

# 干热岩长期开采过程中水岩作用的研究进展

许振华<sup>1,2</sup>, 陈晨<sup>1,2</sup>, 钟秀平<sup>1,2</sup>, 聂帅帅<sup>1,2</sup>, 王亚斐<sup>1,2</sup>, 马英瑞<sup>1,2</sup>, 刘昆岩<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学地热资源开发技术与装备教育部工程研究中心, 吉林 长春 130026;

2. 吉林大学复杂条件钻采技术自然资源部重点实验室, 吉林 长春 130026)

**摘要:**干热岩资源是一种储量巨大的可再生清洁能源, 我国的干热岩资源储量丰富, 高效稳定开采干热岩是我国实现“双碳”战略目标的途径之一。干热岩开发主要是通过增强型地热系统完成。在干热岩开发时, 岩石长期处于高温高压的水环境中, 会出现岩石中不同矿物溶解/沉积的现象, 造成裂缝堵塞或者管道结垢等问题。同时, 在水与干热岩进行接触换热的过程中, 水岩作用还会对岩石的力学性质产生影响, 诱导岩石微孔隙生成、裂隙扩展, 使岩石劣化损伤程度加剧, 力学性能下降。本文分析了干热岩开发过程中高温高压条件下水岩作用引起的问题, 阐述了水岩作用的机理, 总结了当前水岩作用的实验方法以及数值模拟方法, 最后对未来干热岩开发中水岩作用的研究方向进行了探讨, 为今后干热岩长周期高效安全开发提供一些理论参考。

**关键词:**干热岩; 增强型地热系统; 水岩作用; 结垢问题; 岩石劣化

**中图分类号:** P634; TE37 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)S1-0044-06

## Research progress on water-rock interaction during long-term mining of hot dry rock

XU Zhenhua<sup>1,2</sup>, CHEN Chen<sup>1,2</sup>, ZHONG Xiuping<sup>1,2</sup>, NIE Shuaishuai<sup>1,2</sup>,

WANG Yafei<sup>1,2</sup>, MA Yingrui<sup>1,2</sup>, LIU Kunyan<sup>1,2</sup>

(1. *Engineering Research Center of Geothermal Resources Development Technology and Equipment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;*

2. *Engineering Research Center of Geothermal Resources Exploitation Technology and Equipment, Ministry of Education, Changchun Jilin 130026, China*)

**Abstract:** Hot dry rock resource is a kind of renewable clean energy with huge reserves. Abundant hot dry rock resource reserves exist in China, efficient and stable exploitation of hot dry rock is one of the important ways to achieve the strategic goal of “double carbon”. The development of hot dry rock is mainly accomplished through enhanced geothermal systems. When developed, the hot dry rock is exposed to water environment with high temperature and high pressure for a long time. In this process, different minerals in the rock will dissolve/deposit, causing problems such as crack blockage or pipe scaling. At the same time, in the process of contact heat transfer between water and hot dry rock, the water-rock interaction also has an impact on the mechanical properties of rock, inducing the formation of micro-pores and the expansion of cracks, aggravating the damage degree of rock and decreasing the mechanical properties of rock. In this paper, the problems caused by water-rock interaction under high temperature and high pressure conditions in the development of hot dry rock are analyzed, the current experimental methods and numerical simulation methods of water-rock interaction are summarized, and the mechanism of water-rock interaction is described. Finally,

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-07-12 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.007

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目“热岩裸眼水平井采热周期内井壁力学行为及其对取热的影响”(编号: 42272364)

第一作者: 许振华, 男, 汉族, 2000年生, 硕士研究生在读, 地质工程专业, 从事干热岩开发相关研究工作, 吉林省长春市西民主大街938号, 365376480@qq.com。

通信作者: 陈晨, 男, 汉族, 1965年生, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程钻凿技术、基础工程设计、施工与计算机模拟研究及教学工作, 吉林省长春市西民主大街938号, chenchen@jlu.edu.cn。

引用格式: 许振华, 陈晨, 钟秀平, 等. 干热岩长期开采过程中水岩作用的研究进展[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 44-49.

XU Zhenhua, CHEN Chen, ZHONG Xiuping, et al. Research progress on water-rock interaction during long-term mining of hot dry rock[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 44-49.

the research direction of water-rock interaction in the development of hot dry rock in the future is discussed, which provides some theoretical reference for the long periodical, efficient and safe development of hot dry rock in the future.

