

# 高温高压下不同结构形式裂缝充填花岗岩热力学特性

阴伟涛, 冯子军

(太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

**摘要:**深部干热岩地热能储层一般为非完整岩体, 含有大量因地质构造运动形成的裂缝。构造裂缝随后被热液充填, 这种储层被称为裂缝充填储层。为指导深部干热岩地热开发, 利用太原理工大学自主研制 600 °C 高温高压岩体三轴试验机研究了山西芦芽山花岗岩母岩 (I 类花岗岩)、热液充填体 (II 类花岗岩)、充填体与母岩胶结界面横向贯通试样花岗岩 (III 类花岗岩)、充填体与母岩胶结界面纵向贯通试样花岗岩 (IV 型花岗岩) 等 4 类花岗岩高温 (500 °C) 高压 (20 MPa 围压) 条件下的热力学特性。研究得出 4 类花岗岩热膨胀系数随温度升高可分为低温缓慢波动段、中低温快速增加段以及中高温快速减小段 3 个阶段。4 类花岗岩弹性模量随温度升高先缓慢增加后快速降低, 溶蚀孔隙结构以及低键合强度矿物的存在导致热液充填体弹性模量最低。此外, 得出裂缝充填花岗岩体内原生裂缝闭合的临界温度大约为 200 °C; 胶结界面附近充填体恢复弱面结构特性的临界温度为 250 °C 左右。最后, 得出了 4 类花岗岩高温高压条件下的破坏形式。裂缝充填花岗岩体内的母岩粗晶粒边界处、热液充填体溶蚀孔隙处和胶结界面处极有可能在水力压裂建造储层过程中形成大范围高效导水通道, 为干热岩地热开采储层建造理论和技术提供新的思路。

**关键词:** 裂缝充填花岗岩; 高温高压; 微观结构; 矿物特征; 热力学特性; 干热岩地热开发  
**中图分类号:** TD315 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)06-2660-15

## Thermal and mechanical properties of fracture-filled granite with different structural forms under high temperature and high pressure

YIN Weitao, FENG Zijun

(Key Laboratory of In-situ Property-improving Mining, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The reservoir of deep hot dry rock (HDR) geothermal energy is not intact rock mass, which includes a large number of fractures induced by geological tectonic movement. The tectonic fractures are subsequently filled by hydrothermal fluid. This kind of reservoir is so-called fracture-filled reservoir. To guide deep hot dry rock geothermal mining, this paper used a 600 °C high-temperature and high-pressure rock mass triaxial testing machine independently developed by the Taiyuan University of Technology to study the thermal and mechanical characteristics under high temperature (500 °C) and high pressure (20 MPa confining pressure) of four types of granite from the Luya Mountain, Shanxi, China, including parent rock (type I granite), hydrothermal fluid backfill (type II granite), cementation interface between the backfill and the parent rock laterally positioned through the specimen (type III granite), and cementation interface between the backfill and the parent rock longitudinally positioned through the specimen (type IV granite). The research shows that the thermal ex-

收稿日期: 2023-06-05 修回日期: 2023-11-01 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0696

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52122405); 山西省基础研究计划 (自由探索类) 资助项目 (202103021223071); 山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”资助项目 (202101060301024)

作者简介: 阴伟涛 (1991—), 男, 河北保定人, 助理研究员。E-mail: ywt2467@126.com

通讯作者: 冯子军 (1983—), 男, 安徽阜阳人, 教授。Tel: 0351-6014865, E-mail: fzj3893811@126.com

引用格式: 阴伟涛, 冯子军. 高温高压下不同结构形式裂缝充填花岗岩热力学特性[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2660-2674.

YIN Weitao, FENG Zijun. Thermal and mechanical properties of fracture-filled granite with different structural forms under high temperature and high pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2660-2674.



移动阅读

pansion coefficient of four types of granite can be divided into three stages with the increase of temperature: the slow fluctuation stage at low temperature, the rapid increase stage at low and medium temperature, and the rapid decrease stage at medium and high temperature. The elastic modulus of four types of granite increases slowly and then decreases rapidly with the increase of temperature. The dissolution pore structure and the presence of minerals with low bonding strength lead to the lowest elastic modulus of hydrothermal fluid backfill. In addition, the critical temperature of the closure of pre-existing fractures in the fracture-filled granite is about 200 °C. The critical temperature for the backfill near the cementation interface to restore the weak-plane structure characteristics is about 250 °C. Finally, the failure modes of four types of granite under high temperature and high pressure are obtained. The coarse grain boundary of the parent rock, the dissolution pores of the hydrothermal fluid backfill and the cementation interface in the fracture-filled granite are very likely to form a large-scale efficient water channel during the reservoir construction by hydraulic fracturing, which provides a new idea for the theory and technology of reservoir construction for HDR geothermal exploitation.

**Key words:** fracture-filled granite; high temperature and high pressure; microstructure; mineral characteristics; thermal and mechanical characteristics; hot dry rock geothermal development

随着中国经济的快速发展, 可再生能源将满足日益增长的低污染、低排放能源需求, 其开发利用引起了世界范围的广泛关注。地热能作为绿色的、储量丰富的可再生能源, 对满足能源需求、实现脱碳转型具有重要作用<sup>[1-5]</sup>。干热岩 (Hot Dry Rock, 简称 HDR, 指温度在 180 °C 以上, 主要赋存于无水或含少量水岩体中的地热资源<sup>[6]</sup>) 是一种典型的深层地热资源, 具有巨大的热能潜力<sup>[7-8]</sup>。从干热岩中提取的热量可以直接用于发电和空间供暖。逐步开发利用干热岩地热资源对我国改变现有能源格局、解决环境问题以及实现“双碳”目标具有重要意义。在干热岩地热开采过程中, 岩体的热膨胀变形和压缩变形时刻影响着地热开采活动。例如, 岩体的热膨胀变形会直接影响钻井施工和钻井围岩稳定性<sup>[9]</sup>。高温高压 (HTHP) 下岩体的压缩特性也将对固井、井筒稳定性、储层建造和储层监测产生重大影响。因此, 研究高温高压下岩体的热力学特性对干热岩地热开采至关重要。

20 世纪 70 年代以来, 世界范围内的专家学者对花岗岩体的热力学特性进行了广泛的实验室研究。GAUTAM、DURHAM、HEARD 等<sup>[10-12]</sup>发现花岗岩的热膨胀系数随温度的升高而增大, 热应变随温度升高呈指数增加。许锡昌和刘泉声<sup>[13]</sup>研究了高温后花岗岩主要力学参数随温度的变化规律, 得出 75、200 °C 分别是花岗岩弹性模量和单轴抗压强度的门槛温度; 杜守继等<sup>[14]</sup>对经历不同高温后花岗岩的力学性能进行了试验研究, 发现温度超过 400 °C 后, 花岗岩的弹性模量和抗压强度随受热温度的升高急剧降低。北野晃一等<sup>[15]</sup>总结了国际上对花岗岩等岩石的弹性模量、热膨胀系数等热力学参数温度效应的研究成果。上述研究主要基于单轴实验, 与三轴应力情况有较大差别。此外, 上述研究多为升温后再冷却的试验条件,

其结果难以反映花岗岩高温状态时的真正特性。

受试验设备制约, 实时高温高压下花岗岩变形特性的实验测定结果较少。ZHAO 等<sup>[16]</sup>采用自主研发的 20 MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机系统深入地研究了  $\phi 200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  大尺寸花岗岩试样在高温三轴应力下的热变形和破坏特征, 得出花岗岩高温高压破坏过程中呈现 X 型剪切破坏, 弹性模量随温度升高呈指数规律减小。邵保平和赵阳升<sup>[17]</sup>进行了高温高压下花岗岩中钻孔围岩的热弹性变形的试验研究, 得出钻孔围岩的热变形可分为 3 个阶段, 高温下钻孔围岩的弹性模量随温度的升高呈负指数规律减小, 并且高温不同埋深应力下钻孔围岩的热膨胀系数不同。ZHOU 等<sup>[18]</sup>研究了 200 °C 三轴应力下花岗岩的强度、变形特性, 发现温度升高会引起花岗岩抗压强度和弹性模量的明显热劣化。万志军等<sup>[19]</sup>进行了原位条件下花岗岩的破坏试验研究, 得出随着围压的增加, 花岗岩体的破坏形式逐渐由脆性拉伸破坏转变为剪切破坏。为了探究高温作用对花岗岩热力学特性的影响机理, YANG 等<sup>[20]</sup>利用显微 CT 技术研究了花岗岩高温下的力学特性, 分析了花岗岩的力学特性与热破裂的关系。HUANG 等<sup>[21]</sup>利用扫描电子显微镜 (SEM) 观测了高温下花岗岩的裂缝特征, 讨论了花岗岩力学特性的变化机理。HOMAND-ETIENNE 和 HOUPTERT<sup>[22]</sup>对致密花岗岩在热作用下形成的裂缝进行了深入研究, 发现经热处理后, 岩石连通性提高并产生了新裂缝, 导致其力学性能劣化, 新裂缝的长度取决于晶粒形状和尺寸。ZHAO 等<sup>[23]</sup>发现温度超过 573 °C 后, 石英矿物的相变导致花岗岩力学性能急剧减弱。上述研究主要集中于完整、细粒花岗岩 (如鲁灰花岗岩<sup>[16-17,19]</sup>, Jalore 花岗岩<sup>[10]</sup>)。

