者提出了利用径向井辅助干热岩造储的新思路。即通过高压射流或柔性钻具等手段，在直井井筒内径向钻出辐射状分布的一个或多个微小孔眼（直径 20~50 mm、长度可达 100 m 以上），更多地沟通地层中的天然裂隙，增大单井与储层的接触面积<sup>[119]</sup>。在径向分支孔眼的基础上进一步实施水力压裂，一方面，可激活更多的天然裂隙，提升造储范围；另一方面，分支孔眼有助于导控人工裂缝扩展方向，能够辅助注采井连通，改善 EGS 系统的注入和采出能力。2014 年在立陶宛 Klaipėda 的 EGS 工程中实施了径向井技术，在一口注入井内钻出 12 个长为 40 m 的分支井眼，将同等压差下注入能力提高了 57%<sup>[120]</sup>。然而，径向井 EGS 系统中各分支井眼之间、孔眼与裂缝之间相互干扰，目前径向井压裂研究多集中于油气储层，未考虑高温条件下热应力的影响，热应力作用下径向井导控裂缝扩展机理有待揭示，分支井眼辅助干热岩造储参数优化及开发方案设计尚缺乏理论依据。

### 3.2.6 无水压裂

传统水力压裂存在耗水量巨大和环境污染等问题。在美国的 New York Canyon 地热项目由于当地水权超额认购，导致缺乏钻探和储层改造所需的水，项目被迫终止<sup>[121]</sup>。在法国的 Bouillante 项目中，由于缺乏清水，最终不得不使用缓垢剂处理过的海水进行储层激

发<sup>[122]</sup>。

针对这一问题，近年来学者提出了采用无水压裂方法进行干热岩储层改造的思路，如二氧化碳(CO<sub>2</sub>)压裂和液氮压裂等。相比于清水，液氮和二氧化碳具有低温特性，对干热岩的热激发作用更强。采用液氮和二氧化碳作为压裂液在地热储层改造中具有独特的技术与政策优势，应用前景广阔。目前以二氧化碳为压裂液，已形成了 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂、CO<sub>2</sub> 干法压裂、液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂、超临界 CO<sub>2</sub> 压裂等主流技术，研究二氧化碳造储与地质封存(CCUS)一体化技术契合国家的“双碳”目标导向。相比于常规压裂液，CO<sub>2</sub> 黏度低、穿透力强，可以更好地激活和沟通储层中的天然裂缝，提升压裂缝网的复杂度<sup>[123]</sup>。

液氮是一种来源广泛的低温流体(大气压下沸点达 -196 °C)，与干热岩温差巨大，可对岩石产生强烈的“冷冲击”作用，在干热岩储层热激发方面具有优势，能够降低干热岩起裂压力、激活天然裂缝、诱导主裂缝转向，形成水力裂缝—热应力裂缝—天然裂缝的复杂裂缝网络等<sup>[124]</sup>。液氮压裂于 1995 年首次提出，美国首次采用低温液氮对 4 口煤层气井和 1 口致密气井进行压裂，并取得了较好的增产效果<sup>[125]</sup>。基于此，学者提出了液氮压裂、液氮循环/脉动压裂、液氮喷射压裂等干热岩热储构建方法<sup>[126-127]</sup>，综合利用液氮超低温和气化增压等效应致裂干热岩，提升干热岩储层改造效果。学者前期针对干热岩液氮压裂的起裂规律、传热特征、裂缝形态和扩展机理等开展了研究<sup>[124, 128-129]</sup>，研究结果如图 9 所示，相较于传统水力

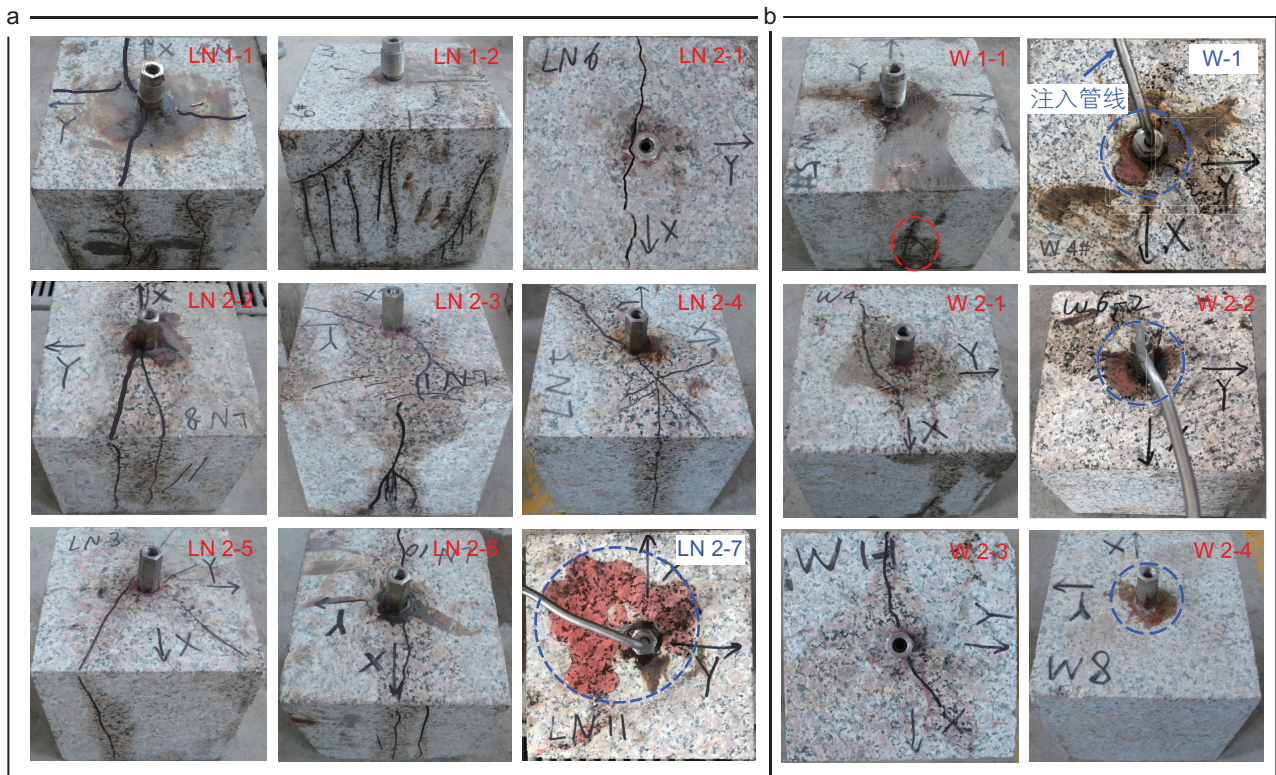


图9 干热岩液氮压裂和水力压裂裂缝形态对比<sup>[128]</sup>, (a) 液氮压裂; (b) 水力压裂

Fig. 9 Comparison in the fracture morphology between liquid nitrogen fracturing and hydraulic fracturing<sup>[128]</sup>, (a) Liquid nitrogen fracturing; (b) Hydraulic fracturing

压裂, 干热岩液氮压裂裂缝起裂压力降低 9%~44%, 压裂缝网的复杂度和连通性均大幅提升。

### 3.3 流动取热

高效取热、合理优化是深部地热经济高效开采的重要保证。干热岩开采涉及多场(温度、应力、位移/应变)、多相(气、液、固)、多过程(渗流、热传导、应力演化、水岩反应等)耦合, 气液运移、热传导和化学反应会影响干热岩热储变形和岩体强度特征, 取热过程受控于其在多场多过程耦合作用下跨尺度的物理/力学/化学机制, EGS取热面临以下 2 方面挑战:

(1) 多场耦合传热机制不清, 热储取热优化难、效率低。热储内工质高效取热是干热岩开发的根本目标。然而不同于油气储层, 地热开采伴随着剧烈的温度场扰动和水岩反应(矿物溶解/沉淀), 涉及热一流一固一化四场耦合(图 10), 多场耦合作用下地层渗流和热交换机制复杂, 为取热效率预测和优化带来挑战。

(2) 注采参数难匹配, 开采调控缺乏依据、寿命短。合理的开采制度是干热岩长效开发的重要保证。然而, 热储长期注采过程中多场时空演化规律复杂, 目前缺乏多目标优化设计方法, 导致注采参数难匹

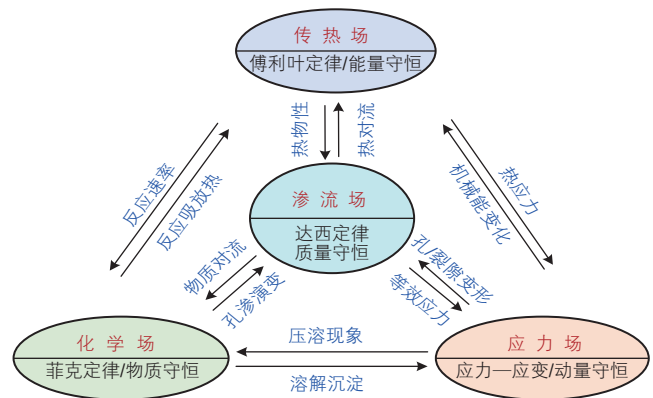


图 10 热储取热过程热一流一固一化四场耦合关系

Fig. 10 Thermo-hydro-mechanical-chemical coupling relationships in the heat extraction process of geothermal reservoirs

配, 开采过程容易形成“优势通道”, 如法国 Soultz 的 GPK-3 井中单条裂缝控制了 70% 的流量, 为热储长期均衡取热带来挑战。美国 Fenton Hill 的 EE-1 井和 GT-2 井在为期 75 天的注采试验中生产温度从 175 °C 下降到 85 °C<sup>[71]</sup>, 日本 Hijiori 也因开采过程中温度骤降, 出现热短路, 导致项目终止, 运行时间不足一



年<sup>[23,81]</sup>。

### 3.3.1 取热工质评价与优选

干热岩循环注采中取热工质的相态、成分将显著影响能量的传递过程,不合理的取热工质将降低EGS的利用效率,制约干热岩的高效开采<sup>[130-132]</sup>。因此如何优选循环工质、探讨工质的最佳适用条件,是EGS开发过程中热点话题。考虑到取热工质的便捷性、稳定性和换热性能等约束,目前的EGS工程一般选择地表水作为主要的换热工质。除此之外,学者还提出采用CO<sub>2</sub>作为干热岩系统的循环取热工质<sup>[133-134]</sup>。相比于水,二氧化碳具有较低的黏度和循环流阻,利于在低渗透储层中流动,有助于提升储层换热效果,同时实现二氧化碳埋存。然而,由于二氧化碳的热容较低,因此相同注入速率下,其换热能力也存在一定局限性<sup>[135]</sup>。除此之外,由于二氧化碳具有较大的膨胀性,会引发焦耳-汤姆逊效应<sup>[136-137]</sup>,进而导致生产井中的二氧化碳在返回地面过程中温度显著下降。Song等人<sup>[138]</sup>研究表明,二氧化碳的温度在生产井中降幅可以超过50℃,而水的温度降幅小于15℃。由此可见,水和二氧化碳作为EGS最主要的两种取热工质,应用中存在着各自的优缺点,而且对于不同的热储条件和开采方案,优缺点会有不同程度的放大或衰减,需要针对不同工质的适用条件进行科学的评价和优选。

### 3.3.2 多场耦合渗流传热机理

热储取热是温度场、渗流场、应力场、化学场相互耦合的复杂过程。注采过程中,地层原有的化学平衡和热平衡被打破,导致开采过程热储裂缝宽度和形态发生复杂的时空演变,从而对热储取热造成影响。裂缝开度和渗透率的演变机制主要体现在2方面:1)热储冷流体注入使原有温度场发生演变,在储层内诱发热应力,改变了缝周岩石原位应力状态,从而导致岩体和裂缝发生变形。2)长期注采过程中,取热工质在储层中与岩石矿物发生水岩反应,使矿物发生溶解或沉淀,从而改变了裂隙的填充度和导流能力。

围绕岩体冷却下裂缝尺寸和形态变化这一热一流一固(THM)耦合过程,学者从微观和宏观尺度探讨了裂缝的变形及其对渗流的影响机理<sup>[139-141]</sup>,发现流体注入后会诱发裂缝失稳,使得裂缝发生剪切激活,引发微地震。美国Geysers、意大利Larderello、法国Soulz等EGS示范工程都在注采过程中监测到了微震信号。在水岩反应方面,学者通过建立热一流一化(THC)耦合模型,分析了矿物溶解和沉淀作用对储层渗透率的影响机制。研究发现,矿物的溶解/沉淀速度与岩石类型、工质类型、注入温度和饱和度等因素有

关<sup>[101,142-144]</sup>。碳酸盐矿物与水的反应速率明显高于硅酸盐矿物,因此相比于火成岩热储,石灰岩热储水岩反应更为显著<sup>[145]</sup>。此外,水岩反应对井筒、设备和管线也具有影响,在日本的Hijiori,发生热突破后生产流体温度下降,管道中发生碳酸钙沉淀,形成了水垢<sup>[146]</sup>。德国汉诺威的Genesys开采试验中,由于取热工质采出到地表后发生冷却,形成了岩盐沉淀,造成管线堵塞,致使项目暂停<sup>[22]</sup>。尽管学者针对THM和THC耦合取热过程开展了一定的研究,但干热岩热储取热是THMC四场耦合过程,四场耦合渗流传热机理研究尚不完善,无法充分满足热储取热预测与优化的需求。

### 3.3.3 注采过程示踪与监测

干热岩造储后形成了多尺度裂缝网络,注采过程中缝网拓扑结构及物性发生复杂时空演化,如何对热储井间连通性及缝网演化动态进行有效监测,对于评价干热岩开发效果至关重要。示踪测试是目前干热岩注采井间连通性和缝网特征监测的常用方法。通过示踪剂突破曲线分析,可以获取井间连通状况,对井间基岩和裂缝网络进行表征<sup>[147-148]</sup>。国际上典型的EGS工程绝大多数都是通过示踪试验来研究缝网的流动换热性能,如法国的Soulz、美国的Desert Peak、澳大利亚的Habanero和德国的Groß Schönebeck等<sup>[149-153]</sup>。以运行最为成功的Soulz EGS场地为例,其示踪实验采用的示踪剂包括氯离子、苯酸钠、萘二磺酸、硝酸钠和荧光素钠等,示踪反演结果表明开采井与回灌井之间存在一个快速循环通道和一个慢速循环通道,通过示踪剂回收曲线评估其裂隙体积约为10 400 m<sup>3</sup><sup>[154]</sup>。

示踪试验需满足以下条件:一是采用至少2种示踪剂,二是示踪剂间的扩散性有足够大的差异,同时示踪剂需要具备背景值低、易于检测、环境友好和价格低廉等特点。然而,由于传统示踪剂本身的扩散性不易控制,在EGS复杂缝网和基质低渗的条件下,难以获得显著的穿透曲线峰值差和拖尾差,导致无法计算换热面积。截至目前,全球范围内已陆续开展了85次以上EGS场地示踪试验,结果表明有24次未能获得预期结果,尚存在缺少合适的示踪剂或示踪方案不合理等问题。

