



移动阅读

顾超,许金余,孟博旭,等. 高温作用后2种层理砂岩的动态力学试验及细观分析[J]. 煤炭学报,2019,44(9):2710-2720. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.1309

GU Chao, XU Jinyu, MENG Boxu, WEN Ming, et al. Dynamic mechanical behavior and mesoscopic analysis of two layered sandstone after high temperature[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2710-2720. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.1309

# 高温作用后2种层理砂岩的动态力学试验及细观分析

顾超<sup>1</sup>,许金余<sup>1,2</sup>,孟博旭<sup>1</sup>,闻名<sup>1</sup>,娄传鑫<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 机场建筑工程系,陕西 西安 710038; 2. 西北工业大学 力学与土木建筑学院,陕西 西安 710072)

**摘要:**为研究层理岩石的动态力学和细观结构方面的各向异性特征,利用大直径( $\phi 100$  mm)分离式霍普金森压杆(SHPB)系统,进行高温作用后层理砂岩的动态压缩试验,而后对试件破坏断口进行SEM电镜扫描试验,分析其断口形貌特征与能耗规律,并对提取出的微裂缝网络进行数值分析。试验结果表明:高温作用后各向异性砂岩的动态力学性能受冲击弹速、温度效应、层理各向异性的共同影响,随着冲击弹速的增加,砂岩的峰值强度逐渐增加,峰值应变逐渐增大,变形模量也逐渐增加;随着温度的升高,砂岩的峰值强度逐渐减小,峰值应变逐渐增大,而变形模量逐渐减小;平行层理砂岩的峰值强度、峰值应变和变形模量普遍高于垂直层理岩样,整体性更好。层理砂岩在高应变率下破坏的断口表面比在低应变率下整体度差,形貌更加粗糙。经历温度不大于400℃时,断面以沿晶破坏和穿晶破坏为主,表现为脆性断裂;经历温度为800℃时,除前2种断裂模式外,断面局部还出现塑性破坏和韧性破坏特征。砂岩在高应变率下破坏时能耗普遍高于低应变率破坏。断口裂隙的数量、裂隙的面积、裂隙的形状三者均存在明显的各向异性差异,水平层理的裂隙数量普遍高于垂直层理;水平层理岩样的微观裂隙率曲线低于垂直层理岩样;垂直层理的裂隙形状普遍比水平层理规则。高温处理后岩样动态破坏断口的裂隙形态趋于规则。

**关键词:**岩石力学;高温作用;层理砂岩;动态力学;断口分析

中图分类号:TD313;TU45 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2019)09-2710-11

## Dynamic mechanical behavior and mesoscopic analysis of two layered sandstone after high temperature

GU Chao<sup>1</sup>, XU Jinyu<sup>1,2</sup>, MENG Boxu<sup>1</sup>, WEN Ming<sup>1</sup>, LOU Chuanxin<sup>1</sup>

(1. Department of Airfield and Building Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. College of Mechanics and Civil Architecture, Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In order to study the anisotropic characteristics of layered sandstone in dynamic and meso-structure, dynamic compression of layered sandstone after high-temperature heating was tested by large-diameter ( $\phi 100$  mm) SHPB. Then the fracture surfaces were tested by the scanning electron microscope (SEM) so as to analyze the features of fracture morphology as well as the law of energy consumption and to conduct the numerical analysis of the extracted micro-crack network. According to the test results, the dynamic mechanical properties of anisotropic sandstone after high temperature are affected by the velocity of impact bullet, temperature effects and bedding anisotropy. As the velocity of impact bullet rises, the peak intensity of sandstone increases, peak strain increases, and variable model increases. As temperature rises, the peak intensity of sandstone decreases, peak strain increases, while variable model decreases. Parallel layered sandstone shows a better integration than vertical samples in terms of peak intensity, peak strain

收稿日期:2018-09-29 修回日期:2019-01-16 责任编辑:郭晓炜

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378497)

作者简介:顾超(1994—),男,山西浑源人,硕士研究生。Tel:029-84787987, E-mail: guchaoafeu@163.com

and variable model. Fractures under high strain rates show a worse integration than the ones under low strain rates, with a rougher morphology. With a temperature under 400 °C, the fractures mainly consist of inter-granular fracture and trans-granular fracture, presenting brittle fracture. With a temperature of 800 °C, fractures partially present plastic fracture and ductile fracture, apart from the two former modes. The energy consumption of broken sandstone is higher under high strain rates than that under low strain rates. There is obvious anisotropy among numbers, areas and shapes of fractures. In general, the fracture number in horizontal bedding samples is more than that in vertical bedding samples. The micro-fracture rate curve of horizontal bedding samples is lower than that in vertical bedding samples. Fracture shapes in vertical bedding samples are generally more regular than those in horizontal bedding samples. Fracture shapes of dynamic broken samples after high temperature tend to be regular.

