

含交叉节理黄砂岩不同冲击载荷作用下破坏机理的研究

冯 杨^{1,2}, 丁 露匀^{1,2}, 罗 宁^{1,2*}, 范学如^{1,2}, 梁汉良^{1,2}

¹中国矿业大学, 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州

²中国矿业大学, 力学与土木工程学院, 江苏 徐州

Email: *nluo@cumt.edu.cn

收稿日期: 2020年12月1日; 录用日期: 2020年12月24日; 发布日期: 2020年12月31日

摘 要

为了研究力-热耦合作用下含交叉节理岩石的动力学性质, 本文利用SHPB实验装置和配套高温环境箱, 对不同温度环境下如25℃、100℃、300℃、500℃和700℃、不同冲击载荷作用下含交叉节理黄砂岩试样进行了五种冲击荷载的试验研究。研究表明: (1) 动态峰值应力与冲击载荷呈二次多项式函数关系, 正相关性显著。100℃~500℃范围内温度对动态峰值应力影响显著, 500℃~700℃范围内温度对动态峰值应力影响较小, 其中300℃温度动态峰值应力最大。(2) 试样破坏形态不同, 随着温度的增加由脆性破坏逐渐向延脆性破坏转化; 随冲击载荷的增加, 破裂面逐渐变多, 破碎程度逐渐加剧, 碎块尺寸变小; 整体上25℃~300℃破碎程度比300℃~700℃破碎程度高。

关键词

岩石动力学, 高温砂岩, 冲击载荷, 分离式Hopkinson压杆

Study on Failure Mechanism of Yellow Sandstone with cross Joints under Different Impact Loads

Yang Feng^{1,2}, Luyun Ding^{1,2}, Ning Luo^{1,2*}, Xueru Fan^{1,2}, Hanliang Liang^{1,2}

¹State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

²School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

Email: *nluo@cumt.edu.cn

*通讯作者。

文章引用: 冯杨, 丁露匀, 罗宁, 范学如, 梁汉良. 含交叉节理黄砂岩不同冲击载荷作用下破坏机理的研究[J]. 力学研究, 2020, 9(4): 209-219. DOI: 10.12677/ijm.2020.94023

Abstract

In order to study the dynamic properties of rocks under the action of force-thermal coupling, the SHPB experiment device and the supporting high-temperature environment box were used to carry out five kinds of experimental studies on the yellow sandstone samples containing cross joints under impact loads of 25°C, 100°C, 300°C, 500°C and 700°C under different temperature environments. The results show that: (1) The dynamic peak stress has a quadratic polynomial function relation with the impact load, and the positive correlation is significant. Temperature has significant influence on dynamic peak stress in the range of 100°C~500°C, while temperature has little influence on dynamic peak stress in the range of 500°C~700°C. The maximum dynamic peak stress was found at 300°C. (2) The failure modes of the samples are different. With the increase of temperature, the brittle failure gradually transforms to the brittle failure. With the increase of the impact load, the fracture surface becomes more and more, the crushing degree becomes more and more serious, and the size of the pieces becomes smaller. On the whole, the crushing degree of 25°C~300°C is higher than that of 300°C~700°C.

Keywords

Rock Dynamics, High Temperature Sandstone, Impact Load, Split Hopkinson Pressure Bar

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

温度是影响岩石物理力学性能的重要因素, 诸多岩石工程都涉及高温岩石问题[1]。例如矿山、化石能源和地下热能深部开采、核废料深部地质处置、城市地下空间开发[2]等。因此, 研究高温作用后岩石的力学性质在工程应用上具有重大意义。

国内外很多学者对高温后和高温下的岩石力学性质开展了试验研究[3]。张志峰[4]利用压汞法测试了25°C~1200°C高温热处理后花岗岩样品的孔隙特征, 并研究了不同温度影响下岩石孔隙的分形结构和孔隙率演化模型; 黄真萍[5]和韩观胜[6]分别以石灰岩和砂岩为研究对象, 研究了不同高温遇水冷却岩样的力学性质; Yuliang Zhang [7]研究了高温下砂岩孔隙特性和力学性能的变化, 发现高温会增加砂岩累计孔隙体积和孔隙率, 降低力学性质; 梁永庆[8]研究了5种温度作用后砂岩的纵波速度以及力学特性, 结果表明高温作用使砂岩纵波速度减小; 杨礼宁[9]结合扫描电镜技术对高温作用后砂岩试样的物理力学性质和微观结构的变化规律进行观察, 结果表明了砂岩试样的变形位移总体上随处理温度升高而增大, 加热温度越高时砂岩微观孔隙越多; Weiqiang Zhang [10]研究了高温作用后砂岩和花岗岩的矿物成分、内部结构和含水量的变化, 以及其导致的物理力学性质的变化; 杨圣奇[11]通过巴西劈裂及常规三轴压缩试验对高温后两种晶粒花岗岩的破坏力学特征进行了研究, 研究表明花岗岩高度随着温度升高不断增高, 而密度和拉伸强度不断降低; Chengdong Su [12]制备了不同加热温度的煤样, 采用超声波、扫描电镜、核磁共振、单轴压缩试验等多种检测方法, 深入研究了高温对煤结构和力学性质的影响; 高春杨[13]测量了高温下不含水的地幔岩电导率, 结果显示岩石的电导率随温度升高而大幅度增大; Yan-jun Shen [14]通过系统

