

引文格式:申晨光,冯子军,陈正男. 径向多裂隙花岗岩渗流演化规律[J]. 太原理工大学学报, 2026, 57(4): 824-834.

SHEN Chenguang, FENG Zijun, CHEN Zhengnan. Seepage evolution law of radial multifractured granite [J].
Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(4): 824-834.

径向多裂隙花岗岩渗流演化规律

申晨光^{1,2}, 冯子军^{1,2}, 陈正男^{1,2}

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原; 2. 太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室,
山西 太原)

摘 要:【目的】径向多裂隙花岗岩作为水热型地热资源开发中常见地层,其热力耦合作用下渗透率变化规律至关重要。【方法】采用自主设计研制的径向渗流实验反应釜,进行不同温压条件(法向应力 30~50 MPa、温度 6~150 °C)下径向多裂隙组花岗岩渗流实验。【结果】结果表明:热力耦合作用下,随着温度升高,径向多裂隙花岗岩渗流流量及渗透率单调递增,随法向应力增加呈负指数关系衰减。1~7 MPa 渗透压范围内存在阈值压力 5 MPa,阈值压力前随着渗透压升高渗透率快速增大。热力耦合作用下花岗岩基岩热损伤对渗透率变化影响可忽略,渗流水岩溶蚀作用和矿物颗粒热膨胀是影响裂隙形貌、渗流特征变化的主要因素。

关键词:地热开发;多裂隙花岗岩;渗透率;径向渗流

中图分类号:P314 **文献标识码:**A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20240418 **文章编号:** 1007-9432(2026)04-0824-11

Seepage Evolution Law of Radial Multifractured Granite

SHEN Chenguang^{1,2}, FENG Zijun^{1,2}, CHEN Zhengnan^{1,2}

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China;

2. Key Laboratory of In-situ Property Improving Mining of Ministry of Education,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China)

Abstract:【Purposes】As a common stratum in the development of hydrothermal geothermal resources, the change rule of permeability with thermal coupling is crucial. 【Methods】In this work, a radial seepage experimental reactor was designed and developed independently to conduct radial multi-fracture group granite seepage tests at different temperature and pressure conditions (normal stress: 30~50 MPa, temperature: 6~150 °C). 【Results】The results show that: with the action of thermal coupling, the radial multi-fractured granite seepage flow and permeability monotonically increase with the increase in temperature, while with the increase in normal stress the seepage shows a negative exponential relationship of decay. There is a threshold pressure of 5 MPa in 1~7 MPa osmotic pressure range, before the threshold pressure, with the osmotic osmotic pressure increasing, the permeability of the rapid increases. Thermal damage to granite bedrock with thermal coupling has a negligible effect on permeability changes, and seepage water rock dissolution and thermal expansion of mineral particles are the main factors affecting changes in fracture morphology and seepage characteristics.

Keywords: geothermal development; multi-fractured granite; permeability; radial seepage

收稿日期: 2024-05-26; 修回日期: 2024-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52122405)

第一作者: 申晨光, 硕士研究生, (E-mail) 1312310632@qq.com

通信作者: 冯子军, 博士, 教授, 主要从事高温高压岩石力学方面的研究, (E-mail) fzj3893811@126.com

当前国际环境问题与能源危机日趋严峻,寻求储量大、环境友好的新型替代能源,已成为各国政府和科研人员的普遍共识^[1]。地热资源作为分布广泛、稳定性高的清洁能源,受到了世界各国的重点关注^[2]。目前开采和利用的地热资源分水热型、干热岩型两种,并以前者居多^[3]。干热岩是一种不含水、汽的热岩体,多为变质岩、结晶岩类,埋深达到3~10 km,温度范围在150~650℃之间^[3,4]。增强型地热系统(Enhanced Geothermal System, EGS)是开发干热岩型地热资源的有效手段,利用水力压裂、射孔等方法将地下深层低渗岩体改造成具有高渗特性的人工地热储层,实现其长期经济开采地热储能^[5,6]。

国内外学者已对裂隙岩体渗流特性进行了大量研究。赵阳升等^[7-9]通过单一裂隙渗流实验,结合理论计算,推导出了三维应力作用下的单一裂隙渗透系数规律。冯子军等^[10-12]研究了高温三轴应力实验下裂隙岩体及含充填体母岩的渗流规律。申林方等^[13]研究了不同粗糙度裂隙面的几何形貌对渗透压降的影响。李正伟^[14]通过花岗岩与砂岩平直裂隙渗流实验,证明了裂隙渗透系数随围压升高而减小,高围压水平下裂隙水力开度不随渗透压而改变。

上述研究主要围绕单一裂隙岩体进行开展,然而一个巨大的花岗岩中包含数千条裂缝,Sausse^[15]等在GPKI井的增产实验中将裂隙网络划分为小裂缝高度连接的网络和孤立的高渗透性网络。研究多裂隙岩体渗流规律,对热储层储能计算以及裂隙网络渗透率等效与评估具有重要作用^[16]。本文通过自主设计的平行裂隙组花岗岩径向渗流实验系统,研究不同裂隙数目下的花岗岩裂隙渗流演化规律。对含多层热储地热资源,尤其包含多个主要裂隙通道,且以变质岩为主低孔隙集层的裂缝型热储层开展储量计算、评估起到一定作用。

1 实验概述

1.1 样品制备及试验设备

实验所用的细粒花岗岩岩块取自山东济宁,属“鲁灰花岗岩”,矿物成份为:白云石44.9%、石英27.4%、斜长石23.9%、高岭石2.5%、黑云母1.2%,其他0.1%。

共制备3组用于流量、渗透率测量的实验试样组,单组试样均为取自同一花岗岩岩块的圆柱形试件。取样步骤为:利用纱线切割机,将完整花岗岩

加工成若干尺寸为 $\Phi 25\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的完整圆柱试样A,直径误差低于0.2 mm;然后利用研磨机对端面进行精加工处理,端面不平行度低于0.05 mm,降低表面粗糙度对渗流实验的影响^[17,18]。该实验的主要目的是想通过改变裂隙条数,来分析花岗岩渗流演化规律,因此通过上述统一磨平处理,来避免裂隙粗糙度、或实际地层中裂隙倾角等对渗流的影响^[19]。随机选取若干加工好的试样A,中心钻制 $\Phi 3\text{ mm}$ 通孔,制成通孔圆柱试样B,如图1所示。

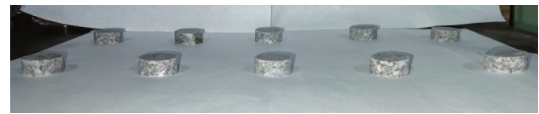
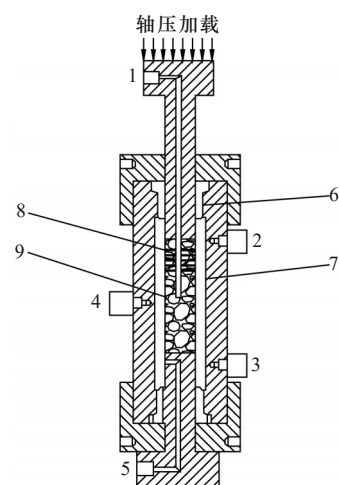


