

DOI: 10.11779/CJGE202206022

# 高温后深部矽卡岩动力学特性及微观破坏机制研究

刘磊<sup>1</sup>, 李睿<sup>1</sup>, 秦浩<sup>1</sup>, 刘洋<sup>\*2</sup>

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 安徽省城市建设和地下空间工程技术研究中心(安徽建筑大学), 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 以深部 700 m 处矽卡岩为研究对象, 采用分离式霍普金森压杆装置开展不同冲击气压 (0.8, 1.0, 1.2 MPa) 下常温和经历不同温度 (200℃, 400℃, 600℃, 800℃) 作用后的岩石冲击压缩试验, 研究深部岩石的高温动力学行为; 借助 SEM 扫描电镜及 XRD 物相特征分析技术, 探索矽卡岩在高温和动载作用下的微观破坏机制。结果表明: 相同冲击气压作用下, 随着温度的升高, 矽卡岩强度劣化、延性增强; 相同温度条件下, 随着冲击气压的增大, 矽卡岩强度和变形均增大, 表现出明显的应变率效应。冲击气压增大或温度升高, 矽卡岩破碎程度均越来越剧烈, 破碎块度越来越小, 800℃时破碎状态以颗粒较小的碎石和粉末状为主。内部组分及结构的变化是造成矽卡岩力学性能变化的主要原因, 25℃~400℃矽卡岩主要为穿晶和沿晶断裂的脆性破坏; 400℃~600℃为矽卡岩由脆性向塑性转化的阈值温度区间; 600℃~800℃时则转变为韧窝和滑移断裂的塑性破坏。

**关键词:** 矽卡岩; 高温; SHPB; 动态力学特性; 微观

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)06-1166-09

**作者简介:** 刘磊(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要从事工程爆破与安全方面的教学和科研。E-mail: kgliulei@kust.edu.cn。

## Dynamic mechanical properties and microscopic damage characteristics of deep skarn after high-temperature treatment

LIU Lei<sup>1</sup>, LI Rui<sup>1</sup>, QIN Hao<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Anhui Province Engineering Technology Research Center of Urban Construction and Underground Space, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** The skarn at a depth of 700 m is taken as the research object to study the dynamic behaviors of deep rocks under high temperature. The impact compression tests at different impact air pressures (0.8, 1.0 and 1.2 MPa) are carried out on the skarn at room temperature and after high-temperature treatment (200 °C, 400 °C, 600 °C and 800 °C) by using the split Hopkinson press bar experimental device. The fracture surface is observed by the SEM scanning electron microscope and XRD phase characteristic analysis technology to explore the micro-failure mechanism of the skarn under high temperature and dynamic load. The test results show that under the same impact air pressure, the strength of the skarn deteriorates and the ductility increases with the increase of temperature. And at the same temperature, both the strength and deformation of the skarn increase with the increase of impact pressure, showing obvious strain rate effect. With the increase of impact pressure or temperature, the crushing degree of the skarn becomes more and more intense, and the fragmentation becomes smaller and smaller, and especially smaller particles are mainly crushed at 800℃. The change of internal composition and structure is the main reason for the change of mechanical properties of the skarn. The brittle failure of the skarn is mainly transgranular and intergranular fracture at 25℃~400℃. 400℃~600℃ is the threshold temperature range of skarn transformation from brittle to plastic. When the temperature degree is up to 600℃~800℃, it transforms into dimple and slip fracture.

**Key words:** skarn; high temperature; SHPB; dynamic mechanical property; microscopic damage characteristic

## 0 引言

温度升高可以改变岩石的内部结构和矿物成分, 导致岩石的性能发生变化。随着各类地下工程不断向深部发展, 岩层温度逐渐升高, 高温热害日益严重<sup>[1-2]</sup>, 高温环境中岩石工程安全问题成为深部岩石力学研究的热点问题之一。深部岩石开挖常采用爆破作业, 岩

石在动力载荷作用下的力学行为往往与静载荷下的力学行为存在差异, 因此, 研究高温环境中岩石动力学特性具有重要的工程实用价值和理论意义。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11862010)

收稿日期: 2021-08-18

\*通信作者 (E-mail: liuyang880205@126.com)

目前,国内外学者主要在高温岩石的静力学特性<sup>[3]</sup>、高温后岩石物理特性<sup>[4-5]</sup>方面开展研究。同时,随着分离式霍普金森压杆(SHPB)测试技术被广泛应用于岩石材料的动态力学性能方面的研究<sup>[6-9]</sup>,有学者利用SHPB技术对受高温影响的岩石材料的动态抗压强度、动态弹性模量等宏观动态力学性能指标进行了研究<sup>[10-12]</sup>;Wang等<sup>[13]</sup>对常温及200℃~500℃高温下华山花岗岩进行了动态压缩试验,研究了温度和应变速率对花岗岩力学性能的影响,并构建了基于Weibull分布的岩石统计损伤本构模型,分析了模型参数的影响因素;Fan等<sup>[14]</sup>利用SEM扫描电镜对200℃~800℃高温处理后花岗岩高温损伤裂纹发育进行了研究,并结合常温及200℃~800℃高温后花岗岩SHPB实验探索高温损伤对花岗岩动力行为影响;平琦等<sup>[15-16]</sup>研究了25℃~1000℃高温下和25℃~800℃高温作用后砂岩的应力-应变曲线、峰值强度、峰值应变和破坏模式等。