**Key words:** hot dry rock; enhanced geothermal systems; water-rock interaction; scaling problems; rock deterioration

## 0 概述

开发地热资源,尤其是深部干热岩型地热资源,是对推动我国能源结构向低碳绿色转型、达到“双碳”战略目标的重要途径<sup>[1-2]</sup>。干热岩是一种清洁、低碳、分布空间广、储量大的可再生资源,我国干热岩资源总量为 $2.52 \times 10^{25}$  J,占世界干热岩资源量的1/6,具有广阔的开发前景和发展潜力<sup>[3-4]</sup>。

目前,干热岩开发主要是通过增强型地热系统(Enhanced Geothermal System, EGS)来进行的,首先通过人工改造地热储层,再利用注采井和裂缝系统循环采热介质提取热量<sup>[6]</sup>;后来有学者又提出了闭环地热系统(Closed Loop Geothermal System, CLGS)和基于开挖的增强地热系统(Enhanced geothermal system based on excavation, EGS-E)等不同的开发方案。CLGS是通过采热介质在水平井筒内闭路循环实现采热<sup>[7]</sup>;EGS-E采用开挖、爆破、崩落等采矿技术进行热储改造,采用开挖竖井铺设换热管道的方式取代地热钻井技术进行热能提取<sup>[8]</sup>。

1973年,美国政府在新墨西哥州Fenton Hill启动了世界范围内首个EGS项目,开启了深部地热资源开采的先河<sup>[9]</sup>,而后日本、法国、德国和澳大利亚等国家也相继开展了干热岩资源开发的研究,建立一系列试验/示范工程,部分具有代表性的项目见表1。我国对干热岩开发研究起步比较晚,目前对干热岩的开采仍处于探索攻坚阶段。

在干热岩开发时,岩石长期处于高温高压的水环境中,水岩相互作用的影响不可忽视,在国内外许多地热电站和一些EGS工程中都出现了结垢现象。除此之外,冷的注入水体与高温岩石发生热冲击、物理化学作用都可能对岩石的力学性质造成劣化,影响地质体的稳定性,对干热岩的长期安全开采带来挑战。

水岩作用一般是指水溶液与岩石体之间的相互作用,对于岩石力学,则是指水溶液与岩石体在岩石固相线下的温度、压力范围内进行的所有化学反应、物理化学作用和力学损伤效应<sup>[11]</sup>。在干热岩开采

表1 具有代表性的EGS项目<sup>[10]</sup>

项 目	开始时间/年	国家	井深/m	刺激方法	岩石类型	储层温度/°C	地震事件
兰道 (Landau)	1983	德国	1874~2542	生产井未压裂; 注入井压裂	花岗岩	159	微震 ( $M \leq 2.7$ )
因斯海姆 (Insheim)	2007	德国	3600~3800	水力压裂和化学 刺激	砂岩,花岗岩	165	微震 ( $M: 2.0 \sim 2.4$ )
苏茨 (Soulzt)	1987	法国	5093	水力压裂和酸化 刺激	花岗岩	165	微震 ( $M: 2.0 \sim 2.9$ )
布瓦兰特 (Bouillante)	1996	法国	1000~2500	热力压裂	火山岩,凝灰岩	250~260	微震
阿尔泰姆 (Altheim)	1989	奥地利	2165~2306	酸化,水力刺激	石灰岩	106	微震
拉达雷罗 (Lardarello)	1970	意大利	2165~2306	水力和热力刺激	变质岩	300~350	微震 ( $M \leq 3.0$ )
沙漠峰 (Desert Peak)	2007	美国	2430~2956	水力、热力和化 学刺激	闪长岩,花岗岩	$\geq 300$	微震 ( $M \leq 2.8$ )
库珀盆地 (Cooper Basin)	2003	澳大 利亚	4421	水力压裂	花岗闪长岩	242~278	微震 ( $M \leq 3.7$ )
比乔里 (Hijiori)	1985	日本	1805~1901	水力压裂	花岗闪长岩	190	微震

