

海南北部玄武岩实时温度单轴拉-压强度试验研究*

刘锐鸿¹, 刘金锋^{1,2}

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082
2. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室 / 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082

摘要: 我国海南北部玄武岩储量丰富且分布广泛, 矿化碳封存潜力巨大。实时温度下玄武岩的力学特性对深部玄武岩碳封存工程实践具有重要意义。本文采用配备高温环境炉的MTS万能材料试验机, 对取自海南北部晚新生代玄武岩样品(主要矿物为富铝辉石和钙长石), 开展了实时温度条件(25~250 °C)下的巴西劈裂和单轴压缩试验, 探究实时温度对其强度与变形破坏特征的影响。巴西劈裂试验表明玄武岩样品的抗拉强度随温度下降, 且优势破裂面明显: 室温时约13 MPa, 50 °C时显著下降至约8 MPa, 250 °C时下降至约7 MPa。单轴压缩试验结果显示玄武岩样品的杨氏模量与泊松比分别为31.0~175.3 GPa和0.13~0.48, 最大值均出现在100~150 °C; 抗压强度为77.5~159.5 MPa, 随温度上升有微弱下降趋势, 但离散性增大; 破裂模式随温度升高由单斜面剪切趋向多斜面剪切, 可能是由于温度导致抗拉强度降低, 进而导致拉张微裂隙比例增加。综合分析表明, 玄武岩样品在25~250 °C条件下力学特性的温度依赖性较为复杂: 抗拉强度随温度升高而下降; 单轴压缩力学参数离散性增加但无显著温度依赖性。其温度依赖性的主控机制为裂纹扩展速率(裂纹扩展激活能)的温度依赖性, 而非热损伤。本研究结果表明, 地下玄武岩碳封存工业实践中, 随着埋藏深度(温度)的增加, 玄武岩抗拉强度显著降低可能增加固碳反应引发的膨胀致裂的可能性, 有利于提高玄武岩固碳效率, 但玄武岩压缩变形破裂过程对固碳效率的影响仍需深入研究。

关键词: 海南玄武岩; CO₂地质封存; 破裂模式; 巴西劈裂; 抗拉强度

中图分类号: TU458 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)04-0019-10

Experimental study on real-time temperature uniaxial tensile-compression strength of basalts from the northern Hainan province

LIU Ruihong¹, LIU Jinfeng^{1,2}

1. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Guangdong Provincial Key Lab of Geodynamics and Geohazards / Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China

Abstract: The north part of Hainan Province has widely distributed, abundant basaltic rocks providing a great potential for carbon geological sequestration via mineralization. Engineering practice of carbon sequestration in subsurface basalt requests to understanding of the mechanical properties of basalt at real-time temperature. In this study, Brazilian splitting and uniaxial compression experiments were

* 收稿日期: 2023-07-06 录用日期: 2023-07-17 网络首发日期: 2024-04-24

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515012202)

作者简介: 刘锐鸿(1998年生), 男; 研究方向: 岩石力学与二氧化碳封存;

E-mail: liurh8@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 刘金锋(1985年生), 男; 研究方向: 实验岩石力学;

E-mail: Liujinf5@mail.sysu.edu.cn



全文阅读

2023D035

performed on late Cenozoic basalt samples (mainly minerals including Augite, Al-rich, and Anorthite) collected from northern Hainan Province under real-time temperature conditions of 25-250 °C, to investigate the effects of temperature on the strength and failure characteristics of the basalt samples. The Brazilian splitting tests show that the tensile strength of the basalt samples reduced from ~13 MPa at room temperature to ~8 MPa at 50 °C, and finally to ~7 MPa at 250 °C, accompanied by a dominant fracture surface. The uniaxial compression experiments determine the Young's modulus and Poisson's ratio of 31.0-175.3 GPa and 0.13-0.48, respectively, having the maximum values at temperatures of 100-150 °C. The compressive strength of 77.5-159.5 MPa decreases slightly with temperature but is associated with larger discreteness. The basalt samples upon uniaxial compression exhibited shear failure along a single plane at temperatures of 25-100 °C, while shear failures along multi-planes at temperatures of 150-250 °C. This may be attributed to the increase of the proportion of tensile microcracks upon temperature rise during the microcracking process. Combining the results from both experiments, the tensile strength reduction and the scattered uniaxial compression mechanical parameters observed at temperatures of 25-250 °C are likely dominated by the thermally activated rate process, rather than the thermal damage mechanism. From a perspective of temperature-dependent mechanical properties of the collected basalt samples, this study implies that deep burial depth (higher temperature) favors the carbonation reaction of basalt and CO₂, as the reduction of tensile strength may accelerate the fracturing process to enhance the reactive surface between basalt and CO₂-rich fluids. Nevertheless, complex deformation and failure mechanisms caused by temperature during in-situ subsurface carbon sequestration in basalt also need serious considerations in future studies.

Key words: Hainan basalt; carbon geological sequestration; failure modes; Brazilian test; tensile strength

二氧化碳(CO₂)的捕集、利用以及封存(CCUS)技术被普遍认为是减少工业碳排放的有效途径之一(McGrail et al., 2003)。其中,将工业捕集的CO₂注入地下玄武岩层,通过矿物矿化反应进行永久封存,被认为是最具潜力的地质碳封存技术(Snaebjörnsdóttir et al., 2020)。玄武岩矿物主要为基性长石和辉石,可与CO₂反应的CaO、MgO、FeO等含量大于25%(Kelemen et al., 2011)。玄武岩作为基性喷出岩,全球分布广泛,尤其是欧洲、美国、中国南海区域等工业发达地区,因此具有巨大的碳封存潜力。冰岛Carbfix地下玄武岩原位固碳封存先导性项目的成功证实了人为加速玄武岩固碳反应可以实现永久碳封存(Matter et al., 2011)。尽管如此,如何提高原位岩石矿物的固碳效率仍然至关重要。CO₂流体与玄武岩接触比表面积的大小是固碳反应效率的主要影响因素(Godard et al., 2013),与玄武岩的变形、破裂、渗透率等物理力学特性的演化过程密切相关。此外,固碳反应过程中所生成的碳酸盐沉淀会导致岩体体积膨胀,一方面会在岩体内部产生较大的额外应力(结晶力或膨胀反力)促使围岩发生破裂,提高固碳效率