实验探讨分析了不同温度梯度的冷却冲击对高温花岗岩开裂的影响;田振兴[15]对花岗岩进行了高温-淬火循环处理后再进行单轴压缩试验和巴西劈裂试验,分析其抗压强度、弹性模量和抗拉强度变化规律;Shuting Miao [16]采用声发射(AE)、数字图像相关(DIC)和光学显微镜观察相结合的方法,对 25℃~800℃条件北山花岗岩物理力学特性和压裂性能进行了实验研究,实验结果表明低温下的花岗岩破坏以拉伸微裂为主,而高温下的花岗岩逐渐以剪切破裂为主;熊健[17]对高温影响下页岩岩石的声学特性进行了试验研究,研究了高温处理后页岩岩样物理性质和动弹性参数的变化规律,并讨论了温度对页岩岩石声波特性的影响;Yan [18]对高温处理后具有不同裂纹倾斜度的 3 个有缺陷砂岩试样进行了单轴压缩试验,并利用摄影、声发射和数字图像相关技术研究了裂纹的萌生、扩展和合并行为;Wang [19]通过高温冷却后,将花岗岩浸泡在不同养护温度的水中以及施加冲击荷载的方法模拟井筒高温围岩条件,并对圆形花岗岩试件在径向冲击载荷作用下、热处理和水养护条件下的力学特性进行了试验研究;Tu-bing YIN [20]开展了花岗岩在高温和轴压作用下的冲击加载试验,并用扫描电镜观察了不同温度下花岗岩的内部结构特征,结果表明轴向压力下的热损伤大于纵波速度所描述的热损伤,随着温度升高,岩石内部结构出现原生裂隙和新生裂隙的扩展和缓慢增加;Xiaohu Zhang [21]在扫描几何数据的基础上建立三维模型,评估岩石温度、水流速度、粗糙度和裂缝面孔径大小对换热系数的影响,模拟试验表明流速对岩石粗糙度影响最大,其次是孔径大小和岩石粗糙度。

上述研究对在高温作用下岩石的静力学特征研究较多,而应力和温度耦合作用下岩石的动力学机理相对比较复杂,研究较少。因此,为了揭示对岩石在力-热耦合作用下的动力学特征,开展相关研究是十分有必要的。本文利用 $\phi 50\text{ mm}$ 分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson pressure bar, SHPB)实验装置和配套高温环境箱,对常温(25℃), 100℃, 300℃, 500℃, 700℃共 5 种温度环境中黄砂岩试样,通过选用 0.2 MPa, 0.3 MPa, 0.4 MPa, 0.5 MPa, 0.6 MPa 等五种不同冲击载荷进行冲击动力学试验,进一步开展了对含交叉节理黄砂岩动力学分析,对黄砂岩应力峰值、破坏形态等关键力学参数进行系统地研究,探讨了温度和冲击载荷耦合作用下变化的规律。

2. 试验方法

2.1. 试样制作

所选岩石试样为采自江苏省徐州市矿区的含交叉节理黄砂岩,呈暗黄色,主要成分有石英、长石、云母、方解石等。根据国际岩石动力学委员会的建议[22],所选用于冲击压缩试验的圆柱形试样直径为 50 mm 左右,厚度为 25 mm。对试样两端和侧面进行打磨(如图 1),使得两端面的平行度不超过 0.05 mm [23]。为了试验的准确性,避免因岩石试样不同而引起不必要的误差,岩石试样均取自同地同一岩块。

2.2. 实验装置

实验采用实时 SHPB 高温实验系统。该系统由直径 50 mm SHPB 实验装置和配套高温环境箱组成,如下图 2 所示。

SHPB 实验装置由气室、入射杆、透射杆、吸收杆、发射管道、子弹、阻尼器等组成。其中,入射杆和透射杆均为 MnCr 合金高强度钢制成,其弹性模量为 206 GPa,屈服强度为 1200 MPa。入射杆与透射杆侧面对称地贴有两个相同的应变片,以实时记录两杆上的变形状况。

2.3. 试验过程

将岩石试样进行编号处理,分为 5 组,每个组 5 个试样。SHPB 试验时,检查调整入射杆、透射杆和吸收杆是否处于同一水平线上,调试 LK2400N 数据采集装置和应变片;并调整阻尼器,使其达到最大

缓冲效果。

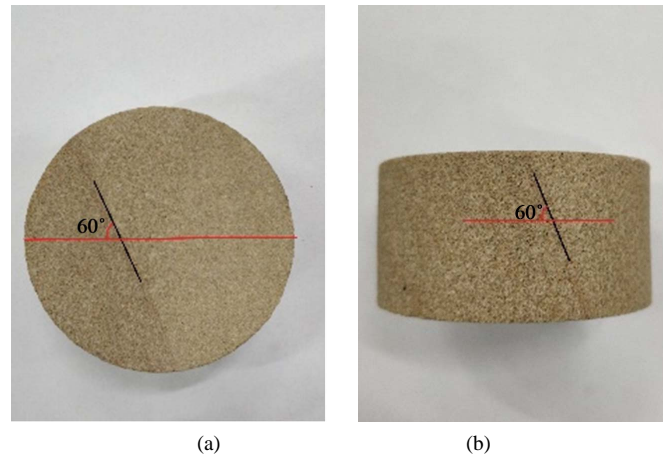


Figure 1. Rock sample. (a) Both ends of the joint; (b) Lateral joint
图 1. 岩石试样。(a) 两端节理；(b) 侧面节理

