

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0196

实时高温作用下花岗岩冲击压缩力学特性研究*

黄耀莹¹, 屈璐^{1,2}, 李宇白^{1,2}, 翟越^{1,2}, 谢怡帆¹

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710064;

2. 自然资源部矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 为研究实时高温作用对花岗岩冲击力学特性的影响, 以川藏铁路色季拉山施工区域加里东期花岗岩为研究对象, 利用分离式霍普金森杆(SHPB)及同步箱式电阻炉, 对 20~800 °C 实时高温下的花岗岩试件进行冲击压缩试验, 分析高温作用及加载应变率对试件破碎特征、动态抗压强度及能量吸收情况的影响, 基于粉晶 X 射线衍射分析矿物成分变化与花岗岩动力学强度的内在关联。研究表明: 20~400 °C 高温试件以脆性劈裂破坏为主, 碎片形态呈纺锤形, 两端尖锐, 而 600 °C 高温试件以塑性破坏为主, 形状趋于圆钝; 试件峰值应力随温度升高具有先增大后减小的变化趋势, 200 °C 时达到强度阈值, 随后持续降低; 单位体积岩石耗散能与加载应变率呈线性正相关关系, 与温度呈二次函数关系, 与峰值应力呈指数关系, 拟合效果良好; 石英、云母和长石三种主要矿物成分的含量波动、相态变化等因素共同导致花岗岩动力学强度在 200 °C 后逐步劣化。

关键词: 实时高温; 花岗岩; SHPB; 能量耗散; XRD

中图分类号: O383.2

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Mechanical properties of granite under impact compression after real-time high temperature

HUANG Yaoying¹, QU Lu^{1,2}, LI Yubai^{1,2}, ZHAI Yue^{1,2}, XIE Yifan¹

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Key Laboratory of Mine Geological Disaster Mechanism and Prevention, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The study of thermal-mechanical coupling mechanism is of great significance to deep rock engineering such as rock tunnel fire, nuclear waste treatment and geothermal development. To investigate the effect of high temperature on the impact mechanical properties of granite, the real-time high temperature impact compression test was carried out on the granite specimen at 20~800 °C. The Caledonian granite in the construction area of Sejila Mountain on Sichuan-Tibet Railway was taken as the research object, real-time high temperature impact compression tests were carried out on the specimens under five different temperatures (20, 200, 400, 600 and 800 °C) with three average loading rates (72.8, 144.97 and 230.29 s⁻¹) by using the split Hopkinson pressure bar (SHPB) and synchronous box-type resistance furnace. The effects of high temperature and loading strain rate on the fracture characteristics, dynamic compressive strength and fractal dimension of the specimens were analyzed. The variation law of dissipated energy per unit volume was also studied and discussed. In addition, the intrinsic correlation between the change of mineral composition and the dynamic strength of granite was analyzed based on X-ray powder crystal diffraction. The results show that the brittle fracture of the specimens at 20 to 400 °C is dominant, and the fragments are spindle-shaped with sharp ends. The specimens at 600 °C are dominated by plastic failure, and their shapes tend

* 收稿日期: 2022-05-09; 修回日期: 2022-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(41941019); 陕西省创新人才推进计划-科研创新团队(2021TD-55); 中央高校基本科研业务费专项(300102261101)

第一作者: 黄耀莹(1999—), 女, 硕士研究生, 2021126140@chd.edu.cn

通信作者: 屈璐(1983—), 女, 博士, 讲师, qulu@chd.edu.cn

to be round. The peak stress of specimens increases first and then decreases with the increase of temperature, reaches the strength threshold at 200 °C, and then decreases continuously. The dissipated energy per unit volume of rock has a positive linear correlation with the loading strain rate and a quadratic function with the temperature, which shows a good fitting effect. The content fluctuation and phase change of the three main mineral components of quartz, mica and feldspar lead to the gradual deterioration of the dynamic strength of granite after 200 °C.

Keywords: real-time high temperature; granite; SHPB; energy dissipation; XRD

地下空间与岩体隧道火灾事故的峰值温度可达 1 000 °C^[1] 以上, 岩体受热后力学特性改变, 极易威胁工程安全; 干热岩地热资源开采过程中, 岩石长时间承受高温(150~650 °C^[2])造成的热损伤, 物理力学性能有所改变; 石油第三次开采过程中, 使用热力采油^[3]、火烧油层等技术降低油气黏度, 提高石油采收率, 其所在岩层也因受热改变力学性能。此外在隧道爆破开挖^[4]、矿山安全、建筑安全等行业中也需要考虑岩石在实时高温与动荷载耦合作用下的力学特性。因此, 研究实时高温环境中岩石的动力学特性变化具有重要工程意义。

温度对岩石力学性能的影响研究广泛开展于 20 世纪 70 年代后, 学者们从纵波速度、单轴抗压强度、裂纹发育等不同角度, 对热处理岩石力学特性进行了试验研究。研究发现, 在高温环境中, 岩石单轴强度表现出明显软化效应^[5,6], 这是由于温度升高导致矿物颗粒胶结处开裂^[7], 促进岩石内部裂纹发育^[8]。随着研究深入, 更多学者发现, 花岗岩热损伤效应存在门槛温度: 赵阳升等^[9-10] 对高温冷却后的花岗岩进行了宏观力学特性、细观结构及渗透性等多方面试验研究, 发现 200 °C 下花岗岩热裂纹数量较少, 300 °C 以上时裂纹数量迅速增多、尺寸增大; 张静华等^[11] 和王靖涛等^[12] 对花岗岩临界应力强度因子的温度效应进行了研究, 发现花岗岩断裂韧度随温度变化存在一门槛温度 200 °C。受限于试验设备, 已有研究多围绕高温冷却后的岩石开展试验, 随着技术进步, 近年来有学者对实时高温下的岩石力学特性展开研究: Yin 等^[13-14] 和王超等^[15] 运用带有加热装置的电液伺服材料试验机对热处理后和实时高温花岗岩、砂岩等进行了静力与动力试验, 结果显示, 实时高温下花岗岩脆-延转变的临界温度更低, 压密阶段更长, 砂岩纵波波速在 200 °C 以前降幅较小, 200 °C 以后急速下降; 许锡昌等^[16] 对高温下花岗岩力学性质进行了研究, 发现 200 °C 为单轴抗压强度劣化的门槛温度。现有实时高温动力学试验主要通过将试件加热至目标温度后, 转移至相同温度下的管式加热炉中进行冲击试验^[17-18] 来完成, 但管式加热炉会使杆件同步升温, 影响杆件屈服强度并带来无法避免的试验误差。

综上, 已有研究工作多集中于静力-温度耦合下的岩石力学特性, 且现有实时高温动力学试验受限于试验条件, 误差较大, 热-力耦合岩石动力学特性研究仍有待深入。因此, 本文以岩体隧道爆破开挖为工程背景, 以川藏铁路色季拉山施工区域加里东期花岗岩为实验材料, 利用霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)及同步高温炉对不同温度下的试件进行冲击压缩试验, 研究热-力耦合作用下花岗岩试件的力学特性、破碎分形、能量耗散规律, 基于粉晶 X 射线衍射对试件进行矿物成分分析, 研究矿物成分变化与花岗岩动力学强度的内在关联, 为实际工程设计提供理论依据与参考。