(Kelemen et al., 2008);另一方面体积膨胀也可能导致渗流通道的堵塞,导致岩体渗透率显著降低进而终止固碳反应(Andreani et al., 2009)。因此,理解原位应力-温度-化学条件下玄武岩的物理力学特性是提高玄武岩原位固碳效率的关键之一。

我国海南岛北部玄武岩有大规模出露,玄武岩层平均厚度约为100 m,总面积约4 160 km²(龙文国等, 2006a, 2006b; 樊祺诚等, 2004);玄武岩主要矿物为斜长石、辉石与橄榄石,其CaO+MgO+FeO含量为25%~30%。因此,该区域具有极大的固碳潜力,有望成为我国碳捕获技术(CCS)试点靶区。然而,尚未有足够的研究报告该区域玄武岩的物理力学性质。本研究将以取自我国海南北部的玄武岩为对象,聚焦于实时温度条件下玄武岩的抗拉、抗压强度以及变形破裂等力学特性,以期对海南玄武岩碳封存可行性评估提供基础数据。

近年来,采用多种实验手段对高温作用下岩石的物理力学性质开展了大量研究,主要集中在高温冷却和实时高温2种条件(罗生银等, 2020; 熊良宵等, 2018)。研究发现高温冷却后岩石的物理力学性质劣化,主要是由于岩石内部矿物不均匀

热胀冷缩导致的裂隙发育所造成的二次损伤(李博宇等,2022;赵亚永等,2017)。其中,陈有亮等(2011)、吴阳春等(2020)对高温冷却后的花岗岩进行了各类力学试验,发现,花岗岩在高温冷却后其单轴抗压强度、抗拉强度与抗剪强度随着处理历史温度的升高(室温~600℃)呈先增大后减小的趋势,弹性模量随处理历史温度的升高逐渐减小。赵洪宝等(2009)研究了高温处理前后的砂岩波速与孔隙率演化规律,发现随着处理历史温度的升高,孔隙率增加,波速降低。实时温度试验研究亦有相似发现。如平琦等(2019)、王鹏等(2013)分别报道了砂岩在室温至1000℃下动态力学特性:砂岩抗压强度随温度升高呈现先增大后下降的趋势,峰值应变则随温度上升逐渐上升,而杨氏模量则随温度上升逐渐下降。但亦有研究报告了岩石在实时温度条件下更为复杂的变形破坏特性。随着实时温度的升高,单轴加载作用下的花岗岩由拉剪破裂转变为锥形破裂(环境温度从400℃上升到600℃后)(徐小丽等,2015),而大理石可以出现明显塑性变形(汪然等,2013)。此外,张连英等(2009)发现石灰岩、大理石、砂岩在实时(室温~800℃)温度条件下的物理力学性质表现为不同的温度依赖性。

前人已对玄武岩的温度-化学作用、裂隙-波速变化或加载速率-尺寸效应等方面开展了试验研究(陈琳等,2016;陈帅等,2022;熊大和,1982)。但是,玄武岩,尤其是海南北部玄武岩,实时温度下的力学特性的温度依赖性尚不清楚。在实际现场工程条件下,海南北部玄武岩处于高地温状态(平均地热梯度每3.84℃/100m(石小蒙,2014)),赋存温度对其物理力学性质存在一定影响。因此,为了尽可能还原实际现场工程条件,本文对玄武岩力学试验设置了实时环境温度。本文以海南北部晚新生代玄武岩为研究对象,通过开展实时高温条件下单轴压缩和巴西劈裂试验,结合力学过程和热损伤分析,尝试揭示在不同原位温度状态下CO₂地质封存潜在靶区玄武岩的变形破裂演化过程及破裂机理,作为后期靶区原位玄武岩固碳反应及效率的复杂试验研究的基础。

1 样品与方法

1.1 试验样品

本研究采用取自海南北部隐晶质玄武岩,样品呈灰色,孔隙率约为10.7%。按照《工程岩体试

验方法标准GB/T50266—2013》(2013),制备巴西劈裂样品(直径50mm,厚度25mm)共24个,单轴压缩试验样品(直径25mm,高度50mm)共23个。所有样品两端使用砂纸打磨,平整度均控制在±0.1mm以内。利用超声波测量手段对样品纵波波速进行测量,通过对比样品之间纵波波速是否存在异常,能有效地判断样品内部是否存在裂隙,排除纵波波速异常的样品能有效避免样品准备过程中产生的试验误差。其中,巴西劈裂样品的纵波波速主要集中在3077~3472m/s(其中15个样品)和5233~5678m/s(9个样品)两个区间;单轴压缩样品的纵波波速集中在4866~5190m/s,以尽可能减小样品初始微观结构对试验结果离散度的影响(图1)。

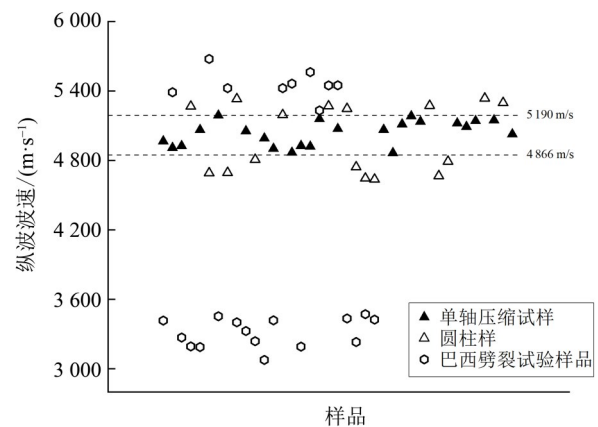


图1 试验样品超声波纵波测试结果

Fig. 1 P-wave velocities of the all tested samples

2.2 试验设备及条件

本文实时高温试验采用MTS E45.105试验机进行,利用MTS配套的高温环境炉对样品进行加温。设备可搭配不同的夹具分别进行巴西劈裂试验与单轴压缩试验(图2),试验温度设置为25、50、100、150、200和250℃。加热过程中,样品与加压板之间预留足够空间,避免样品因受热膨胀产生额外应力。达到环境温度后,样品在恒温条件下静置2h,以确保岩样内部温度恒定。巴西劈裂与单轴压缩试验均采用以位移控制的方式进行加载,加载速率分别设为0.05和0.005mm/min(邵保平等,2020;徐锡昌等,2000)。样品变形过程中的均布荷载由MTS压力传感器测量(测量精度为实时值的0.5%)。单轴压缩试验样品中部正反两面粘贴耐高温应变片,测量样品的轴向和环向应变(数据波动稳定在±10⁻⁶内)。单轴压缩试验后,破裂样品