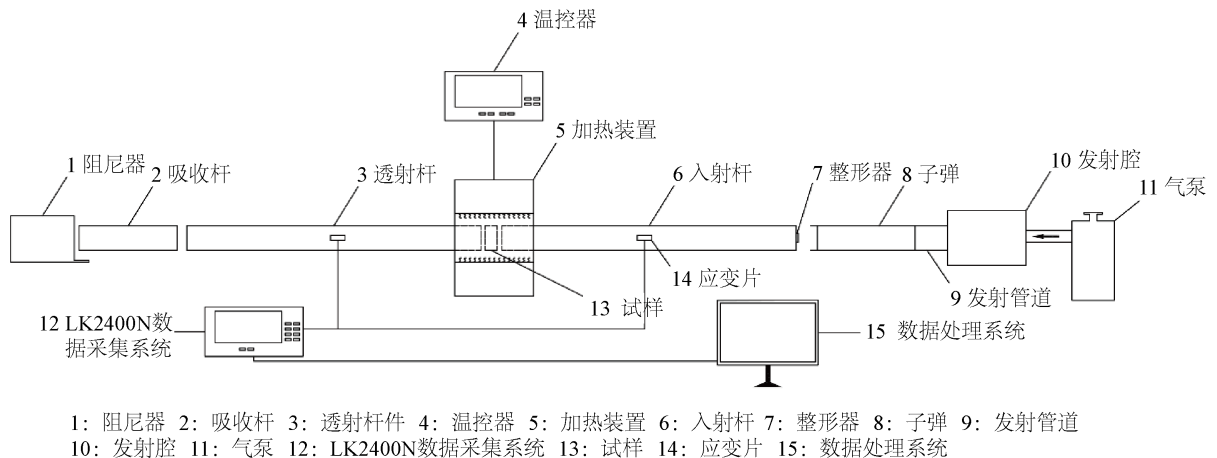


Figure 2. SHPB experimental setup schematic diagram
图 2. SHPB 实验装置原理图

试验操作时，将岩石试样放入配套高温环境箱中，利用温控器设置指定温度后，加温使其达到指定温度，再恒温保存 30 min，使试样维持该温度下的状态。在夹岩石的入射杆与透射杆端均匀擦抹凡士林，以增大摩擦效应。在子弹撞击入射杆侧贴上圆柱形波形整形器，从而使试样更早地达到均匀应力状态。当试样加热到预定温度时，启动高温同步组装系统，推动透射杆向试样移动，同时开启空气炮发射子弹，实施高温黄砂岩 SHPB 冲击试验。子弹撞击入射杆后，在入射杆中产生应力脉冲；通过有效控制，使得应力波到达入射杆与试样接触面时，入射杆、试样和透射杆刚好紧密接触，从而避免对杆传热引起的测量误差。

2.4. 二波法处理

二波法[24]是基于—维假定及均匀假定的测试数据处理方法，被广泛应用于各种材料测试的结果处理。根据图 2 的 SHPB 测试装置，按照—维应力波理论，测试过程中试样的平均应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$ 和平均应变 $\varepsilon(t)$ ，试件两端的面应力的平均值 $\delta(t)$ 可由下式得出。

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}(t) = \frac{1}{l_0}(v_1 - v_2) = \frac{C}{l_0}(\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \\ \varepsilon(t) = \frac{1}{l_0} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt \\ \sigma(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{A}{A_0} E(\varepsilon_i + \varepsilon_r) + \frac{A}{A_0} E \varepsilon_t \right) = \frac{A}{A_0} E(\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \end{cases} \quad (1)$$

若将试件引入均匀性假定，则上式可变为经典的二波法测试数据处理公式，如下。

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C}{l_0} \varepsilon_r(t) \\ \varepsilon(t) = -\frac{2C}{l_0} \int_0^t \varepsilon_r(t) dt \\ \sigma(t) = \frac{A}{A_0} E \varepsilon_t \end{cases} \quad (2)$$

上式中， C 、 E 、 A 分别为压杆的弹性波波速、弹性模量及截面面积， l_0 、 A_0 为试件的长度和截面面积， ε_i 、 ε_r 、 ε_t 分别为测得的入射波、反射波和透射波。

3. 结果及分析

3.1. 动态应力平衡关系

图 3 为加载下试样的典型动态应力平衡图。由图 3 可以看出，在临近入射杆的一端，试样端面应力为入射应力和反射应力叠加，而临近透射杆的一端是由透射应力引起的。两端动应力几乎相等，表明试样在动态加载过程中，基本上处于应力平衡[25]状态，满足均质性假说，保证了实验可靠性。