图1 实验的部分试样

Fig. 1 Some test specimens

本实验所用自主设计研制的平直裂隙组径向渗流试样夹持器如图2所示,渗流反应釜外壁被环形温控箱加热,热量通过氮气介质传导至橡胶套,进而实现对试样的加热。橡胶套上放置热电偶实现温度的实时监测与控制。渗流系统搭接如图3所示。该实验装置的特点在于,岩样与围压载体(胶套)之间有一层刻画网格槽的弧形板,网格槽作为径向渗流通道,注入流体借由网格槽由岩样侧面流至反应釜出口。与现有竖直裂隙渗流实验^[20-22]相比,通过径向渗流可以预制出多条裂隙渗流通道,同时裂隙径向渗流也更符合地热资源开采过程中裂缝型热储的流体流动方向。



1-渗流入口;2-围压入口;3-围压出口;4-测温点;5-渗流出口;
6-带网格槽的弧形板;7-胶套;8-平直裂隙组;9-花岗岩试样

图2 平直裂隙组径向渗流试样夹持器

Fig. 2 Specimen holder for radial seepage tests on a set of straight cracks

1.2 实验步骤

1) 首先将5个试样A/B按照顺序依次堆叠。径

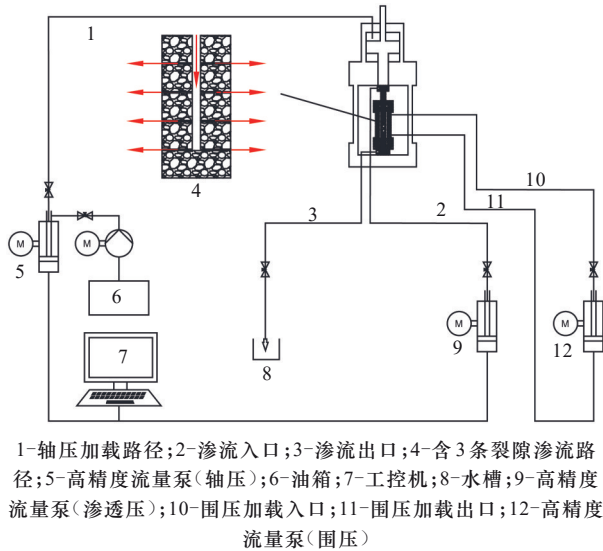


图3 三轴渗流测量系统图

Fig. 3 Diagram of the three-axis seepage measurement system

向单裂隙渗流测试时:首端放置一个试样B,剩余四个试样均选择试样A。

2)将堆叠好的试样先裹一层铜皮,再用橡胶套包裹,首端朝上安置在轴/径向裂隙试样夹持器内。保持围压 10 MPa 不变,以 0.1 MPa/s 加载速率,加载轴压即法向应力至设定压力,即 $\sigma_c = 30, 40$ 和 50 MPa。按照 2 000~4 000 m 的中深层热储中变质岩埋深进行分析,压力梯度 25 MPa/1 000 m 计算,最低将达到 50 MPa,这里实验最大法向应力设置为 50 MPa。

3)不同法向应力水平下,花岗岩均以 6 °C/min 的升温速率从室温加热至预设温度(室温、95 °C 和 150 °C)。设定试验温度的依据为: <90 °C 范围为低温热储,试验期间室温恒定保持在 6 °C,满足温度要求且无需借助温控箱调节温度,这里选室温 6 °C 试验组; 90~150 °C 范围为中高温热储,这里选用 95 °C 试验组; ≥150 °C 范围为高温热储,这里选用 150 °C 试验组。

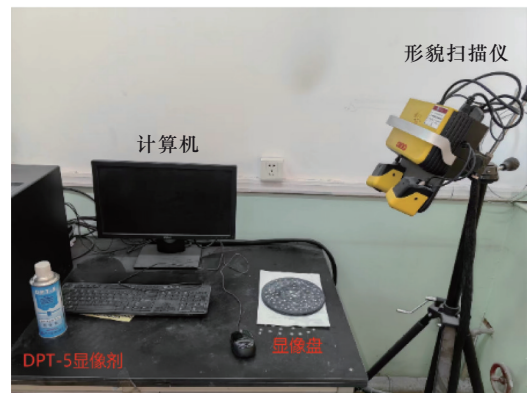
4)保温 30 min 后,以净化水为渗流介质,利用高精恒流泵对试样组上端注入稳定孔隙压(1、3、5 和 7 MPa)^[23,24],代入渗流公式对原位条件下花岗岩径向渗流进行检测。

5)实验后花岗岩组进行纵波波速测试并对结合面的三维形貌结构进行扫描分析,设备如图 4 所示。

完成径向单裂隙渗流测试后,取出所有试样。径向双裂隙渗流测试时,步骤 1 中首端放置两个试样 B,剩余三个试样均选择试样 A,重复步骤 2—4。多裂隙渗流测试过程中,按上述规律排列堆叠,依次增加试样 B 的数量,分别完成径向 1、2、3 和 4 裂隙



(a)纵波波速测量仪



(b)三维形貌扫描仪系统

图4 径向渗流实验设备

Fig. 4 Radial seepage testing equipment

花岗岩不同温度和压力下的径向渗流检测实验。

1.3 理论推导

立方定律是以理想光滑平板为模型推导出来的单一裂隙渗流公式^[25],这里借助单一裂隙岩体的渗流规律,推导裂隙网络、多裂隙岩体渗流计算方法。在多裂隙组合中每个裂隙都有着同样的压力梯度,即进出口压力,因此可以类似电路中并联电阻连接中电位差相等,对并联裂隙等效水力孔径及流量进行计算:

$$h_{eq} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n h_i^3} \quad (1)$$

$$Q = \frac{h_{eq}^3}{12\mu} \frac{\Delta p}{L} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2)$$

式中: h_{eq} 为并联裂隙等效水力孔径, m; h_i 为第 i 条裂隙的水力孔径, m; Q 为渗流通道总渗流量, m^3/s ; Q_i 为第 i 条裂隙的渗流流量, m^3/s ; μ 为水的动力黏度系数, $Pa \cdot s$; Δp 为裂隙内外边界的压差, MPa; L 为渗流长度, m。

Sarkar 等^[18]通过对多个平行裂隙组合进行渗流模拟,最终得出平行网络中不同孔径的裂缝,其网

络流量等效于每个单独裂缝的流量之和,也即公式(2)的推导。

当实验测得多条(以4条为例)等粗糙度裂隙的渗流流量后,分别记为 Q_{01} 、 Q_{02} 、 Q_{03} 和 Q_{04} 。从上述公式(1)、(2)可知,多裂隙径向渗流流量与裂隙数目呈线性叠加的关系。即含4条裂隙的岩体进行渗流时,流过第一条裂隙的流量为 Q_{01} ;流过第2、3和4条裂隙的流量分为:

$$Q_2 = Q_{02} - Q_{01} \quad (3)$$

$$Q_3 = Q_{03} - Q_{02} \quad (4)$$

$$Q_4 = Q_{04} - Q_{03} \quad (5)$$

将 Q_{01} 、 Q_2 、 Q_3 和 Q_4 分别代入渗透率计算公式,即可计算每条裂隙对应的裂隙开度及渗透率。 Q_{01} 为含4条裂隙的多裂隙花岗岩第1条裂隙渗透率 k_1 、裂隙开度 e_1 下的流量; Q_2 、 Q_3 、 Q_4 则分别对应第2、3、4条裂隙的流量,进一步计算出对应的渗透率 k_2 、 k_3 、 k_4 ,裂隙开度 e_2 、 e_3 、 e_4 。在立方定律中假设渗流通道由上下两组光滑、平直、无限长的平行板构成,而实验中径向渗流通道为两组光滑、平直的圆环面,因此需对立方定律做如下修正^[26,27]:

$$Q = Sv = SKJ \quad (6)$$

式中, S 为渗流通道横截面面积, m^2 ; v 为渗流通道流速, m/s ; K 为渗流通道渗透系数, m/s ; J 为水力坡降。其中:

$$S = 2\pi\epsilon e \quad (7)$$

$$\epsilon = \frac{(D-d)}{\ln D - \ln d} \quad (8)$$

$$K = \frac{ge^2}{12\nu} \quad (9)$$

$$J = \frac{\Delta p}{\rho g(D-d)} \quad (10)$$

式中: D 、 d 为开孔试样外径、内径, m ; ϵ 为位于 $[d, D]$ 上的拉格朗日中值点; g 为重力加速度, m/s^2 ; ν 为水的运动黏滞系数, m^2/s ; ρ 为水的密度, kg/m^3 。联立(6)、(7)、(9)和(10)式可得:

$$Q = \frac{\pi\epsilon e^3 \Delta p}{6\mu(D-d)} \quad (11)$$

将式(8)代入式(11)可得裂隙开度:

$$e = \sqrt[3]{\frac{6\mu Q \ln \frac{D}{d}}{\pi \Delta p}} \quad (12)$$

再由达西定律计算渗透率 k :

$$k = \frac{e^2}{12} \quad (13)$$

$$k = \sqrt{\frac{\frac{2}{3} \mu Q \ln \frac{d}{D}}{4\sqrt{3} \pi \Delta p}} \quad (14)$$

上述公式(14)与 Selvadurai 等^[20,21]提到的单裂隙花岗岩径向渗流公式结果是一致的,同时花岗岩基岩渗透率量级较小,在计算中进行了忽略。

2 平行裂隙组流量演化规律

2.1 热力耦合作用对径向多裂隙花岗岩渗流流量的影响

地热开发工程中,径向多裂隙花岗岩受温度-应力耦合的实时作用,不同温度和应力条件下的流量特性发生改变。3 MPa 渗透压、法向应力为 50 MPa 条件下,径向多裂隙(数目:1—4)花岗岩于不同温度下渗流流量的特性如图 5 所示。由图 5 可知,室温~150 °C 升温过程中径向多裂隙(数目:1—4)花岗岩渗流流量呈单调上升趋势,并随着裂隙条数的增多逐渐增大。

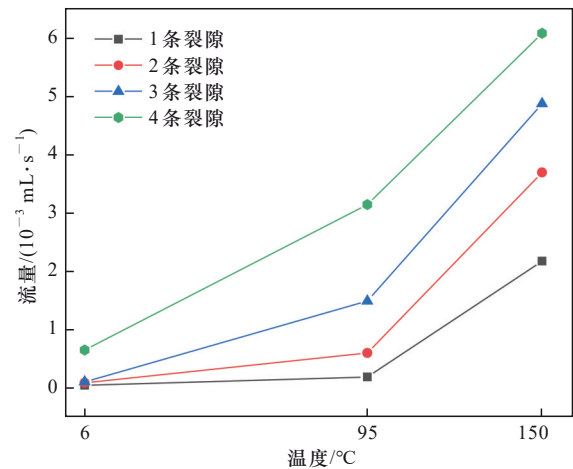


图5 50 MPa 法向应力下,径向多裂隙(数目:1~3)花岗岩径向流量随温度变化曲线

Fig. 5 Curves of radial flow rates of granite with radial multiple fractures (number: 1—3) against temperature with a normal stress of 50 MPa

随着温度升高,矿物颗粒受热发生膨胀,裂隙结合面之间被热膨胀颗粒顶起支撑,宏观径向裂隙张开度增大,形成有效的渗流通道,并且温度升高过程中水的动力黏度逐渐下降,通过裂隙能力增强,故径向渗流流量显著增大。随着裂隙条数增多,宏观径向裂隙面积增大,结合面矿物颗粒热膨胀对渗流流量的增益效果增强。95 °C 温度点相比室温(6 °C),径向多裂隙(数目:1、2)花岗岩组流量分别比径向单裂隙花岗岩组流量增大了 3.25 倍、

8.10 倍。150 ℃ 温度点相比室温 (6 ℃), 径向多裂隙 (数目: 1、2) 花岗岩组流量分别比径向单裂隙花岗岩组流量增大了 1.70 倍、2.24 倍。随着温度的升高, 径向多裂隙花岗岩之间渗流差距逐渐减小, 150 ℃ 高温下矿物颗粒发生软化, 法向应力对结合面的压缩作用增强, 花岗岩组更加稳定, 结合面张开度扩张受到限制。

以室温 (6 ℃)、渗透压分别设置为 1、3、5 和 7 MPa 为对象进行详细分析, 由图 6(a, b) 可知, 在 30~50 MPa 法向应力范围, 径向多裂隙 (裂隙数目: 1~4) 花岗岩径向渗流流量随着法向应力的提高单调递减, 可分为两个阶段: 第一阶段, 30~40 MPa 范围内快速降低阶段, 随着法向应力的升高流量迅速降低, 40 MPa 相对 30 MPa 渗流流量降低了 70% 左

右。第二阶段, 平稳阶段, 40 MPa 后法向应力对渗流流量的影响能力大幅衰减, 渗流流量降低了 18% 左右。第一阶段, 法向应力增大致使裂隙结合面之间相互挤压形变, 微凸体之间相互滑动啮合、甚至发生破裂, 结合面之间较大微观裂纹闭合充填, 径向渗流流量迅速降低; 第二阶段 40 MPa 压力下, 裂隙面接触面积增大、结合更加致密闭合, 裂隙抵抗变形能力增强。法向应力升至 50 MPa 压力时径向宏观裂隙与微裂隙变形相比第一阶段大幅减小, 渗流流量降低速率大幅下降。

不同数目 (数目: 1~4) 径向多裂隙花岗岩渗流流量随法向应力的递减规律均符合指数函数方程, 公式如下, 其中 a 、 b 、 c 为因变量参数:

$$Q = a^{-\sigma_c} + bN + c. \quad (15)$$

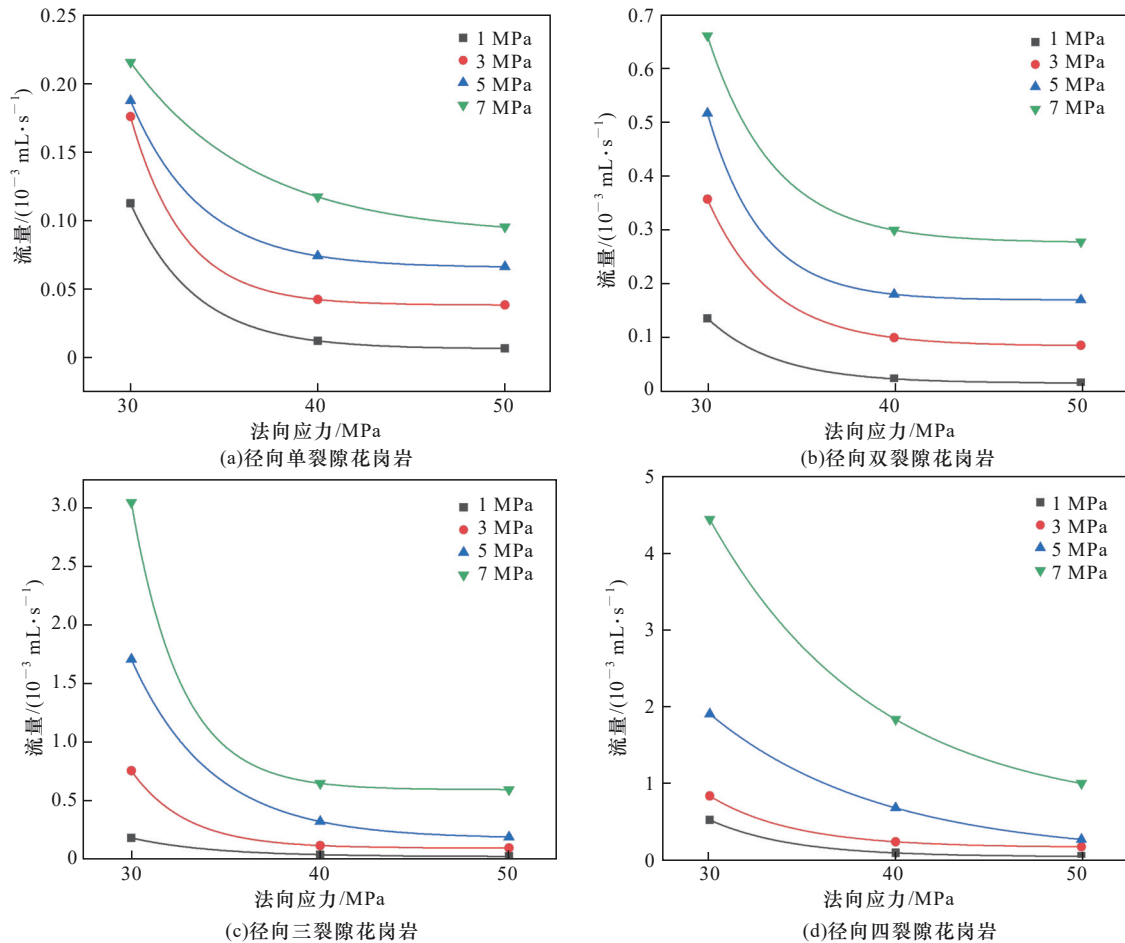


图 6 不同裂隙数下, 径向多裂隙花岗岩流量与法向应力关系曲线图

Fig. 6 Relationships between flow rate and normal stress in radially fractured granite with different numbers of fractures

2.2 裂隙条数对流量的影响

以室温 (6 ℃) 条件下为研究对象, 不同渗透压 (1~7 MPa) 和法向应力 (30~50 MPa) 下径向多裂隙 (数目: 1~4) 花岗岩径向渗流流量变化特征, 如图 7 所示。渗流流量随渗透压的增加基本呈线性正

相关态势, 在实验渗透压变化范围内, 裂隙渗流仍属于层流, 多裂隙花岗岩径向渗流规律也符合达西定律。多裂隙 (数目: 1~4) 花岗岩径向渗流流量随着裂隙数目增大呈线性快速增大, 拟合公式如表 1 所示, 其中 Q 为花岗岩的渗流流量, N 为裂隙条数。

表 1 不同法向应力下,径向多裂隙花岗岩流量与裂隙条数关系拟合公式
Table 1 Fitting equations for relationships between flow rate and number of fractures in radially fractured granite with different normal stresses

法向应力/ MPa	渗透压/ MPa	拟合曲线	相关系数 R^2
30	1	$Q=0.08+0.13N$	0.744 79
	3	$Q=0.06+0.24N$	0.938 79
	5	$Q=0.51+0.63N$	0.918 26
	7	$Q=1.68+1.51N$	0.945 28
40	1	$Q=0.02+0.02N$	0.899 47
	3	$Q=0.02+0.06N$	0.914 90
	5	$Q=0.17+0.19N$	0.920 47
	7	$Q=0.65+0.55N$	0.847 35
50	1	$Q=0.007+0.01N$	0.982 24
	3	$Q=0.002+0.04N$	0.942 34
	5	$Q=0.02+0.06N$	0.946 83
	7	$Q=0.26+0.30N$	0.974 84

如图 7(a—b)所示,在 1~7 MPa 范围内,随着渗透压增大径向多裂隙(数目:1~4)花岗岩渗流单调递增,并且随着裂隙数目的增多不同渗透压下流量差距逐渐增大,线性拟合公式中因变量系数随之逐渐增大。以图 7(a)为例,裂缝数目为 1、2、3 和 4 时,不同渗透压下花岗岩的流量均值分别为 0.17×10^{-3} 、 0.42×10^{-3} 、 1.4×10^{-3} 和 2.58×10^{-3} mL/s,不同渗透压下最大流量与最小流量的比值逐渐递增分别为 1.9 倍、4.9 倍、16.5 倍和 20.6 倍。渗透压力加大,对流体在渗流通道内的渗流促进作用增强,提升了岩样的渗透率。随着裂隙数目的增多这一效果变得更为显著,渗透压对径向多裂隙花岗岩渗流的影响增大。流量随渗透压的增加呈线性正相关,说明花岗岩径向裂隙渗流仍属于层流,符合达西定律。同时总体上流量随裂隙数目的增加呈线性增长趋势,这一规律在不同法向应力、渗透压差下基本保持一致。

2.3 径向多裂隙花岗岩径向渗透率变化特征规律
由上述实验结果可知,径向多裂隙花岗岩组渗流实验中,试样参数及原位条件不变的情况下,增加裂隙数目过程中多裂隙花岗岩流量线性增大,这与公式(1)—(5)推论相符,渗透率是表征裂隙传导流体能力的重要参数,径向多裂隙花岗岩的渗透率并不是单一裂隙渗透率的简单相加。