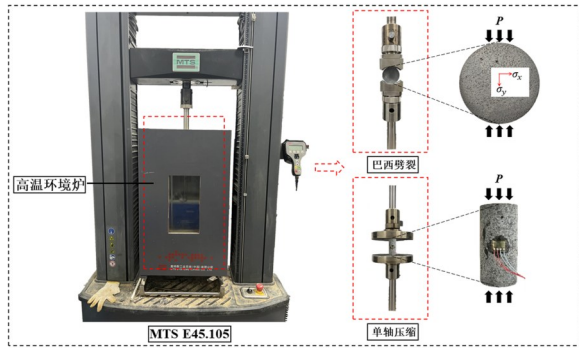


图2 试验设备示意图

Fig. 2 Test equipment diagram

被重新拼合,由环氧树脂 AB 胶浸泡固化,随后垂直于断裂面、过试样中点沿轴向进行切割,获取样品纵剖面,利用显微镜对破裂形态和微断裂特征进行观察。

2.3 试验数据采集与处理

试验中测量的力由 MTS 控制系统以 10 Hz 的频率连续采集,应变由中航电测高温应变片搭配泰斯特动静信号测试分析系统以 10 Hz 的频率采集。

巴西劈裂试验中,受对心集中压缩载荷的样品,其受力直径上任意一点的 2 个应力分量(σ_x 、 σ_y)的精确解由弹性力学可得(Li et al.,2013)

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{2P}{\pi Dh}, \\ \sigma_y = \frac{2P}{\pi Dh} \left(1 - \frac{4D^2}{D^2 - 4r^2} \right), \end{cases} \quad (1)$$

式中 P 为纵向荷载(单位 N); D 和 h 分别为样品直径和厚度(mm); σ_x 、 σ_y 分别为切向、径向正应力(MPa)。样品在荷载-位移曲线中线性段结束的瞬间整体失稳破坏,抗拉强度(σ_t)(Hatheway,2007)

$$\sigma_t = \sigma_x = \frac{2P_{\max}}{\pi Dh}. \quad (2)$$

对于单轴压缩试验,其应力-应变(σ - ε)曲线大致分为 3 个阶段(Martin,1997):初始段(裂纹孔隙闭合阶段)、线性段(岩体弹性压缩段)与应力强化段(屈服变形段)。对曲线中线性段进行拟合,得到玄武岩的杨氏模量(E);根据纵向应变与横向应变中的线性段斜率比值得到玄武岩泊松比(μ)。利用离散系数(V_s)对结果离散程度进行描述(夏圣亭,1997),

$$V_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} / \bar{x}, \quad (3)$$

其中 x_i 为对应温度下单个样品的试验值(E 或抗压强度(σ_c)), \bar{x} 则为试验值的平均值, n 为对应温度下的试验样品数量。

3 试验结果与分析

对 4 个试样进行巴西劈裂试验,得到不同温度下的结果(表 1)。单轴压缩试验不同温度下的结果见表 2。

表 1 巴西劈裂试验得到的抗拉强度 σ_t

Table 1 The tensile strengths of Brazilian test

$T/^\circ\text{C}$	σ_t/MPa	平均值/MPa	$V_s/\%$
25	12.6~14.8	13.5	6.4
50	7.9~9.3	8.5	6.3
100	6.7~7.6	7.3	5.3
150	6.8~7.9	7.5	5.5
200	7.2~7.9	7.5	3.9
250	6.3~7.1	6.9	5.4

表 2 单轴压缩试验结果

Table 2 Uniaxial compressive test result

$T/^\circ\text{C}$	样品数量	σ_c			E			μ		
		范围/MPa	平均值/MPa	$V_s/\%$	范围/GPa	平均值/GPa	$V_s/\%$	范围	平均值	$V_s/\%$
25	3	140.0~144.4	141.5	1.5	31.0~38.5	35.4	9.0	0.13~0.18	0.16	13.5
50	4	77.5~130.4	114.1	19.0	36.3~42.6	39.2	5.8	0.13~0.21	0.15	21.9
100	3	119.3~130.0	123.0	3.9	79.8~163.6	120.0	28.6	0.34~0.49	0.46	19.8
150	5	86.8~138.8	107.8	19.1	94.6~175.3	128.0	24.6	0.35~0.48	0.44	10.6
200	4	111.9~159.5	136.7	13.3	67.1~85.3	77.2	8.8	0.31~0.39	0.36	8.6
250	4	117.9~157.3	131.1	11.8	80.7~89.4	84.6	3.7	0.32~0.37	0.35	5.8

3.1 巴西劈裂试验

3.1.1 抗拉强度的温度依赖性 不同温度条件下

玄武岩抗拉强度见图 3。玄武岩整体抗拉强度区间为 6.32~13.48 MPa。在室温条件下,玄武岩抗拉强

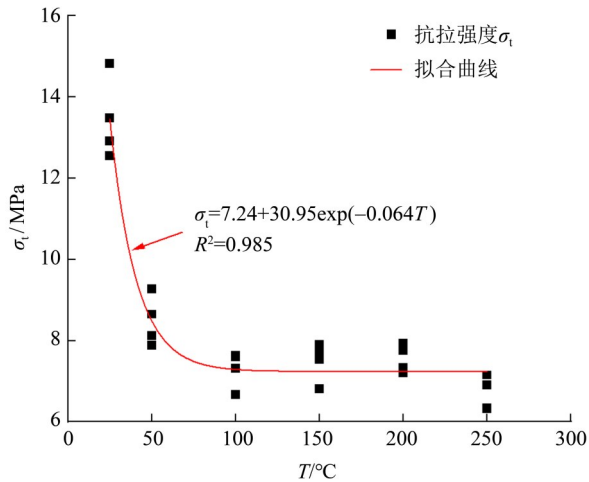


图 3 不同温度下玄武岩抗拉强度

Fig. 3 Tensile strengths of basalt samples against temperature

度较高, 平均强度为 13.45 MPa, 在 50 °C 时的抗拉强度显著下降至约 8.48 MPa, 直至在 100 °C 时降低

至约 7.31 MPa。然而, 当温度大于 100 °C 后, 样品抗拉强度没有明显的降低或增加趋势, 直至在 250 °C 时, 玄武岩样品平均抗拉强度下降至约 6.68 MPa, 与室温条件下的抗拉强度相比, 下降幅度达到 50.3%。在 50~250 °C 范围, 抗拉强度温度依赖性可用幂指数拟合描述, 即

$$\sigma_t = 7.24 + 30.95\exp(-0.064T),$$

$$R^2 = 0.985 .$$

另外, 波速的差异对玄武岩在不同温度条件下的抗拉强度影响较低。

3.1.2 不同温度下破裂模式 不同温度下的巴西劈裂试验后, 玄武岩样品显示拉应力导致的贯穿中心的断裂面(图 4)。其中, 室温条件下 4 个样中有 2 个样品(B25-1 和 B25-2)呈现多剪切面贯穿中心的破裂模式; 温度上升后则没有出现类似破裂模式。玄武岩的初始波速与破裂模式对比表明波速的差异对后者的影响不大。