从上述研究现状不难发现,高温下或高温作用后岩石动力学特性的研究主要集中于从宏观角度出发考察温度-冲击荷载对岩石材料动态力学性能的影响,而从微观的角度对高温-动力作用后岩石内部组分、岩石裂纹发育破坏等微观层面的考察仍不够充分,且研究对象多为砂岩、花岗岩或大理岩等。云贵高原金属矿产丰富,矿体围岩种类繁多<sup>[17]</sup>,因此,选用具有代表性的矽卡岩作为研究对象,利用分离式霍普金森压杆(SHPB)装置、X射线衍射仪(XRD)和电子扫描电镜(SEM)对矽卡岩受高温作用后动态力学特性及微观破坏机制进行研究,为云贵高原深部矿山开采提供参考依据。

## 1 岩样制备及试验设备

### 1.1 岩样制备

试验所用矽卡岩岩样取自云锡集团卡房分矿地下700 m深处,参照国际岩石力学学会(ISRM)的岩石力学实验建议方法<sup>[18]</sup>确定岩石试样直径为50 mm、高径比为0.8圆柱体试件。

### 1.2 岩样高温处理

采用XW7L-12箱式电阻炉加热矽卡岩试样,设定加热速率为10℃/min,待加热至设定温度后保持恒温,恒温时间为1 h,恒温结束后打开炉门,让试件自然冷却至室温后再从炉中取出。

为避免经过高温处理后的岩石试样与空气中的水分产生反应,采用泰斯特WGLL-230BE电热鼓风干燥箱对经高温处理的试样进行干燥存放。

### 1.3 试验设备

冲击设备如图1所示,入射杆和透射杆杆长均为

2 m,直径为75 mm,杆密度 $\rho=7795 \text{ kg/m}^3$ 、杆弹性模量 $E=210 \text{ GPa}$ 、杆泊松比 $\nu=0.286$ ;气压表型号为YQD-6氮气减压器,冲击气压允许范围为0~16 MPa;分别在入射杆杆长1/2处和透射杆杆长1/3处粘贴应变片;应变片为BX120-4AA型电阻应变计,电阻为119.9  $\Omega$ ,灵敏系数为2.08%;冲击子弹头为纺锤形弹头。

微观观测试验中所使用JSM-6510钨丝扫描电镜、XRD衍射仪如图2,3所示。



图1 SHPB试验装置

Fig. 1 SHPB experimental device



图2 JSM-6510钨丝扫描电镜

Fig. 2 JSM-6510 tungsten wire SEM



图3 XRD衍射仪

Fig. 3 XRD diffractometer

### 1.4 SHPB试验基本原理

SHPB试验应力波传播示意图如图4所示,试验过程中,试样放置于入射杆与透射杆之间,子弹以一定的速度射出,撞击入射杆后在入射杆中形成应力波,即入射波;入射波在入射杆中向前传播,当传至入射杆与试样交界面时,由于杆与试样之间的波阻抗差异,入射波中一部分被反射回入射杆中成为反射波,而另一部分则透过试样进入透射杆成为透射波。

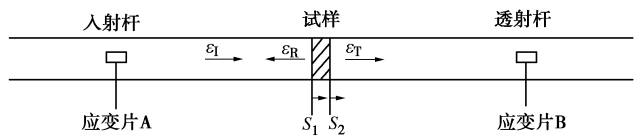


图 4 SHPB 试验应力波传播示意图

Fig. 4 Propagation of stress wave in SHPB experiments

根据一维应力波理论<sup>[19]</sup>,对于压杆与试样之间的作用力可以通过在压杆上粘贴的应变片测得的表面应变来推算。其中,入射杆上可以测得入射脉冲 $\varepsilon_i(t)$ 和反射脉冲 $\varepsilon_r(t)$ ,在透射杆上,则可以测得透射脉冲 $\varepsilon_t(t)$ ,由试验测得的应变信号数据,作用在试样上的应变率、轴向应变和轴向应力为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}(t) &= \frac{C_0}{L_s} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)], \\ \varepsilon(t) &= \frac{C_0}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt, \\ \sigma(t) &= \frac{A_0}{2A_s} E_0 [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $\varepsilon_i(t)$ ,  $\varepsilon_r(t)$ ,  $\varepsilon_t(t)$  为应变片记录到的信号,  $A_0$  为压杆的横截面积,  $E_0$ ,  $C_0$  为压杆的弹性模量和一维弹性波波速,  $A_s$ ,  $L_s$  为试样的横截面积和长度。

参照文献[20]给出的一种适用于纺锤形子弹 SHPB 装置动态应力平衡验证方法,利用下式对试件两端应力进行计算:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= E_0 A_0 [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)], \\ P_2 &= E_0 A_0 [\varepsilon_t(t)], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中,  $\varepsilon_i(t)$ ,  $\varepsilon_r(t)$ ,  $\varepsilon_t(t)$  为应变片记录到的信号,  $A_0$  为压杆的横截面积,  $E_0$  为压杆的弹性模量,  $P_1$ ,  $P_2$  分别为试件输入杆端应力和透射杆端应力。