### 3.3.4 开发方案优化与地质建模

开发方案设计通过考虑地质和工程的双重约束,对布井模式、井距和注采参数等综合优化,均衡取热效率和开采寿命,从而实现干热岩地热能的科学开采与调控。对于井距和布井方案的设计,需综合考虑建井成本、取热效率和压裂控制体积等因素,一方面井距过小容易引起流体热突破,缩短热储寿命;另一方



面,如果井距过长,一旦超过压裂裂缝的有效控制长度,会导致注采井无法沟通。目前EGS试验中注采井井距一般集中在200~500 m之间,注采模式以“一注一采”和“一注两采”模式居多。合理的注采参数(工质类型、注入温度、排量等)是干热岩长效均衡开采的关键<sup>[155]</sup>。为实现热储的高效取热,通常期望取热工质以高温度和高流量采出,但是过快开采容易导致热储地层能量无法及时补充,打破热储开采的热平衡,造成热储温度降低,加剧热突破<sup>[156]</sup>。因此,需要针对干热岩热储地质特征,综合开展多目标优化,制定合理的注采制度,在保持较高取热效率的同时,最大程度延长取热周期和开采寿命。学者前期针对干热岩地热开采效率和寿命的影响因素开展了一定研究<sup>[157-159]</sup>,但尚未形成一种成熟的干热岩开发方案优化设计方法,其主要原因之一是缺乏精细刻画干热岩热储的地质建模方法。准确刻画干热岩地层和热储特征,是干热岩开采过程精确模拟和开发方案优化的前提。干热岩精细化地质建模不仅需要表征场地尺度的岩体空间信息,还需要精细刻画微细观尺度的裂缝特征和渗流传热规律,并客观反映原位地温、应力场及其在时间域的变化<sup>[160-161]</sup>。如何融合复杂地质结构体、钻完井与热储复杂裂缝网络等多源数据,构建“透明”干热岩地质模型,是制约干热岩开采过程模拟和方案优化的瓶颈之一。Fenton Hill、Rosemanowes、Nerberry和Jlokia等项目均出现过地质模型中应力或压力评估不准确等问题<sup>[63, 81, 162]</sup>,导致储层激发后裂缝未按照预定方向延伸,注入井和生产井未能有效连通、工质流失严重,造成项目暂缓或终止。

## 4 攻关思路与研究建议

### 4.1 总体攻关思路

形成上述挑战的客观原因是地层环境异常复杂,但其根本原因是干热岩开采基础理论缺乏,目前国内外尚无成熟经验可借鉴。针对干热岩开采中面临的建井、造储和取热3大挑战,建议以“岩体表征—钻建井—压裂造储—流动取热—集成调控”为主体思路,开展5个方面的基础理论攻关研究:首先,从岩体原位温压下的基础物理力学特性出发,获得干热岩力学本构关系和基本物性参数;以此为基础,紧扣干热岩EGS工程钻井、造储和取热3大关键技术环节,进一步揭示高温破岩、缝网压裂和渗流取热的关键机理,发展和完善干热岩钻井提速、立体造储和取热调控的

新方法,阐明人工热储多场(热—流—固—化)、多过程(渗流、热传导、变形、水岩反应等)耦合关联机制;最终融合岩体、钻井、造储和取热中的地质和工程数据,借助“透明”干热岩地质建模手段,构建地热开采强化与综合调控方法,与钻井、造储和取热3大核心环节形成互馈,为建立干热岩地热资源高效开发理论和方法奠定基础。

### 4.2 具体研究建议

#### (1) 岩体表征

获得岩体原位物理力学特性是干热岩EGS的工程基础。建议围绕高温储层岩体物理力学变化规律与表征方法,重点开展干热岩体精细表征、物理力学特性和动态损伤本构模型等方面研究,创新发展干热岩“力热声震流”原位物理力学特性表征技术,形成具有原创性的深部高温干热岩体力学理论,为EGS建井、造储和取热提供岩石力学理论基础。

#### (2) 钻井建井

安全高效成井是干热岩地热资源经济开采的前提条件。建议以“抗钻特性—破岩机理—清岩方法—固井工艺”为主线,开展高温高压下岩石可钻性评价、轴—扭耦合破岩机理、抗高温钻井液及井筒携岩规律、耐温/隔热水泥浆体系及水泥石强度防衰退方法研究,重点开展轴—扭耦合冲击破岩、异形齿个性化钻头高效破岩新方法探索,突破高温高压下岩石破碎动态力学响应机理,建立一套干热岩高效破岩和安全成井理论,为干热岩EGS提供安全优质的注采通道。

#### (3) 压裂造储

能否形成复杂缝网是衡量EGS成败的关键。以构建复杂立体缝网、降低诱发地震风险为目标,一方面大力发展柔性造储技术,研究温压复合交变下岩体柔性成缝机理,探索新型压裂介质(液氮、二氧化碳、化学刺激等)辅助致裂干热岩等新方法;另一方面,充分利用裂缝性干热岩储层特点,以激活和沟通天然裂缝为突破口,重点开展热应力影响下水力裂缝—天然裂缝相互作用行为和力学机制、天然裂缝剪切增渗机理等研究,形成裂缝性地层复杂缝网造储技术,突破干热岩复杂缝网造储理论与方法,实现立体缝网造储,为EGS开采提供高效换热空间。

#### (4) 流动取热

热储内高效取热是干热岩开发的根本目标。建议围绕复杂缝网内取热工质渗流与传热规律,开展取热工质优选(水和CO<sub>2</sub>等)、水—岩反应、THMC耦合渗流传热规律、磁性纳米颗粒示踪技术和采出流体PVT

特征研究,重点突破裂缝内工质渗流传热及相态演化机制,揭示热储内多场耦合换热机制,为取热调控提供理论基础。

#### (5)集成调控

取热调控是干热岩长效均衡开采的重要保证。建议围绕注采过程中热储多场时空演变规律与流动调控方法,开展干热岩三维精细化地质建模、热储缝网演化特征、四维层析成像技术和开发方案优化设计等研究,重点突破“透明”干热岩热储建模技术,形成开发方案优化设计和综合调控方法,保障资源长效稳定开采。

## 5 结束语

干热岩地热资源分布广、潜力大,是传统化石能源转型的新机遇,也是国家绿色低碳发展的潜在着力点之一。尽管国内外自上世纪70年代以来针对干热岩

EGS已经开展了数10项示范性探索,仅有法国Soulz地区成功实现了商业化运行,“可复制性”较低、难以大规模推广。因此,强化干热岩开采相关基础理论与应用技术研究,突破建井、造储和取热3大关键难题,是寻求干热岩经济高效开发的根本途径。首先,要以经济性为导向,针对干热岩钻井建井成本较高的问题,重点探索适用于干热岩地层的高效破岩和钻井提速方法,缩短钻井周期和成本;其次,以构建复杂缝网、降低诱发地震风险为核心,大力发展EGS柔性造储技术,根据裂缝性干热岩储层特点,以激活和沟通天然裂缝为突破口,形成裂缝性地层复杂缝网造储技术,突破干热岩复杂缝网造储理论与方法;最后,以资源利用和长效开发为目标,重点突破热储内热一流一固一化多场耦合换热机制,构建干热岩开发方案优化设计和调控方法,为干热岩地热经济高效开发奠定理论基础,推动国家能源转型和绿色低碳高质量发展。