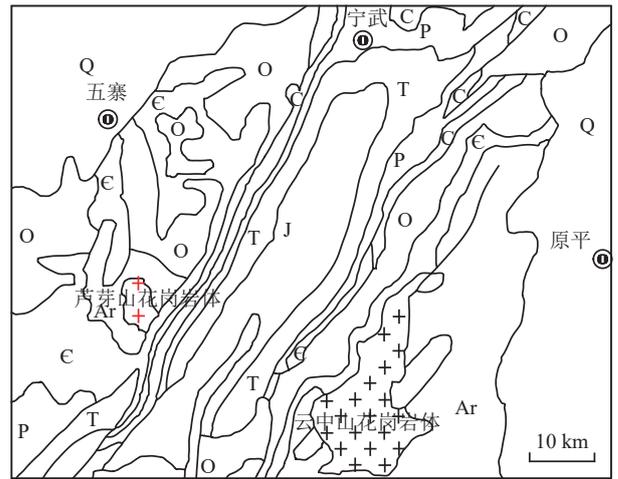
研究表明,花岗岩的矿物组成和微观结构将直接影响高温条件下热破裂的剧烈程度,进而影响岩体的热力学性能<sup>[24-26]</sup>。近年来,通过多处野外花岗岩露头调查研究,我们发现天然深层干热岩体多为含热液充填体的裂缝充填花岗岩<sup>[27]</sup>。不同的成岩环境导致深层干热岩与浅层细粒花岗岩在矿物学特征等方面有显著差异,这进一步导致了高温高压条件下两者热力学特性的差异<sup>[28-30]</sup>。因此,目前关于浅层细粒花岗岩的研究成果难以应用于深层干热岩地热开采,进行深层干热岩体热力学特性研究势在必行。为了揭示高温高压下深层花岗岩的特征,以更准确地指导干热岩地热开采,笔者进行了高温三轴应力条件下花岗岩母岩、热液充填体及裂缝充填花岗岩热力学特性的研究。

### 1 试验设备与方法

#### 1.1 样品制备

用于裂缝充填花岗岩物理力学性质研究的试件全部取自中国山西芦芽山。如图 1 所示,芦芽山花岗岩体形成于古元古代吕梁期的岩浆活动<sup>[31]</sup>,该区花岗岩的性态代表了深层干热岩体的特征,是深层干热岩性态研究难得的样品采集区<sup>[27]</sup>。

如图 2 所示,裂缝充填花岗岩含有花岗岩母岩、热液充填体及胶结界面 3 部分。为彻底研究裂缝充填花岗岩的物理力学性质,笔者选取了 4 类花岗岩样品进行试验: I 类花岗岩——母岩,该类花岗岩试样取自裂缝充填花岗岩的母岩段,如图 2(b) 所示。II 类花岗岩——热液充填体,该类花岗岩试样取自裂缝充填花岗岩的充填体段,如图 2(c) 所示。III 类花岗岩,该类花岗岩试样沿垂直于充填体与母岩胶结界面方向取心得到,包括充填体与母岩,且 2 者间的胶结界面大致纵向贯通试样,如图 2(d) 所示。IV 类花岗岩,该



注: Q—第四系; O—奥陶系; P—二叠系; T—三叠系; C—石炭系; N—新近系; Ar—太古界; C—寒武系; J—侏罗系。

图 1 山西中北部吕梁期花岗岩分布<sup>[31]</sup>

Fig.1 Liliang period granite distribution diagram in north-central Shanxi<sup>[31]</sup>

类花岗岩试样沿平行于胶结界面方向取心得到,同样包含充填体和母岩,且 2 者间的胶结界面大致纵向贯通试样,如图 2(e) 所示。为了尽量消除样品差异带来的影响,同一类型样品不少于 3 块,而且全部在同一岩块中取得。所有样品经取心、磨制、精加工成直径 50 mm、长度 100 mm 的圆柱形试件进行试验。

为了研究裂缝充填花岗岩的矿物组成、晶粒尺寸、微观结构和矿物含量等矿物学特征,笔者对花岗岩母岩以及热液充填体分别进行了 X 射线衍射分析和显微薄片观测。显微观测薄片有 3 类:母岩、热液充填体、母岩与充填体胶结界面,所制薄片如图 3 所示。具体显微观测步骤见 DZ/T 0275.4—2015<sup>[32]</sup>。显微观测结果如图 4 所示,裂缝充填花岗岩母岩及热液充填体矿物组成、含量、尺寸及其性质见表 1。

如图 4 和表 1 所示,花岗岩母岩与热液充填体皆为多种矿物胶结而成的非均质岩体。花岗岩母岩含

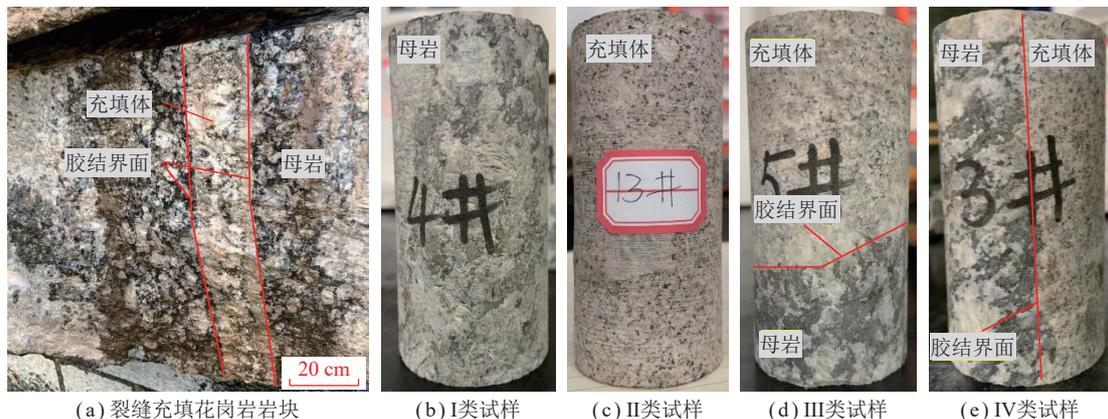
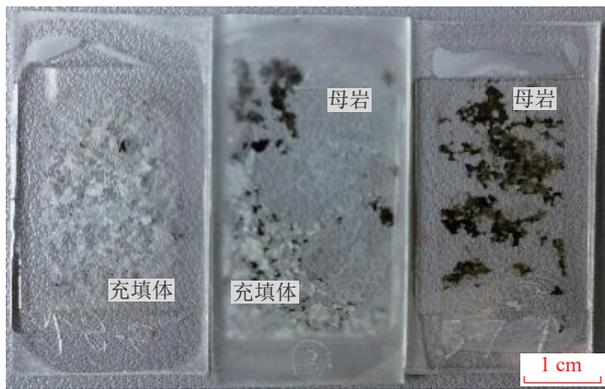


图 2 山西芦芽山裂缝充填花岗岩

Fig.2 Fracture-filled granite in Luya Mountain, Shanxi



(a) 热液充填体 (b) 母岩与充填体胶结界面 (c) 母岩

图 3 显微观测薄片

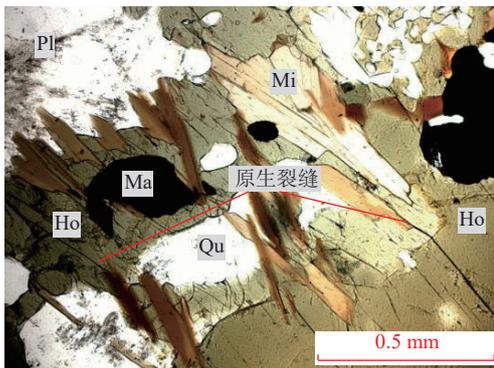
Fig.3 Thin sections for micro-observation

有较多粗晶体颗粒, 晶粒尺寸最大可超过 6 mm。此外, 母岩 (主要为角闪石) 中含有较多原生裂缝 (图 4(a))。热液充填体整体为细粒结构, 最大晶粒尺寸约为 1.5 mm。室温下, 充填体内仅含有少量原生裂缝。此外, 充填体含有较多的与图 4(d) 相同的蜂窝型溶蚀孔隙 (图 4(b))。裂缝充填花岗岩胶结界面附近几乎没有原生裂缝 (图 4(c)),

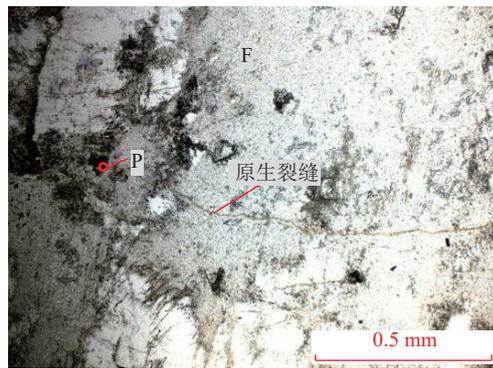
这是由于高温充填体会侵入到胶结界面附近的母岩 (主要在角闪石) 中, 形成“愈合”区域<sup>[27]</sup>。由上述观测结果可知, 裂缝充填花岗岩胶结界面附近矿物组成和晶粒尺寸差异最大, 矿物间胶结情况最复杂。

1.2 试验设备与方法

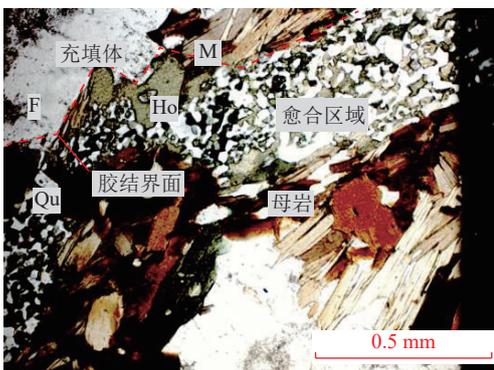
本文试验所用设备为太原理工大学自主研制 600 °C 高温高压岩体三轴试验机, 如图 5 所示。试验机主要包括压力框架、加热系统、高温三轴应力室、温压控制测试系统等, 可进行高温 (最高温度 600 °C) 高压 (最大围压 60 MPa) 条件下不同岩体三轴物理力学试验。如图 5(a) 所示, 轴向压力通过钢制过渡件传递给试样, 而试样的轴向变形会引起轴压头产生的相同位移。2 个光栅位移传感器与钢制过渡件刚性连接 (图 5(b)), 通过光栅位移传感器测量轴压头位移以获得试样的轴向变形。光栅位移传感器通过线缆与计算机连接, 以实时记录试样的轴向变形。此外, 在试验过程中, 高温试样与钢制过渡件之间始终保持冷水循环, 防止高温传递到轴压头。因此, 试验系统可以在安全温度下运行, 高温也不会导致测试结果出现偏差。



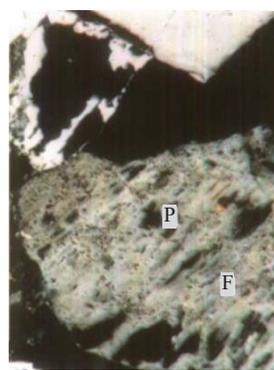
(a) 花岗岩母岩



(b) 热液充填体



(c) 充填体与母岩胶结界面



(d) 蜂窝型溶蚀孔隙<sup>[33]</sup>

注: Ho—角闪石; Pl—斜长石; Mi—云母; Ma—磁铁矿; Qu—石英; F—长石; P—孔隙。

图 4 裂缝充填花岗岩显微观测

Fig.4 Micro-observation images of fracture-filled granite.