表 1 动态冲击压缩试验结果

Table 1 Test results of skarn samples under dynamic impact compression

试件 编号	温度 /°C	冲击气压 /MPa	冲击速率 /(m·s <sup>-1</sup> )	应变率 /s <sup>-1</sup>	峰值应变 $\varepsilon$	动态抗压强度 /MPa	割线模量 /GPa
DY-0.8-1	25	0.8	7.73	24	0.0047	263.75	32.25
DY-0.8-4	200	0.8	7.73	81.68	0.0061	239.79	21.01
DY-0.8-7	400	0.8	7.73	72.85	0.0094	165.76	8.02
DY-0.8-10	600	0.8	7.73	97.13	0.0078	105.13	4.38
DY-0.8-13	800	0.8	7.73	117.21	0.0133	42.21	5.44
DY-1.0-16	25	1.0	8.44	44.58	0.0051	295.41	46.78
DY-1.0-19	200	1.0	8.44	83.89	0.0067	291.76	22.49
DY-1.0-22	400	1.0	8.44	105.92	0.0111	200.45	9.79
DY-1.0-25	600	1.0	8.44	147.91	0.0124	121.32	5.28
DY-1.0-28	800	1.0	8.44	152.32	0.0138	63.18	4.72
DY-1.2-31	25	1.2	9.28	52.98	0.0053	348.15	58.18
DY-1.2-34	200	1.2	9.28	101.55	0.0067	350.86	27.64
DY-1.2-37	400	1.2	9.28	143.49	0.0124	221.55	12.13
DY-1.2-40	600	1.2	9.28	158.94	0.0143	131.87	4.98
DY-1.2-43	800	1.2	9.28	165.57	0.0157	68.57	4.84

注: DY 代表动载冲击压缩试验; 0.8, 1.0 和 1.2 分别代表相应的气压。

并对  $P_1$ ,  $P_2$  的曲线变化趋势进行对比,以检验 SHPB 试验中是否达到应力平衡<sup>[21]</sup>,进而确保试验数据的有效性。本文所涉及的 SHPB 试验中典型的动态应力平衡曲线如图 5 所示(图中标注“In.+Re.”、“Tr.”分别指代  $P_1$  与  $P_2$ ),从图 5 中可以看出  $P_1$  与  $P_2$  曲线变化趋势基本一致,证明符合恒应变率加载条件。

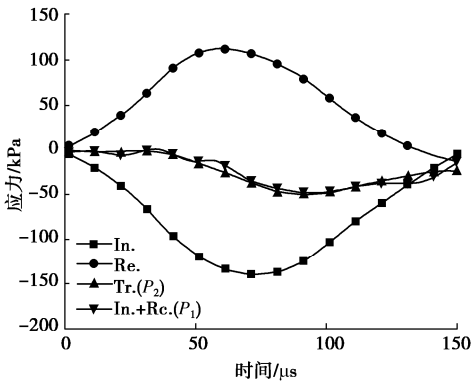


图 5 典型动态应力平衡曲线

Fig. 5 Typical equalization curves of dynamic stress

1.5 试验方案

温度梯度设置为 25℃(室温), 200℃, 400℃, 600℃, 800℃, 冲击气压设置为 0.8, 1.0, 1.2 MPa, 对常温和 4 组温度处理后的试件分别进行不同冲击气压下的冲击压缩试验,每个工况下共进行 3 次独立重复试验,取具有统计学意义的数据进行分析。

2 SHPB 试验结果及分析

采用分离式霍普金森压杆对常温及不同温度等级高温后砂卡岩试样进行动态冲击压缩试验,试验结果见表 1。

## 2.1 应力-应变关系曲线

不同冲击气压和不同温度条件下矽卡岩试件动态应力-应变曲线如图6所示。

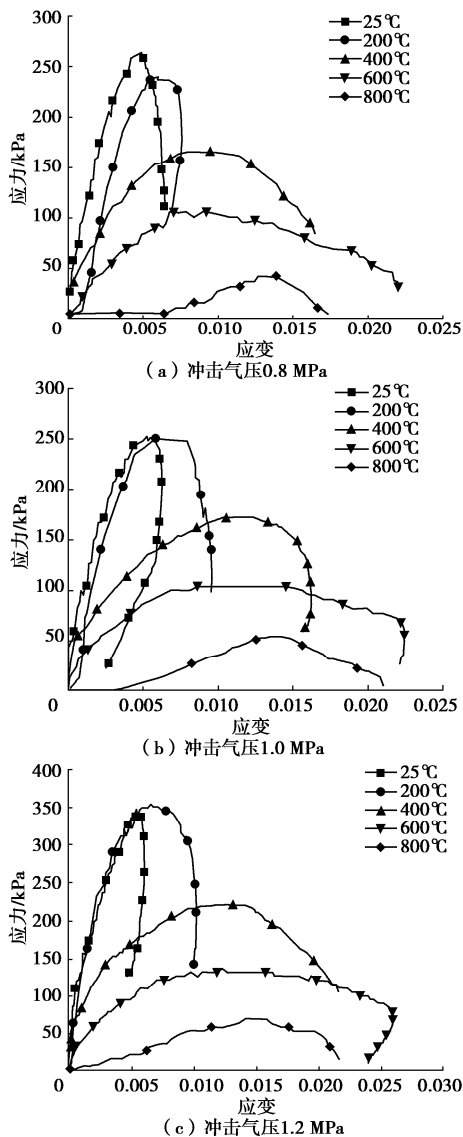


图6 矽卡岩动态应力-应变曲线

Fig. 6 Dynamic stress-strain curves of skarn

从图6中可以看出, 高温-动力作用下矽卡岩应力-应变曲线大致可划分: ①初始阶段; ②弹性阶段; ③屈服阶段; ④破坏阶段。

相同冲击气压条件下, 矽卡岩动态应力-应变曲线的形态及变化趋势随着温度的变化而变化, 温度由25℃升高至800℃过程中, 应力-应变曲线逐渐向右下方移动, 呈现出强度劣化、延性增强的现象。

不同冲击气压条件下, 随着冲击气压的增大, 常温25℃, 200℃作用后矽卡岩均表现为脆性破坏; 400℃作用后矽卡岩表现为由脆性破坏逐渐转变为塑性破坏; 而600℃, 800℃矽卡岩均表现为塑性破坏。