## 参考文献

- [1] 庄贵阳.我国实现“双碳”目标面临的挑战及对策[J].人民论坛,2021(18):4. [ZHUANG G Y. The challenges and countermeasures of realizing “double carbon” in China[J]. People's Tribune, 2021(18):4.]
- [2] 高虎.“双碳”目标下中国能源转型路径思考[J].国际石油经济,2021(3):6. [GAO H. China's energy transformation under the targets of peaking carbon emissions and carbon neutral[J]. International Petroleum Economics, 2021(3):6.]
- [3] 汪集暘.能源环境危机下的地热能开发[J].中国学术期刊文摘,2012,30(04):3. [WANG J Y. Geothermal energy development under energy and environment crisis[J]. Science & Technology Review, 2012,30(04):3.]
- [4] 李德威,王焰新.干热岩地热能研究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):1858-69. [LI D W, WANG Y X. Major issues of research and development of hot dry rock geothermal energy[J]. Earth Science, 2015, 40(11):1858-69.]
- [5] 赵丰年.新形势下地热能行业发展规划基础及目标展望[J].当代石油石化,2020,28(06):10-15. [ZHAO F N. The foundation and prospect of geothermal energy planning under new situation[J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2020, 28(06):10-15.]
- [6] 国家能源局.地热能术语. NB/T 10097-2018[S]. CN-NB.[National Energy Administration. Terminology of geothermal energy. NB/T 10097-2018[S]]
- [7] 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[J].地学前缘,2020,27(1):134. [PANG Z H, LUO J, CHENG Y Z, et al. Evaluation of geological conditions for development of deep geothermal energy in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1) : 134.]
- [8] 王贵玲,张薇,梁继运,等.中国地热资源潜力评价[J].地球学报,2017,38(4):449-59.[WANG G L, ZHANG W, LIANG J Y, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(4):449-59.]
- [9] 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):807-11. [LIN W J, LIU Z M, MA F, et al. An estimation of HDR resources in China's mainland[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(5):807-11.]
- [10] 闫强,于汶加,王安建,等.全球地热资源述评[J].可再生能源,2009,27(6):69-73. [YAN Q, YU W J, WANG A J, et al. Review on the global geothermal resource[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(6):69-73.]
- [11] 汪集暘.地热学及其应用[M].科学出版社,2015. [WANG J Y. Geothermics and its applications[M]. Science Press, 2015]
- [12] JOLIE E, SCOTT S, FAULDS J, et al. Geological controls on geothermal resources for power generation[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2(5):324-39.
- [13] KONG Y, PAN S, REN Y, et al. Catalog of enhanced geothermal systems based on heat sources[J]. Acta Geologica Sinica - English Edition, 2021, 95(6):1882-91.
- [14] 张英,冯建赞,何治亮,等.地热系统类型划分与主控因素分析[J].地学前缘,2017;24(3):190-8. [ZHANG Y, FENG J Y, HE Z L, et al. Classification of geothermal systems and their formation key factors[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3):190-198.]

- [15] 周总瑛, 刘世良, 刘金侠. 中国地热资源特点与发展对策[J]. 自然资源学报, 2015;30(7):1210–21. [ZHOU Z Y, LIU S L, LIU J X. Study on the characteristics and development strategies of geothermal resources in China[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(7):1210–21.]
- [16] 张英, 冯建赞, 罗军, 等. 渤海湾盆地中南部干热岩选区方向[J]. 地学前缘, 2020, 27(1):35–47. [ZHANG Y, FENG J Y, LUO J, et al. Screening of hot dry rock in the south-central part of the Bohai Bay Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1):35–47.]
- [17] 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):16. [LIN W J, WANG G L, SHAO J L, et al. Distribution and exploration of hot dry rock resources in China: Progress and inspiration[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(5):16.]
- [18] LU C, LIN W, GAN H, LIU F, Wang G. Occurrence types and genesis models of hot dry rock resources in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(19):1–19.
- [19] 赵平, 金建, 张海政, 等. 西藏羊八井地热田热水的化学组成[J]. 地质科学, 1998, 33(1):61–72. [ZHAO P, JIN J, ZHANG H Z, et al. Chemical composition of thermal water in the yangbajing geothermal field, Tibet[J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 1998, 33(1):61–72.]
- [20] 张建英. 增强型地热系统(EGS)资源开发利用研究[J]. 中国能源, 2011, 33(1):29–32. [ZHANG J Y. Research on exploitation and utilization of enhanced geothermal system (EGS) resources[J]. Energy of China, 2011, 33(1):29–32.]
- [21] 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):42–5. [XU T F, ZHANG Y J, ZENG Z F, et al. Technology progress in an enhanced geothermal system (hot dry rock) [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32):42–5.]
- [22] BREEDE K, DZEBISASHVILI K, LIU X, et al. A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: Past, present and future[J]. Geothermal Energy, 2013, 1(1):4.
- [23] 许天福, 袁益龙, 姜振蛟, 等. 干热岩资源和增强型地热工程: 国际经验和我国展望[J]. 2016, 46(04):1139–1152. [XU T F, YUAN Y L, JIANG Z J, et al. Hot dry rock and enhanced geothermal engineering: International experience and China prospect[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(04):1139–1152.]
- [24] RYBACH L. Status and prospects of geothermal energy[C]. Proceedings World Geothermal Congress, 2010:1–5.
- [25] 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[J]. 地质学报, 2018, 92(9):1936–47. [XU T F, HU Z X, LI S T, et al. Enhanced geothermal system: International progresses and research status of China[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(9):1936–47.]
- [26] POLLACK A, HORNE RN, MUKERJI T. What are the challenges in developing enhanced geothermal systems (EGS)? Observations from 64 EGS sites[J]. 2020.
- [27] OLASOLO P, JUÁREZ M, MORALES M, et al. Enhanced geothermal systems(EGS): A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 56:133–44.
- [28] HUENGES E. Enhanced geothermal systems: Review and status of research and development[J]. Geothermal Power Generation, 2016, 743–61.
- [29] HEIDINGER P. Integral modeling and financial impact of the geothermal situation and power plant at Soultz-sous-Forêts[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2010, 342(7–8):626–35.
- [30] 翟海珍, 苏正, 吴能友. 苏尔土增强型地热系统的开发经验及对我国地热开发的启示[J]. 新能源进展, 2014, 2(4):286–94. [ZHAI H Z, SU Z, WU N Y. Development experiences of the soultz enhanced geothermal systems and inspirations for geothermal development of China[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2014, 2(4):286–94.]
- [31] MOORE J, MCLENNAN J, ALLIS R, et al. The Utah frontier observatory for geothermal research (FORGE): results of recent drilling and geoscientific surveys[C]. Geothermal Resources Council 42nd Annual Meeting-Geothermal Energy, GRC. 2018.
- [32] MOORE J, MCLENNAN J, PANKOW K, et al. The Utah frontier observatory for research in geothermal energy (FORGE): A laboratory for characterizing, creating, and sustaining enhanced geothermal systems[C]. Proceedings of the 45th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University. 2020.
- [33] ELDERS W, FRIDLEIFSSON G, ALBERTSSON A. Drilling into magma and the implications of the Iceland Deep Drilling Project (IDDP) for high-temperature geothermal systems worldwide[J]. Geothermics, 2014, 49:111–8.
- [34] 刘伟莉, 马庆涛, 付怀刚. 干热岩地热开发钻井技术难点与对策[J]. 石油机械, 2015, 43(8):11–5. [LIU W L, MA Q T, FU H G. Drilling difficulties and solutions for hot dry rock geothermal development[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(8):11–5.]
- [35] 张伟. 高温岩体热能开发及钻进技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(10):219–24. [ZHANG W. Extraction of high temperature rock mass heat energy and related drilling technologies[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(10):219–24.]
- [36] 曾义金. 干热岩热能开发技术进展与思考[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(2):1–7. [ZENG Y J. Technical progress and thinking for development of hot dry rock(HDR) Geothermal Resources[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(2):1–7.]