具体试验步骤按如下方法进行: ① 测量不同类型裂缝充填花岗岩试样尺寸, 随后装入三轴压力试验机; ② 考虑到试验机工作条件以及尽可能真实地模拟

HDR 储层的温度和压力条件, 将试样先后施加轴压 ( $\sigma_1$ ) 及围压 ( $\sigma_3$ ) 至 20 MPa 并保持不变; ③ 压力稳定后将试件升温至预定目标温度 (100、150、...、500 °C),

表 1 裂缝充填花岗岩主要矿物性质

**Table 1 Properties of minerals of fracture-filled granite**

试件	矿物组分	矿物质量分数/%	晶体颗粒平均尺寸/mm	热膨胀系数/ $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [34]
花岗岩母岩	斜长石	44	5.4	4.0
	石英	23	0.7	11.0
	角闪石	21	6.5	8.0
	云母	10	1.9	3.0
	磁铁矿	1	1.5	—
	其他	1	—	—
	充填体	长石	46	1.5
石英		45	1.0	11.0
云母		8	0.6	3.0
其他		1	—	—



(a) 试验机



(b) 光栅位移传感器放大

图 5 高温高压岩体力学试验机

Fig.5 HTHP rock mechanics triaxial testing machine

升温速率  $1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$ , 升至目标温度后保温  $2 \text{ h}$  以确保试样达到热平衡<sup>[35]</sup>。④ 保温完成后, 保持温度与围压不变, 增加轴压至  $100 \text{ MPa}$ , 轴压增量为  $2 \text{ MPa/s}$ , 测得目标温度下试样的弹性模量。随后, 以  $2 \text{ MPa/s}$  的速率将轴压降至  $20 \text{ MPa}$ 。轴向压力加载的具体路径如图 6 所示; ⑤ 重复步骤③和④, 获得 4 类花岗岩试

样在不同目标温度下的弹性模量; ⑥ 在升温过程中, 通过光栅位移传感器连续自动测定轴压头位移, 进一步得到 4 类花岗岩试样不同目标温度下的热变形及热膨胀系数。

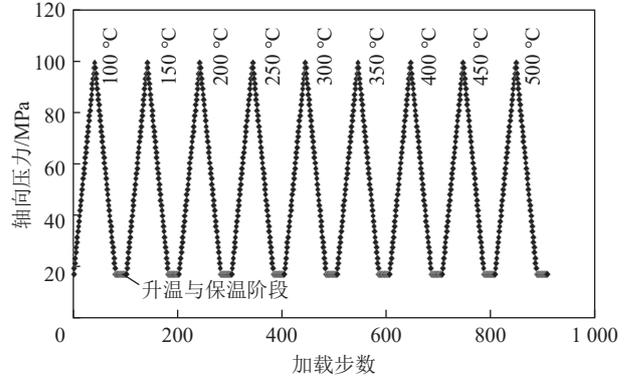


图 6 轴向压力加载示意

Fig.6 Diagram of loading process of axial pressure

热膨胀系数的定义为物体的温度每升高  $1 \text{ } ^\circ\text{C}$ , 其单位长度的伸长量。热膨胀系数<sup>[36]</sup>表达式为

$$\frac{dL}{L} = \alpha dT \quad (1)$$

式中,  $L$  为物体长度;  $dL$  为温度变化  $dT$  情况下物体长度的改变量;  $\alpha$  为热膨胀系数。

对式 (1) 进行积分可得

$$\int_{L_1}^{L_2} \frac{dL}{L} = \int_{T_1}^{T_2} \alpha dt \quad (2)$$

计算可得

$$L_2 = L_1 e^{\alpha(T_2 - T_1)} \quad (3)$$

展开级数可得

$$e^{\alpha(T_2 - T_1)} = 1 + \alpha(T_2 - T_1) + \dots + \frac{\alpha^n (T_2 - T_1)^n}{n!} \quad (4)$$

式中,  $L_1$ 、 $L_2$  分别为  $T_1$  和  $T_2$  温度时物体的长度。

考虑到  $\alpha$  数值很小, 故可省略式 (4) 中 2 次项以后的项, 得到

$$e^{\alpha(T_2 - T_1)} = 1 + \alpha(T_2 - T_1) \quad (5)$$

将式 (5) 代入式 (3) 可得:

$$\alpha = \frac{L_2 - L_1}{L_1 (T_2 - T_1)} = \frac{\Delta L}{L_1 \Delta T} \quad (6)$$

峰前阶段花岗岩的变形可以分为裂纹闭合压密阶段、线弹性变形阶段、裂纹稳定扩展阶段和裂纹不稳定扩展阶段<sup>[18]</sup>。轴向应力在裂纹闭合应力与裂纹起裂应力的区间即为线弹性变形阶段, 通常岩石的弹性模量等力学参数均通过该阶段应力-应变曲线来确定<sup>[37]</sup>。裂纹起裂应力是侧向应变曲线由线性转换为

非线性的标志点<sup>[37]</sup>。万志军等<sup>[19]</sup>得出 400 °C、25 MPa 下花岗岩裂纹起裂应力约为 125 MPa。因此, 整个试验过程中轴向压力在 100 MPa 以内时, 试样基本上皆处于线弹性变形阶段, 不会产生损伤, 由此得到的弹性模量等力学参数可以认为是真实的。

## 2 裂缝充填花岗岩热变形规律

### 2.1 裂缝充填花岗岩热变形与热膨胀系数变化特征

按照 1.2 节步骤⑥利用光栅位移传感器实时记录花岗岩试样在升温过程中的轴压头位移, 从而得到试样的轴向热应变, 结果如图 7 所示 (轴向热应变为负值表示轴向膨胀变形)。随后, 基于轴向热应变计算得到 4 类花岗岩试样不同温度下的热膨胀系数, 结果如图 8、表 2 所示。

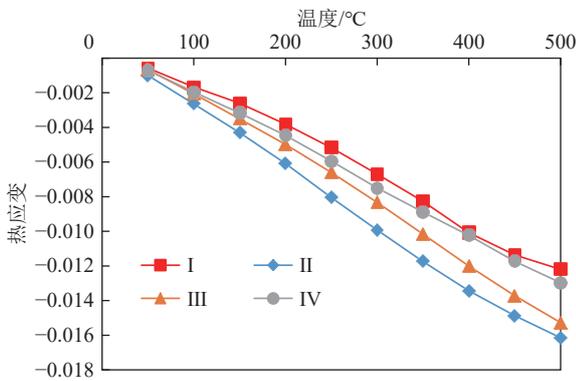


图 7 4 类花岗岩 (I、II、III、IV) 轴向热应变随温度变化曲线

Fig.7 Axial thermal strain of four types of granite (I, II, III, IV) versus temperature

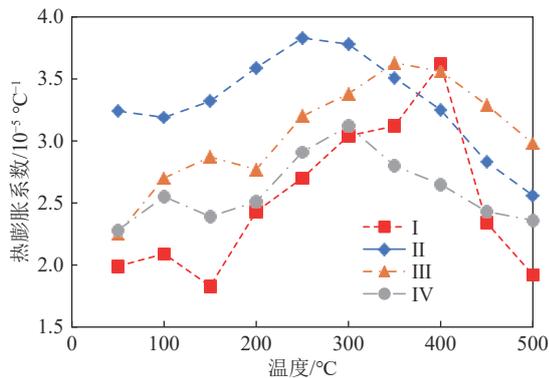


图 8 4 类花岗岩 (I、II、III、IV) 热膨胀系数随温度变化曲线

Fig.8 Thermal expansion coefficient of four types of granite (I, II, III, IV) versus temperature

(1) 热膨胀系数随温度变化的阶段性。如图 8 所示, 4 类花岗岩试件的热膨胀系数随温度变化大体相同, 并且皆可分为 3 阶段: ① 低温缓慢波动段, 该阶

表 2 4 类花岗岩热膨胀系数 3 阶段变化温度

Table 2 Start- and end- temperature of thermal expansion coefficient in three stages of four types of granite

花岗岩类型	I	II	III	IV
低温缓慢波动段开始温度	50	50	50	50
低温缓慢波动段结束温度	150	100	200	150
中低温快速增加段开始温度	150	100	200	150
中低温快速增加段结束温度	400	250	350	300
中高温快速减小段开始温度	400	250	350	300
中高温快速减小段结束温度	500	500	500	500

段 4 类花岗岩试样热膨胀系数随着温度的增加缓慢波动增加; ② 中低温快速增加段, I、II、III、IV 类花岗岩在这一阶段的热膨胀系数分别迅速增大约 98%、20%、30% 和 30%; ③ 中高温快速减小段, 该阶段 4 类花岗岩试样的热膨胀系数随温度升高而迅速减小。与最大值相比, 4 类花岗岩的热膨胀系数分别减小了约 50%、33%、20% 和 25%。

(2) 热膨胀系数随温度变化的阈值温度。从 4 类花岗岩试件热膨胀系数随温度变化的阶段性可知 (参考第 2、3 阶段), 花岗岩热膨胀系数随温度变化是存在阈值温度 (将热膨胀系数随温度变化的阈值温度用  $T_a$  表示) 的。当试验温度低于  $T_a$  时, 4 类花岗岩热膨胀系数随温度的升高而整体增加; 当试验温度超过  $T_a$  后, 4 类花岗岩热膨胀系数开始随着温度的升高而快速减小。由试验结果可知, 4 类花岗岩试件热膨胀系数的  $T_a$  分别为 400、250、350、300 °C。对比 ZHAO 等<sup>[23]</sup>得到的鲁灰花岗岩的变形特性, 本文 4 类花岗岩的热变形同样经历了 3 个阶段, 但具体温度范围和临界温度不同, 这可能是由于花岗岩试样的矿物结构和成分的差异导致的。