## 2.2 动态抗压强度变化规律

不同冲击气压下矽卡岩动态抗压强度与温度等级

关系如图7所示。采用二次多项式函数拟合发现相关性较好。

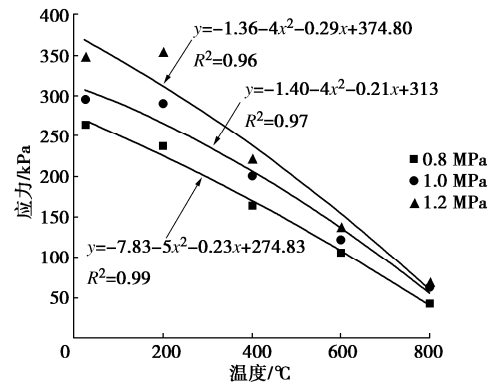


图7 矽卡岩动态抗压强度-温度变化规律

Fig. 7 Variation in dynamic strength with temperature of skarn

从图7中可以看出, 相同冲击气压条件下, 随着温度的升高, 矽卡岩动态抗压强度呈下降趋势。与25℃时对应的动态抗压强度相比较, 冲击气压0.8 MPa条件下, 200℃, 400℃, 600℃, 800℃对应的动态抗压强度分别下降了10%, 38%, 60%, 84%; 冲击气压1.0 MPa条件下, 200℃, 400℃, 600℃, 800℃对应的动态抗压强度分别下降了1.79%, 32.14%, 58.93%, 78.57%; 在冲击气压为1.2 MPa条件下, 200℃, 400℃, 600℃, 800℃对应的动态抗压强度分别下降了-1.52%, 36.36%, 60.61%, 80.30%。

不论冲击气压是0.8, 1.0 MPa还是1.2 MPa, 相比于常温, 400℃条件下岩样的动态抗压强度下降幅度明显, 可初步判断400℃是矽卡岩动力学性能发生突变的阈值温度; 800℃条件下的矽卡岩动态抗压强度的降幅最大, 表明温度的升高, 矽卡岩的动力学性能的劣化程度不断增大。

与冲击气压0.8 MPa条件下的动态抗压强度相比, 25℃时, 1.0, 1.2 MPa对应的动态抗压强度分别提高了10.71%, 32%; 200℃作用后, 而1.0, 1.2 MPa对应的动态抗压强度分别提高了22.22%, 48.89%; 400℃作用后, 1.0, 1.2 MPa对应的动态抗压强度分别提高了22.58%, 35.48%; 600℃作用后, 1.0, 1.2 MPa对应的动态抗压强度分别提高了15%, 30%; 800℃作用后, 1.0, 1.2 MPa对应的动态抗压强度分别提高了50%, 62.51%。

这表明, 在保持温度一定的情况下, 随着冲击气压的增大, 矽卡岩的动态抗压强度也增大, 表现出明显的应变率效应。

## 2.3 动态弹性模量变化规律

不同冲击气压下矽卡岩动态弹性模量与温度等级

关系如图 8 所示, 采用二次多项式函数拟合发现相关性较好。

从图 8 中可以看出, 相同冲击气压条件下, 随着温度的增大, 矽卡岩动态弹性模量呈下降趋势。以冲击气压 1.0 MPa 条件下的试验结果为例, 与 25℃ 对应的动态弹性模量相比, 200℃, 400℃, 600℃, 800℃ 对应的峰值应力分别下降了 6.82%, 32.65%, 74.66%, 95.34%, 这表明温度的升高对矽卡岩试件抵抗变形的能力具有削弱作用, 这种削弱作用在 800℃ 的时候体现最明显。同时, 也可以看出相同温度条件下, 矽卡岩试件动态弹性模量随着冲击气压的增大而增大, 体现了矽卡岩动态弹性模量的应变率效应。

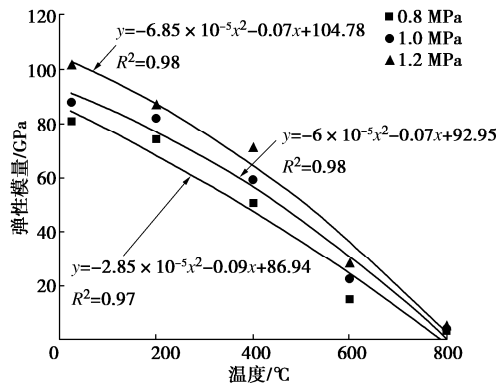


图 8 矽卡岩动态弹性模量 - 温度变化规律  
Fig. 8 Variation laws of dynamic elastic modulus temperature

2.4 破坏形态

图 9 给出了不同冲击气压等级下 (0.8, 1.0, 1.2 MPa) 常温 (25℃) 及不同温度等级高温 (200℃, 400℃, 600℃, 800℃) 作用后矽卡岩试件在 SHPB 试验中的破碎情况。

从图 9 中可以看出, 相同冲击气压条件下, 随着温度的升高, 矽卡岩破碎越来越剧烈。以冲击气压 1.0 MPa 为例, 随着温度由 25℃ 升高至 800℃, 岩石的破碎形态发生了明显变化, 25℃ 对应的破坏状态为 2~3 块大块碎石; 200℃ 对应的是 3~4 块完整性较好的碎石; 而 400℃, 600℃ 的破坏状态中已经没有明显大块碎石, 小碎石占比明显增多; 800℃ 对应的破碎状态以颗粒较小的碎石和粉末状为主, 这一现象表明, 矽卡岩在温度升高过程中抵抗动态荷载的能力逐渐下降, 这与温度效应造成的矽卡岩力学特性劣化的现象是一致的。