- [37] 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.
- [38] PÁLSSON B, HÓLMGEIRSSON S, GUÐMUNDSSON Á, et al. Drilling of the well IDDP-1[J]. *Geothermics*, 2014, 49:23–30.
- [39] 刘畅, 冉恒谦, 许洁. 干热岩耐高温钻井液的研究进展与发展趋势[J]. *钻探工程*, 2021, (2):8–15. [LIU C, RAN H Q, XU J. Research progress and development trend of high temperature drilling fluid in hot dry rock[J]. *Drilling Engineering*, 2021, (2):8–15.]
- [40] 单文军, 陶士先, 蒋睿, 等. 干热岩用耐高温钻井液关键技术及进展[J]. *探矿工程 (岩土钻掘工程)*, 2018, 45(10):52–6. [SHAN W J, TAO S X, JIANG R, et al. Key technology and progress in high temperature resistant drilling fluid for hot dry rock[J]. *Drilling Engineering*, 2018, 45(10):52–6.]
- [41] 鲁立强, 单正明, 邓发兵, 等. 肯尼亚 OLKARIA 地热井空气泡沫流体定向钻井综合技术研究[J]. *科学技术与工程*, 2009, 9(4). [LU L Q, SHAN Z M, DENG F B, et al. Study on geothermal well directional drilling with air foam in Kenya OLKARIA[J]. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9(4).]
- [42] 赖晓晴, 楼一珊, 屈沅沅, 等. 超高温地热井泡沫钻井流体技术[J]. *钻井液与完井液*, 2009, 26(2):37–38. [LAI X Q, LOU Y S, QU Y Z, et al. Drilling fluid technology for ultra-high temperature geothermal wells[J]. *DJCF*, 2009, 26(2):37–38] [43] 李图. 肯尼亚地热井固井水泥浆体系研究[D]. 东北石油大学, 2018. [LI T. Research on the cementing slurry system in Kenya's geothermal wells[D]. Northeast Petroleum University, 2018.]
- [44] 张丰琰, 李立鑫. 地热井固井水泥石传热性能研究现状及展望[J]. *钻探工程*, 2021, 48(12):11. [ZHANG F Y, LI L X. Research status and prospect of thermal transfer performance of cement in geothermal wells[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(12):11.]
- [45] 潘军, 王敏生, 光新军. PDC 钻头新进展及发展思考[J]. *石油机械*, 2016, 44(11):9. [PAN J, WANG M S, GUANG X J. New progress and future development of PDC bit[J]. *China Petroleum Machinery*, 2016, 44(11):9.]
- [46] 思娜, 叶海超, 牛新明, 等. 油气钻井技术在干热岩开发中的适应性分析[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(4):6. [SI N, YE H C, NIU X P, et al. Analysis on the adaptability of oil and gas drilling technologies in development for hot dry rocks [J], *Petroleum Drilling Techniques* 2019, 47(4):6.]
- [47] 王红波, 刘娇鹏, 鲁鹏飞, 等. PDC 钻头发展与应用概况[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2011, (4):74–8. [WANG H B, LIU J P, LU P F, et al. General situations of development and application of PDC bits[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2011, (4):74–8.]
- [48] 孙源秀. 锥形PDC齿破岩机理研究与新型钻头研制[D]. 中国石油大学(华东); 2016. [SUN Y X. Research on rock breaking mechanism of stinger cutters and new bits development[D]. China University of Petroleum(East China), 2016.]
- [49] 邹德永, 潘龙, 崔煜东, 等. 斧形PDC切削齿破岩机理及试验研究[J]. *石油机械*, 2022, 50(1):7. [ZOU D Y, PAN L, CUI Y D, et al. Rock breaking mechanism and experimental study of axe-shaped PDC cutter[J]. *China Petroleum Machinery*, 2022, 50(1):7.]
- [50] 魏秀艳, 赫文豪, 史怀忠, 等. 三轴应力下三棱形PDC齿破岩特性数值模拟研究[J]. *石油机械*, 2021, 49(9):8. [WEI X Y, HE W H, SHI H Z, et al. Numerical simulation study on rock breaking characteristics of prismatic PDC cutter under triaxial stress[J]. *China Petroleum Machinery*, 2021, 49(9):8.]
- [51] DAI X W, HUANG Z W, SHI H Z, et al. Experimental investigation on the PDC cutter penetration efficiency in high-temperature granite[J]. *Geothermics*, 2022, 98:102281.
- [52] XIONG C, HUANG Z W, SHI H W, et al. Experimental investigation into mixed tool cutting of granite with stinger PDC cutters and conventional PDC cutters[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021:1–23.
- [53] 何淼, 龚武镇, 许明标, 等. 干热岩开发技术研究现状与展望分析[J]. *可再生能源*, 2021, 39(11):1447–1454. [HE M, GONG W Z, XU M B, et al. Research status and prospect analysis of hot dry rock development technology[J]. *Renewable Energy Resources*, 2021, 39(11):1447–1454.]
- [54] 贾军, 张德龙, 翁炜, 等. 干热岩钻探关键技术及进展[J]. *科技导报*, 2015, 33(19):40–4. [JIA J, ZHANG D L, WENG W et al. Key technology and development of hot dry rock drilling[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(19):40–4.]
- [55] 穆总结, 李根生, 黄中伟, 等. 轴扭耦合冲击钻井技术研究[J]. *石油机械*, 2018,46(10):12–17. [MU Z J, LI G S, HUANG Z W, et al. Research on axial-torsional coupling percussion drilling technology[J]. *China Petroleum Machinery*, 2018,46(10):12–17.]
- [56] 查春青, 柳贡慧, 李军, 等. 复合冲击破岩钻井新技术提速机理研究[J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(2):20–4. [ZHA Q C, LIU G H, et al. The rock breaking mechanism of the compound percussive rotary drilling method with a PDC bit[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(2):20–4.]
- [57] 张所邦, 宋鸿, 陈兵, 等. 中国干热岩开发与钻井关键技术[J]. *资源环境与工程*, 2017, 31(2):202–7. [ZHANG S B, SONG H, CHEN B, et al. The development and key drilling technology of hot dry rock in China [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2017, 31(2):202–7.]
- [58] 赵福森, 张凯. 青海贵德ZR1 干热岩井钻进工艺研究. *探矿工程 (岩土钻掘工程)*[J], 2016, 43(2):18–23. [ZHAO F S, ZHANG K. Research on hot dry rock well drilling technology[J], *Drilling Engineering*, 2016, 43(2):18–23.]
- [59] ZIAGOS J, PHILLIPS BR, BOYD L, et al. A technology roadmap for strategic development of enhanced geothermal systems[C]. *Proceedings of the 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, CA. Citeseer, 2013:11–3.