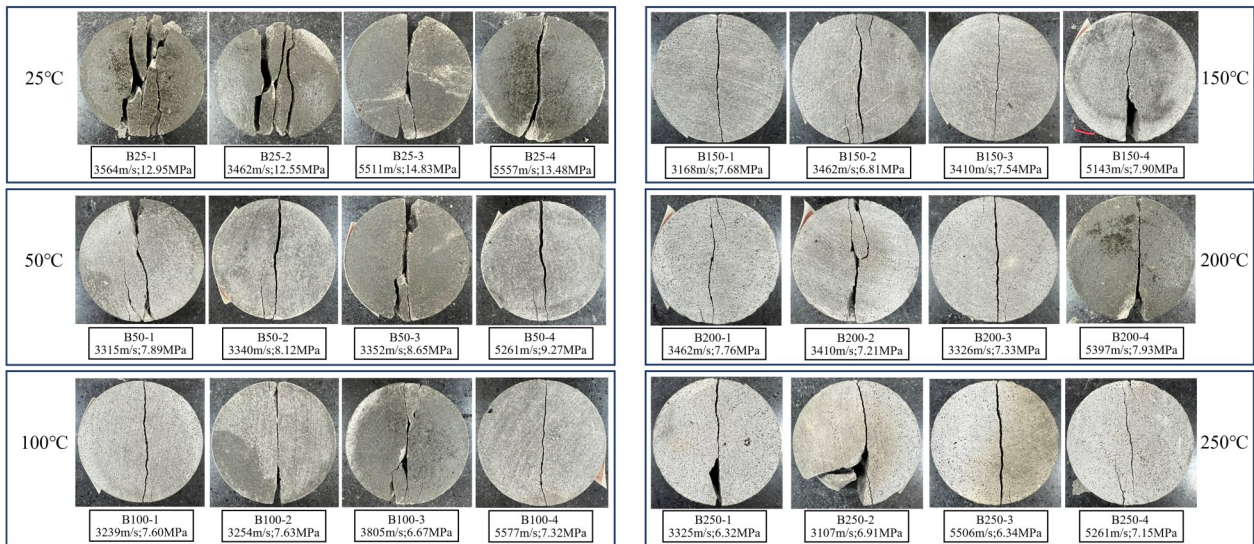


图 4 不同温度下巴西劈裂样品(图中各样品编号下的数字分别为超声波纵波波速与抗拉强度)

Fig. 4 Pictures indicating the failure samples after Brazil splitting tests at different temperatures

3.2 单轴压缩试验

3.2.1 不同温度下玄武岩应力-应变曲线 25~250 °C 条件下玄武岩的 σ - ϵ 曲线, 见图 5。在各温度条件下, 玄武岩试样均呈现非线性变形至脆性破坏。室温条件下 σ - ϵ 曲线能观察到明显的初始段(Martin, 1997); 随着温度升高, σ - ϵ 曲线初始段不明显。在单轴压缩试验过程中, 玄武岩轴向峰值应变范围为 0.05%~0.38%, 峰值应力范围为 77.5~159.5 MPa。总体上, 玄武岩样品的轴向峰值应变随着温度升高而下降, 由室温的 0.03% 下降到 250 °C 时的 0.15%, 但 150 °C 时最小(0.05%~

0.15%)并呈现较大离散性。另外, 25、50、200、250 °C 时, σ - ϵ 曲线斜率相似, 离散性较小, 而在 100、150 °C 时离散性较大。

由图 5 的 σ - ϵ 曲线数据计算得到各温度条件下的力学参数(σ_c 、 E 、 μ 及其相应温度下的平均值和 V_s)见表 2, 温度依赖性见图 6。试验结果表明, 海南玄武岩在温度作用下峰值强度整体有轻微下降趋势, 但随着温度上升峰值强度并未呈现明显规律。离散系数分析表明, 峰值强度的温度依赖性存在一个显著的特征, 即随着温度上升, 离散性逐渐增大。杨氏模量呈现先升后降的趋势, 当温