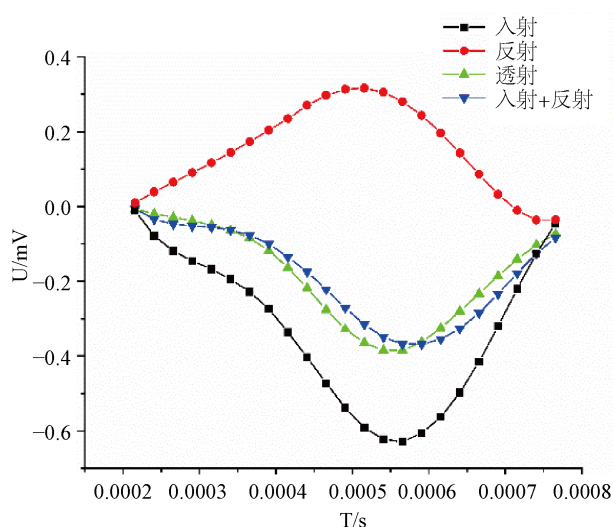


Figure 3. Test chart for stress state uniformity of sample
图 3. 试样应力状态均匀性检验图

3.2. 不同温度下黄砂岩的应力应变曲线

常温(25℃)~700℃黄砂岩试件采用不同冲击载荷进行 SHPB 冲击压缩试验，得到动态应力 - 应变曲线，如图 4 所示。

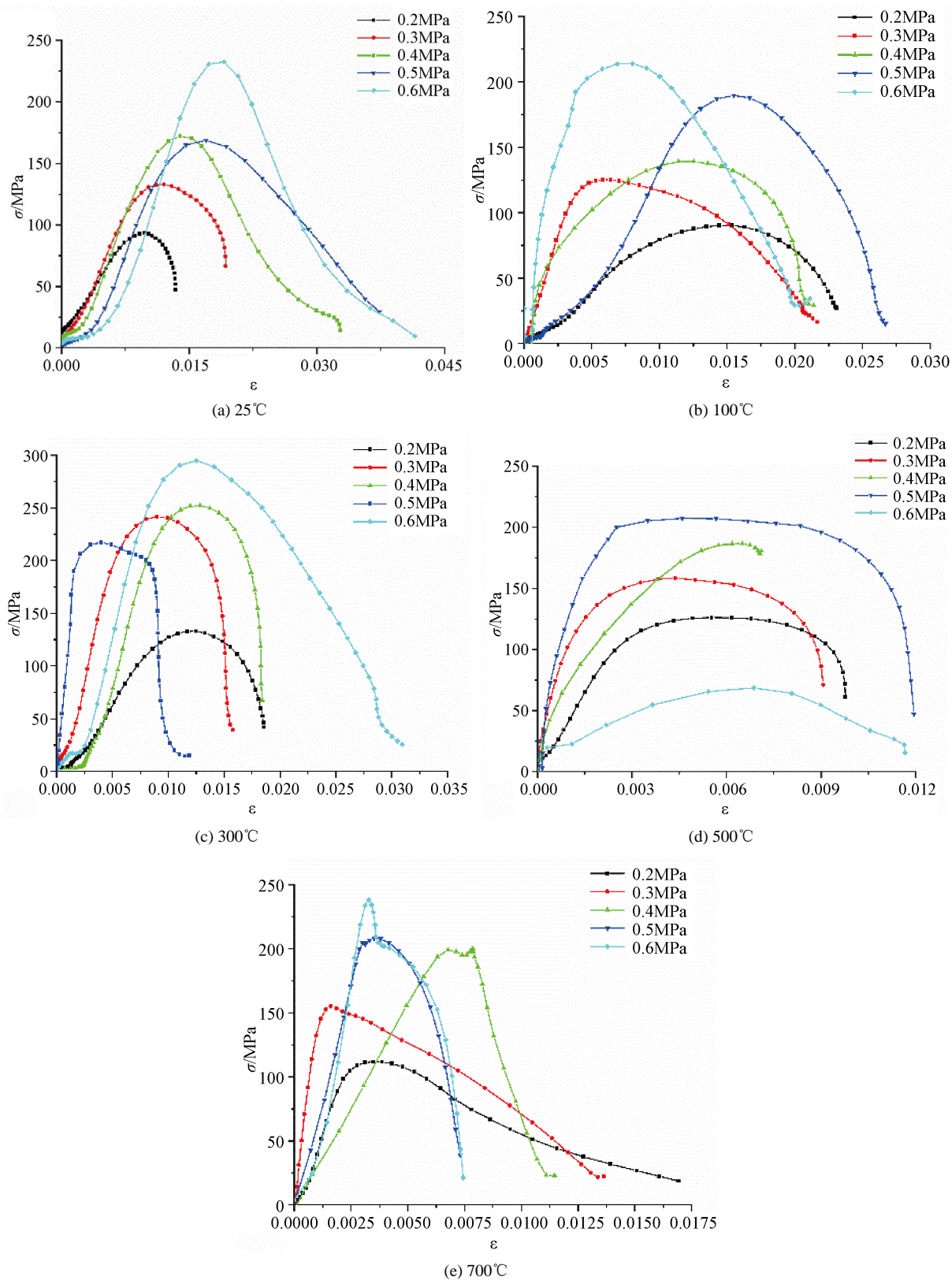


Figure 4. Stress-strain curves of yellow sandstone samples under different impact loads at different temperatures
图 4. 不同温度下黄砂岩试样在不同冲击荷载下的应力应变曲线图

