

袁益龙,唐佳伟,李鹏,等.热-力耦合作用下花岗岩粗糙裂隙渗透率演化规律.吉林大学学报(地球科学版),2025,55(1): 179-187. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230134.

Yuan Yilong, Tang Jiawei, Li Peng, et al. Permeability Evolution of Granite with Rough Fracture Under Thermal - Mechanical Coupling. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55(1): 179 - 187. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20230134.

热-力耦合作用下花岗岩粗糙裂隙渗透率演化规律

袁益龙^{1,2}, 唐佳伟¹, 李鹏³, 何瑞敏³, 郭强¹, 钟承昊²

1.煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室,北京 102209

2.地下水资源与环境教育部重点实验室(吉林大学),长春 130021

3.国家能源集团神东煤炭技术研究院,陕西 榆林 719315

摘要:为研究热-力耦合作用对增强型地热系统热储裂隙渗透率演化的影响,利用含粗糙单裂隙的花岗岩试样,分别在加卸载围压为5~30 MPa,室温(25℃)、高温(150和180℃)条件下进行了流动-应力加卸载耦合实验,分析了应力加卸载引起的弹-塑性变形与裂隙渗透率演化规律。结果表明:花岗岩粗糙裂隙渗透率与围压呈对数负相关关系。当温度分别为25、150和180℃时,加载阶段裂隙渗透率分别减小78%、90%和92%,卸载阶段裂隙渗透率仅分别恢复63%、26%和19%;这表明加卸载过程粗糙裂隙面在应力作用下发生了塑性变形,导致裂隙渗透率出现永久性衰减。当温度由25℃增加到150℃和180℃时,加卸载过程塑性变形导致粗糙裂隙的渗透率衰减率由15%分别上升至64%和73%;这表明塑性变形与裂隙表面接触微凸体发生的矿物颗粒破碎有关,高温条件下其影响更为显著。

关键词:增强型地热系统;地热裂隙;热-力耦合作用;流动实验;裂隙渗透率

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20230134

中图分类号: P641

文献标志码: A

Permeability Evolution of Granite with Rough Fracture Under Thermal - Mechanical Coupling

Yuan Yilong^{1,2}, Tang Jiawei¹, Li Peng³, He Ruimin³, Guo Qiang¹, Zhong Chenghao²

1. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102209, China

2. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment (Jilin University), Ministry of Education, Changchun 130021, China

3. Technology Research Institute, CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Yulin 719315, Shaanxi, China

Abstract: To study the effect of thermal - mechanical coupling on fracture permeability evolution of enhanced geothermal systems (EGS), flow-stress loading and unloading coupling experiments were

收稿日期: 2023-05-22

作者简介: 袁益龙(1990-),男,教授,博士,主要从事地下复杂环境水-热-应力-化学耦合模拟程序开发及应用方面的研究, E-mail: yuanyl14@mails.jlu.edu.cn

通信作者: 钟承昊(1995-),男,博士,主要从事高温高压水-岩作用热力学和动力学方面的研究, E-mail: zhongch20@mails.jlu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(42372283); 吉林省科技厅自然科学基金项目(20220101160JC)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (42372283) and the Natural Science Foundation of Jilin Provincial Department of Science and Technology (20220101160JC)

carried out on granite samples with rough single fracture under the normal temperature (e.g., 25 °C) and high temperature (e.g., 150 °C and 180 °C) conditions, respectively. The confining pressure of loading and unloading processes was between 5 MPa and 30 MPa. The evolution law of fracture permeability induced by elastic-plastic deformation was analyzed during stress loading and unloading. The results show that the fracture permeability has a logarithmic negative correlation with the confining pressure. When the temperature was 25, 150 and 180 °C, the fracture permeability decreased by 78%, 90% and 92% in the loading stage, and only recovered by 63%, 26% and 19% in the unloading stage. This indicated that the rough fracture surface has occurred plastic deformation during loading and unloading processes, which leads to permanent attenuation of fracture permeability. When the temperature increased from 25 °C to 150 °C and 180 °C, the permeability attenuation caused by plastic deformation increased from 15% to 64% and 73%, respectively. This indicated that the effect of plastic deformation on the fracture surface is related to the crushing of mineral particles, which becomes more significant in high temperatures.