**Key words:** rock mechanics; high temperature action; layered sandstone; dynamic mechanics; mesoscopic analysis

随着我国油田、煤矿、地热能等开发力度不断加大,深部地质环境下施工不断增多,高温后岩石性质的改变成为研究热点。岩石是一种由复杂成分组成的固态集合体,因形成于不同的物质环境,其内部含有不同的矿物、节理、裂隙和层理等结构面,导致其性质较为复杂<sup>[1]</sup>。红砂岩具有不同的层理构造,主要有粒状碎屑和泥状胶结2种形式的结构,受荷载作用后,其破坏特征和力学特性表现为明显的各向异性,高温作用后,砂岩内部结构会发生很大改变<sup>[2-4]</sup>,其物理力学特性更加复杂,直接影响到岩体工程的安全性,以往高温作用后各向同性岩石的研究成果难以满足工程实际需求。

大量学者对高温作用后岩石的物理特性进行了有针对性的研究:RUTQVIST J等<sup>[5]</sup>研究了岩石在温度、水和力学耦合作用下的各种力学特性如断裂特性、强度特性等与4种不同数值模型预测的比较。HAIPAL M<sup>[6]</sup>研究了来自德国和匈牙利的历史古迹砂岩经热处理后的物理特性。TIEN等<sup>[7]</sup>通过对不同层理的试件进行静态压力试验,提出了各向异性岩石的破坏准则。苏海健等<sup>[8]</sup>采用巴西劈裂抗拉强度试验研究了温度和尺寸对岩石抗拉强度的影响规律,提出了红砂岩在不同温度下的抗拉强度与圆盘厚径比的线性衰减经验公式。吴刚等<sup>[9]</sup>研究了在常温及经历100~1200 °C温度作用后的力学特性,指出温度会使焦作砂岩产生热应力,改变其矿物成分和微结构,导致砂岩的力学特性发生改变。徐贻等<sup>[10]</sup>研究了高温及裂隙倾角对岩体力学性能的影响并对比白砂岩实验结果,建立了岩石高温受荷损伤方程。李庆森等<sup>[11]</sup>利用单轴压缩试验研究分析了不同温度作用后节理砂岩的物理力学性质,在压缩过程中利用声发射仪器实时监测岩石的声发射分布特征,研究了不同温度对变形破坏机理的影响规律。刘石等<sup>[12]</sup>利用单轴压缩试验研究了不同温度作用后大理岩的纵波波速、抗压强度、破坏形态以及损伤特性随温度的变化

规律。翟松韬等<sup>[13]</sup>对不同温度下及高温作用后的喜马拉雅山盐岩进行单轴压缩试验,分析了一些力学参数的变化规律如峰值应力、峰值应变和弹性模量,着重研究了其应力-应变曲线在高温下的特殊性。张传虎等<sup>[14]</sup>采用YNS2000微机控制电液伺服试验机对特殊地区花岗岩进行压剪试验、单轴压缩试验,研究了不同温度作用后其物理力学特性的变化规律。戎虎仁等<sup>[15]</sup>进行了8种不同温度后红砂岩单轴压缩的试验,指出随着温度升高,红砂岩的峰值强度呈先降低后上升再下降趋势,峰值应变逐渐上升,弹性模量先增大后减小。

基于以上学者研究发现,目前对层理岩石在高温作用后的各向异性及其动态力学特性的研究较少。笔者利用 $\phi 100$  mm SHPB试验系统,对高温作用后的层理砂岩进行5种弹速的冲击试验,分析了其主要的动力学参数如应变率、动态压缩峰值强度、动态压缩峰值应变、动态压缩变形模量等。借助SEM电镜扫描显微镜,对3组温度等级下最低与最高应变的层理砂岩试件进行破坏断口形貌与能耗分析,并对提取出的微裂缝进行数值分析。试验所得结论对高温环境下层理砂岩的理论研究和工程实践具有一定的参考意义。