1 试验设备与方法

1.1 花岗岩试件制备

本文中以川藏铁路某隧道施工区域花岗岩为研究对象, 该花岗岩以灰白色为主, 成分主要为石英、长石及黑云母等。SHPB 动力试验的试件尺寸选取一般满足 $0.5 \leq d/h \leq 1$, 为确保加热过程中试件受热均匀, 根据 GB/T 50266-2013《工程岩体试验方法标准》规范要求并结合实际试验条件, 将花岗岩加工成直径 48 mm、高度 25 mm 的圆柱体标准试件, 如图 1 所示。



图 1 标准花岗岩试件

Fig. 1 Standard granite specimens

1.2 动态冲击压缩试验

采用 $\varnothing 50$ mm SHPB 系统及同步智能箱式电阻炉进行实时高温冲击压缩试验, 如图 2 所示。该套设备可在达到目标温度后迅速完成冲击力学试验, 既能避免将试件与部分杆件同时加热影响杆件力学参数, 也可有效降低高温试件移动导致的温度损失。SHPB 系统各杆件均采用高强度不锈钢制成, 弹性模量 210 GPa、密度 7 800 kg/m³, 其中子弹长度 500 mm, 直径为 50 mm。图 3 给出了同步高温炉测试系统的结构示意图。

将筛选出的试件进行分组编号, 共设置 20 ℃ (常温)、200 ℃、400 ℃、600 ℃ 和 800 ℃ 五个温度等级, 每种工况设置 3 块试件。使用人工智能电阻炉 (型号: AI-518; 测温精度: ± 0.1 ℃; 温度范围: 0~1200 ℃) 加热试件。为使试件受热均匀, 设置升温速率 10 ℃/min, 达到目标温度后恒温 2 h^[19], 恒温后使用同步对杆机构将入射杆与透射杆送至高温炉内, 与高温试件紧密贴合, 随即迅速完成冲击试验。冲击试验结束后自然冷却并收集破碎试件, 进行破碎筛分试验。



图 2 SHPB 系统及同步智能箱式电阻炉
Fig. 2 SHPB system and synchronous intelligent box-type resistance furnace

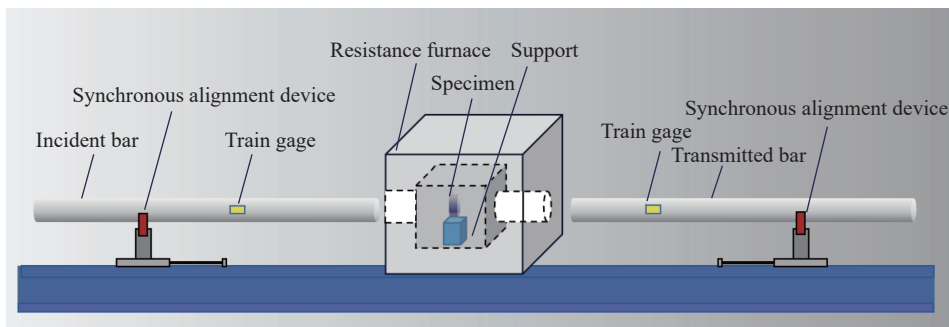


图 3 同步高温炉测试系统结构示意图
Fig. 3 Sketch of synchronous high temperature furnace test system structure

1.3 数据计算方法

通过应变片采集三种波形的脉冲信号, 基于一维应力波原理和均匀性假定, 计算试件两端轴向荷载 $p(t)$ 、应力 $\sigma(t)$ 、应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$ 和应变 $\varepsilon(t)$ ^[20]:

$$p(t) = A_0 \sigma_t(t) = E_0 A_0 \varepsilon_t(t) \quad (1)$$

$$\sigma(t) = \frac{E_0 A_0}{A_s} \varepsilon_t(t) \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2c_0}{L_s} \varepsilon_t(t) \quad (3)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2c_0}{L_s} \int_0^t \varepsilon_r(t) dt \quad (4)$$

式中: A_0 为杆件横截面积, E_0 为杆件弹性模量, c_0 为纵波波速, L_s 为试件厚度, $\varepsilon_t(t)$ 为透射波, $\varepsilon_r(t)$ 为反射波。

共设置 0.2、0.4 和 0.6 MPa 等 3 种气压对试件进行冲击试验, 气缸压力增加促使子弹撞击入射杆的冲击速率增大, 平均加载应变率也随之增大。不同加载应变率下花岗岩试件的应变率时程曲线如图 4 所示, 取应变率曲线上升段拐点与下降段拐点区间内的平均值作为平均加载应变率, 计算得到试验参数如表 1 所示。

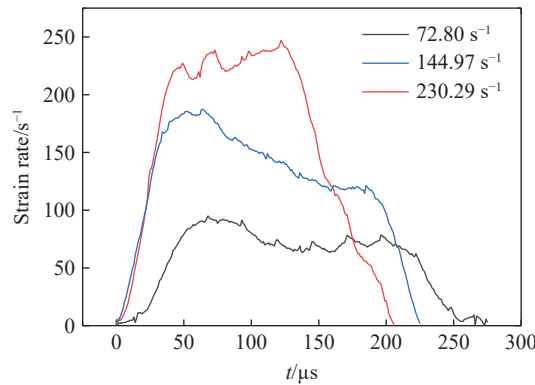


图 4 加载应变率曲线

Fig. 4 Strain rate curves

表 1 SHPB 试验参数

Table 1 Parameters of the test

气压/MPa	冲击速率/(m s ⁻¹)	平均应变率/s ⁻¹
0.2	5.4	74.80
0.4	8.8	144.97
0.6	11.3	230.29

1.4 波形整形

为减小弥散效应带来的应力波振荡现象^[21], 在撞击杆与入射杆接触端面处粘贴紫铜薄片作为缓冲-滤波手段, 过滤撞击产生的高频振荡。冲击气压为 0.2、0.4 和 0.6 MPa 时, 分别采用直径为 15、20 和 25 mm, 厚 1 mm 的紫铜片进行整形。整形前后的应力波波形的对比如图 5 所示, 整形前的入射波为陡峭的梯形, 且存在高频振荡现象; 整形后近似为半正弦形, 且波形相对稳定光滑。

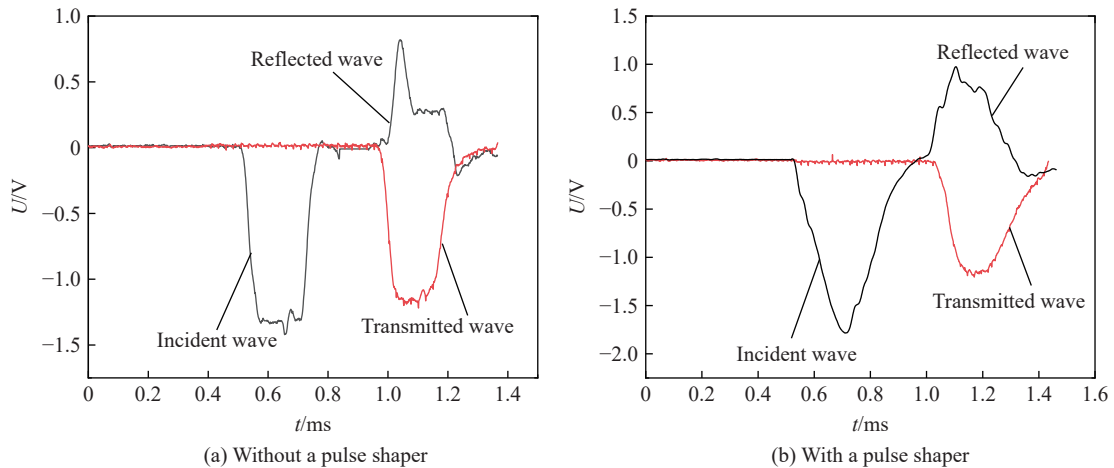


图 5 整形前后波形曲线

Fig. 5 Waveforms without and with a pulse shaper

2 冲击试验结果分析

2.1 破碎形态分析

如图 6 所示, 高温加热至 800 °C 时, 钾长石等矿物成分因水解作用发生了矿物分解^[22], 劣化其力学性能, 另外温度作用促使花岗岩内部裂纹不断发育贯通^[23], 导致试件未经冲击已经破碎, 丧失力学强度。