(3) 热膨胀系数随温度变化的差异性。4 类花岗岩的热膨胀系数随温度的变化规律也存在差异性。首先, 4 类花岗岩热膨胀系数 3 个阶段的具体温度范围不同。特别是低温缓慢波动段, III 类花岗岩的温度范围值最大, 为 150 °C; II 类花岗岩的温度范围值最小, 为 50 °C。此外, 4 类花岗岩不同温度下的具体热膨胀系数不同。在 100~500 °C、20 MPa 静水压力下, 充填体的热膨胀系数为母岩的 1.1~2.0 倍, 为完整细粒花岗岩 (鲁灰花岗岩) 的 2.4~10.3 倍 (鲁灰花岗岩热膨胀系数为  $6.9 \times 10^{-6} \sim 14.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )<sup>[19,23]</sup>。反映到热应变曲线 (图 7), 相同温度下, 充填体的热变形同样是最大的。

综上所述, 热液充填体在高温作用下具有更好的热膨胀性和更大的热膨胀系数。充填体特有的微观

结构和矿物组成导致其热膨胀系数随温度变化的阈值温度明显低于其他类型裂缝充填花岗岩和鲁灰花岗岩<sup>[19,23]</sup>。

## 2.2 裂缝充填花岗岩微观结构对热膨胀系数的影响分析

岩石的热膨胀系数与其矿物组成、晶体结构和内部裂缝结构有关。因此,笔者进行了裂缝充填花岗岩微观结构显微观测。

由图4可知,裂缝充填花岗岩的母岩和充填体皆含有原生裂缝。在低温缓慢波动阶段,花岗岩矿物晶体的部分热膨胀导致原生裂缝闭合<sup>[38]</sup>。再加上母岩和充填体皆含有多种热弹性性质不同的矿物晶体,这便共同导致4类花岗岩热膨胀系数增加缓慢。受充填体高温作用,裂缝充填花岗岩体会形成大量原生裂缝<sup>[27]</sup>,由裂缝充填花岗岩破裂特征可知(图9),受充填体高温作用影响,距离胶结界面3 cm左右的母岩内含有的原生裂缝数量最多,Ⅲ类花岗岩试件包含裂缝数量峰值区域(图2)。因此,Ⅲ类花岗岩试件需要更高温度产生更大的热膨胀量,以闭合原生裂缝。因此,Ⅲ类花岗岩热膨胀系数低温缓慢波动段的温度范围值最大。充填体含有较少的原生裂缝(图9),故Ⅱ类花岗岩只需相对低的温度便可使原生裂缝闭合。因此,Ⅱ类花岗岩热膨胀系数低温缓慢波动段的温度范围值最小。由图8和表2可知,裂缝充填花岗岩热膨胀系数低温缓慢波动段结束温度最高为200℃,综合上述分析可得,裂缝充填花岗岩体内原生裂缝基本闭合的临界温度约为200℃。

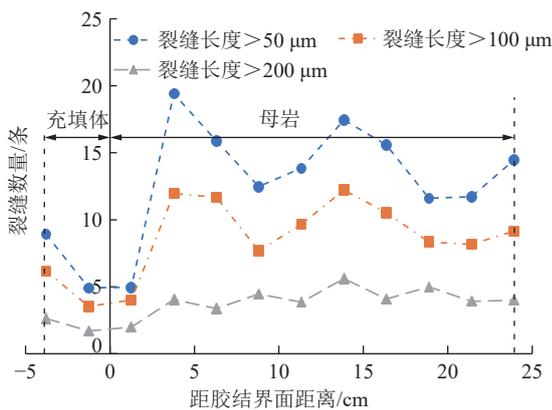


图9 裂缝充填花岗岩不同长度裂缝数量随距胶结界面距离变化规律<sup>[27]</sup>

Fig.9 Change in the number of fractures having different lengths of naturally-fractured-filled granite versus distance to the cementation interface<sup>[27]</sup>

在中低温快速增加段,4类花岗岩试件原生裂缝基本上完全闭合。随着温度继续升高,矿物晶体的热膨胀量便直接表现为试件轴向热变形的增加。由表1

可知,充填体的主要矿物成分为长石和石英,并且石英的热膨胀系数最大,所以Ⅱ类花岗岩试件的热变形最大,相应的热膨胀系数也最大。

在中高温快速减小段,不同矿物晶体间的热应力超过了晶粒间的结合力,试件发生热破裂并形成热致裂缝,使得试件更易被压缩。此外,高温作用下,花岗岩体内矿物晶体发生了变化,部分矿物出现熔融或发生相变<sup>[16,19]</sup>,最终使得4类花岗岩热膨胀系数开始迅速减小。

## 3 裂缝充填花岗岩弹性模量变化规律

### 3.1 弹性模量

按1.2节试验方法得到不同温度下4类花岗岩试件的应力应变曲线,结果如图10所示。选取应力应变曲线中轴向应力为50~80 MPa的直线段进行拟合,得到4类花岗岩试件在不同温度、20 MPa围压下的弹性模量(即平均模量<sup>[39]</sup>),其变化规律如图11所示。弹性模量的具体数值见表3。

与完整细粒花岗岩(如鲁灰花岗岩<sup>[23]</sup>)弹性模量随温度升高而单调减小的变化规律相比,得出4类花岗岩的弹性模量随温度的变化可分为2个阶段(图11):①中低温缓慢增加段,该阶段4类花岗岩试件弹性模量随温度的升高而缓慢增加,其中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类花岗岩弹性模量相较于初始值13.88、10.80、11.68、13.01 GPa分别增加了15.6%、17.6%、19.7%、15.1%(表3);②中高温快速降低段,该阶段4类花岗岩试件弹性模量随温度升高而快速减小,其中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类花岗岩弹性模量相较于峰值16.05、12.70、13.98、14.98 GPa分别降低了22.7%、30.2%、27.2%、27.9%(表3)。花岗岩弹性模量随温度变化的两阶段性表明了花岗岩弹性模量随温度变化存在阈值温度(将弹性模量随温度变化的阈值温度用 $T_E$ 表示),试验得出4类花岗岩试件 $T_E$ 分别为300、200、250、300℃。

4类花岗岩的弹性模量的具体数值具有差异性。在100~500℃内,Ⅰ类花岗岩(母岩)弹性模量是Ⅱ类花岗岩(热液充填体)弹性模量1.2~1.6倍,并且温度越高(400℃以内),差异越大(图11)。此外,与完整细粒花岗岩相比,裂缝充填花岗岩的弹性模量均较小。例如,在100~500℃内,鲁灰花岗岩的弹性模量(45.7~57.0 GPa)是充填体的4.0~4.8倍<sup>[23]</sup>。

### 3.2 裂缝充填花岗岩微观结构对弹性模量的影响分析

由图4和表1可知,裂缝充填花岗岩母岩与热液充填体都是由多种矿物结晶而成。对于非均质岩体,只要温度发生变化,不同热弹性性质的晶体颗粒之间

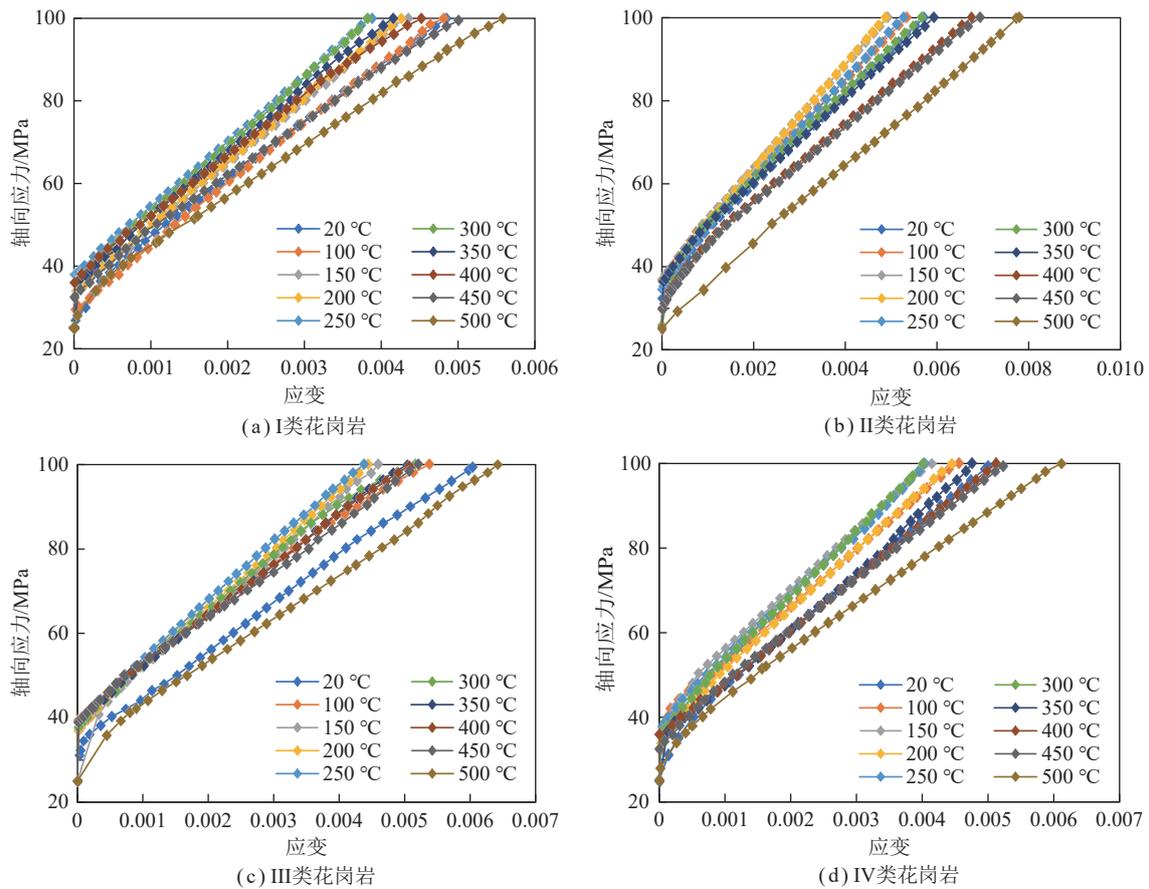


图 10 不同温度下 4 类花岗岩 (I、II、III、IV) 应力应变曲线

Fig.10 Stress-strain curves of four types of granites (I, II, III, IV) at different temperatures