如图 8 所示,不同渗透压(1~7 MPa)时,40 MPa 法向应力下径向多裂隙花岗岩渗透率随裂隙数目变化规律与 50 MPa 法向应力条件相似,均符合幂

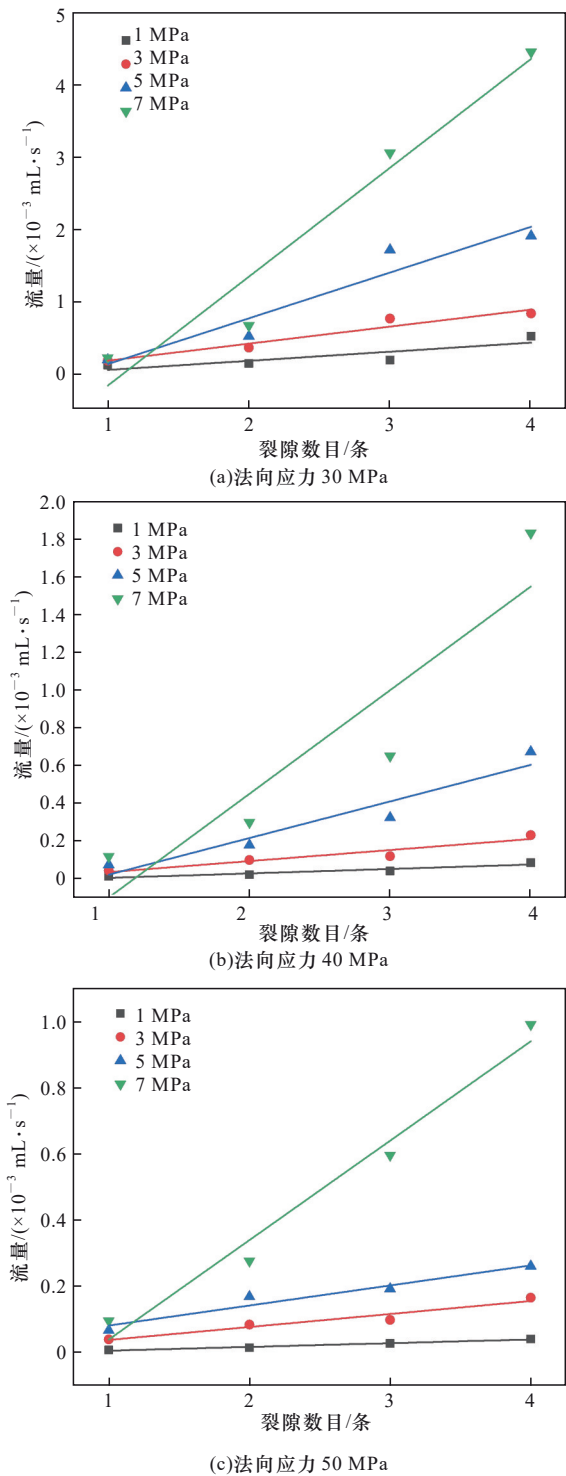


图 7 100 °C 点不同法向应力下,径向多裂隙花岗岩渗流随着裂隙数目变化特性
Fig. 7 Characteristics of radial multi-fracture granite seepage as a function of the number of fractures with different normal stresses at 100 °C

函数变化规律,拟合公式见表 2,其中 k 为渗透率、 N 为裂隙条数、 a 、 b 为因变量参数。由表 2 不同法向应力、渗透压拟合公式参数变化可知,相同法向应力条件,随着渗透压的增大,参数 a 单调递增,参数 b 单调递

减。存在渗透压阈值压力点 5 MPa,5 MPa之前参数 a 的递增趋势明显、参数 b 的下降趋势显著,然而当渗透压超过 5 MPa 以后,参数 a 、 b 的变化趋势开始平缓逐渐稳定。在 1~7 MPa 渗透压范围内,渗透压升高有效促进了流体在渗流通道中的渗流能力,渗透率升高;5 MPa 阈值压力前,渗透压增大有效促进了流体渗流能力,渗透率快速增大;5 MPa 后,在法向应力的约束下,裂隙轴向开度进一步降低,导致渗透压升高对渗流的促进作用减弱,渗透压对渗透率的影响衰减。

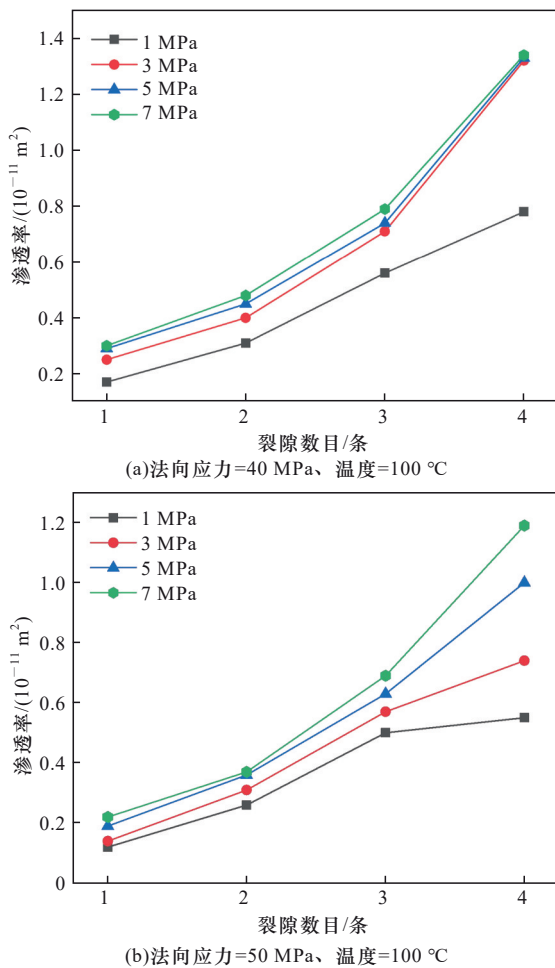


图 8 不同法向应力下裂隙花岗岩渗透率与裂隙条数关系
Fig. 8 Relationships between permeability and the number of fractures in fractured granite with different normal stresses

渗透压 3 MPa、法向应力 50 MPa 条件下,径向多裂隙花岗岩渗透随温度变化曲线如图 9 所示。径向多裂隙花岗岩渗透率随温度变化整体呈上升趋势,并与渗流流量曲线存在些许差异。在 95 ℃ 相对室温(6 ℃)的条件下,随着径向多裂隙花岗岩裂隙数目的增多渗透率增幅逐渐增大,增幅从—6%增至 86.87%;在 150 ℃ 相对 95 ℃ 的条件下,随着径向多裂隙花岗岩裂隙数目的增多渗透率增幅逐渐减

表 2 100 ℃ 不同法向应力及渗透压下,径向多裂隙花岗岩渗透率与裂隙条数拟合($k=a \cdot N^b$)关系

Table 2 Fitting relationships between the permeability of radially fractured granite and the number of fractures ($k=a \cdot N^b$) at 100 ℃ with different normal stresses and osmotic pressures

法向应力/MPa	渗透压/MPa	拟合曲线	相关系数 R^2
40	1	$k=0.15 \times N^{1.21}$	0.993 55
	3	$k=0.22 \times N^{1.16}$	0.903 76
	5	$k=0.26 \times N^{1.05}$	0.902 24
	7	$k=0.27 \times N^{1.04}$	0.928 09
50	1	$k=0.14 \times N^{1.34}$	0.946 86
	3	$k=0.13 \times N^{1.36}$	0.983 74
	5	$k=0.18 \times N^{1.18}$	0.974 86
	7	$k=0.20 \times N^{1.19}$	0.938 09

小,增幅从 300% 降至 50%。随着温度的升高,矿物颗粒受热膨胀,结合面张开度增大,渗透率逐渐提高;95 ℃ 低温下,结合面张开度效果叠加,随着裂隙数目增多形成多条有效渗流通道,渗透率快速增大;150 ℃ 时,多裂隙张开度增大,裂隙数目越多花岗岩组轴向结构越疏松,法向应力对花岗岩组的压缩作用增强,裂隙扩展被限制,渗透率增幅下降。

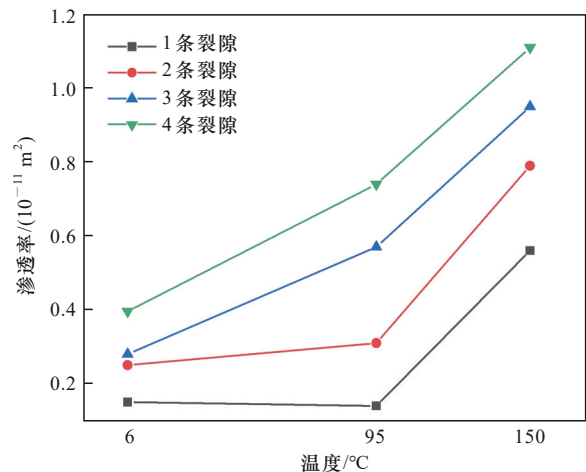


图 9 径向多裂隙花岗岩渗透率随温度变化曲线
Fig. 9 Temperature-dependent permeability curves for radially fractured granite