- [60] 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):93-8. [ZHOU Z, JIN Y, LU Y H, et al. Present challenge and prospects of drilling and hydraulic fracturing technology for hot dry rock geothermal reservoir (in Chinese) [J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 124621] [61] 刘会斌, 李建华, 庞合善, 等. 青海共和盆地干热岩GR1井超高温固井水泥浆技术[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(2):202-8. [LIU H B, LI J H, PANG H S, et al. Ultra-high temperature cement slurry for cementing well GR1 penetrating hot dry rock formations in Gonghe Basin, Qinghai [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(2):202-8.]
- [62] 黄范勇, 张丽, 段云星. 干热岩地热井固井技术研究综述[J]. 西部探矿工程, 2016, 28(4):90-2. [HUANG F Y, ZHANG L, DUAN X Y. Review on cementing technology of geothermal well in dry hot rock[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2016, 28(4):90-2.]
- [63] CLADOUHOS TT, PETTY S, SWYER MW, et al. Results from Newberry volcano EGS demonstration[C]. *Proceedings*, 2015.
- [64] FRÍGLEIFSSON GÓ, ALBERTSSON A, STEFÁNSSON A, et al. The reykjanes deeppegs demonstration Well-IDDP-2[J]. 2019.
- [65] 冯竟竟, 傅宇方, 陈忠辉, 等. 高温对水泥基材料微观结构的影响[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3):318-22. [FENG J J, FU Y F, CHEN Z H, et al. Effect of high temperatures on microstructure of cementbased composite material[J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(3):318-22.]
- [66] POON C-S, AZHAR S, ANSON M, et al. Comparison of the strength and durability performance of normal-and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures[J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(9):1291-300.
- [67] 李全双, 王治国, 邹书强. 适用于干热岩固井抗高温高强度水泥浆体系研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020,40(10):164-167+169. [LI Q S, WANG Z G, ZOU S Q. The study of high temperature and high strength cement slurry system in hot dry rock cementing[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2020,40(10):164-167+169.]
- [68] ALLAHVIRDIZADEH P. A review on geothermal wells: Well integrity issues[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 275:124009.
- [69] 郑睿, 宋先知, 李瑞霞, 等. 地热井导热水泥导热系数影响因素研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5):6. [ZHENG R, SONG X Z, LI R X, et al. Study on factors affecting thermal conductivity of thermal conductive cement in geothermal well[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(5):6.]
- [70] GRIGOLI F, CESCO S, RINALDI AP, et al. The November 2017 M w 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea[J]. *Science*, 2018, 360(6392):1003-6.
- [71] BROWN DW, DUCHANE DV, HEIKEN G, et al. Mining the earth's heat: hot dry rock geothermal energy[J]. *Springer Science & Business Media*, 2012.
- [72] 苏正, 吴能友, 曾玉超, 等. 增强型地热系统研究开发:以美国新墨西哥州芬登山为例[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(2):771-9. [SU Z, WU N Y, ZENG Y C, et al. Research and development of enhanced geothermal system: a case of Fenton hill in New Mexico(USA)[J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(2):771-9.]
- [73] TESTER JW, ANDERSON BJ, BATCHELOR AS, et al. Impact of enhanced geothermal systems on US energy supply in the twenty-first century[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2007, 365(1853):1057-94.
- [74] 张伟, 曲占庆, 郭天魁, 等. 热应力影响下干热岩水压致裂数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(5):2001-8. [ZHANG W, QU Z Q, GUO T K, et al. Numerical simulation of hydraulic fracturing in hot dry rocks under the influence of thermal stress[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(5):2001-8.]
- [75] 唐世斌, 唐春安, 朱万成, 等. 热应力作用下的岩石破裂过程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10):2071-8. [TANG S B, TANG C A, ZHU W C, et al. Numerical investigation on rock failure process induced by thermal stress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(10):2071-8.]
- [76] MCCLURE MW, HORNE RN. An investigation of stimulation mechanisms in enhanced geothermal systems[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 72:242-60.
- [77] HUANG B, LIU J. Experimental investigation of the effect of bedding planes on hydraulic fracturing under true triaxial stress[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(10):2627-43.
- [78] DEHGHAN AN, GOSHTASBI K, AHANGARI K, et al. The effect of natural fracture dip and strike on hydraulic fracture propagation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 100(75):210-5.
- [79] ZHOU J, CHEN M, JIN Y, et al. Analysis of fracture propagation behavior and fracture geometry using a tri-axial fracturing system in naturally fractured reservoirs[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(7):1143-52.
- [80] WAN L, CHEN M, HOU B, et al. Experimental investigation of the effect of natural fracture size on hydraulic fracture propagation in 3D[J]. *Journal of Structural Geology*, 2018;116:1-11.
- [81] TESTER J, ANDERSON B, BATCHELOR A, et al. The future of geothermal energy[J]. *Massachusetts Institute of Technology*. 2006.
- [82] WALLROTH T, ELIASSON T, SUNDQUIST U. Hot dry rock research experiments at Fjällbacka, Sweden[J]. *Geothermics*, 1999, 28(4-5):617-25.
- [83] STOBER I. Depth-and pressure-dependent permeability in the upper continental crust: data from the Urach 3 geothermal borehole,

- southwest Germany[J]. *Hydrogeology Journal*, 2011, 19(3):685–99.
- [84] NIITSUMA H. Fracture mechanics design and development of HDR reservoirs—concept and results of the  $\Gamma$ -Project, Tohoku University, Japan[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1989:169–75.
- [85] ENTINGH DJ. Geothermal well stimulation experiments in the United States[J]. *Proceedings*, 2000:3689–94.
- [86] BIJAY K, GHAZANFARI E. Geothermal reservoir stimulation through hydro-shearing: An experimental study under conditions close to enhanced geothermal systems[J]. *Geothermics*, 2021, 96:102200.
- [87] LU SM. A global review of enhanced geothermal system (EGS) [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 81.
- [88] GENTER A, EVANS K, CUENOT N, et al. Contribution of the exploration of deep crystalline fractured reservoir of Soultz to the knowledge of enhanced geothermal systems (EGS) [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2010, 342(7–8):502–16.
- [89] HAMPTON J, MATZAR L, HU D, et al. Fracture dimension investigation of laboratory hydraulic fracture interaction with natural discontinuity using acoustic emission[C]. 49th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. OnePetro, 2015.
- [90] CHEN Y, ZHANG C, ZHAO Z, et al. Shear behavior of artificial and natural granite fractures after heating and water-cooling treatment[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(12):5429–49.
- [91] 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):12. [GUO J C, XIAO Y, JIANG S, et al. Understanding and practice of hydraulic shearing in deep hot dry rocks[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(5):12.]
- [92] 徐志鹏. 干热岩压裂裂缝剪切滑移特性研究[D]. 中国石油大学(北京), 2020. [XU Z P. Shear-slip characteristics of the hot dry rock fracture[D]. China University of Petroleum(Beijing), 2020.]
- [93] ZHUANG L, ZANG A. Laboratory hydraulic fracturing experiments on crystalline rock for geothermal purposes[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 216:103580.
- [94] HOFMANN H, ZIMMERMANN G, ZANG A, et al. Cyclic soft stimulation (CSS): a new fluid injection protocol and traffic light system to mitigate seismic risks of hydraulic stimulation treatments[J]. *Geothermal Energy*, 2018, 6(1):1–33.
- [95] ZHUANG L, KIM KY, JUNG SG, et al. Cyclic hydraulic fracturing of pocheon granite cores and its impact on breakdown pressure, acoustic emission amplitudes and injectivity[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 122:104065.
- [96] ZANG A, YOON JS, STEPHANSSON O, et al. Fatigue hydraulic fracturing by cyclic reservoir treatment enhances permeability and reduces induced seismicity[J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 195(2):1282–7.
- [97] ZANG A, STEPHANSSON O, STENBERG L, et al. Hydraulic fracture monitoring in hard rock at 410 m depth with an advanced fluid-injection protocol and extensive sensor array[J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 208(2):790–813.
- [98] ZHUANG L, JUNG SG, DIAZ M, et al. Laboratory true triaxial hydraulic fracturing of granite under six fluid injection schemes and grain-scale fracture observations[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(10):4329–44.
- [99] 郭剑, 陈继良, 曹文昊, 等. 增强型地热系统研究综述[J]. *电力建设*, 2014,35(04):10–24. [GUO J, CHEN J L, CAO W J, et al. Research review on enhanced geothermal system[J]. *Electric Power Construction*, 2014,35(04):10–24.]
- [100] PORTIER S, ANDRÉ L, VUATAZ F-D. Review on chemical stimulation techniques in oil industry and applications to geothermal systems[J]. *Engine*, 2007,4:32.
- [101] BÄCHLER D, KOHL T. Coupled thermal–hydraulic–chemical modelling of enhanced geothermal systems[J]. *Geophysical Journal International*, 2005,161(2):533–48.
- [102] ROSE P. Chemical stimulation of engineered geothermal systems[D]. Energy and Geoscience Institute at the University of Utah, 2008.
- [103] 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):70–7.
- [104] ZIMMERMANN G, BLÖCHER G, REINICKE A, et al. Rock specific hydraulic fracturing and matrix acidizing to enhance a geothermal system—concepts and field results[J]. *Tectonophysics*, 2011,503(1–2):146–54.
- [105] BUNING B, MALATE R, LACANILAO A, et al. Recent experiments in acid stimulation technology by PNOC-Energy development corporation, Philippines[C]. *Proc. World Geothermal Congress*, 1995:1807–12.
- [106] CHABORA E, ZEMACH E, SPIELMAN P, et al. Hydraulic stimulation of well 27–15, Desert Peak geothermal field, Nevada, USA[J]. *Proceedings of Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, 2012.
- [107] TULINIUS H, AXELSSON G, TOMASSON J, et al. Stimulation of well SN–12 in the Seltjarnarnes low-temperature field in SW-Iceland[J]. *National Energy Authority, Grensasvegur, Reykjavik, IS*, 1996.
- [108] 郭清海, 何瞳, 庄亚芹, 等. 化学刺激法提高花岗岩类岩石裂隙渗透性的实验研究[J]. *地学前缘*, 2020, 27(1):159. [GUO Q H, HE T, ZHUANG Y Q, et al. Expansion of fracture network in granites via chemical stimulation: a laboratory study[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(1):159.]
- [109] 庄亚芹. 实施增强型地热系统(EGS)的化学刺激实验研究[D]. 中国地质大学; 2017. [ZHUANG Y Q. Study on the chemical stimulation techniques for enhanced geothermal systems(EGS) [D]. China University of Geosciences, 2017]
- [110] 那金, 许天福, 吴永东, 等. 增强型地热系统(EGS)土酸化学刺激剂对热储层的改造. [J] *中南大学学报: 自然科学版*, 2017,