Key words: enhanced geothermal system; geothermal fracture; thermal - mechanical coupling effect; flow experiment; fracture permeability

0 引言

预计到 2035 年,全球能源需求将增加目前的 1/3 以上,这需要可再生能源增加约 77%^[1]。地热能作为最有前景的低碳资源之一,受到了广泛关注。一方面,地热资源可以提供基本负荷电力^[2]。从 1950 年到 2015 年,全球地热发电总装机容量增长了 64 倍^[3-4];截至 2019 年底,地热发电总装机容量达到 107.72 GW^[5]。另一方面,地热能利用目前每年可减少约 252.6 亿 t 二氧化碳排放量^[5]。预计到 2050 年,减少二氧化碳排放量将达到约 800 亿 t^[4]。

干热岩 (HDR) 地热资源储存在地下 3 ~ 10 km,温度大于 150 °C 的低孔隙度、低渗透性结晶岩中^[6]。我国干热岩地热资源量超过 2.52×10^{25} J,如果开发其中的 2%,可满足约 4 000 a 的能源需求^[7]。近年来,在我国青藏高原东北部的共和盆地发现了丰富的干热岩地热资源^[8]。自 20 世纪 70 年代以来,增强型地热系统 (EGS) 为高效、经济地利用干热岩地热能提供了实际可行的途径^[9]。EGS 工程通常需要采用水力压裂来开启和扩展人工裂隙,并获得连通的裂隙网络,进而提高地热储层的渗透率^[10]。相较于围岩基质,即使围压达到 100 MPa,裂隙通道仍具有更高的渗透性^[11]。因此,裂隙是 EGS 储层的主要流动通道。

地热流体流经热储裂隙是一个传热-流动-岩石力学-地球化学 (THMC) 多场耦合过程^[12]。因此,对于 EGS 工程生产性能的提升需要综合性地了解

THMC 耦合作用下地热储层裂隙演化规律与控制机制^[13]。EGS 运行过程中裂隙通道的细微变化难以通过现场测试和试验进行分析,因此通过室内岩心流动实验定量分析注采过程中裂隙渗透性的演化规律十分必要,相关学者对此开展了大量研究。一方面,通过利用含裂隙岩心开展应力加载实验,进行了应力加载下裂隙渗透性的演化规律研究^[14-16];结果表明,作用在裂隙表面的应力增加会抑制裂隙的水动力性能,随着压缩次数不断增加,花岗岩渗透率持续减小,并逐步趋于稳定。另一方面,基于室内裂隙岩心流动实验测试结果,进行了花岗岩裂隙渗透率随围压、温度和岩石力学参数等变化的定量演化关系研究^[17-20];结果表明,加载过程中裂隙渗透率及其敏感性随应力变化基本符合对数函数或幂函数关系式,并且裂隙岩心流动实验的压力梯度与渗透流速的关系可通过线性达西定律进行描述。

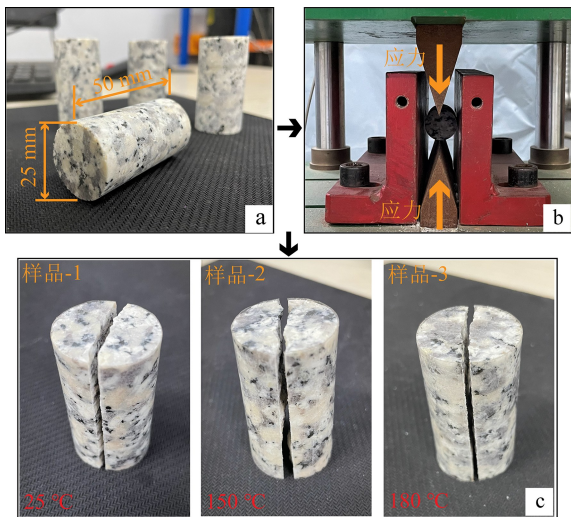
以上实验和模型研究对于认识花岗岩裂隙渗透率动态演化规律具有重要意义^[21-24]。然而,现有的研究大多只关注加载过程对裂隙渗透性演化的影响,并未深入分析卸载过程裂隙渗透率的恢复情况。实验分析很少同时考虑应力加卸载作用下弹-塑性变形对地热储层裂隙的影响。此外,以往的实验围压设置相对较低(通常小于 20 MPa),这导致难以捕捉加载过程塑性变形对地热储层裂隙的潜在影响。针对以上问题,本次研究利用粗糙单裂隙花岗岩试样进行了应力加卸载耦合作用下的高温渗流实验,实验最高温度和围压分别达到 180 °C 和 30 MPa,以

期揭示高温弹-塑性变形耦合作用对地热储层粗糙裂隙渗透性能演化的影响,为增强型地热工程建设与可持续开发提供实验证据。

1 实验方法

1.1 样品制备

青海省共和盆地为我国干热岩地热资源开发的有利目标地区^[25]。通过野外调查,我们基于新鲜未风化露头采集了共和盆地花岗岩岩样,在实验室将其制备成直径为 25 mm、长为 50 mm 的圆柱形花岗岩样品(图 1a),并将其表面用砂纸抛光。通过巴西劈裂法将岩石样品分成两半,获得带有人工粗糙裂隙的圆柱形试样进行渗流实验(图 1b)。本次高温流动-应力耦合实验共制备了 3 个测试样品,以研究热-力耦合作用对地热储层裂隙演化的影响(图 1c)。