相同温度作用后, 随着冲击气压的增大, 矽卡岩破碎程度亦越来越剧烈, 以 400℃ 作用后的破坏形态为例, 矽卡岩试件在冲击气压 0.8 MPa 下的破坏呈 2~3 块的大块石; 冲击气压 1.0 MPa 下的破坏以大碎石为主, 同时出现了较多的小碎石; 冲击气压 1.2 MPa 下的破坏呈粉末状或颗粒较小的碎石状, 无明显大块碎石出现, 表现出明显的应变率效应。

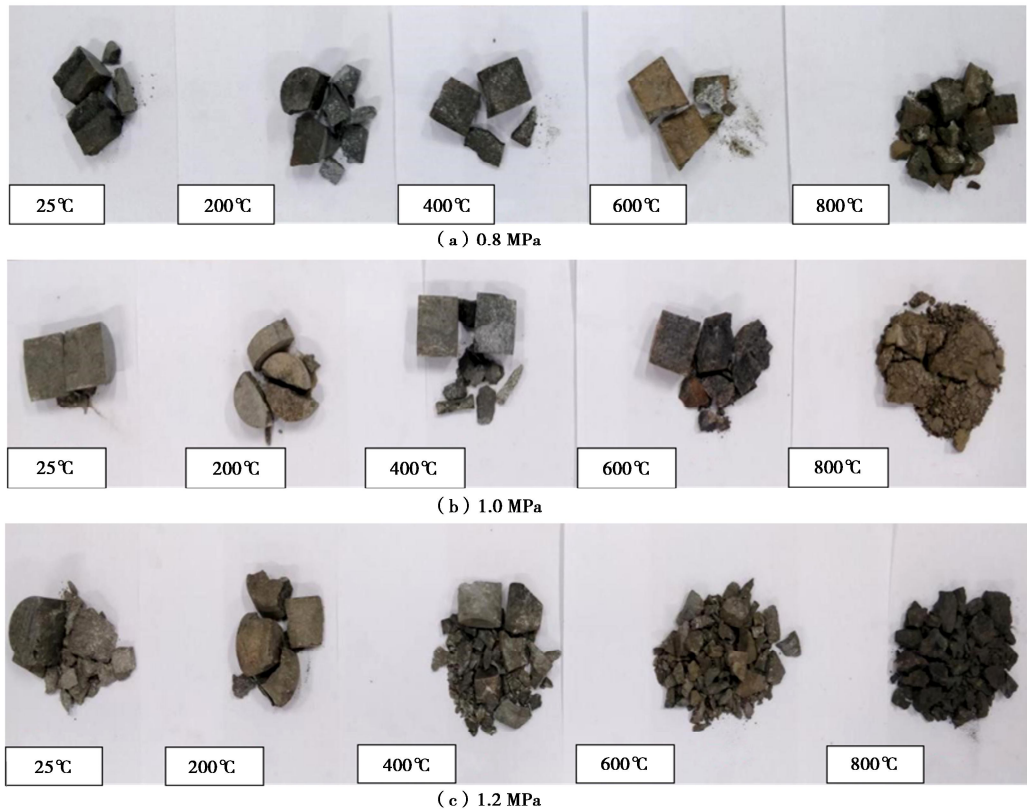


图 9 不同冲击气压下矽卡岩破坏形态  
Fig. 9 Failure patterns of skarn under different impact pressures