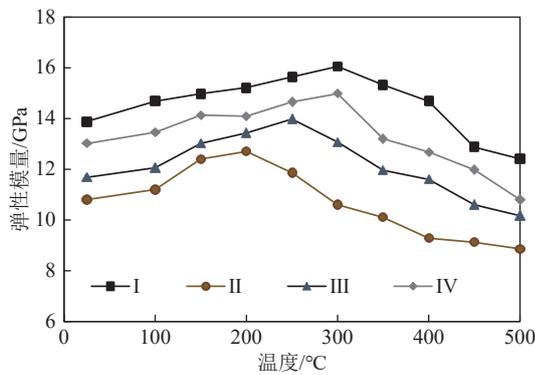


图 11 4 类花岗岩 (I、II、III、IV) 弹性模量随温度的变化规律

Fig.11 Elastic modulus of four types of granite (I, II, III, IV) versus temperature

表 3 不同温度下 4 类花岗岩 (I、II、III、IV) 试件弹性模量  
Table 3 The elastic modulus of four types of granite (I, II, III, IV) at different temperature

温度/°C	弹性模量/GPa			
	I	II	III	IV
25	13.88	10.80	11.68	13.01
100	14.68	11.20	12.06	13.46
150	14.98	12.40	13.02	14.13
200	15.22	12.70	13.43	14.09
250	15.64	11.86	13.98	14.65
300	16.05	10.60	13.07	14.98
350	15.32	10.10	11.96	13.20
400	14.68	9.28	11.60	12.68
450	12.87	9.12	10.60	11.98
500	12.41	8.86	10.17	10.80

以及晶体颗粒与胶结物之间都会产生热应力。当热应力超过结合力时, 便会发生热破裂, 产生裂缝<sup>[40]</sup>。孔隙和裂隙结构直接影响岩石的完整性, 从而影响岩体抵抗弹性变形的能力 (即弹性模量)<sup>[41]</sup>。为此, 为了揭示微观结构对弹性模量的影响机理, 笔者采用徕卡公司 MPV-SP 显微光度计对花岗岩母岩和热液充填体 500 °C 内裂缝 (长度 > 100 μm) 数量进行了观测计

算。观测方法及步骤参考文献<sup>[42-43]</sup>。不同温度下花岗岩母岩和热液充填体裂缝数量如图 12 所示。

(1) 对于 I 类花岗岩 (母岩), 在中低温度段 (100~300 °C), 随着温度的升高, 母岩内裂缝数量随温度升高而波动变化, 但与常温下基本一致 (图 12)。这表明

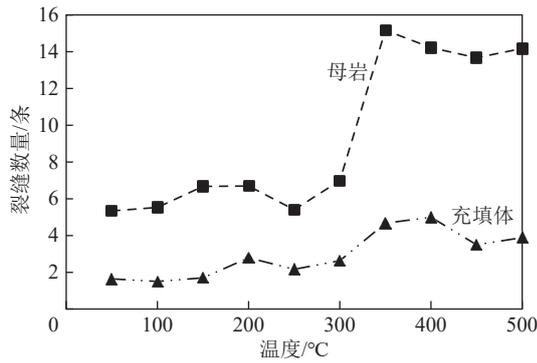


图 12 母岩、充填体热致裂缝数量 (长度 > 100  $\mu\text{m}$ ) 随温度变化曲线

Fig.12 Change of number of fractures with fracture length larger than the 100  $\mu\text{m}$  of the parent rock and backfill versus temperature

300  $^{\circ}\text{C}$  内母岩几乎不产生长度大于 100  $\mu\text{m}$  的大裂缝。在该温度范围内,花岗岩内部不同矿物颗粒发生热膨胀,使得晶体颗粒内部及不同晶体颗粒间的原生微裂缝发生闭合,随着花岗岩试件内部裂缝数量减少、整体性增强,花岗岩抵抗变形的能力得以加强,因此弹性模量随温度的升高而增大。由于完整细粒花岗岩在室温下几乎不含原生裂缝<sup>[9]</sup>,因此,一方面完整细粒花岗岩的弹性模量不存在缓慢增加段;另一方面,完整细粒花岗岩的弹性模量大于裂缝充填花岗岩<sup>[23]</sup>。

进入中高温阶段后 (300  $^{\circ}\text{C}$  以上),随着温度继续升高,晶体颗粒间的热应力也进一步提高,并超过晶体间的结合力,发生热破裂产生裂缝<sup>[42]</sup>,母岩内长度大于 100  $\mu\text{m}$  的裂缝数量迅速增加至峰值并始终保持在较高水平 (图 12),致使其力学性质发生劣化。此外,高温下花岗岩部分矿物晶体发生熔融或相变,导致其塑性增强<sup>[16]</sup>。上述原因共同导致母岩的弹性模量显著降低。这便是 I 类花岗岩弹性模量随温度变化的机理,同时两阶段的临界温度即为弹性模量随温度变化的阈值温度。

(2) 尽管热液充填体中长度大于 100  $\mu\text{m}$  的裂缝数量整体上随着温度的升高同样增加,但是热液充填体内裂缝数量明显小于母岩内裂缝数量,并且总体增量不大 (图 12)。此外,热液充填体的弹性模量在 200  $^{\circ}\text{C}$  之后开始减小 (图 11),这说明热致裂缝数量的增加并不是热液充填体弹性模量下降的主要原因。

岩浆结晶过程中释放出的热水溶液含有  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{HF}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}$  以及  $\text{CO}_2$  等挥发组分,所以热液具有很强的流动性和酸性<sup>[44]</sup>。随后这些热液大范围在岩体构造裂缝中冷却、结晶,形成热液充填体。高温热液冷凝固形成的充填体的主要矿物组分为长石 (表 1),

长石作为可溶骨架会在充填体成岩过程中受到酸性物质的溶蚀作用形成溶蚀孔隙<sup>[45]</sup>。由图 4(b) 可知,热液充填体内会形成直径约为 14  $\mu\text{m}$  的溶蚀孔隙,并且溶蚀孔隙类型主要为与图 4(c) 相同的蜂窝型溶蚀孔隙。蜂窝型孔隙结构一旦形成,即便溶蚀程度较低,岩体的承载能力将显著降低<sup>[46]</sup>。

岩体中的矿物晶体颗粒本质上是原子或团簇在三维空间中经过规律性、周期性排列构成的晶体结构<sup>[47]</sup>。从微观角度来说,弹性模量是晶体内原子之间键合强度的反映。粒子间的键合强度与晶体的热膨胀系数呈负相关的关系,及晶体颗粒的热膨胀系数越大,晶体内粒子 (如原子) 间的键合强度越低<sup>[48]</sup>。由微观结构观察结果 (表 1) 可知,热液充填体内的石英的质量分数达 45%,而石英晶体的热膨胀系数是最大的,这导致充填体晶体内粒子间的键合强度普遍小于母岩晶体内粒子间的键合强度。粒子间键合强度越低,晶体弹性模量越低,这从物理角度解释了充填体弹性模量低于母岩弹性模量的原因。

综上所述,蜂窝型溶蚀孔隙结构以及低键合强度矿物 (主要为石英) 的存在使充填体成为裂缝充填花岗岩的力学性质劣化结构,导致 II 类花岗岩的弹性模量在 200  $^{\circ}\text{C}$  后开始减小,同时也导致充填体弹性模量小于母岩和完整细粒花岗岩<sup>[23]</sup>。温度低于 200  $^{\circ}\text{C}$  时,充填体弹性模量小幅增加的原因同 I 类花岗岩试件。

(3) III 类花岗岩母岩与充填体胶结界面附近,部分高温充填体会侵入母岩,形成愈合区域 (图 4(c))。在愈合作用以及胶结作用影响下,胶结界面附近的母岩以及充填体的整体性得以加强,充填体劣化的力学性质同样得以加强<sup>[49-50]</sup>。因此,对于 III 类花岗岩,即使有充填体的存在,其弹性模量也不会同 II 类花岗岩一样从 200  $^{\circ}\text{C}$  开始下降。由图 11 可知,当温度超过 250  $^{\circ}\text{C}$  后,III 类花岗岩弹性模量开始随着温度的升高而减小,且其变化趋势与 II 类花岗岩相同,这表明温度超过 250  $^{\circ}\text{C}$  后,因胶结作用被强化的充填体恢复了劣化结构性质。由此得出胶结界面附近因胶结作用而强化的充填体恢复力学性质劣化结构的临界温度为 250  $^{\circ}\text{C}$  左右。温度低于 250  $^{\circ}\text{C}$  时,III 类花岗岩弹性模量小幅增加的原因同 I、II 类花岗岩。

(4) 由于 IV 类花岗岩试件内母岩部分是纵向贯通试件的,因此其变形特性主要受母岩力学性质影响。结果表明,IV 类花岗岩弹性模量随温度升高的变化规律与 I 类花岗岩相同,阈值温度皆为 300  $^{\circ}\text{C}$ 。但由于纵向贯通试件的充填体存在,使得 IV 类花岗岩弹性模量介于 I 类花岗岩与 III 类花岗岩之间。

## 4 裂缝充填花岗岩破坏特征

### 4.1 裂缝充填花岗岩破坏试验

基于试验机的运行条件和 HDR 地热开发的实际情况, 在测量完 4 类花岗岩最高温度下的弹性模量后, 进行了 4 类花岗岩 500 °C、三轴应力 ( $\sigma_3=20$  MPa) 下的全应力应变破坏试验。破坏试验中应力和应变由试验机自动采集和记录, 由此得到完整的应力-应变曲线, 结果如图 13 所示。表 4 为 4 类花岗岩破坏试验中得到的特征力学参数。