花岗岩试件在同一实时高温下, 受到不同速率冲击荷载作用后的破碎形态如图 7~图 9 所示, 其中: 每幅子图中有 8 个位置, 分为两行, 用于放置不同尺寸的破碎块体(如对应尺寸无破碎块体, 则空出该位置): 第一行破碎块体粒径从左往右依次为: 大于 19 mm、16~19 mm、13.2~16 mm、9.5~13.2 mm, 第二行破碎块体粒径从左往右依次为: 小于 0.5 mm、0.5~2.36 mm、2.36~4.75 mm、4.75~9.5 mm。



图 6 800 °C 实时高温破碎试件

Fig. 6 Broken specimen at 800 °C real-time high temperature

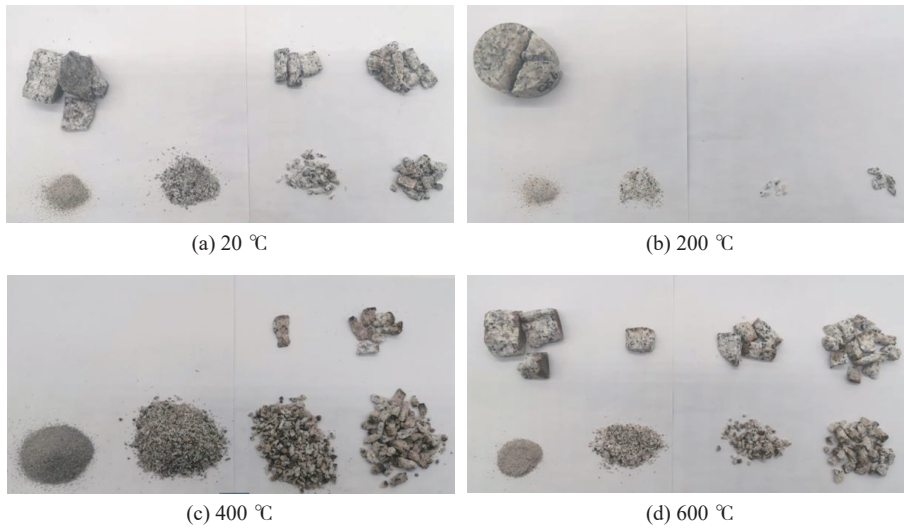


图 7 74.8 s⁻¹ 应变率时, 试件破碎形态

Fig. 7 Fragmentation morphologies of the specimen at the strain rate of 74.8 s⁻¹

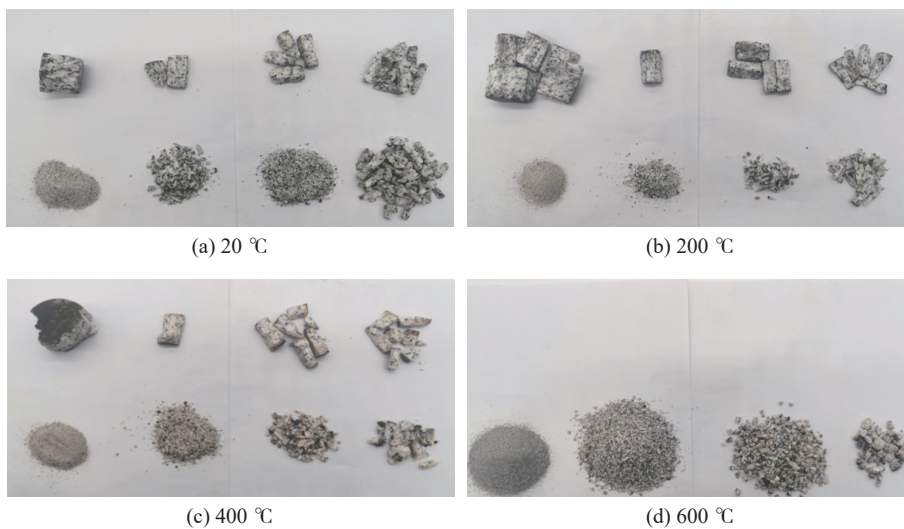


图 8 144.97 s⁻¹ 应变率时, 试件破碎形态

Fig. 8 Fragmentation morphologies of the specimen at the strain rate of 144.97 s⁻¹

对破碎筛分试验结果进行分析发现, 随着冲击速率增大, 试件整体破碎程度加剧。应变率由 74.8 s⁻¹ 增加至 144.97 s⁻¹ 时, 粒径大于 19 mm 的破碎试件碎块质量占比由 64.23% 下降至 22.59%, 粒径小于等于

2.36 mm 的破碎试件颗粒质量占比由 6.98% 上升至 92.67%; 应变率为 230.29 s^{-1} 时基本没有大粒径颗粒出现, 粒径小于 2.36 mm 的细微颗粒质量占比高达 83.26%。随着温度升高, $20 \sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内试件破碎程度变化规律不明显; 高于 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 试件破碎程度明显加剧, 基本无大粒径碎块存在, 粉末状颗粒质量占比显著增加。

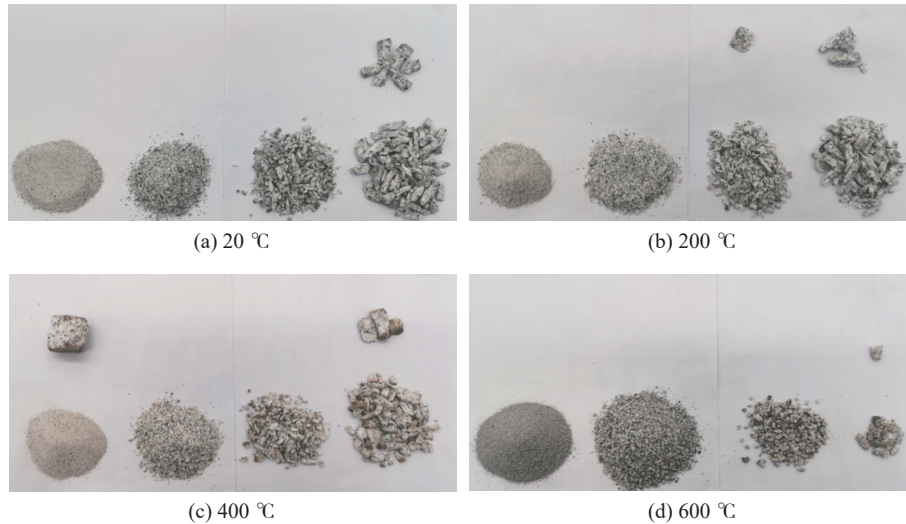


图 9 230.29 s^{-1} 应变率时, 试件破碎形态

Fig. 9 Fragmentation morphologies of the specimen at the strain rate of 230.29 s^{-1}