如下图所示, 常温(25℃)和高温(100℃~700℃)条件下, 黄砂岩在不同冲击载荷作用下, 动态应力应变曲线可分为 4 个阶段。第一阶段: 初始压密阶段。由于外力作用, 黄砂岩原有微裂缝产生闭合。在此过程中, 曲线斜率较小, 很小的应力可以引起较多应变; 试样被压实, 将原有空隙去除; 曲线斜率逐渐增大。第二阶段: 弹性变形阶段。此阶段中, 曲线可看做一条直线, 其斜率保持不变, 即黄砂岩的动态弹性模量。第三阶段: 塑性变形阶段。此阶段中, 曲线的斜率发生变化, 呈减小走势, 使得曲线走向呈现上凹状态。不同温度, 不同冲击载荷下, 曲线斜率变化速度不一样。当曲线斜率达到 0 时, 到达峰值应力。第四阶段: 破坏阶段。此阶段中, 曲线快速下降, 曲线斜率变为负值。

在 25℃、100℃、300℃、500℃、700℃温度下, 不同冲击载荷下, 试样的应力应变曲线大致相同。25℃时, 曲线有一定的右倾趋势, 且随着冲击载荷的增大, 试样的变形能力逐渐增强。100~500℃, 曲线表现出一定的左移倾向。500℃下, 当冲击荷载为 0.6 MPa 时, 因试样间的不均质性出现的偶然误差而导致试样应力应变曲线明显出现偏差; 曲线塑性变形较为明显, 整个试样表现出显著的弹塑性状态。700℃下压密阶段和塑性变形阶段都很小, 弹性变形占比远大于塑形变形和初始压密阶段, 故而曲线峰值区域较为尖锐。从图中观察, 25℃、100℃、300℃、500℃、700℃条件下, 试样弹性变形阶段曲线长度均大于塑性变形阶段长度。

3.3. 动态峰值应力的变化规律

25℃~700℃黄砂岩试样动态峰值应力随冲击载荷的变化情况, 如图 5 所示。

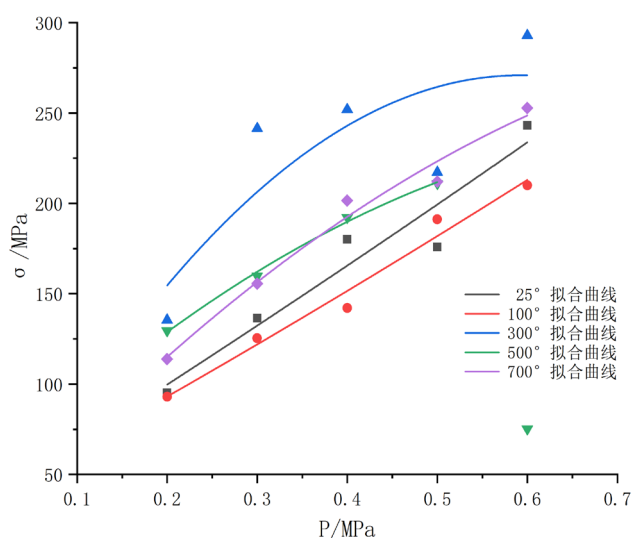


Figure 5. Diagram of dynamic peak stress and impact load

图 5. 动态峰值应力和冲击载荷的关系图

由图 5 可知, 不同温度条件下, 黄砂岩试样的动态峰值应力均随着冲击载荷的增大而增大, 即冲击载荷对黄砂岩的单轴抗载荷有加强作用。

动态峰值应力与冲击载荷呈二次函数关系, 拟合关系式为

$$\delta = aP^2 + bP + c \quad (3)$$

式中 a 、 b 、 c 为拟合相关参数。不同温度黄砂岩试样拟合参数取值如表 1 所示。

25℃时, 冲击载荷从 0.2 MPa 增加到 0.6 MPa, 试样的真实应力从 95.18 MPa 增加到 243.10 MPa, 增加幅度达 155.41%, 说明冲击载荷对常温条件下的黄砂岩的单轴抗压强度具有明显的加强作用。

Table 1. Fitting parameters for the peak stress and impact load
表 1. 峰值应力和冲击载荷拟合参数取值

T/°C	a	b	c
25	29.553	311.514	36.205
100	37.303	269.921	37.601
300	-756.826	896.207	5.567
500	-287.229	477.846	44.651
700	-268.579	549.094	15.876

此外,不同温度对试样产生的热力学效应不同,300℃、500℃、700℃时的真实应力关系曲线均位于25℃曲线上方,此温度范围内,真实应力均高于同种冲击载荷下的常温真实应力。而300℃对试样强度影响最为显著,在冲击载荷0.2 MPa~0.6 MPa中,真实应力分别达到134.44 MPa、241.49 MPa、251.99 MPa、292.94 MPa,比同冲击载荷下常温的试样真实应力分别增加42.32%、76.86%、40.00%、23.54%、20.50%。

100℃真实应力关系曲线位于最下方,即曲线值最小。在冲击载荷0.2 MPa~0.6 MPa中,真实应力分别达到92.96 MPa、125.34 MPa、142.05 MPa、191.14 MPa、209.94 MPa,比同冲击载荷下常温的试样真实应力分别减少2.32%、8.21%、21.08%、-8.69%、13.64%。说明100℃对黄砂岩试样单轴抗压强度具有弱化作用。