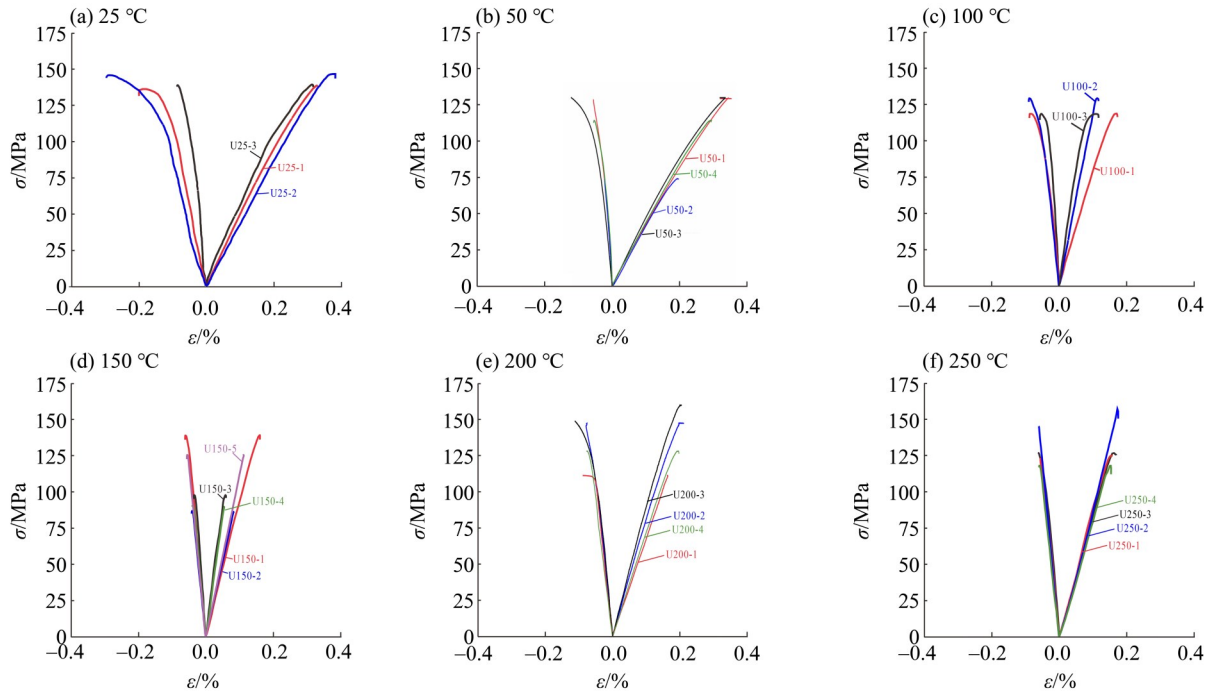


图 5 玄武岩单轴压缩试验应力-应变曲线

Fig. 5 Plots illustrating stress-strain data of the basalt samples

reduced from the uniaxial compression tests performed at different temperatures

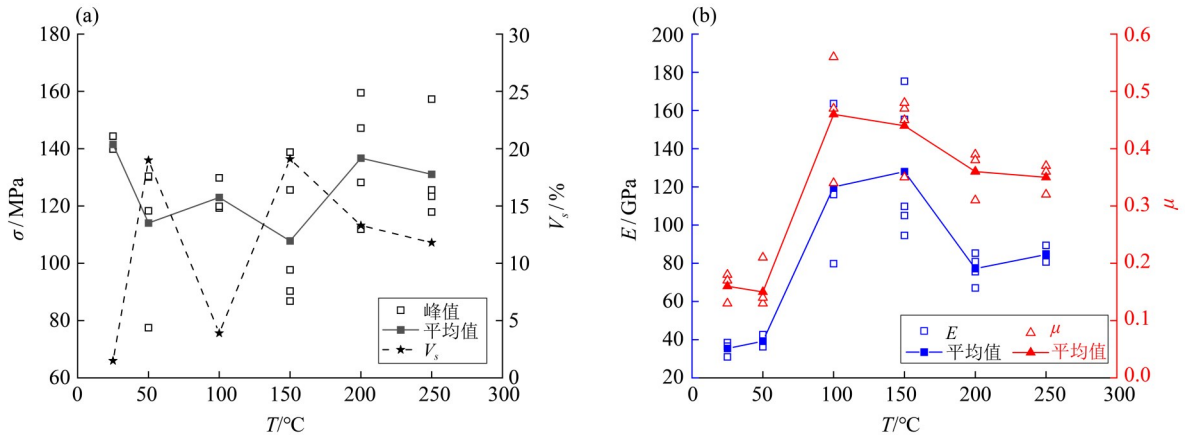


图 6 不同温度下玄武岩的力学参数

Fig. 6 Mechanical parameters of the basalt samples reduced from the uniaxial compression tests at different temperatures

度从 25 °C 升高到 100 °C 时, E 由 35.4 GPa 增加到 120.0 GPa; 当温度升至 250 °C, E 降至 84.6 GPa, 仍高于室温时 35.4 GPa。相似地, μ 亦呈现出先增大后下降的趋势, 当温度从 25 °C 升高到 100 °C 时, μ 从 0.16 增加到 0.46; 当温度升高到 250 °C, μ 降至 0.35, 仍显著高于室温时的 0.16。

3.2.2 玄武岩破裂模式 将破坏后的玄武岩样品重新拼接, 获得不同温度条件下代表性玄武岩的破裂模式, 见图 7。可以发现, 温度低于 100 °C 时, 样品破裂模式较为单一, 主要以单斜面剪切为主; 随着温度上升, 样品会产生更多平行于轴

向的裂纹, 多剪切面破坏逐渐演化为主要破裂模式。

破坏后样品的微观结构(图 8)记录了玄武岩压缩破裂过程中 2 种微型拉张裂隙发育方式。第一类主要为剪切发育过程中矿物牵引带动而产生的微型拉张裂隙(图 8c,d), 其主要特征为裂隙始端位于断裂带上, 与断裂带形成一定夹角, 随着压缩过程逐渐沿轴向发育; 第二类主要产生于剪切裂隙的尖端(图 8e,f), 在剪切带发育过程中, 原生晶间裂隙或压密的孔隙裂隙发生错动, 其两端发生拉张应力集中(图 8h), 诱发拉张裂隙形成, 主要