过程中,高温高压的环境下,注入的循环水体会与干热岩体发生水岩反应,引起不同矿物溶解/沉积现象,造成的裂缝堵塞或者管道结垢,以及储层渗透率和热导率的变化<sup>[12]</sup>,例如在法国的 Soultz、Le Mayet、日本的 Hijiori、澳大利亚的 Cooper Basin 项目中均有发生,伴随着地热流体循环结垢,管道直径显著减少,从而阻塞热量和流体输送的路径,井筒内壁均形成了厚度大于 10 cm 的矿物垢,并使人工裂隙不同区域的渗透率降幅均超过 13.5%,严重破坏水力连通性<sup>[13-14]</sup>。除此之外,水岩作用还会对干热岩体的力学性质造成影响。在干热岩开发过程中,高温的干热岩体与注入的低温水体发生的热冲击,产生热应力,诱导裂隙发育扩展,导致岩石力学性质下降,对地质体的稳定性带来不可忽视的影响<sup>[15]</sup>。

### 1 水岩作用引起的结垢问题

为了避免或抑制地热开发中的钙垢,需要清楚钙垢形成的主要过程及温度、压力、孔隙度发生变化时,碳酸钙的溶解规律。国内外一些学者对此也进行了相关研究,如 Andre 等<sup>[16]</sup>利用 FRACHEM 软件对深部地热储层在长期注采过程中孔隙度、渗透率以及矿物成分的变化进行了研究。Alt-Epping 等<sup>[17]</sup>利用 Basel-1 井的约束条件预测花岗岩型的增强地热系统中水-岩相互作用过程中孔隙度演化进行了研究。Xu 等<sup>[18]</sup>利用 TOUGHREACT 软件对以 CO<sub>2</sub> 为工作流体的 EGS 储层外围区域进行了水岩化学反应运移数值模拟,对 pH、孔隙度及 CO<sub>2</sub> 矿物捕获量等进行了分析。

地热系统中,代表性的垢物是钙垢和硅垢,其中钙垢是地热系统中最常见的,主要成分方解石,是一种次生矿物。当井内流体发生闪蒸汽化后,气相水蒸汽增多,导致二氧化碳分压降低,溶解在液相的 CO<sub>2</sub> 脱气溢出,造成最常见的碳酸钙垢。对于中性-碱性地热流体,方解石都是饱和的,关于低温条件下方解石的溶解度有很多研究,但对于高温系统和流体组分复杂的情况,实验数据很少<sup>[19]</sup>,Segnit 等<sup>[20]</sup>给出的涵盖 75~201 °C 范围的数据。后来经过不断研究,Gledhill 等<sup>[21]</sup>得出了 5~300 °C 范围内方解石的平衡常数随温度变化,见图 1。此外,方解石的溶解度也受 CO<sub>2</sub> 分压和盐度的影响,随 CO<sub>2</sub> 分压的增加而增大,随温度的升高而减小,随着盐度的增加而增大<sup>[22]</sup>。所以井筒内发生沸腾的地方结垢的概率

最大,结垢量也是最多的。随着沸腾的进行,地热水的温度会降低,使方解石的溶解度又增大,往欠饱和的方向发展<sup>[19]</sup>。

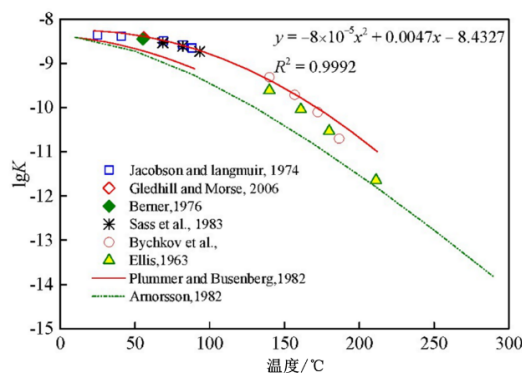


图 1 方解石平衡常数随温度变化曲线<sup>[21]</sup>

地热系统中,钙垢的形成与 4 个主要的地球化学过程有关:(1)井筒中沸腾作用导致的 CO<sub>2</sub> 脱气作用以及 pH 值增大;(2)套管腐蚀导致的 pH 值增大;(3)气体侵入导致的 CO<sub>2</sub> 逸出;(4)地热流体从储层到井口呈线性的解压作用导致的碳酸钙溶解度降低<sup>[23]</sup>。