a. 巴西劈裂前的圆柱形试样; b. 巴西劈裂设备; c. 巴西劈裂后的裂隙试样。

图 1 花岗岩粗糙裂隙试样制备

Fig.1 Preparation of granite sample with rough fracture

1.2 实验系统

流动实验系统包含五个主要部分:注入系统、岩心夹持器、压力控制系统、温度控制系统及数据采集和记录系统(图 2)。流体注入压力通过注入泵进行控制,最大注入压力为 40 MPa。花岗岩样品固定在岩心夹持器中。在试样安装到岩心夹持器之前,样品被包裹在一层很薄的聚合物防水胶带中,以确保流体只在人工裂隙中流动。围压通过独立的围压泵进行控制,最大围压上限为 30 MPa。岩心夹持器水

平放置在加热箱中,加热箱上限温度为 200 °C。数据采集和记录系统用于记录进、出口压力和流速。此外,在出口处安装了冷凝器,以方便高温实验下的流体样品采集。

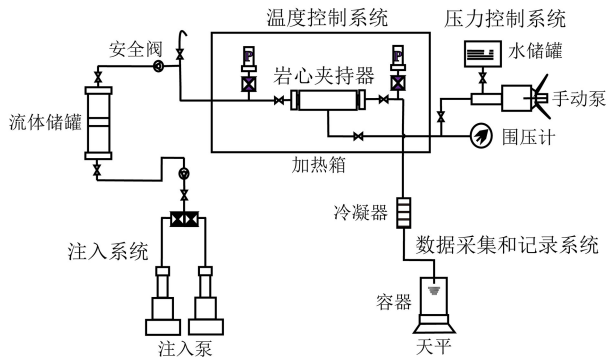


图 2 裂隙渗流测试实验系统

Fig.2 Experiment system of fracture flow-through tests

1.3 实验方案

国外研究普遍将干热岩温度的下限定义为 150 °C^[9, 25]。中国国家能源局组织地热行业专家编制了国家能源行业标准《地热能术语》(NB-T 10097—2018)^[26],规定干热岩为温度高于 180 °C 的异常高温岩体。为此,本次实验分别考虑在室温(25 °C)和高温(150 和 180 °C)情景下进行三组加卸载过程的裂隙岩心流动实验,且两组高温实验可以相互对照。岩石样品在流动测试开始前保持在指定的温度和围压下进行单次加卸载。围压在加载阶段由 5 MPa 逐渐增大到 30 MPa,在卸载阶段沿原路径逐渐减小。在测试过程中,蒸馏水被用作工作循环流体,且在注入裂隙岩心前提前预热至与岩石试样相同温度。每次实验设置恒定的 1 MPa 回压,以确保水在高温下仍能保持液体状态。在实验过程中,注入流速保持在恒定 5 mL/min,每 60 s 监测并记录一次注入压力。

1.4 渗透率计算

根据实测的进出口压差,利用达西定律^[27]可以计算出单个裂隙的渗透率,公式为

$$k_e = \frac{q\mu L}{pA} \quad (1)$$

式中: k_e 为渗透率(m^2); q 为流量(m^3/s); μ 为水的动力黏度($Pa \cdot s$); L 为裂隙长度(m); p 为进出口压差(Pa); A 为裂缝截面积(m^2)。

此外,渗透率计算考虑了水的动力黏度对温度的依赖性,即不同温度($t, ^\circ\text{C}$)条件下水的动力黏度,根据如下经验公式^[28]进行计算:

$$\mu = \begin{cases} 1.3799 - 0.0212t + 1.3604 \times 10^{-4}t^2 - 4.6454 \times 10^{-7}t^3 + 8.9043 \times 10^{-10}t^4 - 9.0791 \times 10^{-13}t^5 + 3.8457 \times 10^{-16}t^6, t \in [0, 140 ^\circ\text{C}]; \\ 0.0040 - 2.1075 \times 10^{-5}t + 3.8577 \times 10^{-8}t^2 - 2.3973 \times 10^{-11}t^3, t \in [140, 280 ^\circ\text{C}]. \end{cases} \quad (2)$$

2 实验结果与分析

2.1 室温条件应力加卸载过程粗糙裂隙渗透特性

流动实验结果显示,室温条件下粗糙裂隙渗透率与围压呈指数关系,如图 3 所示。由图 3 可知:加载阶段(围压从 5 MPa 增加到 30 MPa),裂隙渗透率随围压的增大呈对数递减趋势,此阶段渗透率降低了 78%。这是由于压力增加对裂隙闭合的影响逐渐降低,因此在加载早期渗透率降低较快,随后渗透率降低速率变慢。卸载阶段(围压从 30 MPa 降低到 5 MPa),裂隙渗透率随围压的增大呈对数递增趋势,这一恢复过程主要受裂隙的弹性变形控制;然而,与加载阶段的渗透率相比,卸载阶段各围压下的渗透率均偏低,即渗透率无法完全恢复到其初始值,表现出滞后效应,此阶段渗透率仅恢复了 63%,表明加卸载过程导致粗糙裂隙渗透率衰减了 15%。