由图 10 可知,同一渗透压差,在不同温度范围内,随着法向应力的增加,径向渗流裂隙的渗透率整体呈降低趋势,这一趋势不随裂隙数目和温度的变化发生变化。以室温下径向三裂隙花岗岩随法向应力变化为例,30~50 MPa 过程中,40 MPa 法向应力下的渗透率相对 30 MPa 条件下降了 49.47%,50 MPa 法向应力下的渗透率相对 40 MPa 条件下降了 22.91%,40 MPa 后渗透率下降趋势减缓趋于平稳。40 MPa 前,法向应力(轴压)升高,裂隙面法向应力增大相互挤压,微凸体破裂导致裂隙面快速闭合,渗透率快速降低;40 MPa 后,法向应力增大,裂

隙面在相互挤压作用下接触面积进一步增大,使得裂隙面抵抗变形的能力得到增强,多裂隙花岗岩渗透率降低趋势变缓。

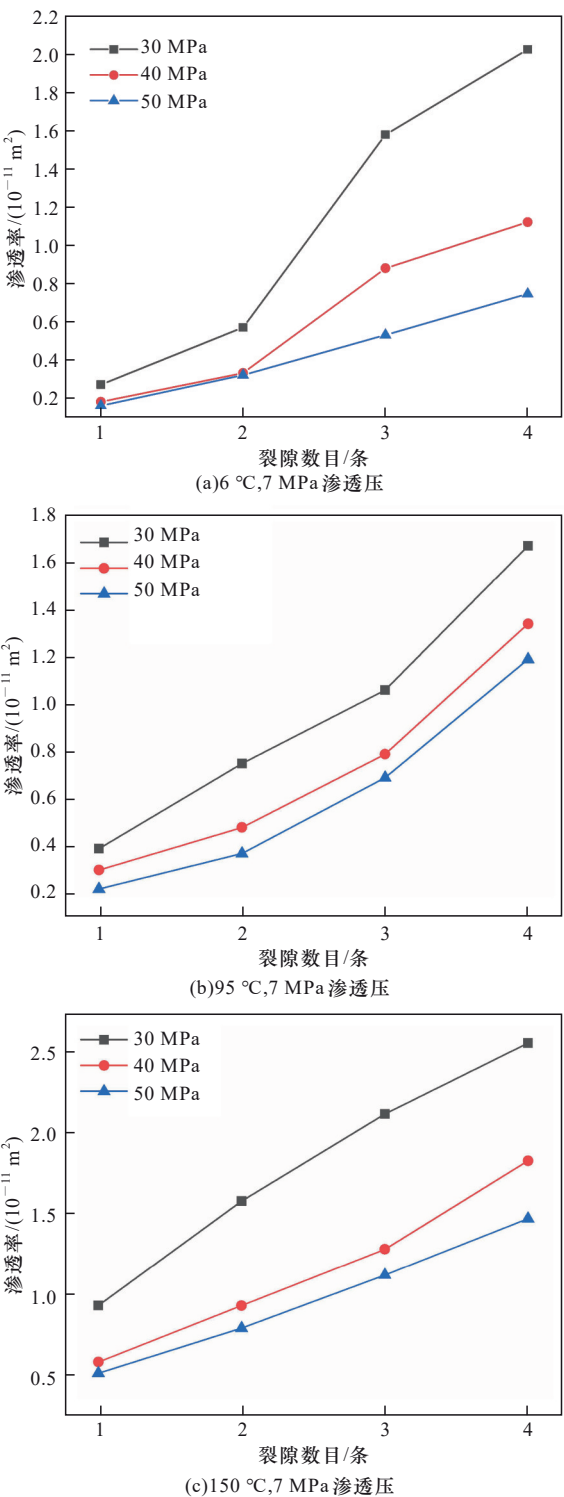


图 10 不同温度条件下裂隙花岗岩渗透率与裂隙条数关系
Fig. 10 Relationships between permeability and the number of fractures in fractured granite at different temperatures

2.4 径向多裂隙花岗岩三维形貌变化特征

波速参数可以对岩体内部整体损伤程度进行

定性宏观评价,通过波速测量仪对不同温度条件下实验后花岗岩(法向应力 50 MPa)试样进行纵向波速测试,检测结果见表 3。50 MPa 法向应力条件下,不同温度点预热处理后花岗岩试样 A/B 纵波波速变化仅为 2% 左右。200 °C 内花岗岩波速的波动较小,温度超过 200 °C 后,波速随温度的升高明显下降^[25],这与此处结论相一致。300 °C 为花岗岩热破裂的临界温度^[25],6~150 °C 温度范围内,岩体内部热损伤微弱,花岗岩热冲击生成次生裂纹较少,热力耦合作用下花岗岩基岩热损伤对渗透率变化的影响可忽略。

表 3 三组对照实验下的波速对比
Table 3 Comparison of wave speeds across three control experiments

试样序号	波速/(m·s ⁻¹)		
	室温(6 °C)	95 °C	150 °C
A1	5 128	5 233	5 013
B2	5 175	5 304	5 037
B3	5 236	5 218	4 944
B4	5 175	5 247	4 860
B5	5 203	5 253	5 048

对实验前后的花岗岩径向裂隙组表面进行三维形貌扫描,得到关于花岗岩平行裂隙组的三维形貌图与点云数据,将三维形貌图按照角度进行剖面轮廓线划分,以 X 轴正向坐标为起点,如图 11 所示。应用 Imageware13 和 Surfer11 软件获得实验前后径向多裂隙花岗岩第一、二裂隙表面形貌云图及表面剖面轮廓线变化特征,如图 12、13 所示。

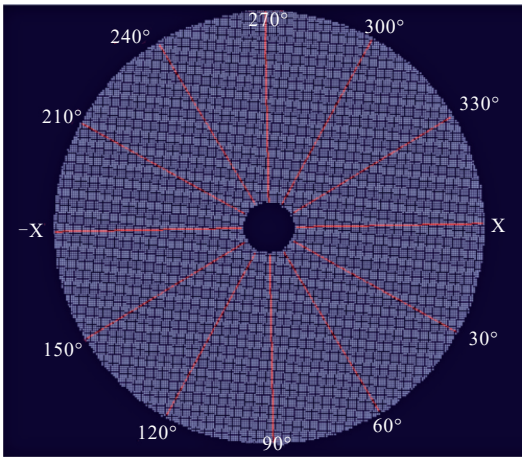


图 11 试样剖面轮廓线角度划分示意图
Fig. 11 Schematic diagram of the angular divisions of specimen cross-sectional profile

由图 12 可知,实验前后对裂隙组表面的几何参数发生明显改变,表面波峰、波谷值存在显著差异。

裂隙轮廓的高差 ξ 、裂隙轮廓均方偏差 R_{rms} 、裂隙轮廓算数平均偏差 R_n 等粗糙度表征参数具体数值,见表4、5所示。在温度、压力的耦合作用下,实验前后粗糙度表征参数变化主要是三种因素相互竞争耦合的影响:法向应力的作用下,结合面之间的微裂隙相互摩擦滑动,局部尖端的微凸体会因为应力集中而发生破坏,矿物颗粒凸起部分磨平。渗流过程