20 、 200 和 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温试件冲击破碎形式以脆性劈裂破坏为主, 试件破坏前无明显变形, 且粒径范围在 $4.75 \sim 9.5 \text{ mm}$ 内的碎块形态呈纺锤形, 两端尖锐(见图 10(a)); $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 试件碎块以塑性破坏为主, 形状趋于圆钝(见图 10(b))。

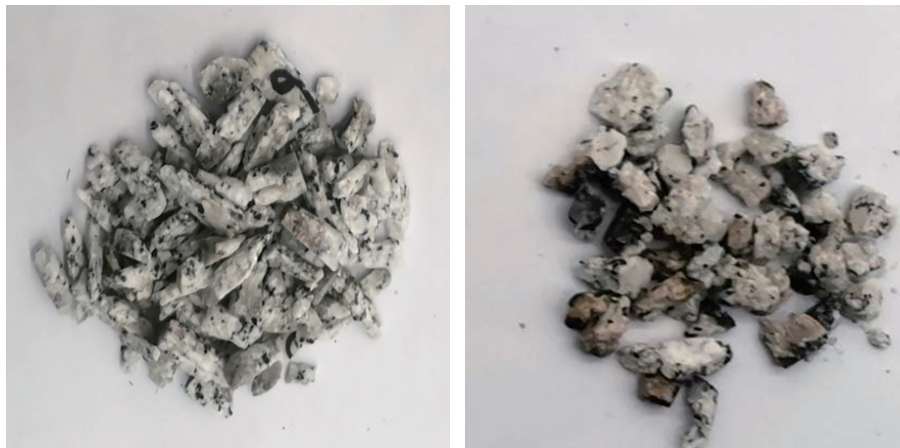


图 10 破碎试件细节

Fig. 10 Detail of the broken specimen

2.2 力学特性分析

图 11 所示的应力-应变曲线反映了试件从变形发展到冲击破坏的过程。表 2 为不同温度下的试件峰值应力。试验曲线无明显压密段, 部分曲线初始阶段斜率急剧增大, 这是由于尽管采用波形整形铜片、试件两端涂抹钼基润滑脂等措施, 在入射杆接触试样的瞬间, 仍会出现因杆件接触不平稳导致的数据振荡现象, 造成变形模量急剧升高。加载应变率为 74.8 s^{-1} 时(见图 7(a)), 试验曲线在达到峰值应力前

出现明显的近似平台段, 因为冲击速率较小时, 当外界荷载达到试件最大承载能力, 由于作用时间极短, 岩石破碎后会存在短暂的适应停滞期, 从而产生一种能短时间抵抗峰值载荷的现象^[24]。

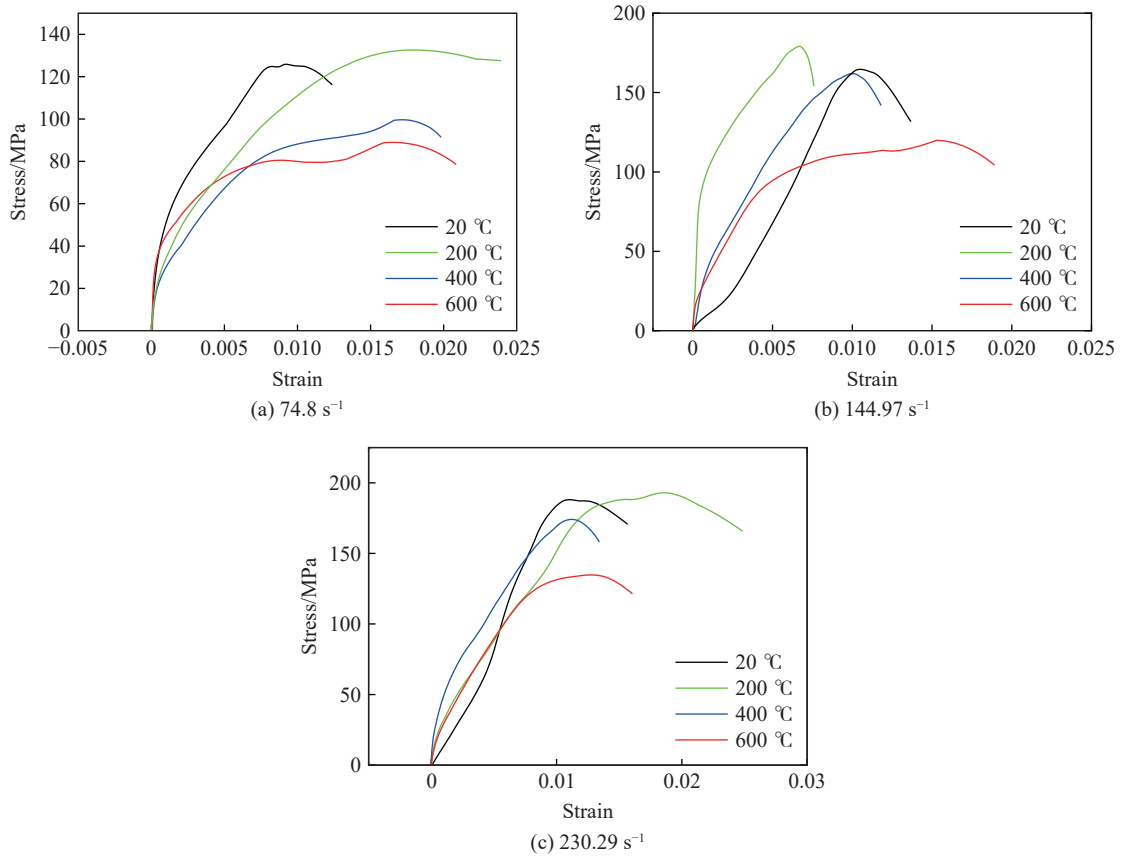


图 11 应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves

表 2 峰值应力

Table 2 Peak stress

平均应变率/s ⁻¹	试件峰值应力/MPa				
	20 °C	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C
74.80	125.25	132.08	103.43	92.517	0
144.97	164.39	178.38	161.38	114.59	0
230.29	188.91	190.91	174.00	135.80	0

不同冲击速率下花岗岩的峰值应力随温度变化情况如图 12 所示。由于应变率对岩石材料力学性能的强化效应, 试验冲击速率对花岗岩试件的抗冲击力学性能影响较为显著, 随着冲击速率的增大, 试件峰值应力具有明显上升趋势。

随着温度升高, 试件峰值应力具有先增大后减小的变化趋势, 在 200 °C 时达到强度阈值, 随后持续降低。这一变化规律与文献 [5,16,25] 对高温花岗岩抗压强度研究得出的结论一致, 即花岗岩峰值应力的门槛温度为 200 °C, 25~200 °C 区间内缓慢上升, 200 °C 以后迅速下降。不同应变率下, 200 °C 的花岗岩峰值应力较常温分别提升了 5.45%、8.51% 和 1.06%。其原因是 200 °C 以内的升温过程会造成岩石内部自由水蒸发, 孔隙水压力减小, 同时矿物成分受热膨胀, 挤压填充试件内原生裂隙^[25], 因此其动力学特性得到一定强化。200~400 °C 区间内, 不同应变率下的花岗岩试件的峰值应力随温度升高而降低, 分