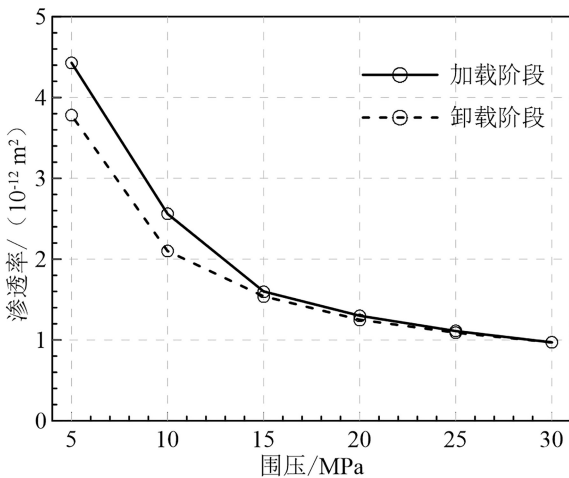


图 3 室温加卸载条件下裂隙渗透率随围压的变化

Fig.3 Variation of fracture permeability with confining pressure during loading and unloading processes under normal temperature condition

前人^[21, 29-33]的研究成果表明,这种滞后效应主要由粗糙裂隙面在应力作用下发生塑性变形控制,这是一个永久的、不可逆的过程。如图 4 所示:流出液中含有少量的岩石颗粒,这是由于加载过程导致的塑性变形通常与发生在裂隙表面接触微凸体的矿物颗粒破碎有关,这一过程伴随着矿物颗粒的脱落^[29];一些大于裂隙开度的矿物颗粒被滞留在裂隙中,这不仅直接减小了流动空间,而且进一步造成流动通道堵塞引起渗透率降低。分析可知,应力加卸载过程引起的弹-塑性变形耦合作用是影响粗糙裂隙渗透率动态演化的主要因素^[30-33]。

2.2 温度对应力加卸载过程粗糙裂隙渗透特性演化的影响

本次研究我们开展了高温 150 $^\circ\text{C}$ 和 180 $^\circ\text{C}$ 条件下粗糙裂隙岩心流动实验,以研究温度耦合作用对粗糙裂隙渗透率的影响。高温条件下裂隙渗透率与围压同样呈指数关系,如图 5 所示。由于岩样之间存在一定差异,因此其初始渗透率并不一致,但其受温度和应力作用影响下的渗透性演化规律保持一致。加载阶段(围压从 5 MPa 增加到 30 MPa),当温度为 150 $^\circ\text{C}$ 和 180 $^\circ\text{C}$ 时,裂隙渗透率分别减小了 90% 和 92%,相较于室温条件,粗糙裂隙渗透率在高温下减小幅度更大。这主要是由于高温条件降低了岩石力学强度,导致应力加载条件下粗糙裂隙面压缩变形更大,从而导致渗透率衰减更明显。卸载阶段(围压从 30 MPa 降低到 5 MPa),当温度为 150 $^\circ\text{C}$ 和 180 $^\circ\text{C}$ 时,裂隙渗透率分别仅恢复了 26% 和 19%;这表明高温条件下,加卸载过程导致粗糙裂隙面的塑性变形作用对裂隙渗透率的影响更加显著。由此可知,干热花岗岩粗糙裂隙渗透率的滞后效应随温度的升高而增大。以 5 MPa 围压为例,当岩石温度由 25 $^\circ\text{C}$ 增加到 150 $^\circ\text{C}$ 和 180 $^\circ\text{C}$ 时,加卸载过程引起的粗糙裂隙渗透率衰减程度由 15% 增加至 64% 和 73%。

温度对粗糙裂隙渗透性演化的影响可以用一些叠加的过程进行说明,如图 6 所示。前人研究^[29, 34]表明:高温增强了岩石热膨胀效应,降低了花岗岩基质的弹性模量。由图 6 可知,在高温条件下,岩石基质由于应力加载产生的机械变形可能加剧,并导致裂隙流动空间的截面面积减小。此外,随着温度升高,粗糙裂隙面接触微凸体处的矿物颗粒可能进一步破裂。这一过程伴随着矿物颗粒的脱落,减少了流动空间,并导致裂隙闭合作用加剧^[34]。因此,高温条件下粗糙裂隙渗透率的变化更为明显。