中,水在流经结合面时表面部分矿物颗粒溶解或冲刷损失,产生新的粗糙表面,导致岩体裂隙表面起伏增大。150℃高温下,矿物颗粒发生不可逆热膨胀,高温冷却后仍保持较大的起伏波动。通过图12三维形貌云图可知,在法向应力50 MPa、温度150℃条件下,裂隙表面波峰值增大、波谷值降低。

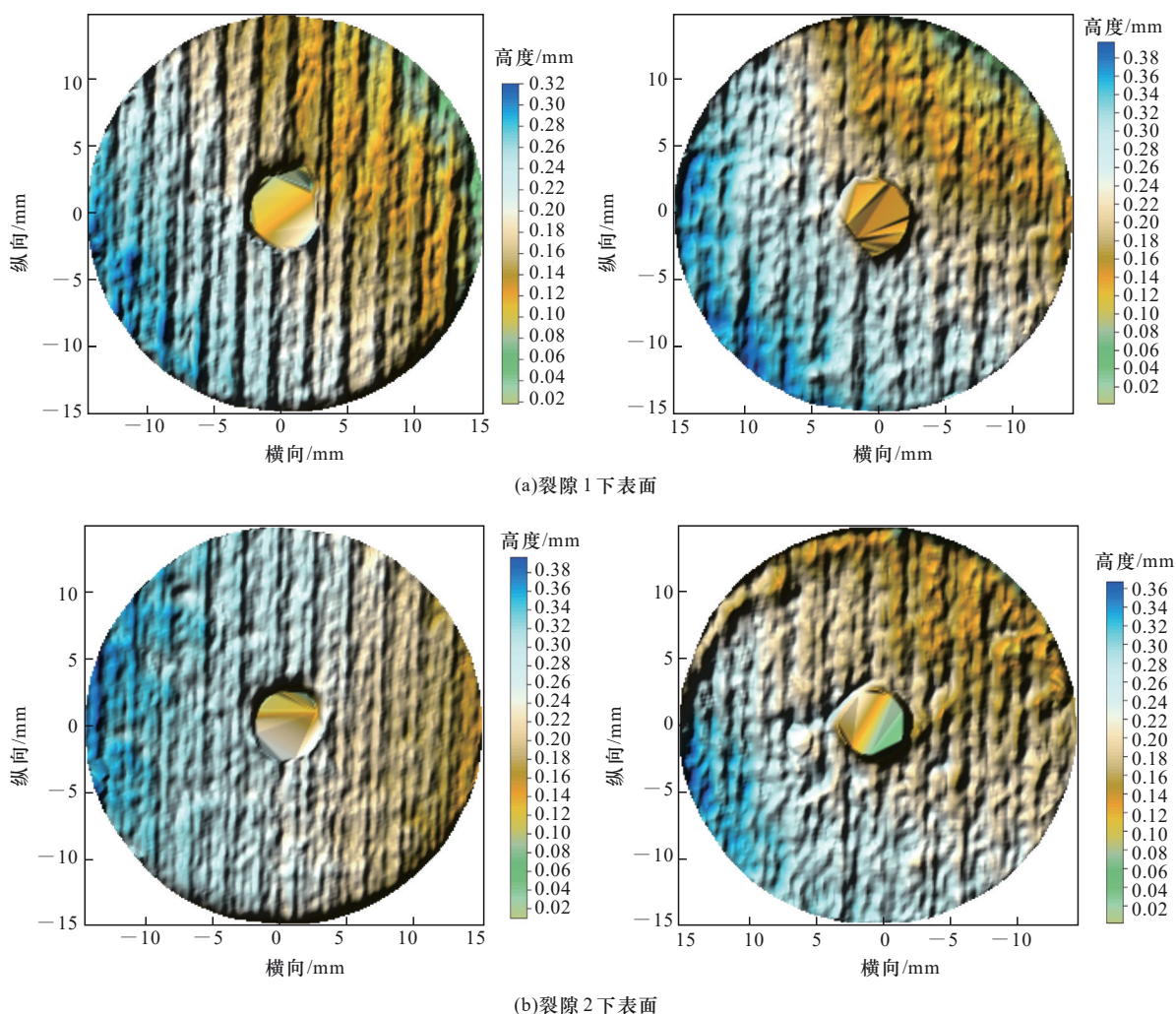


图12 实验前后裂隙表面形貌变化

Fig. 12 Changes in surface morphology of cracks before and after testing

如图13所示,高温、高压条件(150℃、50 MPa)下,渗流水岩溶蚀作用和矿物颗粒热膨胀占据主导地位,实验后剖面轮廓线棱角更加分明、波动更加剧烈,试样表面结合密闭性降低、宏观裂隙张开度增大,生成了新鲜粗糙渗流通道,径向渗流和渗透率增大。

3 结论

利用自研三轴渗流系统,采用稳态法进行渗流实验,系统研究了不同法向应力(轴压)、温度以及

表4 裂隙1粗糙度几何表征参数变化
Table 4 Variations in geometric characterization parameters of roughness in fissure 1

角度	实验前			实验后		
	ξ	R_n	R_{rms}	ξ	R_n	R_{rms}
0°	0.200	0.039	0.054	0.224	0.035	0.047
90°	0.060	0.009	0.014	0.196	0.045	0.054
180°	0.081	0.014	0.018	0.079	0.014	0.019
270°	0.080	0.018	0.024	0.091	0.022	0.026

渗透压下,径向多裂隙花岗岩流量和渗透率随裂隙条数的变化,得出的主要结论如下:

表 5 裂隙 2 粗糙度几何表征参数变化
Table 5 Variations in geometric characterization parameters of roughness in fissure 2

角度	实验前			实验后		
	ξ	R_n	R_{rms}	ξ	R_n	R_{rms}
0°	0.093	0.019	0.022	0.179	0.033	0.044
90°	0.176	0.036	0.051	0.215	0.043	0.057
180°	0.132	0.026	0.034	0.148	0.018	0.029
270°	0.032	0.006	0.007	0.074	0.012	0.016

1) 热力耦合作用(温度:室温~150℃、法向应力:30~50 MPa)下多裂隙花岗岩渗流流量,随温度升高呈单调上升趋势,且随着裂隙条数增多流量呈线性增长。法向应力与径向多裂隙花岗岩流量呈负指数关系衰减,并得出流量相应拟合函数公式。

2) 在 1~7 MPa 渗透压范围内,同一渗透压下,

随着法向应力的增加,径向多裂隙花岗岩的渗透率整体呈降低趋势,且这一趋势不随裂隙数目和温度的变化发生变化;存在阈值压力 5 MPa,阈值压力前随着渗透压升高渗透率快速增大。随着径向多裂隙花岗岩裂隙数目的增多,相对于室温(6℃),95℃时渗透率增幅达到 300%,150℃时渗透率增幅降至 50%。

3) 高温三轴应力条件(150℃、50 MPa)下,径向多裂隙花岗岩纵波波速变化仅为 2%,热力耦合作用下花岗岩基岩热损伤对渗透率的影响可忽略;实验后多裂隙花岗岩三维形貌剖面轮廓线棱角更加分明、波动更加剧烈,水岩溶蚀作用和矿物颗粒热膨胀现象对渗流的影响占据主导;试样结合面密闭性降低、宏观裂隙张开度增大,径向渗流和渗透率增大。