## 1 试验概述

### 1.1 试样制备

岩样采用红砂岩,取自某横断山脉地下国防工程。本试验依据《GBT 50266—2013 工程岩体试验方法标准》<sup>[16]</sup>和国际岩石力学学会(ISRM)建议,采用 $\phi 96$  mm $\times$ 48 mm的圆盘试件。为研究层理砂岩在2个方向上的物理力学特性的各向异性,先期根据红砂岩原始层理,将岩石加工为平行层理面与垂直层理2种岩样,如图1所示。考虑岩石非均质特性对岩石性质的影响,试验岩样中密度偏差均低于5%,以尽量减少岩石自身对试验结果准确性的影响。

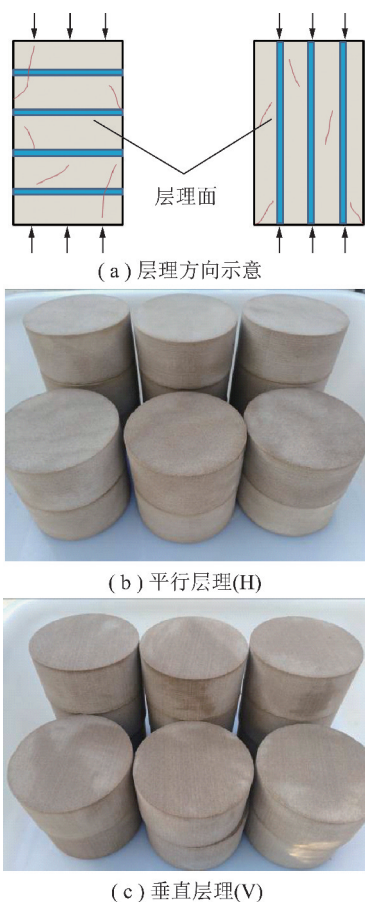


图 1 2 种层理岩样

Fig. 1 Two kinds of stratified samples

## 1.2 试验方案

试验整体共分为 2 步:第 1 步是岩样加温,第 2 步是动态压缩试验。岩样加温过程:采用 RX3-20-12 型箱式电阻炉加热岩样,设置加温速率为  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,达到预设温度后恒温 3 h,关闭仪器使岩样在炉膛内冷却至室温,将取出后的岩样用于动态压缩试验。岩样动态压缩试验过程:试验采用冲击装置为直径 100 mm 的分离式霍普金森压杆装置 (SHPB),其打击杆长 0.5 m,弹性模量 210 GPa,泊松比为 0.25 ~ 0.30,密度为  $7.85\text{ g}/\text{cm}^3$ ,实测波速 5 200 m/s,按预设弹速将岩样进行动态压缩试验。

动态试验中存在一定的波动特征,经过多次反复试打,发现温度区间过密,对试验结果影响较小,且为控制试样数量,保证试验结果可靠,综合分析后设置 3 个温度等级:25,400,800  $^{\circ}\text{C}$ ;设置 5 个弹速等级:11,12,13,14,15 m/s。每组岩石不少于 7 个试样,将得到的试验结果进行处理后取均值,具体试验方案见表 1。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 岩样经过不同温度后的物相分析

经原国土资源部西安矿产资源检测中心检测,得

到该岩样 3 种温度后的主要矿物成分见表 2。表中含量仅保留 3 位有效数字。

表 1 冲击试验方案

Table 1 Impact compression test scheme

| 层理方向 | 温度等级/ $^{\circ}\text{C}$ | 冲击弹速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |
|------|--------------------------|--------------------------------------|
| 平行层理 | 25,400,800               | 11,12,13,14,15                       |
| 垂直层理 | 25,400,800               | 11,12,13,14,15                       |

表 2 砂岩矿物成分

Table 2 Components of sandstone

| 温度/<br>$^{\circ}\text{C}$ | 含量/% |      |      |     |     |     |      |
|---------------------------|------|------|------|-----|-----|-----|------|
|                           | 石英   | 钾长石  | 伊利石  | 白云石 | 滑石  | 方解石 | 透辉石  |
| 25                        | 48.6 | 28.4 | 11.1 | 6.0 | 2.9 | 2.5 | 0.5  |
| 400                       | 47.9 | 29.0 | 9.0  | 5.7 | 1.8 | 2.1 | 4.5  |
| 800                       | 46.8 | 32.1 | 1.5  | 4.1 | 0   | 0.4 | 15.1 |