- 48(1):247–54. [NA J, XU T F, WU Y D, et al. Effectiveness of using mud acid as stimulation agent for enhanced geothermal systems (EGS) reservoir[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2017, 48(1):247–54.]
- [111] WATANABE N, TAKAHASHI K, TAKAHASHI R, et al. Novel chemical stimulation for geothermal reservoirs by chelating agent driven selective mineral dissolution in fractured rocks[J]. *Scientific Reports*, 2021,11(1):1–11.
- [112] NA J, XU T, JIANG Z, et al. A study on the interaction of mud acid with rock for chemical stimulation in an enhanced geothermal system[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016,75(12):1–13.
- [113] 那金, 冯波, 兰乘宇, 等. CO<sub>2</sub> 化学刺激剂对增强地热系统热储层的改造作用[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2014, 45(7):2447–58. [NA J, FENG B, LAN C Y, et al. Effectiveness of using supercritical CO<sub>2</sub> as stimulation agent for enhanced geothermal systems[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2014, 45(7):2447–58.]
- [114] ROSE PE, XU T, FAYER S, et al. Chemical stimulation for EGS: the use of chelating agents at high pH for the simultaneous dissolution of Calcium Carbonate, Silicas, and Silicates[C]. *Proceedings World Geothermal Congress*.2010.
- [115] PANDEY S, VISHAL V, CHAUDHURI A. Geothermal reservoir modeling in a coupled thermo-hydro-mechanical-chemical approach: A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185:1157–69.
- [116] XU H, CHENG J, ZHAO Z, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical modeling on acid fracturing in carbonatite geothermal reservoirs containing a heterogeneous fracture[J]. *Renewable Energy*, 2021,172:145–57.
- [117] TARON J, ELSWORTH D. Thermal–hydrologic–mechanical–chemical processes in the evolution of engineered geothermal reservoirs[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009,46(5):855–64.
- [118] RAWAL C, GHASSEMI A. A reactive thermo-poroelastic analysis of water injection into an enhanced geothermal reservoir[J]. *Geothermics*, 2014,50:10–23.
- [119] 黄中伟, 李根生, 唐志军, 等. 水力喷射侧钻径向微小井眼技术[J]. *石油钻探技术*, 2013, 41(4):37–41. [HUANG Z W, LI G S, TANG Z J, et al. Technology of Hydra-jet sidetracking of horizontal micro-radial laterals[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2013, 41(4):37–41.]
- [120] NAIR R, PETERS E, ŠLIAUPA S, et al. A case study of radial jetting technology for enhancing geothermal energy systems at Klaipeda geothermal demonstration plant[C]. *42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, CA, Feb. 2017:13–5.*
- [121] RAEMY B. *New York Canyon Stimulation*[J]. TGP Development Company, LLC, 2012.
- [122] CORREIA H, SIGURDSSON O, SANJUAN B, et al. Stimulation test of a high-enthalpy geothermal well by cold water injection[C]. *Geothermal Resources Council*, 2000:129–36.
- [123] 王海柱, 沈忠厚, 李根生. 超临界CO<sub>2</sub> 开发页岩气技术[J]. *石油钻探技术*, 2011, 39(3):30–5. [WANG H Z, SHEN Z H, LI G S. Feasibility analysis on shale gas exploitation with supercritical CO<sub>2</sub>[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(3):30–5.]
- [124] 黄中伟, 武晓光, 谢紫霄, 等. 液氮射流破岩及压裂研究进展[J]. *中国科学基金*, 2021, 35(6):12. [HUANG Z W, WU X G, XIE Z X, et al. Theory an research progress of liquid nitrogen fracturing and rock breaking[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2021, 35(6):12.]
- [125] MCDANIEL BW, GRUNDMANN SR, KENDRICK WD, et al. Field applications of cryogenic nitrogen as a hydraulic fracturing fluid[J]. *Society of Petroleum Engineers*, 1997.
- [126] 黄中伟, 武晓光, 李冉, 等. 高压液氮射流提高深井钻速机理[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(4):768–75. [HUANG Z W, WU X G, LI R, et al. Mechanism of drilling rate improvement using high-pressure liquid nitrogen jet[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(4):768–75.]
- [127] 黄中伟, 武晓光, 邹文超, 等. 非常规储层液氮低温致裂理论及研究进展[J]. *西南石油大学学报 (自然科学版)*, 2021, 43(5):155. [HUANG Z W, WU X G, ZOU W C, et al. Theory and research progress of cryogenic cracking with liquid nitrogen in unconventional reservoirs[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2021, 43(5):155.]
- [128] YANG R Y, HONG C Y, LIU W, et al. Non-contaminating cryogenic fluid access to high-temperature resources: Liquid nitrogen fracturing in a lab-scale enhanced geothermal system[J]. *Renewable Energy*, 2021,165:125–38.
- [129] ALQATAHNI NB, CHA M, YAO B, et al. Experimental investigation of cryogenic fracturing of rock specimens under true triaxial confining stresses[J]. *Society of Petroleum Engineers*, 2016.
- [130] 宇波, 李庭宇, 韩东旭, 等. 干热岩流动换热多尺度有限容积法[J]. *天然气工业*, 2021, 41(3). [YU B, LI T Y, HAN D X, et al. Multi-scale finite volume method for the flow and heat transfer process in hot dry rocks[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(3).]
- [131] ALIYU MD, ARCHER RA. A thermo-hydro-mechanical model of a hot dry rock geothermal reservoir[J]. *Renewable Energy*, 2021,176:475–93.
- [132] CHEN Y, ZHAO Z, PENG H. Convective heat transfer of water flow in intersected rock fractures for enhanced geothermal extraction[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022,14(1):108–22.
- [133] XU R, ZHANG L, ZHANG F, et al. A review on heat transfer and energy conversion in the enhanced geothermal systems with water/