### 2 水岩作用对岩石力学性质的影响

地下深部的干热岩处于高应力、高温的状态,其岩体的变形破坏特征呈现明显的流变性<sup>[24]</sup>,岩体变形与时间相关联,变形量随时间的延续而不断变大,从而导致岩体抗破坏能力下降,同时,在水与干热岩进行接触换热的过程中,水岩作用的离子交换、冲刷运移、氧化还原作用等物理化学反应过程以及热冲击作用都将使岩体组分改变,微孔隙生成、裂隙扩展,岩石损伤程度加剧,使岩石的力学性能下降。

1948 年,Rebinder 等<sup>[25]</sup>首先通过实验研究和理论分析,运用 Griffith 强度理论探讨了化学环境对岩石力学性质的影响。Sausse 等<sup>[26]</sup>对水岩作用下岩石节理表面的力学性质弱化等方面进行了研究。张文达<sup>[27]</sup>研究了花岗岩岩体化学场-温度场耦合作用下高温酸性环境水-岩作用的模拟实验,并采用常规三轴抗压强度实验讨论高温酸蚀作用后岩石力学强度劣化机制,发现岩体力学性质下降明显。邓华锋等<sup>[28]</sup>对水岩作用下损伤砂岩强度劣化规律进行了试验研究,发现水岩作用对损伤岩样的耦合损伤效应明显。水岩作用改变了岩石的微观孔隙结构,破

坏了岩石颗粒或晶体间的连接,致使岩石的力学特性发生了变化<sup>[29]</sup>。邵保平等<sup>[30]</sup>对600℃内高温状态花岗岩遇水冷却后花岗岩的力学特性进行了研究,发现花岗岩的超声波速、单轴抗压强度、抗拉强度及弹性模量随温度逐渐减小,见图2。顾晓伟<sup>[31]</sup>对不同高温水平和水冷循环次数作用下干热岩物理力学性质进行了试验研究,得出结论:随温度和循环次数的增加,花岗岩峰值应力、弹性模量呈下降的趋势,在T=300~600℃时,迅速降低,当T=750℃时,变化较小;随着围压的升高,花岗岩峰值应力、弹性模量近似线性增加。

上述研究结果表明温度、时间、水岩作用均会影响

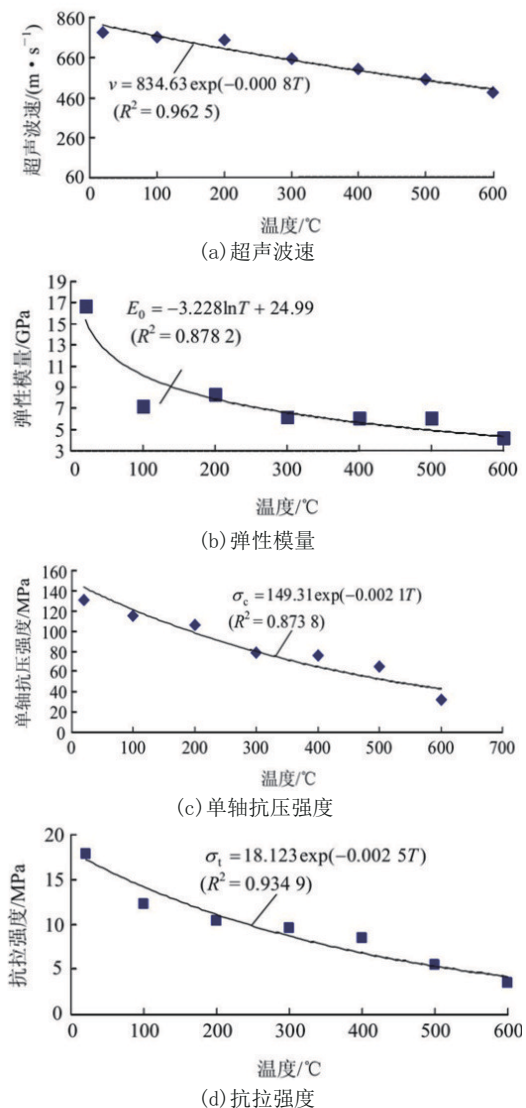


图2 600℃内不同温度状态花岗岩遇水冷却后岩石力学性质变化<sup>[30]</sup>

响到岩石的力学性质和本构模型,但目前干热岩开发过程中,大时间尺度下高温、高压及水岩作用对岩石性质演变的综合影响机制尚未探明,相关的花岗岩时效本构模型尚未建立,这也是未来对于干热岩长期开采的一个重要研究方向。