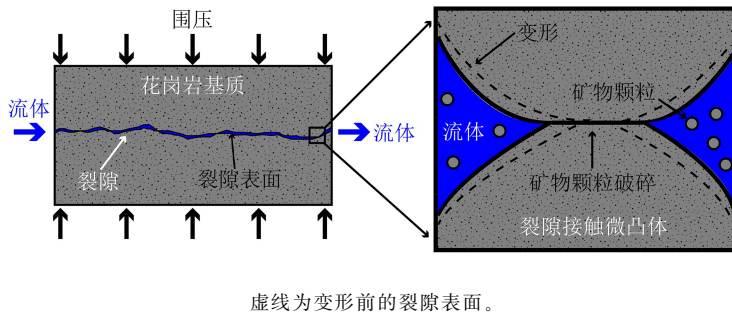


图 4 室温条件下应力加载变形对裂隙影响示意图

Fig.4 Schematic of mechanical deformation effects on fracture at normal temperature conditions

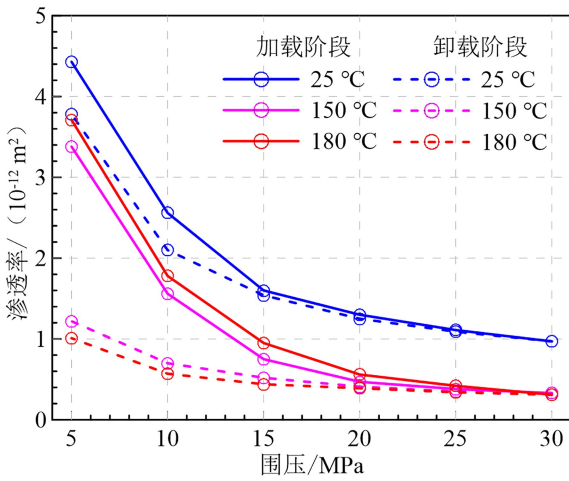


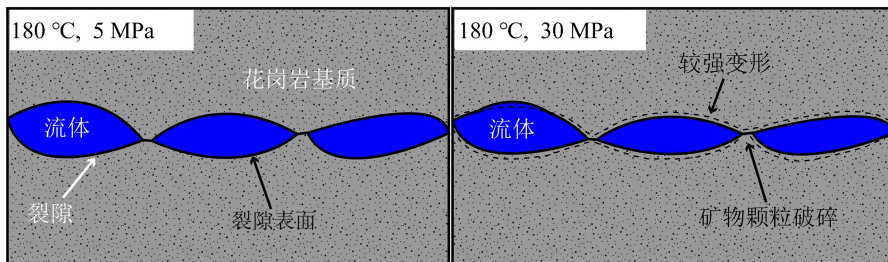
图 5 不同温度加卸载条件下裂隙渗透率随围压的变化

Fig.5 Variation of fracture permeability with confining pressure during loading and unloading processes at different temperature conditions

高温高围压作用下裂隙闭合作用加剧,裂隙流动空间减小会导致注入流体与裂隙面之间的接触面积减小,也就是水岩反应面积减小,因此可通过流出液离子浓度的检测对以上裂隙面演化的分析进行辅

助证明。扫描电镜(SEM)结果显示,花岗岩样品颗粒为中粒(2~5 mm),呈块状结构(图 7)。X 射线衍射(XRD)结果显示,实验花岗岩样品中含有斜长石(42%)、钾长石(18%)、石英(30%)、云母(8%)和其他矿物(2%)。由图 7 可以看出,高温条件下注入的蒸馏水主要导致长石类矿物发生溶解,具体的水岩反应如表 1 所示。

依据表 1 中可能发生的水岩化学反应,我们对室温(25 °C)和高温(150 °C)实验样品在不同围压下的流出液进行了收集,并对K⁺、Na⁺和Ca²⁺质量浓度进行了检测分析。由于室温环境下流出液样品的检测质量浓度低于仪器检测精度,因此图 8 仅显示了高温(150 °C)实验流出液中不同离子质量浓度随实验围压变化的特征。由图 8 可以看出,流出液中离子质量浓度随着围压的增加而减小,这主要是由于高围压下裂隙流动空间的截面面积减小,导致水岩反应面积降低所致。综上分析可知,对于高温干热岩地热开采,由于地热储层原位地应力通常较高,因此对于水力压裂后形成的人工裂缝需要添加高强度支撑剂,以避免地热流体长期动态开采过程中人工裂缝的闭合降低系统采热性能。



虚线为变形前的裂隙表面。

图 6 不同围压在高温条件下粗糙裂隙渗透率演化示意图

Fig.6 Schematic of mechanical deformation effects on fracture at different confining pressure under high temperature conditions