别由 132.08、178.38 和 190.91 MPa 降低至 103.43、161.38 和 173.94 MPa, 降低幅度由 8.89% 到 21.69% 不等。原因是受温度影响, 花岗岩内部孔隙逐渐发展贯通, 同时高温导致试件内结构水脱失^[26], 引起其内部裂隙发展, 劣化试件动态力学性能。400~600 °C 区间内花岗岩峰值应力持续降低, 降幅可达 28.99%。这是由于随着温度的进一步升高, 试件内部结构热应力逐步增大, 导致原有孔隙和微裂隙在结构热应力的影响下发展贯通, 形成较大裂隙, 同时黑云母、角闪石等矿物成分脱水熔融生成新矿物熔体^[27], 加大峰值应力降低幅度。

峰值应变作为试件脆塑性大小的判断依据, 表征了试件的塑性强弱。随温度升高, 花岗岩试件峰值应变整体呈增大趋势, 在 200~400 °C 内有所波动。20 °C 时峰值应变为 0.010 1、0.010 4 和 0.011 2, 600 °C 时峰值应变为 0.017 9、0.015 2 和 0.011 9, 增幅约为 6.25%~72.23%。造成这种现象的原因是: 高温作用改变了花岗岩试件内部矿物成分的形态和相态, 造成矿物熔融软化^[28], 试件原有组分接触状态与整体结构被破坏, 裂纹发育更加贯通, 因此花岗岩试件的塑性特征得到加强。

2.3 破碎分形分析

分形维数大小是破碎程度的量化体现, 根据 GB/T 14685—2011《建设用卵石、碎石》, 收集 SHPB 冲击试验后的破碎块体, 通过筛分称量不同粒径范围的破碎试件质量, 按质量-频率关系^[28] 计算花岗岩冲击破碎块度的分布

$$Y = \frac{M_x}{M} = \left(\frac{X}{X_m} \right)^{3-D} \quad (5)$$

式中: M_x 为粒径小于 X 的破碎块体质量之和, M 为破碎块体总质量, X 为破碎颗粒粒径, X_m 为破碎颗粒的最大粒径, D 为破碎颗粒块度分布的分形维数。

分形维数与温度、加载应变率的关系如图 13 所示。由图可知, 随着应变率的增大, 试件分形维数具有明显增大趋势。例如 74.8 s⁻¹ 时, 不同温度下破碎试件的分形维数分别为 2.09、1.95、1.99 和 2.39, 当应变率增大到 230.29 s⁻¹ 时, 不同温度下破碎试件的分形维数则分别增大至 2.439 1、2.405 3、2.500 3 和 2.705, 增幅从 13.03% 到 25.52% 不等。分形维数随冲击速率增大而增大, 说明试件破碎后的小颗粒占比增加, 即冲击速率的增加会导致试件破坏程度加剧。

随着温度升高, 分形维数呈整体上升趋势, 20~400 °C 温度区间内分形维数有所波动, 变化规律不明显; 400~600 °C, 分形维数呈明显上升趋势, 由 1.99、2.35 和 2.50 增长至 2.39、2.57 和 2.70, 增幅可达 20.10%。分形维数随温度升高而增大, 说明实时高温冲击破碎后, 试件小粒径颗粒含量增高, 破碎程度加剧。

分形维数与峰值应力的关系如图 14 所示。峰值应力表征试件动力学强度的大小, 分形维数是破碎程度的量化体现, 二者线性正相关, 因此分形维数可以作为试件动力学强度的劣化的一种衡量指标。

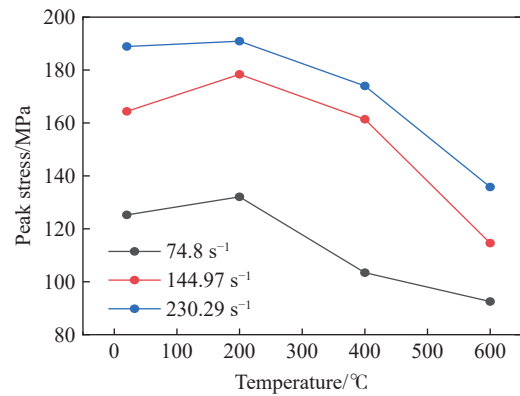


图 12 峰值应力与温度、冲击荷载关系

Fig. 12 Relationship between peak stress and temperature and strain rate

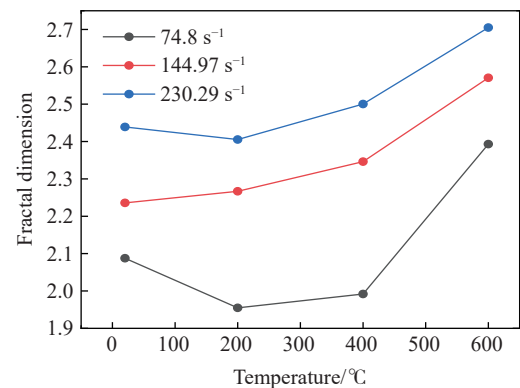


图 13 分形维数与温度、应变率关系

Fig. 13 Relationship between fractal dimension and temperature and strain rate

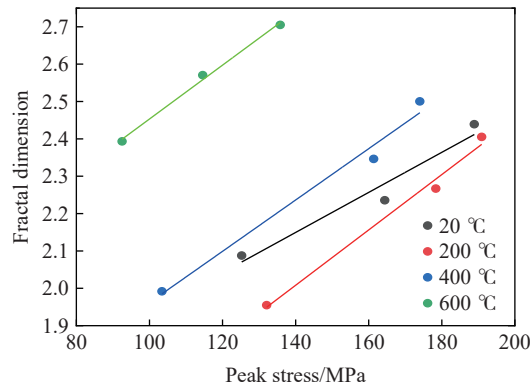


图 14 分形维数与峰值应力关系

Fig. 14 Relationship between fractal dimension and peak stress

3 能量分析

3.1 计算原理

岩石冲击破坏是不同形式能量相互转化的结果, 能量演化促进试件内部损伤发育。设撞击杆携带的入射能为 W_i , 反射能为 W_r , 透射能为 W_t , 三种能量可通过下式计算得到:

$$W_i = A_s c_s E \int_0^t \varepsilon_i^2(t) dt \quad (6)$$

$$W_r = A_s c_s E \int_0^t \varepsilon_r^2(t) dt \quad (7)$$

$$W_t = A_s c_s E \int_0^t \varepsilon_t^2(t) dt \quad (8)$$

式中: A_s 、 c_s 、 E 分别为杆件横截面积、纵波波速和杆件的弹性模量。

图 15 为 SHPB 试验中花岗岩入射能、反射能与透射能的时程曲线。由图可知, 随着采样时间增加, 入射能、反射能与透射能也持续增长, 达到最大值后趋于稳定。计算得出, 入射能大于反射、透射能之和, 这说明有一部分能量被试件本身吸收, 这部分能量即为吸收能。

冲击过程中, 绝大部分吸收能转化为破碎耗散能, 少部分转化为碎块动能^[29], 因此本研究以吸收能近似替代破碎耗散能。根据能量守恒定律, 计算可得试件破坏过程耗散能量:

$$W = W_i - W_r - W_t \quad (9)$$

为更直观地比较不同温度及冲击荷载下试件的能量吸收特性, 定义体积能量(w)为单位体积花岗岩耗散能^[30]:

$$w = W/V_g \quad (10)$$

式中: V_g 为试件体积。

3.2 体积能量变化规律

表 3 给出了计算得出的试件体积能量, 其中: $\bar{\varepsilon}$ 为平均应变率。图 16~图 17 给出了体积能量与加载应变率和温度的关系。分析发现, 体积能量随应变率增大而近似线性增大, 这是由于冲击速率越大, 入射杆携带能量越大, 用于岩石破碎的耗能越多, 试件内部被激活的裂纹增加, 因此体积能量随之增大。