### 3 高温高压下水岩作用的研究方法

#### 3.1 实验研究

由于对于干热岩的开发是在高温高压的环境下进行的,为了模拟现实工况环境,Baldermann<sup>[32]</sup>和Ellis<sup>[33]</sup>等人在温度范围为150~600℃,压力范围为50~150 MPa的实验条件下对水和岩石(如火山岩和沉积岩)之间的化学过程的物质成分变化进行了实验调查。研究表明,岩石和水的相互作用与发生在该地下岩石中的地下水的类型相似。在水岩相互作用过程中,观察到各种岩石矿物(石英、方解石、伊利石、白云石等)的溶解和沉淀<sup>[34]</sup>,它们受到温度、溶液的初始pH值和溶液中的初始离子量以及矿物本身的特性的影响<sup>[32]</sup>;Yang等<sup>[35]</sup>在250℃的温度和10 MPa的压力下对经过热处理的花岗岩进行了水岩相互作用的实验,得到了岩石的渗透率、热导率变化,发现渗透率呈现先增加到减少的过渡,而热导率呈现相反的变化规律,见图3。赵宇辉等<sup>[12]</sup>采用ML-0.3型高温高压反应釜,在150℃,8 MPa的条件下进行了花岗岩与不同注入水体相互作用的实验,分析花岗岩体的矿物成分变化以及注入水体的化学成分变化规律,得出结论:不同注入水体与干热岩进行水岩作用,会产生不同类型的矿物溶解与沉淀。张荣华等<sup>[36]</sup>设计出高温高压流动反应实验平台,进行了水-玄武岩石在25~400℃,23 MPa条件下反应动力学实验,得出各种变化条件下的元素溶解释放速率。

综上所述,目前已经具备模拟干热岩水岩反应的高温高压流动反应的实验条件,但在大时间尺度下高温高压的水岩作用的相关实验目前还没有,研究方法上多采用热力学方法,未来研究难点将会转移到宏观、大时间尺度下水-岩相互作用的动力学过程,从不同的时间尺度研究水岩作用对于干热岩开采过程的影响。

#### 3.2 数值模拟研究

水-岩相互作用过程模拟是基于化学热力学和化学动力学原理,用数学方法定量刻画水岩体系化

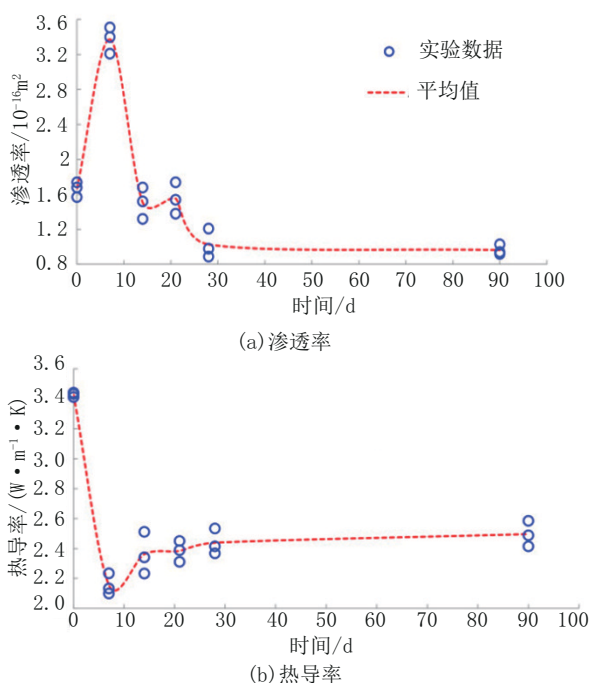


图3 花岗岩在水岩作用下渗透率和热导率的变化<sup>[35]</sup>

学反应过程的研究方法<sup>[37]</sup>,对水岩相互作用模拟的软件有很多, MINTEQA, PHREEQC, NETPART 及 TOUGHREACT 等<sup>[38]</sup>,这些软件也成为人们认识热、流体、力学和化学等多场耦合作用下的各种水岩相互作用过程的有力工具<sup>[39]</sup>。根据所获得的水化学分析数据和同位素资料,用这些软件可对水岩反应过程进行模拟,阐明水岩作用演化中经历的地球化学作用、物质迁移等<sup>[40]</sup>。在对干热岩的开发上,国内外学者借助这些软件对水岩作用导致的矿物成分的溶解与沉淀、岩石渗透率、热导率的变化以及结垢问题进行了研究,例如李佳琦等<sup>[14]</sup>通过 TOUGHREACT 软件分析水岩相互作用对 EGS 热储层特征的影响,发现注入冷水到花岗岩热储层中导致石英矿物沉淀,碱性长石、斜长石、黑云母矿物溶解,得出储层孔隙度、渗透率均随时间逐渐增大的结论,高温水岩反应后矿物的相对含量变化见表 2。Yang 等<sup>[35]</sup>用 PHREEQC3.0 对高温高压条件下水岩相互作用的化学过程进行模拟,再现了水-岩石反应的化学时间序列。