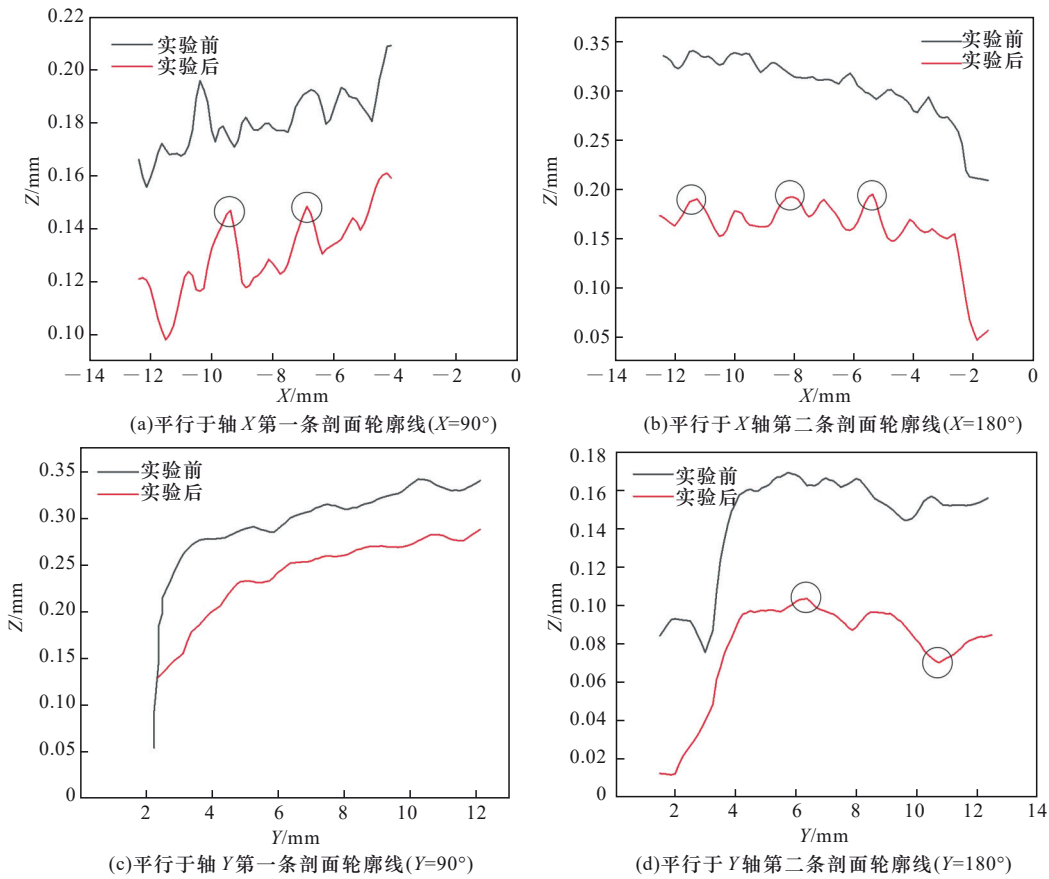


图 13 第一、二条裂隙剖面轮廓线分布变化
Fig. 13 Distribution variations of contour lines in the cross-section of fissure 1 and fissure 2

参考文献:

[1] 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.
[2] 许天福,张伟.增强型地热工程国际发展和我国前景展望[J].石油科学通报,2016,1(1):38-44.
[3] 汪集旻,胡圣标,庞忠和,等.中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J].科技导报,2012,30(32):25-31.
[4] Brown D.The US hot dry rock program-20 years of experience in reservoir testing[C]//International Geothermal Association. World geothermal congress.1995: 2607-2612.

- [5] 陆川,王贵玲.干热岩研究现状与展望[J].科技导报,2015,33(19):13-21.
- [6] 翟海珍,苏正,吴能友.苏尔士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):286-294.
- [7] 赵阳升.岩体力学发展的一些回顾与若干未解之百年问题[J].岩石力学与工程学报,2021,40(7):1297-1336.
- [8] 赵阳升,胡耀青,杨栋,等.三维应力下吸附作用对煤岩体气体渗流规律影响的实验研究[J].岩石力学与工程学报,1999(6):651-653.
- [9] 常宗旭,赵阳升,胡耀青,等.三维应力作用下单—裂缝渗流规律的理论与试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004(4):620-624.
- [10] 武治盛,冯子军,张驰等.两种有效应力下花岗岩和充填体渗透率变化规律研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(5):1391-1398.
- [11] 董文强,冯子军,杜赓,等.高温三轴应力下寒武系鲕状灰岩单裂隙渗流特性研究[J].矿业研究与开发,2022,42(9):105-109.
- [12] 赵鹏.高温三轴应力下粗粒花岗岩渗流与变形特性研究[D].太原:太原理工大学,2020.
- [13] 申林方,曾叶,王志良,等.考虑几何形貌特征的粗糙岩体裂隙渗流特性研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(S1):2704-2711.
- [14] 李正伟.干热岩裂隙渗流—传热试验及储层模拟评价研究[D].长春:吉林大学,2016.
- [15] Sausse J, Genter A. Types of permeable fractures in granite[M]//Harvey P K, Brewer T S, Pezard P A, et al. Petrophysical Properties of Crystalline Rocks. London: Geological Society of London, 2005.
- [16] 张波,李术才,杨学英,等.含交叉多裂隙类岩石材料单轴压缩力学性能研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(9):1777-1785.
- [17] 贾鹏,邵保平,李晓科,等.热作用下花岗岩能量演变的尺度分析[J].太原理工大学学报,2024,55(6):1020-1030.
- [18] Sarkar S, Toksöz M, Burns D. Fluid flow modeling in fractures[R]. Earth Resources Laboratory, 2004.
- [19] 许光祥,张永兴,哈秋龄.粗糙裂隙渗流的超立方和次立方定律及其试验研究[J].水利学报,2003(3):74-79.
- [20] 阴伟涛,赵阳升,冯子军.高温三轴应力下粗、细粒花岗岩力学特性研究[J].太原理工大学学报,2020,51(6):627-633.
- [21] Selvadurai A P S. Normal stress-induced permeability hysteresis of a fracture in a granite cylinder[J]. Geofluids, 2015, 15: 37-47.
- [22] Selvadurai A P S, Boulon M J, Nguyen T S. The permeability of an intact granite[J]. Pure and Applied Geophysics, 2005, 162: 373-407.
- [23] 甘磊,金洪杰,沈振中,等.围压和渗压加卸载作用下石灰岩裂隙渗流特性试验研究[J].岩土工程学报,2023,45(10):2062-2071.
- [24] 钟振,孟醒,胡云进,等.考虑基质渗透性的岩体单裂隙渗流及影响因素的室内和数值试验研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(9):2148-2163.
- [25] 闫治国,朱合华,邓涛,等.三种岩石高温后纵波波速特性的试验研究[J].岩土工程学报,2006(11):2010-2014.
- [26] 冯子军,赵阳升,张渊,等.热破裂花岗岩渗透率变化的临界温度[J].煤炭学报,2014,39(10):1987-1992.

(编辑:杨 鹏)