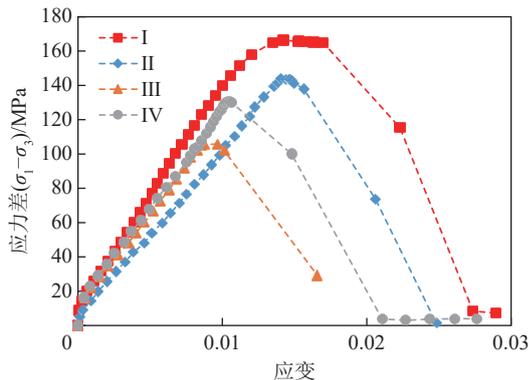


图 13 500 °C 下 4 类花岗岩应力差-应变曲线 ( $\sigma_3=20$  MPa)

Fig. 13 Differential stress-strain curves of four types of granite at 500 °C ( $\sigma_3=20$  MPa)

表 4 500 °C 下 4 类花岗岩破坏试验力学参数

Table 4 Mechanical parameters of four types of granite in the failure test at 500 °C

花岗岩类型	峰值应力/MPa	峰值应变	塑性流动阶段应力差/MPa
I	186	0.015	166
II	164	0.014	144
III	126	0.009	106
IV	150	0.010	130

由图 13 可知, 4 类花岗岩试件的全应力-应变曲线皆经历了弹性阶段、塑性流动阶段和破坏阶段。在弹性阶段, 试件轴向压缩变形随着轴压的增加大致呈线性增加。当轴压进一步增加至某一特定值时 (表 4), 试件开始进入塑性流动阶段, 这是低温或低压条件下花岗岩变形所不具备的<sup>[51]</sup>。这表明高温、高围压条件能够促进花岗岩的弹-塑性转变, 这是花岗岩矿物组成和微观结构变化的结果<sup>[35,52]</sup>。此阶段试件轴压基本保持不变, 但轴向压缩变形迅速增加, 岩石表现出较大的侧向扩展变形, 试件体积急剧增大<sup>[16]</sup>, 最终导致试件发生破坏。

由图 13 和表 4 可得出: ① 母岩抗压强度高于充填体, 2 者相差近 13%。由图 11 可知, 500 °C 下母岩

弹性模量比充填体弹性模量高出近 29%, 表明在高温高压条件下, 相较于花岗岩母岩, 充填体有着更加劣化的力学性质。这可能与充填体内的矿物组成和溶蚀孔隙结构有关。② 对比 III、IV 类花岗岩试件与 I、II 类花岗岩试件抗压强度可知, 由于胶结界面结构存在, III、IV 类花岗岩试件抗压强度远低于母岩和充填体。其中 I 类花岗岩试件与 III 类花岗岩试件最大相差 48%。③ 结合图 11 可知, II 类花岗岩试件弹性模量是小于 III、IV 类花岗岩的, 但在 500 °C、20 MPa 静水压力下 III、IV 类花岗岩会先发生破坏。这表明虽然充填体在高温高压条件下更易发生压缩变形, 但不至于导致结构失稳破坏。而 III、IV 类花岗岩体内胶结界面结构会在该试验条件下由于高温作用发育成弱面结构, 使其沿胶结界面方向失稳破坏 (详见 4.2 节)。

### 4.2 高温高压下裂缝充填花岗岩破坏形式

岩体的破坏形式反映了其内部弱面结构特性, 为研究裂缝充填花岗岩高温高压条件下的破坏特征以指导干热岩地热开采, 笔者分析讨论了裂缝充填花岗岩高温高压条件下的破坏形式。图 14 为 4 类花岗岩试件破坏试验后得到的破坏特征图。由图 14 可知:

(1) I 类花岗岩 (母岩)。母岩试件首先从端部形成单斜剪切破裂面, 剪切破裂面的破坏角 (剪切破裂面与轴向应力作用面的夹角) 为 24°。随着单斜剪切破裂面的扩展, 便会与粗晶体颗粒相交并开始改变扩展方向, 沿着粗晶体颗粒边界形成新的破裂面 (图 14(a) 橙虚线破裂面) 直至试件失稳破坏。这表明高温高压条件下粗晶体颗粒边界便会演化成结构弱面, 形成失稳破裂面。

(2) II 类花岗岩 (热液充填体)。虽然热液充填体和鲁灰花岗岩一样由尺寸均匀的小晶体颗粒结晶形成, 但两者的破坏形式也不是完全相同的<sup>[53]</sup>。除去和鲁灰花岗岩相似的剪切破裂面 (破坏角为 26°), 充填体也会形成近似横向扩展的破裂面 (图 14(b) 橙虚线破裂面)。此外, 试件也会因错动、咬合、摩擦形成大量粉末。这表明热液充填体与完整的、无裂隙的鲁灰花岗岩不同<sup>[9]</sup>, 其内部同样存在结构弱面 (溶蚀孔隙, 图 4(b)), 导致充填体形成沿溶蚀孔隙扩展的破裂面。

(3) III 类花岗岩。III 类花岗岩试件破坏形式表现为 3 部分。第 1 部分为贯穿试件上下端面的剪切破裂面, 剪切破裂面的破坏角为 22°。第 2 部分为沿母岩内粗晶体颗粒边界产生的破裂面。当单斜剪切破裂面扩展至粗晶体颗粒边界时, 同样会产生沿粗晶体颗粒边界方向扩展的破裂面。第 3 部分为沿充填体与母岩胶结界面扩展的破裂面。随着单斜剪切破裂面进一步扩展到胶结界面处时, 便会沿着胶结界面方

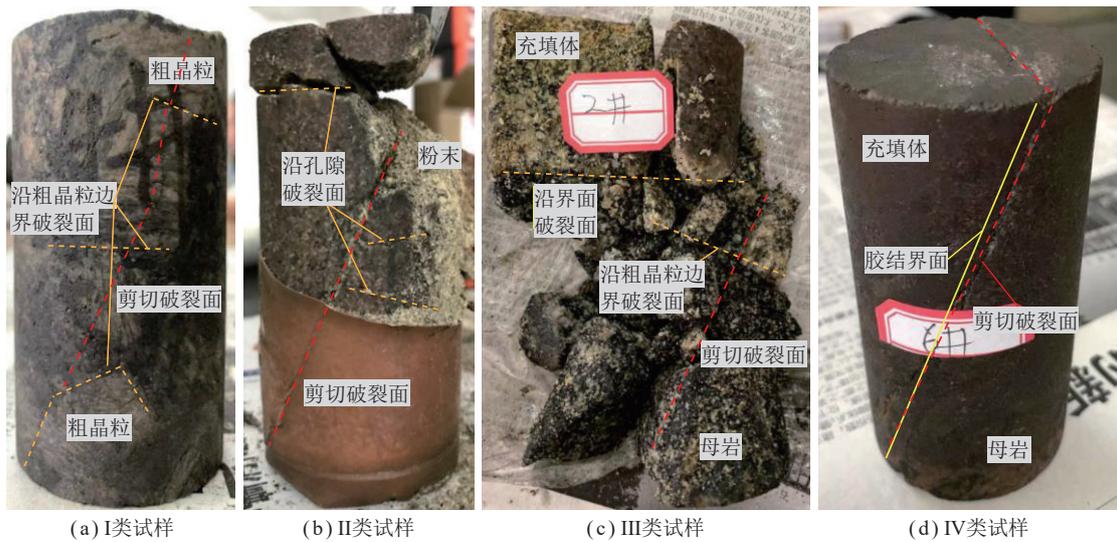


图 14 4类花岗岩破坏形式

Fig.14 Failure mode of four types of granite

向扩展形成另一新的破裂面。上述破坏形式表明在高温高压条件下, 裂缝充填花岗岩的粗晶体颗粒边界以及胶结界面附近皆会形成弱面结构。

(4) IV类花岗岩。IV类试件破坏形式同样是为以纵向贯通试件的单斜剪切破裂面为主的剪切破坏, 并且IV类花岗岩剪切破裂面扩展方向几乎与充填体及母岩胶结界面方向一致。

通过对上述4类花岗岩试件具体的破坏形式的分析, 可以得出高温高压下裂缝充填花岗岩的破坏模式及主要控制因素, 具体见表5。

综合考虑I、III类花岗岩试件破坏形式可知, 两者单斜剪切破裂面产生位置不是完全随机的, 即都会穿过母岩内粗晶体颗粒并沿其边界形成新的破裂面, 这表明粗晶体颗粒边界处是母岩花岗岩体的结构弱面。IV类花岗岩试件母岩内同样含有粗晶体颗粒, 但并未出现同I、III类花岗岩试件类似的沿粗晶体颗粒边界扩展的破裂面, 而是形成沿胶结界面方向扩展的剪切破裂面, 并且破裂面未经过粗晶体颗粒边界。这便进一步说明了胶结界面是裂缝充填花岗岩的弱面结构, 并且相较于母岩中的粗晶体颗粒结构, 胶结界面拥有更加劣化的力学性质。

对比III、IV类花岗岩试件破坏形式可知, 无论胶结界面在裂缝充填花岗岩中走向如何, 在高温高压条件下都会沿着胶结界面方向产生破裂面导致失稳破坏。这充分说明充填体与母岩的胶结界面为裂缝充填花岗岩的弱面结构, 该结构特性为干热岩地热开采中储留层建造提供了极为有利的地质条件。

#### 4.3 裂缝充填花岗岩破坏机理分析

裂缝充填花岗岩体是由多种矿物结晶而成的非

均质岩体, 在高温作用下, 具有不同热弹性性质的矿物晶体便会发生不同程度的热膨胀, 并在不同晶体颗粒间、晶体颗粒与胶结物间产生热应力。当热应力超过晶体间的结合力时, 便会发生热破裂产生裂缝, 最终导致高温高压花岗岩试样失稳破坏。

升温过程中裂缝充填花岗岩体内不同矿物颗粒间产生的热应力 $\sigma_{\Delta T}$ 可利用式(7)<sup>[54-55]</sup>计算:

$$\sigma_{\Delta T} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T E_1 E_2}{E_1 + E_2} \quad (7)$$

式中,  $E_1$ 、 $E_2$ 为相邻两矿物的弹性模量;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 为相邻两矿物的热膨胀系数;  $\Delta T$ 为温度差。