不同冲击载荷作用下的黄砂岩试样动态峰值应力随着温度变化情况如图6所示。从图中可以看出,不同冲击载荷作用下,黄砂岩试样动态峰值应力随温度的变化曲线总体呈现W型。且随着冲击载荷的增大,曲线整体呈上移趋势。25℃~100℃时,除0.5 MPa曲线,曲线均表现为下降走势。100℃~500℃,曲线表现为先增大后减小,且变化幅度较大,100℃~300℃曲线整体上升,在300℃时均到达曲线的最高点;300℃~500℃,曲线下降;除0.6 MPa曲线,在100℃~500℃曲线上升速率大于下降速率。500℃~700℃时,除0.6 MPa外,其余曲线较为平缓。说明在500℃~700℃时,温度对黄砂岩试样的单轴抗压强度影响较小。

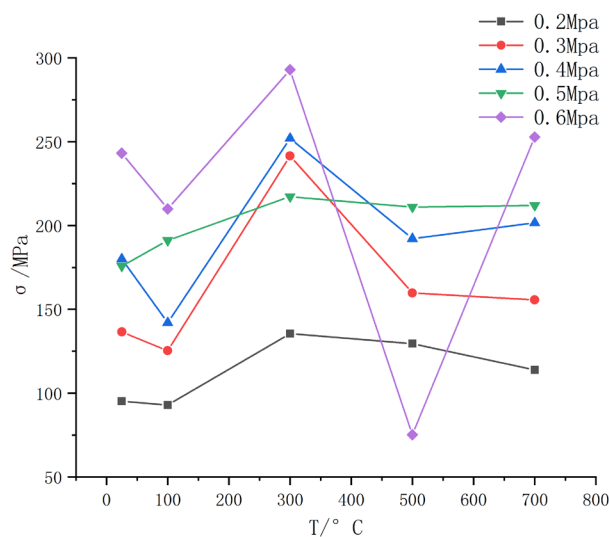


Figure 6. Diagram of dynamic peak stress and temperature
图 6. 动态峰值应力和温度的关系图

同种冲击载荷下, $25^{\circ}\text{C} \leq T \leq 100^{\circ}\text{C}$ 和 $500^{\circ}\text{C} \leq T \leq 700^{\circ}\text{C}$ 时, 黄砂岩试样动态峰值应力受温度的影响明显小于 $100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 500^{\circ}\text{C}$ 时的情况。其中, 300°C 时黄砂岩的动态峰值应力最大, 大于其他温度的同种冲击载荷的情况。说明黄砂岩试样动态峰值应力受温度作用的影响明显, 并且在 300°C 时最为显著。