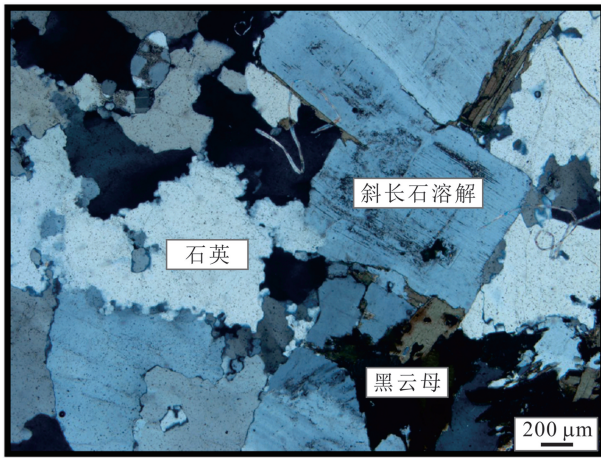


图 7 高温条件下花岗岩样品扫描电镜结果

Fig.7 Scanning electron microscope of granite sample under high temperature condition

表 1 花岗岩裂隙样品中矿物成分的化学反应

Table 1 Chemical reaction of mineral components in fractured granite samples

矿物	化学反应方程式
钾长石	$KAlSi_3O_8 + 4H^+ + 4H_2O \rightarrow Al^{3+} + K^+ + 3H_4SiO_4$
钠长石	$NaAlSi_3O_8 + 4H^+ + 4H_2O \rightarrow Al^{3+} + Na^+ + 3H_4SiO_4$
钙长石	$CaAl_2(SiO_4)_2 + 8H^+ \rightarrow 2Al^{3+} + Ca^{2+} + 2H_4SiO_4$

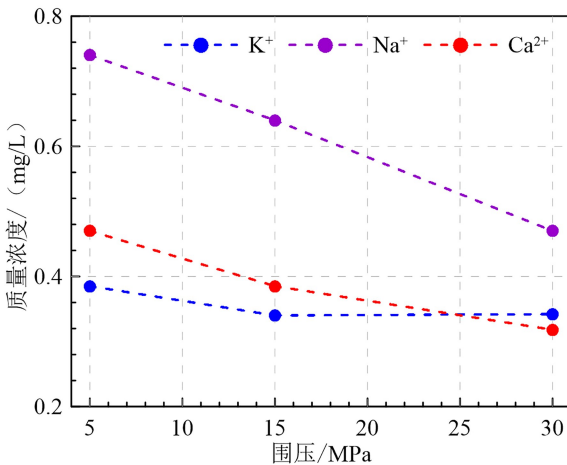


图 8 150 °C 下 K⁺、Na⁺、Ca²⁺ 质量浓度随围压的变化

Fig.8 Mass concentration changes of K⁺, Na⁺, Ca²⁺ with confining pressures at 150 °C

2.3 干热岩工程指示意义

与多孔介质相比,裂隙介质中的流体运移和热量传递更加复杂,并且受到 THMC 耦合作用的显著影响^[35-38]。人工热储裂隙本质上是非均匀的,其

水力特性与裂隙几何形状密切相关^[39],裂隙几何形状取决于裂隙表面的有效应力,而裂隙表面的有效应力通常由深度和有效地应力(主应力的大小和方向)控制^[21, 37]。地热开发系统工质流体循环过程中孔隙压力变化引起的机械卸载对裂隙的几何形状影响很大^[40]。部分裂隙的水力开启可能会增加作用在相邻裂隙表面的正应力,即应力阴影效应^[41],同样会对裂隙的渗流性能产生影响。本文开展的不同温度条件下流动-应力加载耦合实验结果显示,粗糙裂隙中较大的塑性变形与较高的温度有关。因此,高强度支撑剂的添加对于高地应力条件下裂隙型地热储层的可持续地热开发非常重要^[6, 42]。此外,相关模拟和实验研究^[43-45]同样表明,支撑剂的添加对深部地热储层裂隙渗透率的稳定具有积极作用。本次研究明确了热-力耦合作用下花岗岩地热储层粗糙裂隙渗透率演化的主要控制机制,为干热岩地热工程开发过程中可持续流动采热问题的解决提供了理论支撑。

3 结论

1) 应力加载过程中粗糙裂隙渗透率的降低同时受到弹性变形和塑性变形的影响。应力卸载过程弹性变形造成的粗糙裂隙渗透率降低可以完全恢复,然而,塑性变形导致的粗糙裂隙渗透率降低并不能完全恢复,且高温条件下塑性变形导致的粗糙裂隙渗透率衰减滞后效应更加明显。

2) 当温度分别为 25、150 和 180 °C 时,加载阶段裂隙渗透率分别减小了 78%、90% 和 92%,卸载阶段裂隙渗透率分别仅恢复了 63%、26% 和 19%,加卸载过程塑性变形导致粗糙裂隙的渗透率衰减幅度分别为 15%、64% 和 73%。

3) 高温高围压作用下裂隙闭合作用加剧,裂隙流动空间减小会导致注入流体与裂隙面之间的接触面积减小,也就是水岩反应面积减小,因此流出液中不同离子的质量浓度随着实验围压的增加而降低。

参考文献(References):