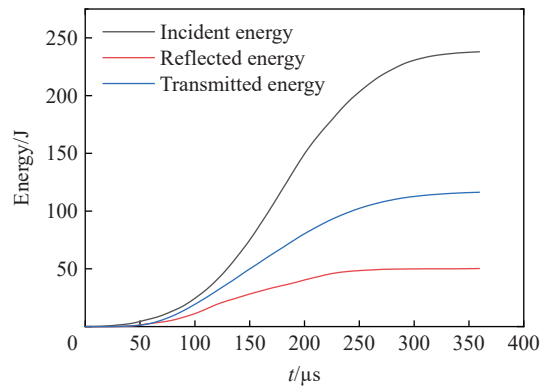


图 15 能量时程曲线

Fig. 15 Curve of energy

表 3 体积能量

Table 3 Volumic energy

$\bar{\varepsilon}/s^{-1}$	$w/(J \cdot cm^{-3})$				
	20 °C	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C
74.80	0.49	0.36	0.46	0.76	0.49
144.97	1.56	1.22	1.25	1.46	1.56
230.29	3.61	3.24	3.31	4.40	3.61

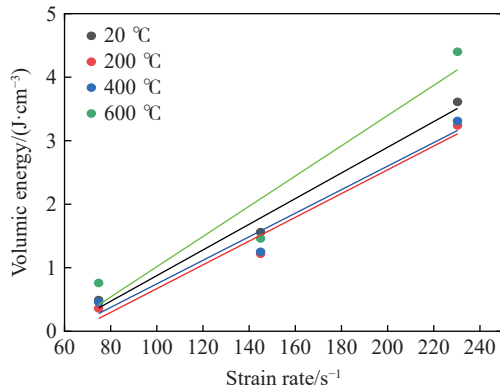


图 16 体积能量与应变率关系

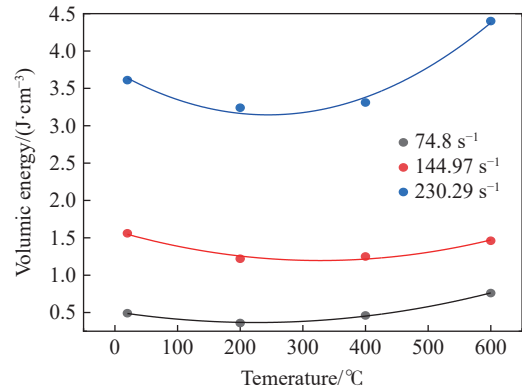


图 17 体积能量与温度关系

Fig. 16 Relationship between volumic energy and strain rate

Fig. 17 Relationship between volumic energy and temperature

同一加载应变率下, 随着温度升高, 体积能量先减小后增大, 变化趋势很好地满足二次函数形式:

$$w = \begin{cases} 3 \times 10^{-6}T^2 - 0.0013T + 0.5115 & \bar{\varepsilon} = 74.80 \text{ s}^{-1}, R^2 = 0.99 \\ 4 \times 10^{-6}T^2 - 0.0024T + 1.5939 & \bar{\varepsilon} = 144.97 \text{ s}^{-1}, R^2 = 0.97 \\ 1 \times 10^{-6}T^2 - 0.0048T + 0.7287 & \bar{\varepsilon} = 230.29 \text{ s}^{-1}, R^2 = 0.99 \end{cases} \quad (11)$$

式中: w 的单位为 J/cm^3 ; T 为温度, $^{\circ}C$; R^2 为决定系数。三种冲击速率下的 R^2 均大于等于 0.97, 说明拟合效果良好。吸收能越大, 说明试件内部用于裂纹发育的能量越多, 强度越弱。因此, 体积能量的先减后增表明试件强度先升后降, 与冲击试验结果一致。

3.3 吸收能与动态抗压强度

岩石的失稳破坏是能量转移与吸收的结果, 体积能量变化与试件内部损伤演化、强度劣化息息相关。不同温度下花岗岩动态抗压强度与体积能量关系如图 18 所示, 动态抗压强度随体积能量增大而增大, 二者呈指数相关。这是由于体积能量越大, 单位体积花岗岩吸收能量越多, 裂纹发育越贯通, 试件损伤越严重, 导致试件力学性能劣化。

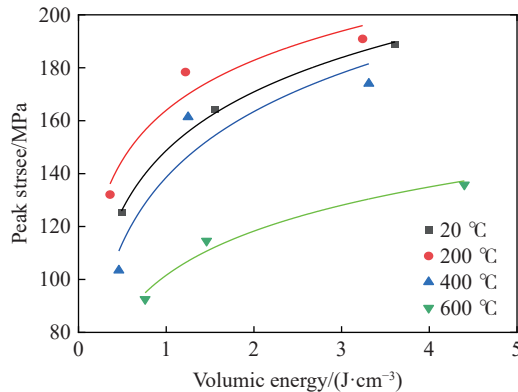


图 18 动态抗压强度与体积能量关系

Fig. 18 Relationship between fractal dimension and volumic energy of granite

4 XRD 结果分析

为进一步分析矿物成分变化对试验结果的影响, 对破碎试件进行 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析。根据 XRD 结果, 分别绘制花岗岩在 20、200、400 和 600 °C 下的 X 射线衍射图谱, 如图 19 所示。

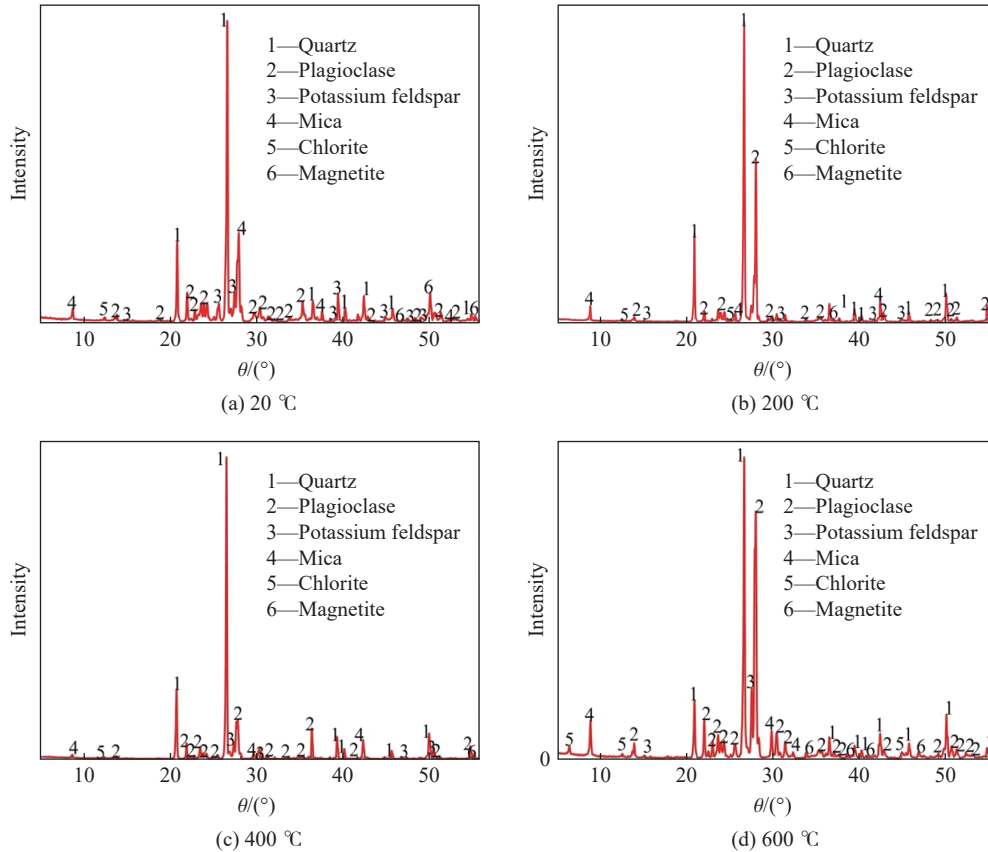


图 19 不同实时高温下花岗岩 X 衍射图谱

Fig. 19 X-ray diffraction patterns of granite at different real-time high temperatures