而两相邻的不同的矿物颗粒间的热作用力 $F$ 为

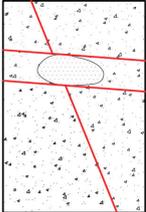
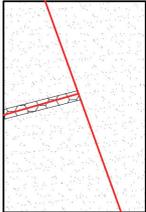
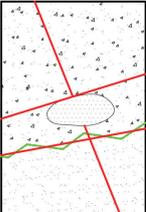
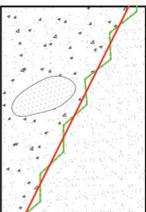
$$F = S \sigma_{\Delta T} \quad (8)$$

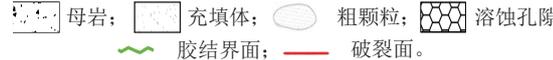
式中,  $S$ 为相邻的不同矿物颗粒间的接触面积。

由式(7)、(8)可知, 不同矿物颗粒间的非均质性( $\alpha_1 - \alpha_2$ )以及接触面积越大, 高温高压条件下产生的热作用力越大。由图4和表1可知, 在花岗岩母岩内的粗晶体颗粒边界(如角闪石与云母)以及母岩与充填体间的整个胶结界面附近(如角闪石与云母、角闪石与石英), 皆会出现集中的高热作用力。除此之外, 矿物晶体颗粒交界处的胶结物的强度以及熔点最低<sup>[41]</sup>, 因此对于I、III及IV类花岗岩试件, 在高温高压条件下的破坏试验中, 上述区域便会产生热致裂缝形成破裂面, 最终发生失稳破坏。由于高温作用下胶结界面可整体形成弱面结构, 导致IV类花岗岩只形成沿胶结界面方向扩展的剪切破裂面。II类花岗岩试件内部含有的蜂窝型溶蚀孔隙(图4(b))决定了其破坏形式主要是孔隙结构崩塌, 故II类花岗岩试件表现出了除

表 5 高温高压下裂缝充填花岗岩破坏模式及控制因素

Table 5 Failure models and controlling factors of fracture-filled granite under HTHP

花岗岩类型	破坏形状	破坏模式	控制因素
I 类		穿越粗晶体颗粒的剪切破坏、沿粗晶体颗粒边界的剪切破坏	粗晶体颗粒
II 类		纵向贯通基质的剪切破坏、沿溶蚀孔隙结构的剪切破坏	溶蚀孔隙
III 类		穿越粗晶体颗粒的剪切破坏、沿粗晶体颗粒边界的剪切破坏、沿胶结界面结构的剪切破坏	粗晶体颗粒和胶结界面弱面结构
IV 类		沿胶结界面结构的剪切破坏	胶结界面弱面结构

注:  母岩;  充填体;  粗颗粒;  溶蚀孔隙;  胶结界面;  破裂面。

剪切破裂面外同时具有多个横向破裂面的破坏特征(图 14(b)),这也进一步体现了热液充填体的微观结构特性。该结构特性可大幅提高干热岩渗透率,这对于干热岩地热开采是十分有利的。

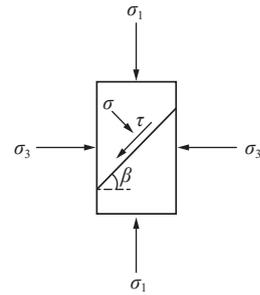
破坏试验结果表明,高温作用下裂缝充填花岗岩胶结界面会发育为弱面结构并影响剪切破裂面走向。因此,根据 Jaeger 单一不连续面强度理论<sup>[56]</sup>分析了高温高压下裂缝充填花岗岩剪切破裂面的变化趋势。

如图 15(a)所示,花岗岩内部存在一个弱面,即高温条件下胶结界面,胶结界面与最小主应力夹角为  $\beta$ 。根据 Jaeger 的单一不连续面理论,在以下情况下,裂缝面沿胶结界面扩展:

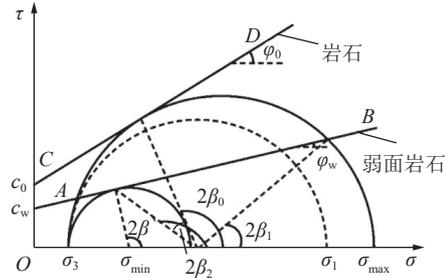
$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c_w + \sigma_3 \tan \varphi_w)}{(1 - \tan \varphi_w \cot \beta) \sin 2\beta} \quad (9)$$

式中,  $c_w$ 、 $\varphi_w$  分别为胶结界面黏聚力和内摩擦角。

对式(9)中  $\beta$  求导,设一阶导数为 0,则满足最小



(a) 岩体应力模型



(b) 莫尔应力圆理论

图 15 单一不连续面理论分析示意<sup>[56]</sup>

Fig.15 Analysis schematic diagram of single discontinuity theory<sup>[56]</sup>

$\sigma_1$  的条件为

$$\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_w}{2} \quad (10)$$

如图 15(a)所示,根据正弦定理可以得到  $\beta_1$  和  $\beta_2$ :

$$\beta_1 = \frac{\varphi_w}{2} + \frac{1}{2} \arcsin \left[ \frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c_w \cot \varphi_w) \sin \varphi_w}{\sigma_1 - \sigma_3} \right] \quad (11)$$

$$\beta_2 = \frac{\pi}{2} + \varphi_w - \beta_1 \quad (12)$$

如图 14(d)所示,IV类花岗岩破裂面与胶结界面重合( $\beta=67^\circ$ ),这表明该角度弱面结构的应力状态为极限平衡状态。根据式(9)、(10)得出 500 °C 下裂缝充填花岗岩的  $c_w$  和  $\varphi_w$  分别为 3.6 MPa 和 44°。代入式(11)、(12)可得  $\beta_1$  和  $\beta_2$  分别为 65°和 69°。

当裂缝充填花岗岩胶结界面倾角  $\beta$  介于  $\beta_1$  和  $\beta_2$  之间时,花岗岩沿胶结界面破裂(如IV类花岗岩,图 14(d)),破坏强度取决于胶结界面强度。反之,花岗岩不会沿胶结界面形成剪切破裂面(如III类花岗岩,图 14(c))。

### 5 裂缝充填花岗岩热力学性质意义分析

深层花岗岩体在矿物组成、晶粒尺寸和微观结构等方面与完整细粒花岗岩有显著差异。因此,有必要对裂缝充填花岗岩的热膨胀和固体力学性质进行研究。山西芦芽山裂缝充填花岗岩是由地壳深部高温岩浆、热液缓慢冷却结晶形成的,其热力学性质反映

了真正深部干热岩体特性。本文的研究结果可为干热岩地热规模高效开采提供理论指导。

规模高效建造高渗储留层是干热岩地热开发的决定因素。裂缝充填花岗岩微观观测结果表明,母岩内粗晶体颗粒和热液充填体的存在导致裂缝充填花岗岩具有极强的非均质性。在水力压裂建造储留层过程中,母岩粗晶体颗粒边界处以及胶结界面附近会诱发更加剧烈的热破裂,形成大范围的裂缝网。图 16 为裂缝充填干热岩地热开采示意,由图 16 可知,在水力压裂过程中,上述区域的热破裂现象会随着水岩热交换持续发生,储留层规模及其内部裂缝网络也会进一步发育,其渗透能力也得到进一步提高<sup>[57-58]</sup>。最终,母岩粗晶粒边界处、充填体溶蚀孔隙处和胶结界面处会规模高效形成高渗透水力通道。因此,裂缝充填花岗岩特有的结构特征会大大降低干热岩地热开采过程中储留层建造的施工难度,增加储留层体积,节约施工成本,为干热岩地热规模高效开采提供了良好的地质基础。

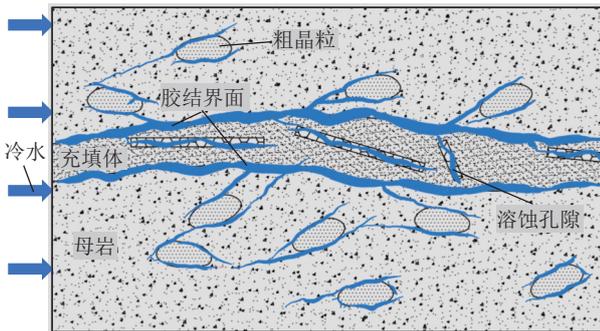


图 16 裂缝充填干热岩地热开采示意

Fig.16 Schematic diagram of fracture-filled HDR geothermal exploitation

## 6 结 论

(1) 在 100~500 °C 内,4 类花岗岩的热膨胀系数随温度变化可分为 3 个阶段:① 低温缓慢波动段;② 中低温快速增加段;③ 中高温快速减小段。温度超过 200 °C,裂缝充填花岗岩内原生裂缝基本闭合,其热膨胀系数随温度升高开始迅速增加。

(2) 高温高压条件下,原生裂缝导致裂缝充填花岗岩弹性模量随温度的升高呈两阶段变化。蜂窝型溶蚀孔隙结构以及低键合强度矿物的存在导致热液充填体力学性质劣化,也导致其弹性模量最低。