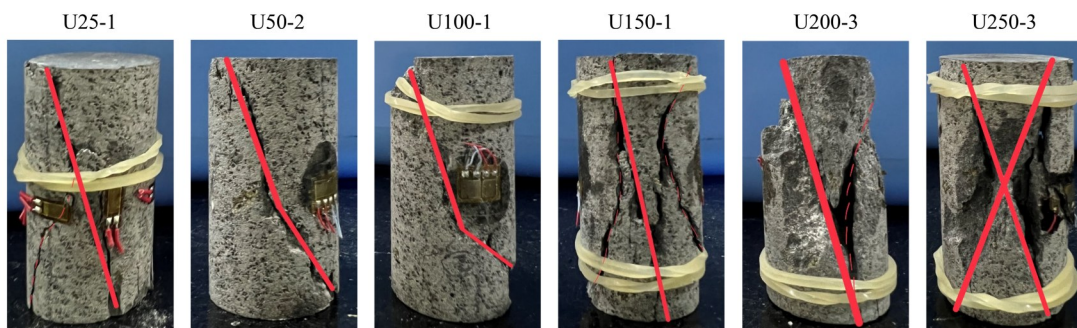
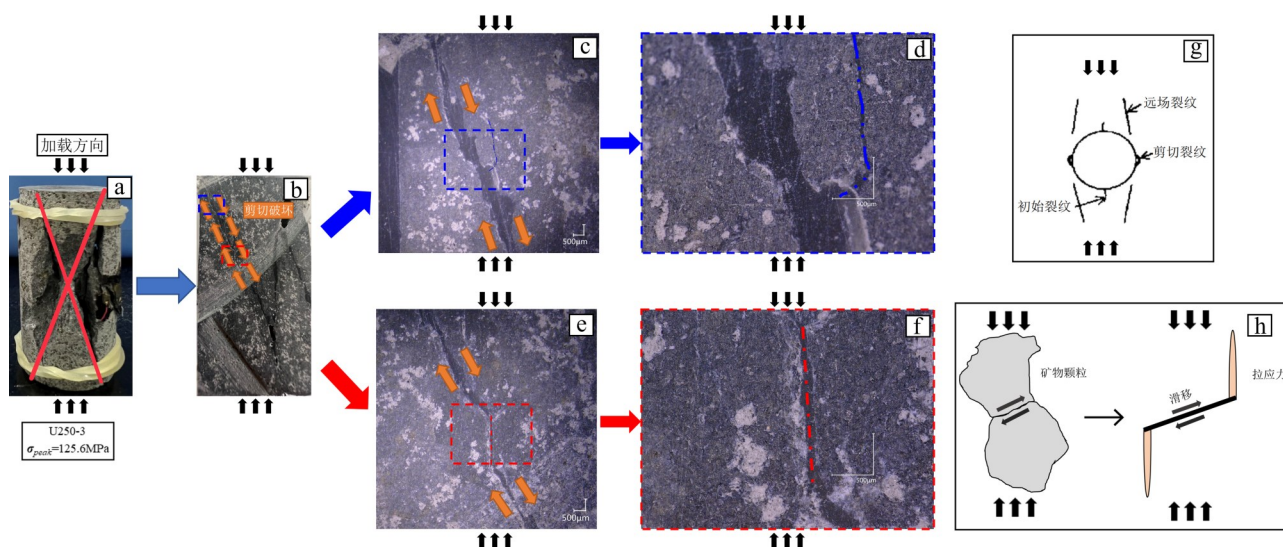


图7 各温度条件下玄武岩单轴压缩代表性破裂模式

Fig. 7 Pictures indicating the representative failure modes of the basalt samples observed after the uniaxial compression tests performed at different temperatures



a 样品整体破裂图; b 样品纵剖面图; c~d 矿物摩擦牵引导致的微型拉张裂隙(放大倍数分别为50×、100×);
e~f 剪切滑移过程中拉应力集中区域微型拉张裂隙(放大倍数分别为50×、100×);
g 单轴应力下岩石内3类裂纹(改自 Martin,1997); h 裂纹剪切滑移(改自 Okubo et al., 1977)。

图8 单轴压缩破坏下玄武岩试样内微裂隙特征

Fig. 8 The microstructures indicating two types of microcracks, as classified in g and h (after Martin,1997; Okubo et al., 1977) observed in c-f of the basalt sample U250-3 obtained after the uniaxial compression test performed at 250°C

分布于剪切带上, 可能是剪切带向轴向发展的主要原因。

4 讨论

对取自海南北部的玄武岩开展了不同温度下(25~250 °C)的巴西劈裂和单轴压缩试验研究, 结果表明抗拉强度随温度显著降低, 其中从室温加热到50 °C时降低最显著, 由约13 MPa降至约7 MPa, 降幅约为50%。其规律与高温处理后的花岗岩抗拉强度一致(方新宇等, 2016; 吴顺川等, 2018); 抗压强度随温度变化规律性不明显, 但其离散性、弹性常数与破裂模式随温度变化较为复杂。

4.1 温度对抗拉强度影响的微观机制

关于温度作用下岩石抗拉强度的微观控制机制目前主流的观点是受热损伤机制控制(吴顺川等, 2018; 徐小丽, 2008), 多数学者利用岩石力学性能的变化来反映岩石的热损伤程度。方新宇等(2016)在研究花岗岩热损伤过程中提出, 以巴西劈裂试验过程中试样径向压缩模量来表征热损伤因子(D_T)

$$D_T = 1 - E_y^T/E_y^0, \quad (4)$$

式中 E_y^T 与 E_y^0 分别为实时环境温度 T 与室温条件下的径向压缩模量, E_y 通过计算径向应力-径向应变曲线中近似直线段的斜率得出。

参照上述方法, 对巴西劈裂的结果进行热损

伤定量计算。由式(1)中 σ_r 的计算公式可知,在加载点处($r = D/2$)存在应力奇异性,实际计算过程中需要做出更进一步的假设与限制。为方便后续讨论,对 E_r^*/E_0^* 的计算进行一定的简化,刚度 E^* 代替径向压缩模量 E_r ,

$$E^* = \Delta P / \Delta d, \quad (5)$$

其中 ΔP 为巴西劈裂试验中荷载-位移曲线近似线性段的荷载差值(单位kN); Δd 为巴西劈裂试验中荷载-位移曲线近似线性段的径向位移差值(单位mm)。 ΔP 和 Δd 的定义见图9。

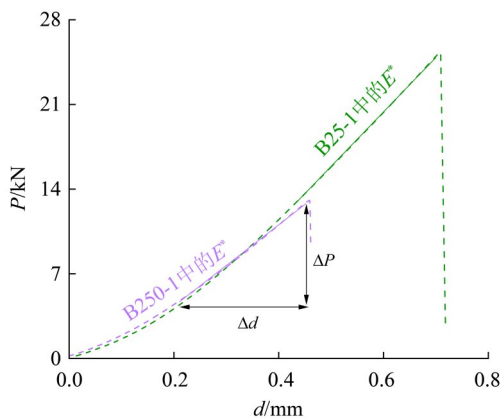


图9 图9 D_T 计算取值示意图

Fig. 9 Schematic diagram of D_T calculation process

图10为热损伤计算结果,根据巴西劈裂试验得到的热损伤因子 D_T 随温度上升而上升,满足线性关系

$$D_T = 0.1255 + 0.00083T, \\ R^2 = 0.7689.$$

上述分析表明,抗拉性能劣化是由于温度上升过程中的玄武岩内部热损伤加剧(即 D_T 上升),利用热损伤因子对玄武岩抗拉强度在高温下劣化进行围观机理分析存在一定可行性。然而,综合比较汪斌等(2012)和彭俊等(2015)分别对岩石热损伤因子的计算,其结果表示 D_T 随温度上升呈负相关关系,这与 D_T 随温度上升的演化规律并不一致,因此,利用热损伤因子对玄武岩抗拉强度的分析需要进一步研究。