由衍射结果可知, 川藏铁路色季拉山施工区域加里东期花岗岩主要成分为石英、长石(以斜长石、钠长石为主)和云母, 并含有少量绿泥石和磁铁矿。在四种试验温度下, 花岗岩主要矿物成分衍射信息均未消失, 说明该地区花岗岩在 20~600 °C 化学性质较为稳定。通过 K 值法^[22]计算得出不同实时温度下花岗岩主要矿物成分的相对含量, 如表 4 所示。

由表 4 可知, 20~400 °C 试件中石英含量随温度升高而不断增大, 600 °C 时有所下降, 这可能是由于在 573 °C 附近石英发生了低温 α 石英向高温 β 石英的相变过程。长石和云母含量随温度升高有所波动, 规律不明显, 由于二者主要成分均为金属铝硅酸盐, 因此单独分析某一种成分的含量变化较为片面, 需要综合分析长石和云母的相对含量之和, 绘制长石、云母含量之和随温度变化曲线, 如图 20 所示。

由图 20 可知, 20~200 °C 长石和云母相对含量之和增大, 在 200 °C 时达到最大, 与冲击试验结果保持一致。200~400 °C 长石和云母相对含量下降, 石英相对含量增大, 从材料方面解释了花岗岩破碎分形维数在 20~400 °C 变化规律不明显的原因: 三种主要矿物成分含量在 20~400 °C 内随温度变化规律有

表 4 矿物成分的质量分数(%)

Table 4 Mass fraction (%) of the components

温度/°C	石英	长石	云母	绿泥石	磁铁矿
20	53.4	32.2	7.2	2.2	5.0
200	52.5	35.6	8.4	1.7	0.5
400	77.4	17.1	3.4	1.4	0.7
600	33.3	50.0	13.2	1.5	0.6

所不同,因此试件硬度变化规律不明显,导致分形维数波动。400~600 °C 下长石云母含量之和明显提升,这是由于温度升高导致石英矿物晶格破坏,羟基逸出形成钠长石^[27],结合石英含量的下降趋势,解释了花岗岩 600 °C 下破碎形态的塑性特征:石英硬度为 7,长石硬度在 6~6.5,云母硬度在 2~3 左右,温度由 400 °C 升高到 600 °C 时,硬度较大的石英含量下降,硬度较小的长石和云母含量增大,导致试件整体硬度减小,脆性随之减小,因此破坏形态转变为塑性破坏。三种主要矿物成分的含量变化和相变共同作用,最终导致 200 °C 后试件的动力学性能劣化、分形维数波动与破碎形态变化。

5 结 论

本文利用配有实时高温装置的 $\phi 50$ mm SHPB 试验系统对花岗岩进行实时高温(20~800 °C)冲击压缩力学特性研究,研究并分析了不同温度等级下花岗岩的破碎分形、动力学性能变化、能量吸收和矿物成分变化的内在关联。总结规律如下:

(1) 试件破碎形式为劈裂破坏,600 °C 以下高温试件以脆性破坏为主,试件破坏前无明显变形,且粒径范围在 4.75~9.5 mm 内的碎块形态呈纺锤形,两端尖锐;600 °C 试件以塑性破坏为主,形状趋于圆钝;

(2) 随着温度升高,试件峰值应力具有先增大后减小的变化趋势,在 200 °C 时达到强度阈值,随后持续降低;不同冲击速率下,200 °C 的花岗岩峰值应力较 20 °C 分别提升了 5.45%、8.51% 和 1.06%;400 °C 花岗岩峰值应力较 200 °C 降低 8.89%~21.69%;600 °C 峰值应力较 400 °C 下降了 10.55%~28.99%;800 °C 实时高温中,花岗岩未经冲击即破碎;

(3) 体积能量与加载应变率线性正相关,与温度呈二次函数关系,与峰值应力呈指数相关,拟合效果良好;

(4) 花岗岩试件在 20~600 °C 化学性质较稳定;云母、长石和石英的含量波动共同导致花岗岩动力学强度在 200 °C 后随温度升高逐步劣化。

参考文献:

- [1] 闫治国,朱合华,梁利. 火灾高温下隧道衬砌管片力学性能试验 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(6): 823-828. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2012.06.004.
YAN Z G, ZHU H H, LIANG L. Experimental study on mechanical performance of lining segments in fire accidents [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012, 40(6): 823-828. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2012.06.004.
- [2] MARTÍN-GAMBOA M, IRIBARREN D, DUFOUR J. On the environmental suitability of high-and low-enthalpy geothermal systems [J]. *Geothermics*, 2015, 53: 27-37. DOI: 10.1016/j.geothermics.2014.03.012.
- [3] 杨丹. 三次采油化学驱油技术现状与未来展望 [J]. *化学工程与装备*, 2021(1): 216-217. DOI: 10.19566/j.cnki.cn35-1285/tq.2021.01.099.
- [4] 唐红梅,周云涛,陈洪凯,等. 地下工程爆破对危岩稳定性的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(2): 278-284. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0278-07.
TANG H M, ZHOU Y T, CHEN H K, et al. Impact study on stability of unstable rock under underground construction blasting [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(2): 278-284. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0278-07.
- [5] 罗生银,窦斌,田红,等. 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*, 2020, 27(1): 178-184. DOI: 10.13745/j.esf.2020.1.19.

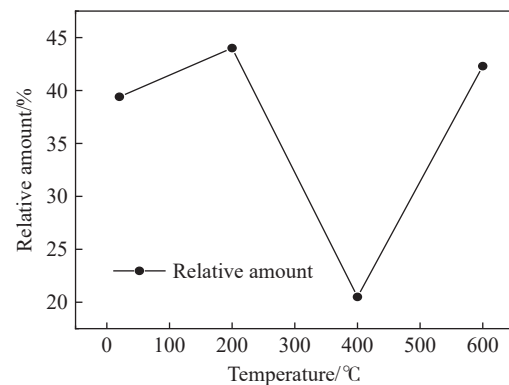


图 20 长石、云母相对含量之和与温度的关系

Fig. 20 Relationship between the sum of feldspar and mica content and temperature