#### 4 结语与展望

自 1970 年 EGS 的概念提出以来,逐步形成了增强型地热系统(EGS)和闭环地热系统(CLGS)等

表 2 高温水岩作用后矿物相对含量及改变量<sup>[14]</sup>

矿物	相对质量分数/%	变化量/%
石英	27	5
斜长石	35	2
碱性长石	35	-2
黑云母	3	-2

不同的开发方案,并全球范围内建立了很多典型的试验/示范工程,其中有一些 EGS 项目在运行中因受水岩作用的影响而失败。为了能够实现干热岩长期稳定安全开采,对高温高压下水岩作用的深入研究具有重要意义。

(1) 探明高温、高压条件下大时间尺度的水岩作用对岩石性质演变的综合影响机制,对实现干热岩的长期稳定开采具有重要意义。

(2) 目前研究水岩作用过程演化上多采用热力学方法,而宏观、大尺度水-岩相互作用的动力学过程还有较多问题需要探讨,将来可以从不同的时间尺度将热力学和动力学结合研究水岩作用对干热岩开采过程的影响。

(3) 加强关键技术攻关和研发,将理论与实践相结合,在高地温梯度地区建设 EGS 或者 CLGS 示范项目,推动我国干热岩开发技术的发展。

#### 参考文献:

- [1] 推进“十四五”规划落实着力构建新发展格局——全国政协十三届常委会第十七次会议大会发言摘编[J]. 中国政协, 2021, 387(12):10-7.
- [2] 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知[J]. 建筑节能(中英文), 2021, 49(11):131-136.
- [3] 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, 11:1858-1869.
- [4] 余毅,马艺媛. 中国干热岩资源赋存类型与开发利用[J]. 自然资源情报, 2022, (5):7.
- [5] 王贵玲,刘彦广,朱喜,等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 2020, 27(1):1-9.
- [6] Allan J, Raymond F, Raymond L. An evaluation of enhanced geothermal systems technology[R]. 2008.
- [7] Fallah A H, Gu Q, Chen D, et al. Globally scalable geothermal energy production through managed pressure operation control of deep closed-loop well systems-ScienceDirect [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 236(0):114056.
- [8] 唐春安,赵坚,王思敬. 基于开挖技术的增强型地热系统 EGS-E 概念模型[J]. 地热能, 2021, (5):3.
- [9] 亢方超,唐春安,李迎春,等. 增强型地热系统研究现状:挑战与机