(3) 胶结界面附近因胶结作用而强化的充填体恢复弱面结构特性的临界温度为 250 °C 左右。

(4) 高温高压条件下,4 类花岗岩的破坏形式主要为剪切破坏,而粗晶体颗粒边界、孔隙结构及胶结界

面会形成次级破裂面。当胶结界面与水平面夹角为 65°~69°时,裂缝充填花岗岩会沿胶结界面形成主剪切破裂面。

## 参考文献(References):

- [1] MOCK J E, TESTER J W, WRIGHT P M. Geothermal energy from the earth: Its potential impact as an environmentally sustainable resource[J]. *Annual Review of Energy and the Environment*, 1997, 22(1): 305-356.
  - [2] FRIDLEIFSSON I B. Geothermal energy for the benefit of the people[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2001, 5(3): 299-312.
  - [3] TESTER J W, ANDERSON B J, BATCHELOR A, et al. The future of geothermal energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century[M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
  - [4] ARMSTRONG R C, WOLFRAM C, JONG K P, et al. The frontiers of energy[J]. *Natural Energy*, 2016, 1: 15020.
  - [5] ØSTERGAARD P A, DUIC N, NOOROLLAHI Y, et al. Sustainable development using renewable energy technology[J]. *Renewable Energy*, 2020, 146: 2430-2437.
  - [6] FENG Y, CHEN X, XU X F. Current status and potentials of enhanced geothermal system in China: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 33: 214-223.
  - [7] LUO J, ZHU Y Q, GUO Q H, et al. Chemical stimulation on the hydraulic properties of artificially fractured granite for enhanced geothermal system[J]. *Energy*, 2018, 142: 754-764.
  - [8] BROWN D W, DUCHANE D V, HEIKEN G, et al. Mining the Earth's Heat: Hot Dry Rock geothermal energy[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.
  - [9] ZHAO Y S, FENG Z J, XI B P, et al. Deformation and instability failure of borehole at high temperature and high pressure in Hot Dry Rock exploitation[J]. *Renewable Energy*, 2015, 77: 159-165.
  - [10] GAUTAM P K, VERMA A K, SINGH T N, et al. Experimental investigations on the thermal properties of Jalore granitic rocks for nuclear waste repository[J]. *Thermochemica Acta*, 2019, 681: 178381.
  - [11] DUEHAM W B, ABEY A E. The effect of pressure and temperature on the thermal properties of salt and a quartz monazite[M]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1981.
  - [12] HEARD H C. Thermal expansion and inferred permeability of climax quartz monazite to 300 °C and 27.6 MPa[J]. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 1980, 17: 289-296.
  - [13] 许锡昌, 刘泉声. 高温下花岗岩基本力学性质初步研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(3): 332-335.
- XU Xichang, LIU Quansheng. A preliminary study on basic mechanical properties for granite at high temperature[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(3): 332-335.

- [14] 杜守继, 刘华, 职洪涛, 等. 高温后花岗岩力学性能的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(14): 2359–2364.  
DU Shouji, LIU Hua, ZHI Hongtao, et al. Testing study on mechanical properties of post-high-temperature granite[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(14): 2359–2364.
- [15] 北野晃一, 新孝一, 木下直人, 等. 高温下岩石的力学特性熱特性および透水特性に関する文献調査[J]. *応用地質*, 1988, 29(3): 36–47.
- [16] ZHAO Y S, WAN Z J, FENG Z J, et al. Triaxial compression system for rock testing under high temperature and high pressure[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 52: 132–138.
- [17] 邵保平, 赵阳升. 高温高压下花岗岩中钻孔围岩的热物理及力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(6): 1245–1253.  
XI Baoping, ZHAO Yangsheng. Experimental study of thermo-physico-mechanical property of drilling surrounding rock in granite under high temperature and high pressure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(6): 1245–1253.
- [18] ZHOU H Y, LIU Z B, SHEN W Q, et al. Mechanical property and thermal degradation mechanism of granite in thermal-mechanical coupled triaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 160: 105270.
- [19] 王志军, 赵阳升, 董付科, 等. 高温及三轴应力下花岗岩体力学特性的实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(1): 72–77.  
WAN Zhijun, ZHAO Yangsheng, DONG Fuke, et al. Experimental study on mechanical characteristics of granite under high temperatures and triaxial stresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(1): 72–77.
- [20] YANG S Q, RANJITH P G, JING H W, et al. An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behavior of granite after exposure to different high temperature treatments[J]. *Geothermics*, 2017, 65: 180–197.
- [21] HUANG Y H, YANG S Q, TIAN W L, et al. Physical and mechanical behavior of granite containing pre-existing holes after high temperature treatment[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2017, 17(4): 912–925.
- [22] HOMAND-ETIENNE F, HOUPERT R. Thermally induced microcracking in granites: characterization and analysis[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1989, 26(2): 125–134.
- [23] ZHAO Y S, WAN Z J, FENG Z J, et al. Evolution of mechanical properties of granite at high temperature and high pressure[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2017, 3(2): 199–210.
- [24] DU K, YANG C Z, SU R, et al. Failure properties of cubic granite, marble, and sandstone specimens under true triaxial stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 130: 104309.
- [25] DU K, SUN Y, ZHOU J, et al. Low amplitude fatigue performance of sandstone, marble, and granite under high static stress[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2021, 7(3): 68.
- [26] TUĞRUL A, ZARIF I H. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey[J]. *Engineering Geology*, 1999, 51(4): 303–317.
- [27] YIN W T, ZHAO Y S, FENG Z J. Experimental research on the rupture characteristics of fractures subsequently filled by magma and hydrothermal fluid in hot dry rock[J]. *Renewable Energy*, 2019, 139: 71–79.
- [28] DWIVEDI R D, GOEL R K, PRASAD V V R, et al. Thermo-mechanical properties of Indian and other granites[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2008, 45: 303–315.
- [29] KUMARI W G P, RANJITH P G, PERERA M S A, et al. Mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite under in situ stress and temperature conditions: an application to geothermal energy extraction[J]. *Geothermics*, 2017, 65: 44–59.
- [30] HUANG Y H, YANG S Q, BU Y S. Effect of thermal shock on the strength and fracture behavior of pre-flawed granite specimens under uniaxial compression[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 106: 102474.
- [31] 陈赤洲. 山西中北部岩浆作用特点及构造背景研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.  
CHEN Chizhou. Magmatism characteristics and research of tectonic background in north-central of Shanxi Province[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013.
- [32] 中华人民共和国国土资源部. 岩矿鉴定技术规范第4部分: 岩石薄片鉴定: DZ/T 0275.4—2015[S].
- [33] 邸世祥. 中国碎屑岩储集层的孔隙结构[M]. 西安: 西北大学出版社, 1991.
- [34] Engineering ToolBox. Coefficients of linear thermal expansion [EB/OL]. [https://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d\\_95.html](https://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.html), 2003–08–01.
- [35] CHEN S W, YANG C H, WANG G B. Evolution of thermal damage and permeability of Beishan granite[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 1533–1542.
- [36] 卢荣胜, 费业泰. 材料线膨胀系数的科学定义及应用[J]. *应用科学学报*, 1996, 14(3): 253–258.  
LU Rongsheng, FEI Yetai. The scientific definition and applications of linear thermal expansion coefficient of material[J]. *Journal of Applied Sciences*, 1996, 14(3): 253–258.
- [37] 彭俊, 蔡明, 荣冠, 等. 裂纹闭合应力及其岩石微裂纹损伤评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(6): 1091–1100.  
PENG Jun, CAI Ming, RONG Guan, et al. Stresses for crack closure and its application to assessing stress-induced microcrack damage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(6): 1091–1100.
- [38] COOPER H W, SIMMONS G. The effect of cracks on the thermal expansion of rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1977,

- 36(3): 404–412.
- [39] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R W. Fundamentals of rock mechanics[M]. 4th ed. Malden, MA: Blackwell Pub., 2007.
- [40] ZHAO Y S, FENG Z J, ZHAO Y, et al. Experimental investigation on thermal cracking, permeability under HTHP and application for geothermal mining of HDR[J]. *Energy*, 2017, 132: 305–314.
- [41] JIN F L, PARK S J. Impact-strength improvement of epoxy resins reinforced with a biodegradable polymer[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 478(1–2): 402–405.
- [42] FENG Z J, ZHAO Y S, ZHANG Y, et al. Real-time permeability evolution of thermally cracked granite at triaxial stresses[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 133: 194–200.
- [43] 张渊, 张贤, 赵阳升. 砂岩的热破裂过程[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(3): 656–659.  
ZHANG Yuan, ZHANG Xian, ZHAO Yangsheng. Process of sandstone thermal cracking[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(3): 656–659.
- [44] 杨强生, 浦保荣. 高等传热学: 热传导和对流传热与传质[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996.
- [45] ZHOU Z, JIN Y, ZENG Y J, et al. Investigation on fracture creation in hot dry rock geothermal formations of China during hydraulic fracturing[J]. *Renewable Energy*, 2020, 153: 301–313.
- [46] 袁振明. 声发射技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [47] 马建丽. 无机材料科学基础[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2008.
- [48] HELMUT G F, WINKLER. Struktur und Eigenschaften der Kristalle [M]. Berlin: Springer Verlag, 1955.
- [49] 张顺存, 黄立良, 冯右伦, 等. 准噶尔盆地玛北地区三叠系百口泉组储层成岩相特征[J]. *沉积学报*, 2018, 36(2): 354–365.  
ZHANG Shuncun, HUANG Liliang, FENG Youlun, et al. Diagenetic facies of Triassic baikouquan formation in Mabei area, Junggar Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(2): 354–365.
- [50] 郝乐伟, 王琪, 唐俊. 储层岩石微观孔隙结构研究方法 with 理论综述 [J]. *岩性油气藏*, 2013, 25(5): 123–128.  
HAO Lewei, WANG Qi, TANG Jun. Research progress of reservoir microscopic pore structure[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 25(5): 123–128.
- [51] 朱合华, 闫治国, 邓涛, 等. 3种岩石高温后力学性质的试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(10): 1945–1950.  
ZHU Hehua, YAN Zhiguo, DENG Tao, et al. Testing study on mechanical properties of tuff, granite and breccia after high temperatures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(10): 1945–1950.
- [52] CHEN Y L, WANG S R, NI J, et al. An experimental study of the mechanical properties of granite after high temperature exposure based on mineral characteristics[J]. *Engineering Geology*, 2017, 220: 234–242.
- [53] 徐小丽, 高峰, 张志镇. 高温作用后花岗岩三轴压缩试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(11): 3177–3183.  
XU Xiaoli, GAO Feng, ZHANG Zhizhen. Research on triaxial compression test of granite after high temperatures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(11): 3177–3183.
- [54] (日) 平修二, 郭廷玮, 李安定, 译. 热应力与热疲劳: 基础理论与设计应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [55] 邵保平, 赵阳升. 600℃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): 892–898.  
XI Baoping, ZHAO Yangsheng. Experimental research on mechanical properties of water-cooled granite under high temperatures within 600℃[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(5): 892–898.
- [56] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [57] KOŽUŠŇÍKOVÁ A, KONEČNÝ P. Influence of temperature on the permeability of rocks[J]. *Géotechnique*, 2011, 61(12): 1081–1085.
- [58] JIANG G H, ZUO J P, LI L Y, et al. The evolution of cracks in Maluanshan granite subjected to different temperature processing[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(6): 1683–1695.