由表 2 可知,常温和 400  $^{\circ}\text{C}$  条件下,岩样的主要矿物成分相同,即为石英、钾长石、伊利石,含量较少的填隙物有白云石、滑石、方解石;800  $^{\circ}\text{C}$  条件下,岩样的主要矿物成分为石英、钾长石、透辉石,含量较少的填隙物有白云石、伊利石。不难发现,400  $^{\circ}\text{C}$  作用后岩石内部的物质成份变化较少,一旦温度达到 800  $^{\circ}\text{C}$ ,岩石的物质成份变化十分明显<sup>[17]</sup>,这对岩石的宏观物理力学性质与微观结构均会造成一定影响。

### 2.2 岩样经过不同温度后的表观变化

不同温度作用后砂岩试件的表观形态如图 2 所示。由图 2 可知,在常温下 2 种层理砂岩整体呈淡褐色,表面光滑致密无裂缝,层理均匀。当温度达到 400  $^{\circ}\text{C}$  时,砂岩颜色变深,整体呈褐色,表面没有明显裂隙。当温度达到 800  $^{\circ}\text{C}$  时,岩样颜色呈桃红色,表面出现明显裂隙,整体性较差,出现缺陷,层理模糊,且质地变脆。800  $^{\circ}\text{C}$  作用后平行层理岩样在侧面中部出现一条裂隙,垂直层理岩样在侧面出现多条裂纹,长度较短,但宽度较大,裂纹发展明显。基于图 2 与表 2 分析,800  $^{\circ}\text{C}$  作用后岩样组分发生明显变化,导致其物理特性出现一定程度的变化<sup>[18]</sup>,其中透辉石含量大幅度提高,透辉石有明显光泽,这是 800  $^{\circ}\text{C}$  作用后岩样颜色变暖,色调变亮的主要原因。并且,相较于垂直层理,平行层理岩样稳定性更好。

### 2.3 层理砂岩冲击压缩全应力-应变曲线

试验得到了不同高温作用后层理砂岩的动态压缩全应力-应变曲线,如图 3 所示,图中字母 H,V 分别为水平层理和垂直层理;25,400,800 为温度, $^{\circ}\text{C}$ ;11,12,13,14,15 为冲击弹速,m/s;例如 H-400-13 表示 400  $^{\circ}\text{C}$  作用后平行层理砂岩在冲击弹速为 13 m/s 下的应力-应变曲线。由图 3 可知,曲线大致