- CO<sub>2</sub> as working fluid[J]. *International Journal of Energy Research*, 2015, 39(13):1722–41.
- [134] WU Y, LI P. The potential of coupled carbon storage and geothermal extraction in a CO<sub>2</sub>-enhanced geothermal system: a review[J]. *Geothermal Energy*, 2020, 8(1):1–28.
- [135] WANG C-L, CHENG W-L, NIAN Y-L, et al. Simulation of heat extraction from CO<sub>2</sub>-based enhanced geothermal systems considering CO<sub>2</sub> sequestration[J]. *Energy*, 2018, 142:157–67.
- [136] SHI Y, SONG X, WANG G, et al. Study on wellbore fluid flow and heat transfer of a multilateral-well CO<sub>2</sub> enhanced geothermal system[J]. *Applied Energy*, 2019, 249:14–27.
- [137] HU Z, XU T, FENG B, et al. Thermal and fluid processes in a closed-loop geothermal system using CO<sub>2</sub> as a working fluid[J]. *Renewable Energy*, 2020, 154:351–67.
- [138] SONG W, WANG C, DU Y, et al. Comparative analysis on the heat transfer efficiency of supercritical CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O in the production well of enhanced geothermal system[J]. *Energy*, 2020, 205:118071.
- [139] GHASSEMI A, KUMAR GS. Changes in fracture aperture and fluid pressure due to thermal stress and silica dissolution/precipitation induced by heat extraction from subsurface rocks[J]. *Geothermics*, 2007, 36(2):115–40.
- [140] PENG H, ZHAO Z, CHEN W, et al. Thermal effect on permeability in a single granite fracture: experiment and theoretical model[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 131:104358.
- [141] SUN Z-X, ZHANG X, XU Y, et al. Numerical simulation of the heat extraction in EGS with thermal-hydraulic-mechanical coupling method based on discrete fractures model[J]. *Energy*, 2017, 120:20–33.
- [142] ALT-EPPING P, DIAMOND LW, HÄRING M, et al. Prediction of water-rock interaction and porosity evolution in a granitoid-hosted enhanced geothermal system, using constraints from the 5 km Basel-1 well[J]. *Applied geochemistry*, 2013, 38:121–33.
- [143] PANDEY S, CHAUDHURI A, KELKAR S, et al. Investigation of permeability alteration of fractured limestone reservoir due to geothermal heat extraction using three-dimensional thermo-hydro-chemical (THC) model[J]. *Geothermics*, 2014, 51:46–62.
- [144] FRITZ B, JACQUOT E, JACQUEMONT B, et al. Geochemical modelling of fluid-rock interactions in the context of the Soultz-sous-Forêts geothermal system[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2010, 342(7–8):653–67.
- [145] 林鹏威, 曾平, 林署炯, 等. 增强型地热系统热储层研究进展[J]. *中外能源*, 2015, (10):21–30. [LIN P W, ZENG P, LIN S J, et al. Advances in research on reservoirs of enhanced geothermal system[J]. *Sino-Global Energy*, 2015, (10):21–30.]
- [146] YANAGISAWA N. Case study of calcium carbonate scale at EGS and hot spring binary system[C]. *Proceedings of the World Geothermal Congress*. 2015:1–5.
- [147] ROUBINET D, DE DREUZY J-R, TARTAKOVSKY DM. Particle-tracking simulations of anomalous transport in hierarchically fractured rocks[J]. *Computers & Geosciences*, 2013, 50:52–8.
- [148] HADDAD AS, HASSANZADEH H, ABEDI J, et al. Application of tracer injection tests to characterize rock matrix block size distribution and dispersivity in fractured aquifers. [J] *Journal of Hydrology*, 2014, 510:504–12.
- [149] SANJUAN B, PINAULT J-L, ROSE P, et al. Tracer testing of the geothermal heat exchanger at Soultz-sous-Forêts (France) between 2000 and 2005[J]. *Geothermics*, 2006, 35(5–6):622–53.
- [150] ROSE P, LEECASTER K, DRAKOS P, et al. Tracer testing at the Desert Peak EGS project[J]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 2009, 33:241–4.
- [151] RADILLA G, SAUSSE J, SANJUAN B, et al. Interpreting tracer tests in the enhanced geothermal system (EGS) of Soultz-sous-Forêts using the equivalent stratified medium approach[J]. *Geothermics*, 2012, 44:43–51.
- [152] AYLING BF, HOGARTH RA, ROSE PE. Tracer testing at the Habanero EGS site, central Australia[J]. *Geothermics*, 2016, 63:15–26.
- [153] GHERGUT J, BEHRENS H, SAUTER M. Petrothermal and aquifer-based EGS in the Northern-German Sedimentary Basin, investigated by conservative tracers during single-well injection-flowback and production tests[J]. *Geothermics*, 2016, 63:225–41.
- [154] SANJUAN B, BRACH M, GENTER A, et al. Tracer testing of the EGS site at Soultz-sous-Forêts (Alsace, France) between 2005 and 2013[C]. *Proceedings World Geothermal Congress*. 2015.
- [155] WU B, ZHANG X, JEFFREY RG, et al. A simplified model for heat extraction by circulating fluid through a closed-loop multiple-fracture enhanced geothermal system[J]. *Applied energy*, 2016, 183:1664–81.
- [156] ASAI P, PANJA P, MCLENNAN JM. Effect of different flow schemes on heat recovery from Enhanced Geothermal Systems (EGS) [J]. *Energy*, 2019, 175:667–76.
- [157] SONG G, SONG X, LI G, et al. An integrated multi-objective optimization method to improve the performance of multilateral-well geothermal system[J]. *Renewable Energy*, 2021, 172:1233–49.
- [158] MARTÍNEZ-GOMEZ J, PEÑA-LAMAS J, MARTÍN M, et al. A multi-objective optimization approach for the selection of working fluids of geothermal facilities: economic, environmental and social aspects[J]. *Journal of environmental management*, 2017, 203:962–72.
- [159] ALIRAHMI SM, DABBAGH SR, AHMADI P, et al. Multi-objective design optimization of a multi-generation energy system based on

- geothermal and solar energy[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205:112426.
- [160] ZHANG C, HU S, ZHANG S, et al. Radiogenic heat production variations in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau: implications for the origin of high-temperature geothermal resources[J]. *Renewable Energy*, 2020, 148:284–97.
- [161] SILER DL, FAULDS JE, HINZ NH, et al. Three-dimensional geologic mapping to assess geothermal potential: examples from Nevada and Oregon[J]. *Geothermal Energy*, 2019, 7(1):1–32.
- [162] BUDD AR, GERNER EJ. Externalities are the dominant cause of faltering in Australian geothermal energy development[C]. *Proceedings of the World Geothermal Congress*. 2015.

(责任编辑 陈勉 编辑 马桂霞)