另一方面,断裂动力学认为当温度升高时,岩石内部原生的微裂纹尖端累积的自由能将增加,更容易克服微裂纹周围键位的能量壁垒,发生裂纹扩展(Kam et al., 1989; Bažant et al., 1988)。扩展速率与原子键位的热力学激活能成幂指数关系,可以用Maxwell概率分布描述(Thouless et al., 1983; Knott, 1973)

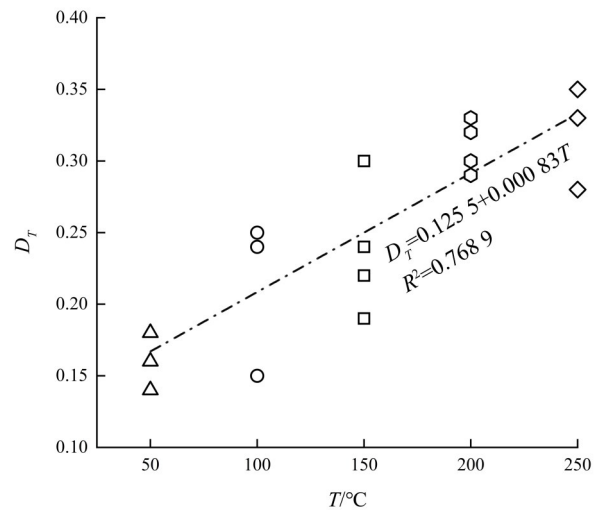


图10 不同温度条件下的热损伤因子

Fig. 10 Thermal damage factors of the basalt samples as a function of temperature

$$\dot{a} = \nu_c \left(\frac{G}{G_f^*} \right)^{n/2} \exp \left[-\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (6)$$

其中 \dot{a} 表示裂纹扩展速率; ν_c 与 n 可认为是物质常量; G 表示断裂能量释放率; G_f^* 表示在参考温度 T_0 下的能量释放率; U 表示键位断裂扩展激活(活化)能; R 表示理想气体常数; T 表示温度。

根据式(6)推断,在一定范围内,裂纹扩展速率 \dot{a} 与温度正相关,导致抗拉强度有可能随着温度的升高而降低。相比于单轴压缩试验,巴西劈裂试验样品的破裂模式为拉破坏,其抗拉强度大约为单轴抗压强度的1/10,对温度变化更为敏感。此外,本文中玄武岩在25~250 °C条件下抗拉强度的下降趋势(图3),满足

$$\sigma_t = 7.24168 + 30.95177 \exp(-0.06427T), \\ R^2 = 0.985,$$

与裂隙扩展速率方程(式6)同为幂指数形式。

综上,试验中观察到的玄武岩抗拉强度下降可能主要由张拉裂纹扩展过程动力学机制控制。

4.2 温度对压缩变形破裂影响机制

岩石在单轴应力场内发育的裂纹通常有3类(Martin, 1997): ①初始裂纹,随荷载增加而形成于孔洞周围的拉应力集中区; ②远场裂纹,在孔洞周围不相邻处的裂纹; ③剪切裂纹,在孔洞周围压应力集中区的裂纹(图8g)。这3类裂纹的发育是导致岩石发生单轴压缩破坏的原因。前面的讨论可以推断,温度作用可能使玄武岩内发育更多的拉张裂隙,即①型裂纹更为发育,这可能是

导致玄武岩单轴破坏模式由单斜面剪切发展为多斜面剪切的主要原因。同时,微裂纹发育剪切变形亦导致岩石的非均匀性(段进超等,2006),从而使玄武岩宏观力学性质的离散性更显著。

4.3 海南原位玄武岩碳封存工程实践的指示

本研究试验温度范围为20~250℃,依据海南北部平均地热梯度3.84℃/100m(石小蒙,2014),对应地表至埋深6510m温度范围。同时考虑玄武岩固碳矿化反应热量的变化,即在同一埋深条件下,随着固碳反应的进程其温度亦有可能变化。因此,本试验基本涵盖了玄武岩埋深6510m的温度条件。试验结果表明,随着埋深的增加或是放热反应的进行,玄武岩围岩体的抗拉强度会降低,更容易发生破裂,从而提高工业碳封存过程中注入的CO₂富集流体与玄武岩的有效接触面积,增强固碳反应效率。另一方面,温度的升高使玄武岩的压缩变形破裂机制更为复杂,离散性很大,可能存在围岩失稳或强化的情况,进而影响玄武岩固碳效率。本文为海南原位玄武岩碳封存工程实践提供了关键的前期试验基础,但实时温度条件下玄武岩变形破坏特性演化对固碳效率的影响仍需进一步研究。

5 结 论

本文对海南北部晚新生代玄武岩进行了不同

实时温度的巴西劈裂与单轴压缩试验,对其力学性能及破坏特征进行了分析,得出如下结论:

1) 海南玄武岩抗拉强度随着温度的上升显著下降,平均抗拉强度从室温条件下的13.45 MPa下降到250℃下的6.68 MPa,降幅达到50.3%。温度对劈裂破坏模式影响不显著,但温度越高优势破裂面更突出,破裂带更集中。

2) 在25~250℃实时温度条件下,玄武岩单轴压缩整体峰值强度稍有下降,但未发现有明显的温度依赖性。杨氏模量与泊松比具有相似的温度依赖性,都高于室温水平,并随温度先上升后下降。低于100℃时,玄武岩单轴压缩破裂以单斜面剪切为主,但随着温度上升,试样中出现更多沿轴向发育的裂纹,逐渐趋向多斜面剪切破裂。

3) 热损伤因子和断裂动力学分析表明,本文玄武岩的单轴抗拉、抗压强度可能受裂纹扩展速率(断裂扩展激活能)的温度依赖性控制,即温度降低了裂纹尖端的断裂扩展激活能,使裂纹在高温时更容易扩展。本文研究结果表明,在玄武岩碳封存工程实践中,应综合考虑埋深和固碳反应导致的温度变化对玄武岩抗拉强度和变形破坏特性的影响。

参考文献:

- 陈琳,徐小丽,徐银花,2016. 温度与加载速率对岩石力学性质的影响[J]. 广西大学学报(自然科学版),41(1):170-177.
- 陈帅,石祥超,包恒,等,2022. 高温对玄武岩可钻性及微观结构影响的试验研究[J]. 地下空间与工程学报,18(6):1898-1905.
- 陈有亮,邵伟,周有成,2011. 高温作用后花岗岩力学性能试验研究[J]. 力学季刊,32(3):397-402.
- 段进超,唐春安,常旭,等,2006. 单轴压缩下含孔脆性材料的力学行为研究[J]. 岩土力学,27(8):1416-1420.
- 樊祺诚,孙谦,李霓,等,2004. 琼北火山活动分期与全新世岩浆演化[J]. 岩石学报,20(3):533-544.
- 方新宇,许金余,刘石,等,2016. 高温后花岗岩的劈裂试验及热损伤特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,35(S1):2687-2694.
- 李博宇,彭文祥,李李昌,等,2022. 温度与化学作用下岩石物理力学性质研究进展[J]. 地质装备,23(2):33-37.
- 龙文国,林义华,石春,等,2006a. 海南岛北部更新世道堂组的重新厘定[J]. 地质通报,25(4):469-474.
- 龙文国,林义华,朱耀河,等,2006b. 海南岛北部第四纪早中更新世多文组的建立[J]. 地质通报,25(3):408-414.
- 罗生银,窦斌,田红,等,2020. 自然冷却后与实时高温下花岗岩物理力学性质对比试验研究[J]. 地学前缘,27(1):178-184.
- 彭俊,蔡明,荣冠,等,2015. 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,34(6):1091-1100.
- 平琦,吴明静,张欢,等,2019. 高温条件下砂岩动态力学特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报,15(3):691-698.
- 石小蒙,2014. 琼北盆地地热田特征及流量-温度耦合模型研究[D]. 徐州:中国矿业大学.
- 汪斌,朱杰兵,严鹏,等,2012. 大理岩损伤强度的识别及基于损伤控制的参数演化规律[J]. 岩石力学与工程学报,31(S2):3967-3973.
- 汪然,朱大勇,姚华彦,等,2013. 温度对大理岩力学性能的影响[J]. 金属矿山,(4):49-53.
- 王鹏,许金余,刘石,等,2013. 高温下砂岩动态力学特性研究

- [J]. 兵工学报, 34(2): 203-208.
- 吴顺川, 郭沛, 张诗淮, 等, 2018. 基于巴西劈裂试验的花岗岩热损伤研究[J]. 岩石力学与工程学报, 37(S2): 3805-3816.
- 吴阳春, 邵保平, 王磊, 等, 2020. 高温后花岗岩的物理力学特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 51(1): 193-203.
- 邵保平, 吴阳春, 王帅, 等, 2020. 青海共和盆地花岗岩高温热损伤力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 39(1): 69-83.
- 夏圣亭, 1997. 关于离散系数的探讨[J]. 工科数学, 13(2): 144-146.
- 熊大和, 1982. 玄武岩的高温高压实验研究[J]. 岩矿测试, 1(2): 13-24.
- 熊良宵, 虞利军, 2018. 高温作用下和高温后岩石力学特性的研究进展[J]. 地质灾害与环境保护, 29(1): 76-82.
- 徐小丽, 高峰, 张志镇, 等, 2015. 实时高温下加载速率对花岗岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 36(8): 2184-2192.
- 徐小丽, 2008. 温度载荷作用下花岗岩力学性质演化及其微观机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学.
- 许锡昌, 刘泉声, 2000. 高温下花岗岩基本力学性质初步研究[J]. 岩土工程学报, (3): 332-335.
- 张连英, 茅献彪, 卢爱红, 2010. 高温作用下岩石力学性能的实验研究[J]. 中国科学: 技术科学, 40(2): 157-162.
- 赵洪宝, 尹光志, 谌伦建, 2009. 温度对砂岩损伤影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 28(S1): 2784-2788.
- 赵亚永, 魏凯, 周佳庆, 等, 2017. 三类岩石热损伤力学特性的试验研究与细观力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 36(1): 142-151.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2013. 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013[S]. 北京: 中国计划出版社.
- BAZANT Z, PRAT P, 1988. Effect of temperature and humidity on fracture energy of concrete[J]. ACI Mater J, 85(4): 262-271.
- GODARD M, LUQUOT L, ANDREANI M, et al, 2013. Incipient hydration of mantle lithosphere at ridges: A reactive percolation experiment[J]. Earth Planet Sci Lett, 371/372: 92-102.
- HATHEWAY A W, 2009. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring, 1974-2006[J]. Environ Eng Geosci, 15(1): 47-48.
- KAM T Y, LU C D, 1989. Thermal stress fracture analysis of brittle bodies[J]. Eng Fract Mech, 32(5): 827-832.
- KELEMEN P B, MATTER J, STREIT E E, et al, 2011. Rates and mechanisms of mineral carbonation in peridotite: Natural processes and recipes for enhanced, *in situ* CO₂ capture and storage[J]. Annu Rev Earth Planet Sci, 39: 545-576.
- KELEMEN P B, MATTER J, 2008. In situ carbonation of peridotite for CO₂ storage[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 105(45): 17295-17300.
- KNOTT J F, 1973. Fundamentals of fracture mechanics[M]. New York: Wiley.
- LI D, WONG L N Y, 2013. The Brazilian disc test for rock mechanics applications: Review and new insights [J]. Rock Mech Rock Eng, 46(2): 269-287.
- MARTIN C D, 1997. Seventeenth canadian geotechnical colloquium: The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength[J]. Can Geotech J, 34(5): 698-725.
- MATTER J M, BROECKER W S, GISLASON S R, et al, 2011. The CarbFix Pilot Project—Storing carbon dioxide in basalt[J]. Energy Procedia, 4: 5579-5585.
- McGRAIL B P, HO A M, REIDEL S P, et al, 2003. Use and features of basalt formations for geologic sequestration [M]//Greenhouse Gas Control Technologies—6th International Conference. Amsterdam: Elsevier. 1637-1640.
- OKUBO S, PENG S, 1977. A model for axial splitting under uniaxial compression[C]// ASME paper 77-Pet-73, Energy Technology Conf, Houston, USA.
- SNÆBJÖRNSDÓTTIR S O, SIGFÚSSON B, MARIENI C, et al, 2020. Carbon dioxide storage through mineral carbonation [J]. Nat Rev Earth Environ, 1: 90-102.
- THOULESS M D, HSUEH C H, EVANS A G, 1983. A damage model of creep crack growth in polycrystals[J]. Acta Metall, 31(10): 1675-1687.

(责任编辑 秦社彩)