### 3 微观观测试验结果与分析

#### 3.1 XRD 物相特征分析

对常温及高温后矽卡岩进行 XRD 物相特征分析, XRD 测试结果如图 10 所示, 对不同温度等级下矽卡岩主要物相成分衍射强度进行统计如图 11 所示。

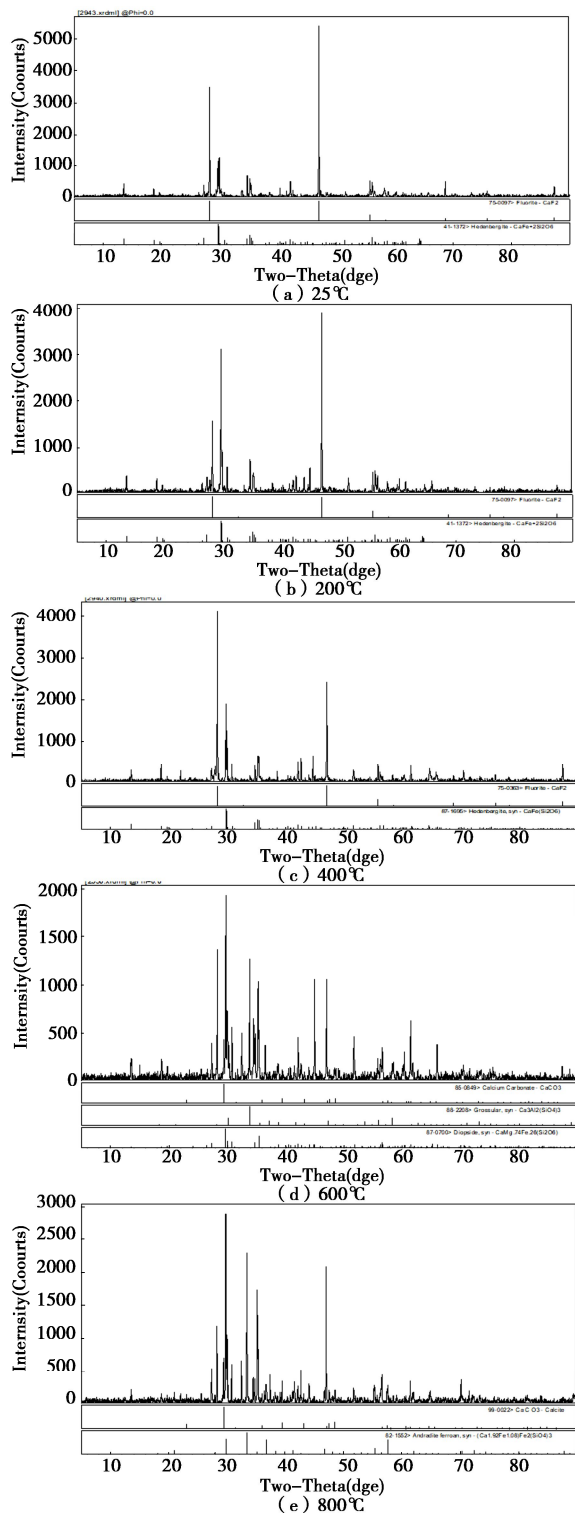


图 10 XRD 物相特征衍射图谱

Fig. 10 Patterns of XRD phase characteristic diffraction

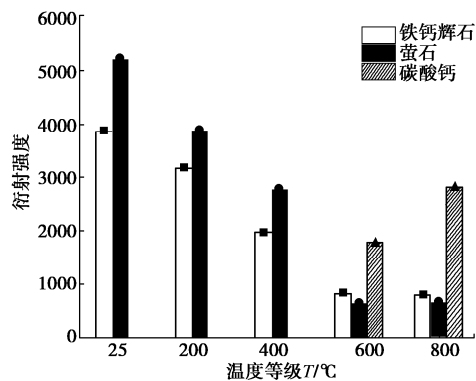


图 11 不同温度等级矽卡岩主要物相成分衍射强度

Fig. 11 Diffraction intensities of main phase components at different temperature levels

从图 10, 11 可以看出, 在 25℃ 条件下的矽卡岩的主要矿物成分有铁钙辉石和萤石, 但是随着温度逐渐升高, 在 200℃, 400℃ 之后这两种物质的衍射强度明显减少, 说明铁钙辉石和萤石在高温作用下被分解了一部分; 在 600℃ 的条件下, 碳酸钙的衍射强度增大, 说明铁钙辉石在高温作用下, 逐渐生成了碳酸钙。

高温引起的岩石材料内部成分变化, 是高温对岩石材料造成损伤进而影响岩石材料力学性能的主要原因<sup>[22]</sup>, 随着温度等级的提升, 矽卡岩中铁钙辉石成分不断减少而碳酸钙成分不断增加, 铁钙辉石的力学性能明显优于碳酸钙的力学性能, 铁钙辉石的含量减少与碳酸钙的含量增大直接导致矽卡岩力学性能的劣化, 宏观上表现出矽卡岩强度的下降, 这与矽卡岩试件在 SHPB 试验中动态抗压强度的温度效应现象具有一致性。

#### 3.2 温度-动力破裂微细观分析

采用 JSM-6510 钨丝扫描电镜 (SEM) 观测的矽卡岩破裂后断口形貌如图 12 所示。

由图 12 可知, 常温及高温后矽卡岩试件受冲击荷载破坏后的断口破坏形式主要呈现为穿晶破坏、沿晶破坏、韧窝和滑移破坏<sup>[23]</sup>。

相同冲击气压条件下, 从常温 25℃ 和 200℃, 400℃ 高温作用后的断口形貌图片可以看出, 主要破坏形式为穿晶断裂和沿晶断裂, 并未出现韧窝和滑移破坏的特征, 表明经过 25℃~400℃ 的温度处理后, 矽卡岩表现为脆性破坏。从 600℃~800℃ 的断口形貌图片可以看出, 韧窝状小坑和 S 形花纹数量的增加较为明显, 表明当温度达到 600℃~800℃ 之后, 矽卡岩的材料性质已经发生了改变, 由脆性向塑性转变, 这与 SHPB 试验中不同等级高温后矽卡岩的弹性模量、动态应力-应变曲线变化趋势表现出的温度效应相一致。