- 遇[J].工程科学学报,2022,44(10):1767-77.
- [10] 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.
- [11] 汤连生,王思敬.工程地质地球化学的发展前景及研究内容和思维方法[J].大自然探索,1999,(2):35-9,44.
- [12] 赵宇辉,冯波,张国斌,等.花岗岩型干热岩体与不同注入水体相互作用研究[J].地热能,2021,94(7):2115-2123.
- [13] Kaieda H, Asanuma H. Present status of worldwide development of hot dry rock geothermal energy[J]. *Journal of the Japan Institute of Energy*, 2008,87(10):834-839.
- [14] 李佳琦,魏铭聪,冯波,等.EGS地热能开发过程中水岩作用对热储层特征的影响[J].可再生能源,2014,32(7):1004-1010.
- [15] 吴阳春.热冲击作用下干热岩井筒围岩力学特性与稳定控制机理研究[D].太原理工大学,2020.
- [16] Andre L, Rabemanana V, Vuataz F D. Influence of water - rock interactions on fracture permeability of the deep reservoir at Soultz-sous-Forêts, France[J]. *Geothermics*, 2006,35(5-6):507-531.
- [17] Alt-epping P, Diamond L W, Hä, et al. Prediction of water - rock interaction and porosity evolution in a granitoid-hosted enhanced geothermal system, using constraints from the 5km Basel-1 well[J]. *Applied Geochemistry*, 2013,38(1):121-133.
- [18] Xu T, Pruess K. Reactive transport modeling to study fluid-rock interactions in Enhanced Geothermal Systems (EGS) with CO<sub>2</sub> as working fluid[A]. *Proceedings World Geothermal Congress 2010[C]*, 2010.
- [19] 李义曼,庞忠和.地热系统碳酸钙垢形成原因及量化评价[J].新能源进展,2018,6(4):274-281.
- [20] Segnit E R, Holland H D, Biscardi C J. The solubility of calcite in aqueous solutions-I The solubility of calcite in water between 75° and 200° at CO<sub>2</sub> pressures up to 60 atm[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1962,26(12):1301-1331.
- [21] Gledhill D K, Morse J W. Calcite solubility in Na-Ca-Mg-Cl brines[J]. *Chemical Geology*, 2006,233(3-4):249-56.
- [22] Henley R W. *Geothermal fluids: Chemistry and exploration techniques*: K. Nicholson. Springer Verlag, Berlin, New York, 1993, 263 pp., DM 138.00 [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1995,52(3):382-383.
- [23] Wanner C, Eichinger F, Jahrfeld T, et al. Causes of abundant calcite scaling in geothermal wells in the Bavarian Molasse Basin, Southern Germany[J]. 2017,70(1):324-338.
- [24] 刘业科.水岩作用下深部岩体的损伤演化与流变特性研究[D].中南大学,2014,32(5):9.
- [25] Rebinder P A, Shreiner L A, Zhigach K F. Hardness reducers in drilling: A physico-chemical method of facilitating the mechanical destruction of rocks during drilling[J]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1948,37(17):378-392.
- [26] Sausse J, Jacquot E, Fritz B, et al. Evolution of crack permeability during fluid-rock interaction. Example of the Brézouard granite (Vosges, France)[J]. *Tectonophysics*, 2001,336(1-4):199-214.
- [27] 张文达.花岗岩高温酸性环境水-岩作用特征及岩体劣化机制[D].西南交通大学,2021.
- [28] 邓华锋,肖志勇,李建林,等.水岩作用下损伤砂岩强度劣化规律试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015(S1):2690-2698.
- [29] 冯夏庭.岩石破裂过程的化学-应力耦合效应[M].北京:科学出版社,2010.
- [30] 邵保平,赵阳升.600°C内高温状态花岗岩遇水冷却后力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(5):7.
- [31] 顾晓伟.基于干热岩开采的高温水冷循环后花岗岩力学特性研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.
- [32] Baldermann A, Abbasov O R, Bayramova A, et al. New insights into fluid-rock interaction mechanisms at mud volcanoes: Implications for fluid origin and mud provenance at Bahar and Zenbil (Azerbaijan)[J]. *Chemical Geology*, 2020,(537):119479.
- [33] Ellis A J, Mahon W. Natural hydrothermal systems and experimental hot-water/rock interactions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964,28(8):1323-1357.
- [34] Bjorke J K, Stefansson A, Arnorsson S. Surface water chemistry at Torfajkull, Iceland—Quantification of boiling, mixing, oxidation and water-rock interaction and reconstruction of reservoir fluid composition[J]. *Geothermics*, 2015,58(1):75-86.
- [35] Yang F, Wang G, Hu D, et al. Influence of water-rock interaction on permeability and heat conductivity of granite under high temperature and pressure conditions [J]. *Geothermics*, 2022,100:102347-.
- [36] 张荣华,张雪彤,胡书敏,等.高温下玄武岩与流体相互作用:在400°C、23MPa条件下反应的动力学实验[C]//2011年全国岩石学与地球动力学研讨会,2011.
- [37] 李义曼,庞忠和.二氧化碳地质封存中的水-岩反应动力学模拟:进展及问题[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(S2):352-360.
- [38] 王周锋,郝瑞娟,杨红斌,等.水岩相互作用的研究进展[J].水资源与水工程学报,2015,(3):7.
- [39] 杨国栋,李义连,马鑫,等.绿泥石对CO<sub>2</sub>-水-岩石相互作用的影响[J].地球科学:中国地质大学学报,2014,(4):11.
- [40] 贾文飞,高柏,李鸣晓,等.水岩相互作用分析方法研究进展[J].广东化工,2015,42(9):2.

(编辑 王文)