- LUO S Y, DOU B, TIAN H, et al. Comparative experimental study on physical and mechanical properties of granite after natural cooling and under real-time high temperature [J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(1): 178–184. DOI: 10.13745/j.esf.2020.1.19.
- [6] 范飞林, 许金余. 大直径 SHPB 实验中的高温加载技术及其应用 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(1): 54–60. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)01-0054-07.
- FAN F L, XU J Y. High-temperature loading techniques in large-diameter SHPB experiment and its application [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(1): 54–60. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)01-0054-07.
- [7] 寇绍全, ALM O. 微裂隙和花岗岩的抗拉强度 [J]. *力学学报*, 1987, 19(4): 366–373. DOI: 10.6052/0459-1879-1987-4-1987-045.
- KOU S Q, ALM O. Microcracks and the tensile strength of granite [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1987, 19(4): 366–373. DOI: 10.6052/0459-1879-1987-4-1987-045.
- [8] 吴刚, 翟松韬, 王宇. 高温下花岗岩的细观结构与声发射特性研究 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(S1): 351–356. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S1.060.
- WU G, ZHAI S T, WANG Y. Research on characteristics of mesostructure and acoustic emission of granite under high temperature [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(S1): 351–356. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S1.060.
- [9] 赵阳升, 孟巧荣, 康天合, 等. 显微 CT 试验技术与花岗岩热破裂特征的细观研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(1): 28–34. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.01.005.
- ZHAO Y S, MENG Q R, KANG T H, et al. Micro-CT experimental technology and meso-investigation on thermal fracturing characteristics of granite [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(1): 28–34. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.01.005.
- [10] 赵阳升, 万志军, 张渊, 等. 岩石热破裂与渗透性相关规律的试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(10): 1970–1976.
- ZHAO Y S, WAN Z J, ZHANG Y, et al. Experimental study of related laws of rock thermal cracking and permeability [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(10): 1970–1976.
- [11] 张静华, 王靖涛, 赵爱国. 高温下花岗岩断裂特性的研究 [J]. *岩土力学*, 1987, 8(4): 11–16. DOI: 10.16285/j.rsm.1987.04.005.
- ZHANG J H, WANG J T, ZHAO A G. Fracture properties of granite at high temperature [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1987, 8(4): 11–16. DOI: 10.16285/j.rsm.1987.04.005.
- [12] 王靖涛, 赵爱国, 黄明昌. 花岗岩断裂韧度的高温效应 [J]. *岩土工程学报*, 1989, 11(6): 113–118. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.1989.06.015.
- WANG J T, ZHAO A G, HUANG M C. Effect of high temperature on the fracture toughness of granite [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, 11(6): 113–118. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.1989.06.015.
- [13] YIN T B, SHU R H, LI X B, et al. Comparison of mechanical properties in high temperature and thermal treatment granite [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(7): 1926–1937. DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64311-X.
- [14] 尹土兵, 李夕兵, 殷志强, 等. 高温后砂岩静、动态力学特性研究与比较 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(2): 273–279. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.02.006.
- YIN T B, LI X B, YIN Z Q, et al. Study and comparison of mechanical properties of sandstone under static and dynamic loadings after high temperature [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(2): 273–279. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.02.006.
- [15] 王超, 尹土兵. 实时高温下与热处理后砂岩动态拉伸特性研究 [J]. *工程爆破*, 2021, 27(6): 9–17, 51. DOI: 10.19931/j.EB.20210022.
- WANG C, YIN T B. Study on dynamic tensile properties of sandstone at real-time high temperatures and after thermal treatment [J]. *Engineering Blasting*, 2021, 27(6): 9–17, 51. DOI: 10.19931/j.EB.20210022.
- [16] 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. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2000.03.014.
- XU X C, LIU Q S. A preliminary study on basic mechanical properties for granite at high temperature [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(3): 332–335. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2000.03.014.
- [17] 王鹏, 许金余, 刘石, 等. 高温下砂岩动态力学特性研究 [J]. *兵工学报*, 2013, 34(2): 203–208. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.02.012.

- WANG P, XU J Y, LIU S, et al. Research on dynamic mechanical properties of sandstone at high temperature [J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(2): 203–208. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.02.012.
- [18] 平琦, 吴波, 吴明静, 等. 高温状态下岩石 SHPB 实验方法探究 [J]. *中国多媒体与网络教学学报(上旬刊)*, 2021(2): 205–207.
- [19] 刘石, 许金余. 高温作用对花岗岩动态压缩力学性能的影响研究 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(4): 195–198. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2014.04.035.
- LIU S, XU J Y. Effect of high temperature on dynamic compressive mechanical properties of granite [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(4): 195–198. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2014.04.035.
- [20] LI Y B, ZHAI Y, WANG C S, et al. Mechanical properties of Beishan granite under complex dynamic loads after thermal treatment [J]. *Engineering Geology*, 2020, 267: 105481. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105481.
- [21] 尹士兵. 考虑温度效应的岩石动力学行为研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- YIN T B. Study on dynamic behavior of rocks considering thermal effect [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [22] 刘贵, 周永胜. 花岗岩剪切变形与矿物成分变化的高温高压实验 [J]. *地质通报*, 2020, 39(11): 1840–1849.
- LIU G, ZHOU Y S. An experimental study of shear deformation and mineral composition changes of granite under the condition of high temperature and high pressure [J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(11): 1840–1849.
- [23] 张森, 舒彪, 梁铭, 等. 不同冷却方式下高温花岗岩微观损伤量化和机理分析 [J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(2): 106–114. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2022.02.013.
- ZHANG S, SHU B, LIANG M, et al. Quantification and mechanism analysis of meso-damage of high-temperature granite under different cooling modes [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(2): 106–114. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2022.02.013.
- [24] 王春, 熊宏威, 舒荣华, 等. 高温处理后含铜矽卡岩的动态力学特性及损伤破碎特征 [J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(9): 2801–2818.
- WANG C, XIONG H W, SHU R H, et al. Dynamic mechanical characteristic and damage-fracture behavior of deep copper-bearing skarn after high temperature treatment [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32(9): 2801–2818.
- [25] 徐小丽, 高峰, 张志镇, 等. 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*, 2015, 36(8): 2184–2192. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.08.008.
- XU X L, GAO F, ZHANG Z Z, et al. Experimental study of the effect of loading rates on mechanical properties of granite at real-time high temperature [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(8): 2184–2192. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.08.008.
- [26] 张志镇, 高峰, 高亚楠, 等. 高温影响下花岗岩孔径分布的分形结构及模型 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(12): 2426–2438. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0798.
- ZHANG Z Z, GAO F, GAO Y N, et al. Fractal structure and model of pore size distribution of granite under high temperatures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(12): 2426–2438. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0798.
- [27] 席道瑛. 花岗岩中矿物相变的物性特征 [J]. *矿物学报*, 1994, 14(3): 223–227. DOI: 10.16461/j.cnki.1000-4734.1994.03.003.
- XI D Y. Physical characteristics of mineral phase transition in the granite [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1994, 14(3): 223–227. DOI: 10.16461/j.cnki.1000-4734.1994.03.003.
- [28] 许金余, 刘石. 大理岩冲击加载试验碎块的分形特征分析 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(11): 3225–3229. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.11.005.
- XU J Y, LIU S. Research on fractal characteristics of marble fragments subjected to impact loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(11): 3225–3229. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.11.005.
- [29] ZHANG Z X, KOU S Q, JIANG L G, et al. Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(5): 745–762. DOI: 10.1016/S1365-1609(00)00008-3.
- [30] 许金余, 吕晓聪, 张军, 等. 围压条件下岩石循环冲击损伤的能量特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(S2): 4159–4165.
- XU J Y, LV X C, ZHANG J, et al. Research on energy properties of rock cyclical impact damage under confining pressure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(S2): 4159–4165.

(责任编辑 王小飞)