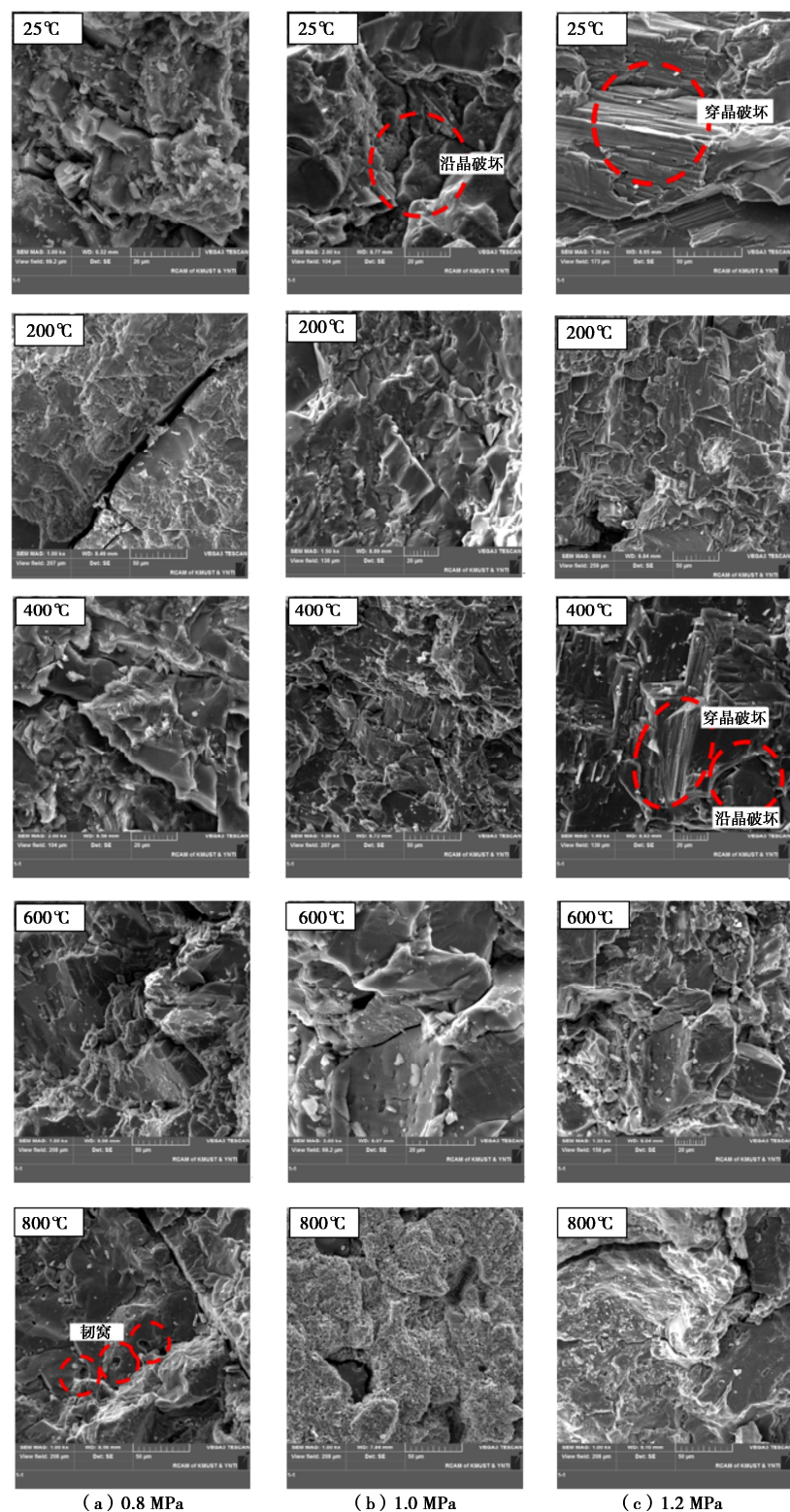


图 12 扫描电镜 (SEM) 观测图像

Fig. 12 SEM images

相同温度条件下，相对于 0.8，1.0 MPa 冲击气压条件下，1.2 MPa 条件下的砂卡岩试件冲击破坏后断口扫描图中穿晶断裂特征明显增多，而沿晶破坏的特征明显减少。这表明高冲击气压条件下以穿晶破坏形式为主导；而在低冲击气压条件下，以沿晶断裂为主。在

冲击荷载作用下，随着应变率的提升，砂卡岩试件吸收的能量也越大<sup>[24]</sup>，能量在砂卡岩试件内部传导过程中，短时间内无法破坏晶体之间连接，而通过穿晶的形式进行能量的耗散，这与 SHPB 试验中试件的破坏形态所体现的应变率效应相一致。

## 4 结 论

以深部 700 m 处砂卡岩为研究对象, 采用 SHPB 试验装置、XRD 衍射仪和 SEM 扫描电镜研究不同冲击气压 (0.8, 1.0, 1.2 MPa) 下常温和经历不同温度 (200℃, 400℃, 600℃, 800℃) 作用后的岩石高温动力学特性和微观破坏机制, 得到 4 点结论。

(1) 砂卡岩动态力学性能 (动态抗压强度、动态弹性模量、峰值应变等) 存在明显的温度效应, 随着温度的升高而劣化, 400℃ 为砂卡岩动态力学性能发生突变的阈值温度; 砂卡岩动态力学性能 (动态抗压强度、动态弹性模量) 存在明显的应变率效应, 随着冲击气压的增大而强化。

(2) 冲击气压和温度影响着冲击后砂卡岩的破碎形态, 冲击气压增大或温度升高, 砂卡岩破碎程度均越来越剧烈, 破碎块度越来越小, 800℃ 时破碎状态以颗粒较小的碎石和粉末状为主。

(3) 温度通过影响砂卡岩内部组分含量影响砂卡岩力学性能, 随着温度等级的升高, 砂卡岩内部钙铁辉石含量下降, 碳酸钙含量提升, 砂卡岩强度表现劣化趋势, 与宏观试验相一致。

(4) 相同温度作用后, 高冲击气压下砂卡岩以穿晶破坏为主, 而在低冲击气压下则以沿晶断裂为主。相同冲击气压条件下, 随着温度的升高, 砂卡岩破坏由脆性逐渐转变为塑性破坏, 破坏机制更加复杂。