3.4. 试件破碎形态

本文选取 25°C 不同冲击荷载下的破碎情况和 0.6 MPa 不同温度下的破碎情况进行分析讨论, 破碎情况如图 7 所示。

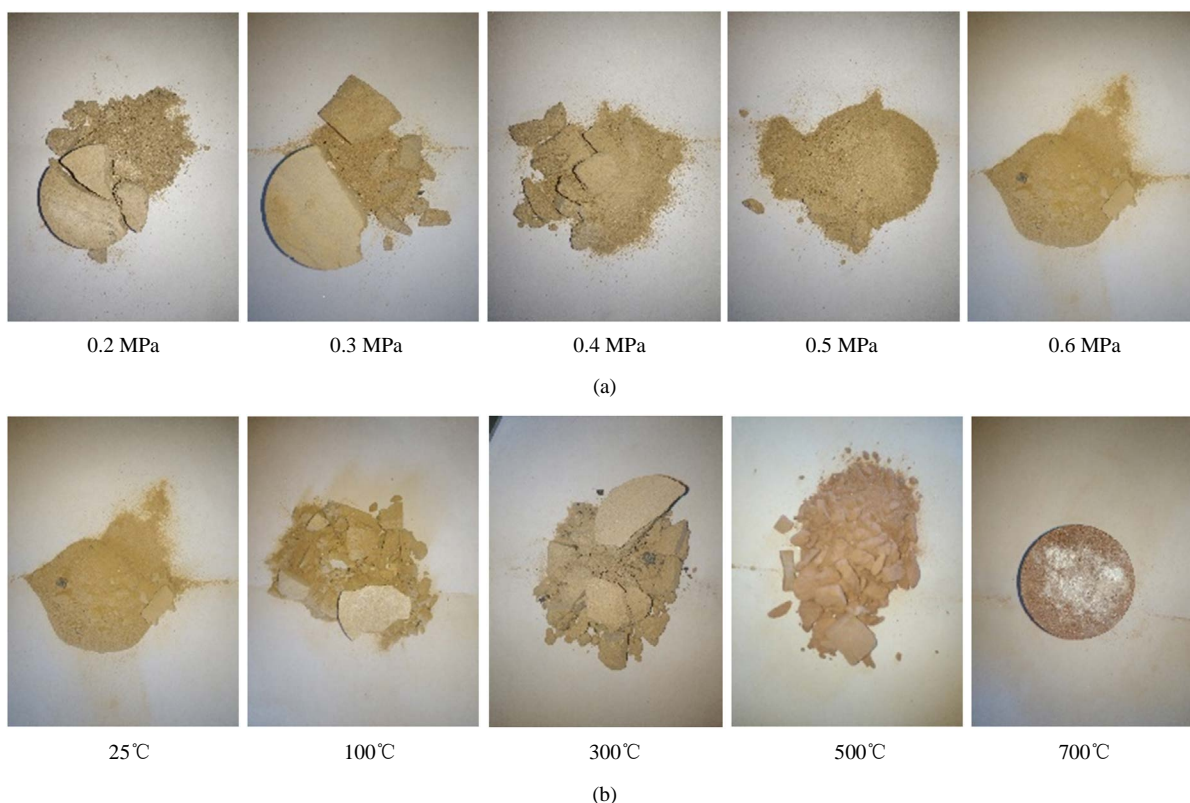


Figure 7. The fracture diagram of a representative yellow sandstone sample under the action of force-thermal coupling. (a) Under the condition of 25°C ; (b) Under the condition of 0.6 MPa

图 7. 具有代表性的黄砂岩试样力 - 热耦合作用下的破碎状态图。(a) 25°C 条件下; (b) 0.6 MPa 条件下

相同温度下, 随着冲击载荷的增大, 试样的破裂面逐渐增多, 破坏程度加剧, 碎块尺寸减小。 25°C 时, 随着冲击载荷的增大, 碎块逐渐变细, 当冲击载荷为 0.4 MPa 时, 黄砂岩试样已有大面积粉末状态, 当荷载为 0.5 MPa 时, 黄砂岩试样已变成完全粉末状态。

相同冲击载荷下, 随着温度的升高, 黄砂岩试样破碎程度先减小, 到达临界温度后, 破碎程度呈增大趋势。 0.6 MPa 冲击荷载条件下, 可以明显看出, $25^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$ 时, 黄砂岩试样破碎状态分别为粉末状态、破碎细颗粒状态、破碎粗颗粒状态, 破碎程度逐渐下降; $300^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$, 黄砂岩试样的破碎程度缓缓加剧, 由破碎粗颗粒状态变为破碎细颗粒状态; 但整体破碎程度不如 $25^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$; 300°C 为临界温度。 700°C 条件下, 黄砂岩试样保持高度完整状态。同时, 随着温度的升高, 黄砂岩试样逐渐由黄色变成棕红色; 且温度越高, 颜色变化效应越明显。

对于以上现象我们进行了以下分析。相同温度下, 冲击载荷越大, 初始动能越高, 吸收的能量越多,

裂隙扩展越大, 碎块数目越多, 破碎程度越大。这是因为岩石内部大小不同的裂隙逐渐发育、扩展、贯通最终导致的。温度对黄砂岩试样的力学性质有两方面的影响, 一方面, 温度升高使得黄砂岩试样热熔变形, 试样内部原生裂隙逐渐愈合, 裂隙数量变少, 密实性得到提升, 从而提升了试样的承载能力和抗变形能力; 另一方面, 不同热膨胀率引起跨颗粒边界的热膨胀不协调引起结构热应力, 试样内部产生微裂缝, 同时胶结物的形成也会影响试样的变形, 使得试样的承载能力和抗变形能力下降[26]。

4. 结论

(1) 黄砂岩在不同冲击载荷作用下, 动态应力应变曲线可分为 4 个阶段, 分别为压密阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段、损伤破坏阶段。从整体上看, 黄砂岩应力应变曲线经过先上升, 再平缓, 达到峰值后, 再下降的发展趋势。在 25℃、100℃、300℃、500℃、700℃温度下, 不同冲击载荷下, 试样的应力应变曲线大致相同。各温度作用下, 试样弹性变形阶段曲线长度均大于塑性变形阶段长度。

(2) 不同温度条件下, 黄砂岩试样的动态峰值应力均随着冲击载荷的增大而增大。300℃、500℃、700℃曲线均位于 25℃曲线上方, 此温度范围内, 真实应力均高于同种冲击载荷下的常温真实应力。根据 100℃真实应力曲线关系, 说明 100℃对黄砂岩试样单轴抗压强度具有弱化作用。

(3) 不同冲击载荷作用下, 黄砂岩试样动态峰值应力随温度的变化曲线总体呈现 W 型; 且随着冲击载荷的增大, δ - T 曲线整体呈上移趋势。同种冲击载荷下, 25℃ ≤ T ≤ 100℃和 500℃ ≤ T ≤ 700℃时, 黄砂岩试样动态峰值应力受温度的影响明显小于 100℃ ≤ T ≤ 500℃时的情况。黄砂岩试样动态峰值应力受温度的影响明显, 在 300℃时最显著。

(4) 相同温度下, 随着冲击载荷的增大, 试样的破裂面逐渐增多, 破坏程度加剧, 碎块尺寸减小。相同冲击载荷下, 随着温度的升高, 黄砂岩试样破碎程度先减小, 到达临界温度 300℃后, 破碎程度呈缓慢增大趋势, 整体上 25℃~300℃破碎程度比 300℃~700℃破碎程度高。