[1] George A, Shen B X, Craven M, et al. A Review of Non-Thermal Plasma Technology: A Novel Solution for CO₂ Conversion and Utilization[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2021, 135: 109702.
 [2] Song X Z, Shi Y, Li G S, et al. Numerical Simulation of Heat Extraction Performance in Enhanced

- Geothermal System with Multilateral Wells [J]. *Applied Energy*, 2018, 218: 325 - 337.
- [3] Bertani R. Geothermal Power Generation in the World 2010 - 2014 Update Report[J]. *Geothermics*, 2016, 60: 31 - 43.
- [4] Pan S Y, Gao M Y, Shah K J, et al. Establishment of Enhanced Geothermal Energy Utilization Plans: Barriers and Strategies[J]. *Renewable Energy*, 2019, 132: 19 - 32.
- [5] Lund J W, Toth A N. Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review [J]. *Geothermics*, 2021, 90: 101915.
- [6] Lu S M. A Global Review of Enhanced Geothermal System (EGS)[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 2902 - 2921.
- [7] Hao Z G, Fei H C, Hao Q Q, et al. China First Discovered Massive Available Hot Dry Rock Resources [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(3): 1039 - 1040.
- [8] Zhang C, Hu S B, Zhang S 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 - 297.
- [9] Olasolo P, Juarez M C, Morales M P, et al. Enhanced Geothermal Systems (EGS): A Review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 56: 133 - 144.
- [10] Li K W, Pan B Z, Horne R. Evaluating Fractures in Rocks from Geothermal Reservoirs Using Resistivity at Different Frequencies [J]. *Energy*, 2015, 93: 1230 - 1238.
- [11] Watanabe N, Hirano N, Tsuchiya N. Experimental Evaluation of Fluid Flow Through Artificial Shear Fracture in Granite [J]. *Geothermal Resources Council*, 2006, 30: 361 - 366.
- [12] Yasuhara H, Polak A, Mitani Y, et al. Evolution of Fracture Permeability Through Fluid - Rock Reaction Under Hydrothermal Conditions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 244(1): 186 - 200.
- [13] Fang Y, Wang C, Elsworth D, et al. Seismicity-Permeability Coupling in the Behavior of Gas Shales, CO₂ Storage and Deep Geothermal Energy [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2017, 3(2): 189 - 198.
- [14] Selvadurai A P S. Normal Stress-Induced Permeability Hysteresis of a Fracture in a Granite Cylinder[J]. *Geofluids*, 2015, 15(1/2): 37 - 47.
- [15] Meng X X, Liu W, Meng T. Experimental Investigation of Thermal Cracking and Permeability Evolution of Granite with Varying Initial Damage Under High Temperature and Triaxial Compression [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2018: 8759740.
- [16] 李军, 张杨, 胡大伟, 等. 花岗岩三轴循环加卸载条件下的气体渗透率[J]. *岩土力学*, 2019, 40(2): 693 - 700.
- Li Jun, Zhang Yang, Hu Dawei, et al. Gas Permeability of Granite in Triaxial Cyclic Loading/Unloading Tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(2): 693 - 700.
- [17] Wang L C, Cardenas M B. Development of an Empirical Model Relating Permeability and Specific Stiffness for Rough Fractures from Numerical Deformation Experiments[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2016, 121(7): 4977 - 4989.
- [18] 高红梅, 兰永伟, 赵延林, 等. 花岗岩在围压和温度作用下渗透率变化规律研究[J]. *佳木斯大学学报(自然科学版)*, 2017, 35(6): 955 - 958.
- Gao Hongmei, Lan Yongwei, Zhao Yanlin, et al. Study on Permeability of Granite Under Conditions of Stress and Temperature [J]. *Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition)*, 2017, 35(6): 955 - 958.
- [19] 武治盛, 冯子军, 石晓巖, 等. 不同围压下花岗岩渗透率及其渗透敏感性规律研究[J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(10): 46 - 50.
- Wu Zhisheng, Feng Zijun, Shi Xiaodian, et al. Study on Permeability of Granite Under Different Confining Pressure and Its Permeability Sensitivity[J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(10): 46 - 50.
- [20] 李林林, 朱俊福, 靖洪文, 等. 高温处理后花岗岩应力作用下渗透特性演化研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(7): 45 - 50.
- Li Linlin, Zhu Junfu, Jing Hongwen, et al. Study on Evolution of Granite Permeability Under Stress After High Temperature Exposure[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(7): 45 - 50.
- [21] Hofmann H, Blocher G, Milsch H, et al. Transmissivity of Aligned and Displaced Tensile Fractures in Granitic Rocks During Cyclic Loading [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 87: 69 - 84.
- [22] Vogler D, Amann F, Bayer P, et al. Permeability Evolution in Natural Fractures Subject to Cyclic