## 参考文献:

- [1] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(16): 2803 - 2813. (HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(16): 2803 - 2813. (in Chinese))
- [2] 何满潮, 郭平业. 深部岩体热力学效应及温控对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(12): 2377 - 2393. (HE Man-chao, GUO Ping-ye. Deep rock mass thermodynamic effect and temperature control measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(12): 2377 - 2393. (in Chinese))
- [3] 熊良宵, 虞利军. 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, 2018, **29**(1): 76 - 82. (XIONG Liang-xiao, YU Li-jun. Advances of mechanical properties of rock under high temperature and after high temperature[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2018, **29**(1): 76 - 82. (in Chinese))
- [4] 邓申缘, 姜清辉, 商开卫, 等. 高温对花岗岩微结构及渗透性演化机制影响分析[J]. 岩土力学, 2021, **42**(6): 1601 - 1611. (DENG Shen-yuan, JIANG Qing-hui, SHANG Kai-wei, et al. Effect of high temperature on micro-structure and permeability of granite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(6): 1601 - 1611. (in Chinese))
- [5] 贾蓬, 杨其要, 刘冬桥, 等. 高温花岗岩水冷却后物理力学特性及微观破裂特征[J]. 岩土力学, 2021, **42**(6): 1568 - 1578. (JIA Peng, YANG Qi-yao, LIU Dong-qiao, et al. Physical and mechanical properties and related microscopic characteristics of high-temperature granite after water-cooling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(6): 1568 - 1578. (in Chinese))
- [6] 夏开文, 王帅, 徐颖, 等. 深部岩石动力学实验研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(3): 448 - 475. (XIA Kai-wen, WANG Shuai, XU Ying, et al. Advances in experimental studies for deep rock dynamics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(3): 448 - 475. (in Chinese))
- [7] KLEPACZKO J R. Behavior of rock-like materials at high strain rates in compression[J]. International Journal of Plasticity, 1990, **6**(4): 415 - 432.
- [8] 胡时胜, 王礼立, 宋力, 等. Hopkinson 压杆技术在中国的发展回顾[J]. 爆炸与冲击, 2014, **34**(6): 641 - 657. (HU Shi-sheng, WANG Li-li, SONG Li, et al. Review of the development of Hopkinson pressure bar technique in China[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, **34**(6): 641 - 657. (in Chinese))
- [9] 陈强, 王志亮. 分离式霍普金森压杆在岩石力学实验中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2012, **31**(11): 146 - 149. (CHEN Qiang, WANG Zhi-liang. Application of split Hopkinson pressure bar in rock mechanics experiments[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2012, **31**(11): 146 - 149. (in Chinese))
- [10] 尹士兵, 李夕兵, 王斌, 等. 高温后砂岩动态压缩条件下力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(5): 777 - 784. (YIN Tu-bing, LI Xi-bing, WANG Bin, et al. Mechanical properties of sandstones after high temperature under dynamic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(5): 777 - 784. (in Chinese))
- [11] 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. (LIU Shi, XU Jin-yu. Effect of high temperature on dynamic



- compressive mechanical properties of granite[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, **33**(4): 195 - 198. (in Chinese))
- [12] 李明, 茅献彪, 曹丽丽, 等. 高温后砂岩动力特性应变率效应的实验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(12): 3479 - 3488. (LI Ming, MAO Xian-biao, CAO Li-li, et al. Experimental study of mechanical properties on strain rate effect of sandstones after high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(12): 3479 - 3488. (in Chinese))
- [13] WANG Z L, SHI H, WANG J G. Mechanical behavior and damage constitutive model of granite under coupling of temperature and dynamic loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, **51**(10): 3045 - 3059.
- [14] FAN L F, WU Z J, WAN Z, et al. Experimental investigation of thermal effects on dynamic behavior of granite[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, **125**: 94 - 103.
- [15] 平琦, 吴明静, 张欢, 等. 高温条件下砂岩动态力学特性实验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, **15**(3): 691 - 698. (PING Qi, WU Ming-jing, ZHANG Huan, et al. Experimental study on dynamic mechanical characteristics of sandstone under actual high temperature conditions[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, **15**(3): 691 - 698. (in Chinese))
- [16] 平琦, 吴明静, 袁璞, 等. 冲击载荷作用下高温砂岩动态力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(4): 782 - 792. (PING Qi, WU Ming-jing, YUAN Pu, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of high temperature sandstone under impact loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(4): 782 - 792. (in Chinese))
- [17] 方维萱, 郭玉乾, 贾润幸, 等. 论云南个旧锡铜钨三稀金属矿集区叠加成矿系统与垂向构造岩相学结构的关系[J]. 地质力学学报, 2021, **27**(4): 557 - 584. (FANG Wei-xuan, GUO Yu-qian, JIA Run-xing, et al. On relationship between the superimposed mineralization systems and the zoning patterns of vertical tectonic lithofacies in the Gejiu concentration area of Sn-Cu-W and three rare metals in Yunnan[J]. Journal of Geomechanics, 2021, **27**(4): 557 - 584. (in Chinese))
- [18] ZHOU Y X, XIA K, LI X B, et al. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, **49**: 105 - 112.
- [19] 宋力, 胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法[J]. 爆炸与冲击, 2005, **25**(4): 368 - 373. (SONG Li, HU Shi-sheng. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, **25**(4): 368 - 373. (in Chinese))
- [20] YIN T B, WANG P, YANG J, et al. Mechanical behaviors and damage constitutive model of thermally treated sandstone under impact loading[J]. IEEE Access, 2018, **6**: 72047 - 72062.
- [21] 宋力, 胡时胜. SHPB 测试中的均匀性问题及恒应变率[J]. 爆炸与冲击, 2005, **25**(3): 207 - 216. (SONG Li, HU Shi-sheng. Stress uniformity and constant strain rate in SHPB test[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, **25**(3): 207 - 216. (in Chinese))
- [22] 杨圣奇, 田文岭, 董晋鹏. 高温后两种晶粒花岗岩破坏力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(2): 281 - 289. (YANG Sheng-qi, TIAN Wen-ling, DONG Jin-peng. Experimental study on failure mechanical properties of granite with two grain sizes after thermal treatment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(2): 281 - 289. (in Chinese))
- [23] 陶明, 汪军, 李占文, 等. 冲击荷载下花岗岩层裂断口细-微观试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(11): 2172 - 2181. (TAO Ming, WANG Jun, LI Zhan-wen, et al. Meso-and micro-experimental research on the fracture of granite spallation under impact loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(11): 2172 - 2181. (in Chinese))
- [24] 李晓锋, 李海波, 刘凯, 等. 冲击荷载作用下岩石动态力学特性及破裂特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(10): 2393 - 2405. (LI Xiao-feng, LI Hai-bo, LIU Kai, et al. Dynamic properties and fracture characteristics of rocks subject to impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(10): 2393 - 2405. (in Chinese))