项目基金

国家自然科学基金面上项目编号(12072363)。

参考文献

- [1] 吴刚, 孙红, 翟松韬. 高温岩石的扰动状态本构模型[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 875-879.
- [2] 吴豪, 徐峰, 张萍. 高温对砂岩强度特性的影响试验研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(7): 61-64.
- [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.
- [4] 张志镇, 高峰, 高亚楠, 徐小丽, 侯鹏, 滕腾, 尚晓吉. 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. <http://dx.chinadoi.cn/10.13722/j.cnki.jrme.2016.0798>
- [5] 黄真萍, 张义, 孙艳坤, 刘成禹, 吴伟达. 高温遇水冷却石灰岩力学与声学性质研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(12): 4180-4188. <http://dx.chinadoi.cn/10.11817/j.issn.1672-7207.2016.12.029>
- [6] 韩观胜, 靖洪文, 苏海健, 尹乾, 吴疆宇, 高远. 高温状态砂岩遇水冷却后力学行为研究[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(1): 69-75.
- [7] Zhang, Y.L., Sun, Q., He, H., Cao, L.W., Zhang, W.Q. and Wang, B. (2017) Pore Characteristics and Mechanical Properties of Sandstone under the Influence of Temperature. *Applied Thermal Engineering*, **113**, 537-543. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.061>
- [8] 梁永庆. 高温作用后砂岩力学性质实验研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(3): 76-78. <http://dx.chinadoi.cn/10.13301/j.cnki.ct.2016.03.030>
- [9] 杨礼宁, 姜振泉, 张卫强, 耿济世. 高温作用后砂岩力学性质研究[J]. 地震工程学报, 2016, 38(2): 299-302. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1000-0844.2016.02.0299>
- [10] Zhang, W.Q., Sun, Q., Hao, S.Q., Geng, J.S. and Lv, C. (2016) Experimental Study on the Variation of Physical and

- Mechanical Properties of Rock after High Temperature Treatment. *Applied Thermal Engineering*, **98**, 1297-1304. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.061>
- [11] 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/OL]. 岩土工程学报. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.tu.20201016.1630.012.html>, 2020-10-27.
- [12] Su, C.D., Qiu, J.D., Wu, Q.H. and Wen, L. (2020) Effects of High Temperature on the Microstructure and Mechanical Behavior of Hard Coal. *International Journal of Mining Science and Technology*, **30**, 643-650. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.05.021>
- [13] 高春杨, 黄晓葛, 代唯琪, 陈祖安. 高温高压下上地幔岩石电导率实验研究[J]. 地球物理学报, 2020, 63(9): 3409-3419.
- [14] Shen, Y.-J., Hou, X., Yuan, J.-Q., Wang, S.F. and Zhao, C.H. (2020) Thermal Cracking Characteristics of High-Temperature Granite Suffering from Different Cooling Shocks. *International Journal of Fracture*, **225**, 1-16.
- [15] 田振兴, 苏培东, 孙强. 花岗岩高温疲劳效应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 680-690.
- [16] Miao, S.T., Pan, P.Z., Zhao, X.G., Shao, C.Y. and Yu, P.Y. (2020) Experimental Study on Damage and Fracture Characteristics of Beishan Granite Subjected to High-Temperature Treatment with DIC and AE Techniques. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02271-4>
- [17] 熊健, 黄林林, 刘向君, 周文, 梁利喜. 高温影响下页岩岩石的声学特性实验研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2019, 41(6): 35-43. <http://dx.chinadoi.cn/10.11885/j.issn.1674-5086.2019.08.29.02>
- [18] Huang, Y.-H., Yang, S.-Q. and Dong, J.-P. (2020) Experimental Study on Fracture Behaviour of Three-Flawed Sandstone Specimens after High-Temperature Treatments. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **43**, 2214-2231. <https://doi.org/10.1111/ffe.13245>
- [19] Wang, C., Wang, H.B., Xie, M.Z., Xiong, Z.Q., Wang, C., Cheng, L.P. and Zhan, S.F. (2020) Study on the Dynamic Characteristics of Rock Surrounding a Wellbore in Energy Storage Areas during Deep Geothermal Energy Mining. *PLoS ONE*, **15**, e0237823. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237823>
- [20] Yin, T.-B., Shu, R.-H., LI, X.-B., Wang, P. and Dong, L.-J. (2016) Combined Effects of Temperature and Axial Pressure on Dynamic Mechanical Properties of Granite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **26**, 2209-2219. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64337-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64337-6)
- [21] Zhang, X.H., Wang, Z.L., Sun, Y.H., Zhu, C., Xiong, F., Tang, Q.Q. and Yin, Q. (2020) Numerical Simulation on Heat Transfer Characteristics of Water Flowing through the Fracture of High-Temperature Rock. *Geofluids*, **2020**, Article ID: 8864028. <https://doi.org/10.1155/2020/8864028>
- [22] 平琦, 吴明静, 袁璞, 张欢. 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.
- [23] 胡健, 宫凤强, 贾航宇. SHPB 压缩试验中红砂岩的力学与能量耗散特性研究[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(3): 411-420.
- [24] 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. <http://dx.chinadoi.cn/10.3321/j.issn:1001-1455.2005.04.014>
- [25] 王鲁明, 赵坚, 华安增, 赵晓豹. 脆性材料 SHPB 实验技术的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1798-1802. <http://dx.chinadoi.cn/10.3321/j.issn:1000-6915.2003.11.009>
- [26] 苏承东, 郭文兵, 李小双. 粗砂岩高温作用后力学效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1162-1170. <http://dx.chinadoi.cn/10.3321/j.issn:1000-6915.2008.06.009>