- Loading and Gouge Formation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(9): 3463–3479.
- [23] Zhao Y, Wang C L, Bi J. Analysis of Fractured Rock Permeability Evolution Under Unloading Conditions by the Model of Elastoplastic Contact Between Rough Surfaces[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(12): 5795–5808.
- [24] Shu B, Zhu R J, Elsworth D, et al. Effect of Temperature and Confining Pressure on the Evolution of Hydraulic and Heat Transfer Properties of Geothermal Fracture in Granite[J]. *Applied Energy*, 2020, 272: 115290.
- [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): 1936–1947.
- Xu Tianfu, Hu Zixu, Li Shengtao, et al. Enhanced Geothermal System: International Progresses and Research Status of China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(9): 1936–1947.
- [26] 地热能术语: NB/T 10097—2018[S]. 北京: 中国石化出版社, 2018.
- Terminology of Geothermal Energy: NB/T 10097—2018[S]. Beijing: China Petrochemical Press Co., Ltd., 2018.
- [27] Caulk R A, Ghazanfari E, Perdril J N, et al. Experimental Investigation of Fracture Aperture and Permeability Change Within Enhanced Geothermal Systems[J]. *Geothermics*, 2016, 62: 12–21.
- [28] Qu Z Q, Zhang W, Guo T K. Influence of Different Fracture Morphology on Heat Mining Performance of Enhanced Geothermal Systems Based on COMSOL [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(29): 18263–18278.
- [29] Siratovich P A, Villeneuve M C, Cole J W, et al. Saturated Heating and Quenching of Three Crustal Rocks and Implications for Thermal Stimulation of Permeability in Geothermal Reservoirs [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 80: 265–280.
- [30] Yasuhara H, Elsworth D, Polak A. Evolution of Permeability in a Natural Fracture: Significant Role of Pressure Solution [J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2004, 109(B3): B03204.
- [31] Yasuhara H, Elsworth D. Compaction of a Rock Fracture Moderated by Competing Roles of Stress Corrosion and Pressure Solution[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2008, 165(7): 1289–1306.
- [32] Yasuhara H, Kinoshita N, Ohfuji H, et al. Temporal Alteration of Fracture Permeability in Granite Under Hydrothermal Conditions and Its Interpretation by Coupled Chemo-Mechanical Model [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(12): 2074–2088.
- [33] Ghassemi A, Kumar G S. 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): 115–140.
- [34] Zhou X P, Li G Q, Ma H C. Real-Time Experiment Investigations on the Coupled Thermomechanical and Cracking Behaviors in Granite Containing Three Pre-Existing Fissures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 224: 106797.
- [35] Polak A, Elsworth D, Yasuhara H, et al. Permeability Reduction of a Natural Fracture Under Net Dissolution by Hydrothermal Fluids [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(20): 2020.
- [36] Ghassemi A, Zhang Q. Porothermoelastic Analysis of the Response of a Stationary Crack Using the Displacement Discontinuity Method [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2006, 132(1): 26–33.
- [37] Zhou S W, Zhuang X Y, Rabczuk T. A Phase-Field Modeling Approach of Fracture Propagation in Poroelastic Media [J]. *Engineering Geology*, 2018, 240: 189–203.
- [38] Rabczuk T, Belytschko T. Cracking Particles: A Simplified Meshfree Method for Arbitrary Evolving Cracks [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 61(13): 2316–2343.
- [39] Chen Y D, Lian H J, Liang W G, et al. The Influence of Fracture Geometry Variation on Non-Darcy Flow in Fractures Under Confining Dpresses [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 113: 59–71.
- [40] Chen Y D, Liang W G, Selvadurai A P S, et al. Influence of Asperity Degradation and Gouge Formation on Flow During Rock Fracture Shearing [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 143: 104795.
- [41] Yoon J S, Zimmermann G, Zang A. Numerical Investigation on Stress Shadowing in Fluid Injection-Induced Fracture Propagation in Naturally Fractured Geothermal Reservoirs[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(4): 1439–1454.

- [42] Yuan Y L, Xu T F, Moore J, et al. Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Modeling of Hydro-Shearing Stimulation in an Enhanced Geothermal System in the Raft River Geothermal Field, USA [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(12): 5371 - 5388.
- [43] Bandara K M A S, Ranjith P G, Rathnaweera T D, et al. Thermally-Induced Mechanical Behaviour of a Single Proppant Under Compression: Insights into the Long-Term Integrity of Hydraulic Fracturing in Geothermal Reservoirs [J]. *Measurement*, 2018, 120: 76 - 91.
- [44] Bandara K M A S, Ranjith P G, Haque A, et al. An Experimental Investigation of the Effect of Long-Term, Time-Dependent Proppant Embedment on Fracture Permeability and Fracture Aperture Reduction [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 144: 104813.
- [45] Fan M, Han Y H, Chen C. Thermal-Mechanical Modeling of a Rock/Proppant System to Investigate the Role of Shale Creep on Proppant Embedment and Fracture Conductivity[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(12): 6495 - 6510.