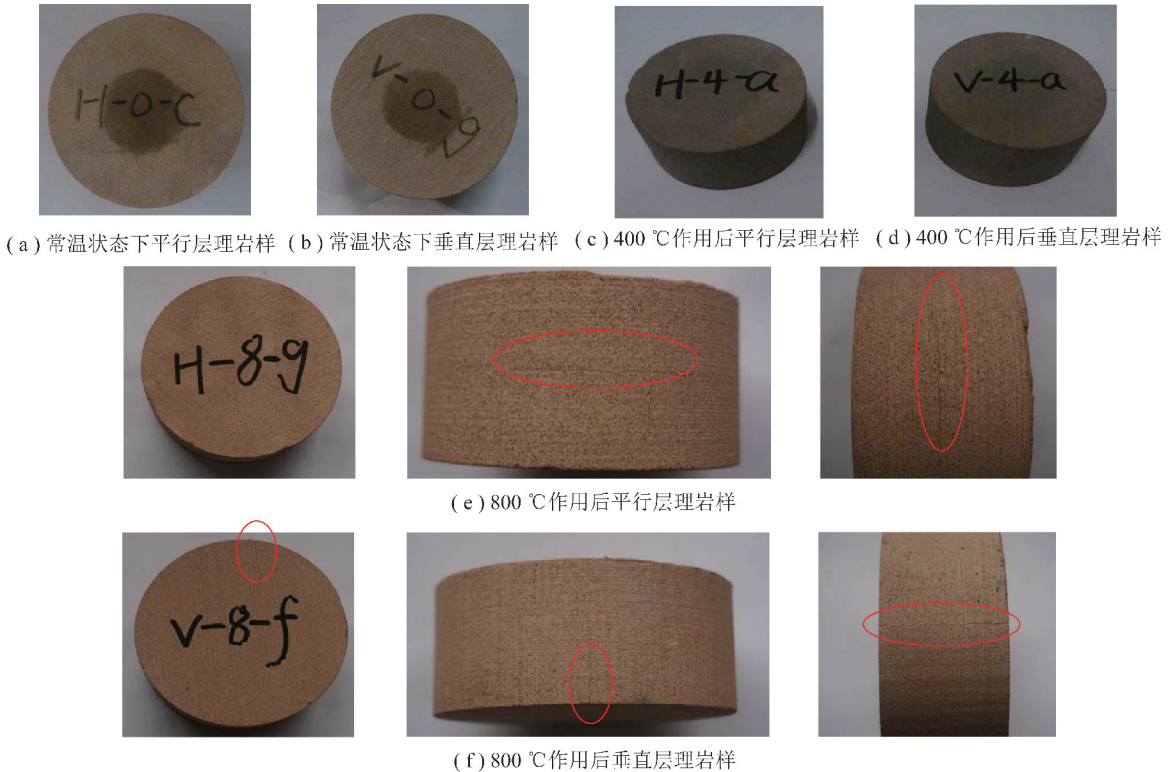


图2 不同温度作用后砂岩试件的表观形态

Fig. 2 Apparent morphology of sandstone specimens after different temperatures

可分为4个阶段。以800℃作用后垂直层理砂岩在冲击弹速为11 m/s下的应力-应变曲线为例,第1阶段为非线性压密阶段OA,在冲击压力作用下,存在于岩石内的天然缺陷(微裂纹、孔隙等)闭合,试件刚度增大。第2阶段为线弹性阶段AB,应力与应变成正比,试件刚度为常数。第3阶段为微裂缝稳定扩展阶段BC,过B点以后,在岩石内的原生裂纹端部或岩石内部微缺陷处,发生局部应力集中或裂隙面的剪切运动,导致裂纹沿原有方向稳定发展。第4阶段为非弹性变形阶段CD。岩石的应力达到屈服极限以后进入软化阶段。在CD段中,变形随应力下降而增加,岩体内大量微裂隙产生,不稳定扩展汇合而导致破坏。对比3种温度可以发现,常温和400℃应力-应变曲线走势相近,而800℃作用后应力-应变曲线OA段的斜率明显小于另外2种温度,这是因为,岩样在800℃作用后内部存在较多微裂缝。对比不同弹速可知,冲击弹速较大,其应力-应变曲线BC段扩展更充分,原因是冲击弹速越大,提供给岩样能量越多,裂缝发展越充分。对比2种层理可知,较平行层理相比,垂直层理岩样应力-应变曲线OA段斜率较小,这说明垂直层理内部裂缝更多。

#### 2.4 冲击弹速对应变率的影响

岩样的破碎响应与冲击弹速密切相关<sup>[19]</sup>,不同温度作用后层理砂岩的应变率与冲击弹速的关系如图4

所示。由图4可知,冲击弹速与层理方向相同时,随着温度的升高,应变率逐渐增加,相较于经历25℃常温后岩样的应变率,经历400℃和800℃高温后的平均涨幅约为17%和35%。这主要是因为不同矿物颗粒在高温膨胀过程中变形不协调,因此造成大量次生裂隙、孔隙,温度越高岩石越容易发生受力形变。冲击弹速与温度等级相同时,2种层理岩样的应变率变化规律基本类似,但相较于垂直层理,水平层理岩样的应变率普遍较高。这是因为,垂直层理岩样受荷方向平行于层理面,受力时裂隙易沿着层理面扩展,致使材料破坏,相比于加载方向垂直于层理面的水平层理岩样,垂直层理岩样发生形变的潜能要弱很多,因而应变率低于水平层理岩样。整体上,应变率随着冲击弹速的增加而增加,当子弹加载速率为11 m/s时,常温下平行层理岩样的应变率为 $105.2 \text{ s}^{-1}$ ,当子弹加载速率达到15 m/s时,常温下平行层理岩样的应变率为 $200.6 \text{ s}^{-1}$ ,增加了91%,增幅明显。

#### 2.5 层理砂岩峰值强度曲线

不同温度作用后层理砂岩的峰值强度曲线如图5所示。对比3种温度作用后层理砂岩峰值强度曲线图可以得出:砂岩峰值强度变化规律基本相同,峰值强度随着冲击弹速的增加而增加,水平层理岩样的峰值强度曲线均高于垂直层理。冲击弹速与层理方向相同时,峰值强度基本随着温度的升



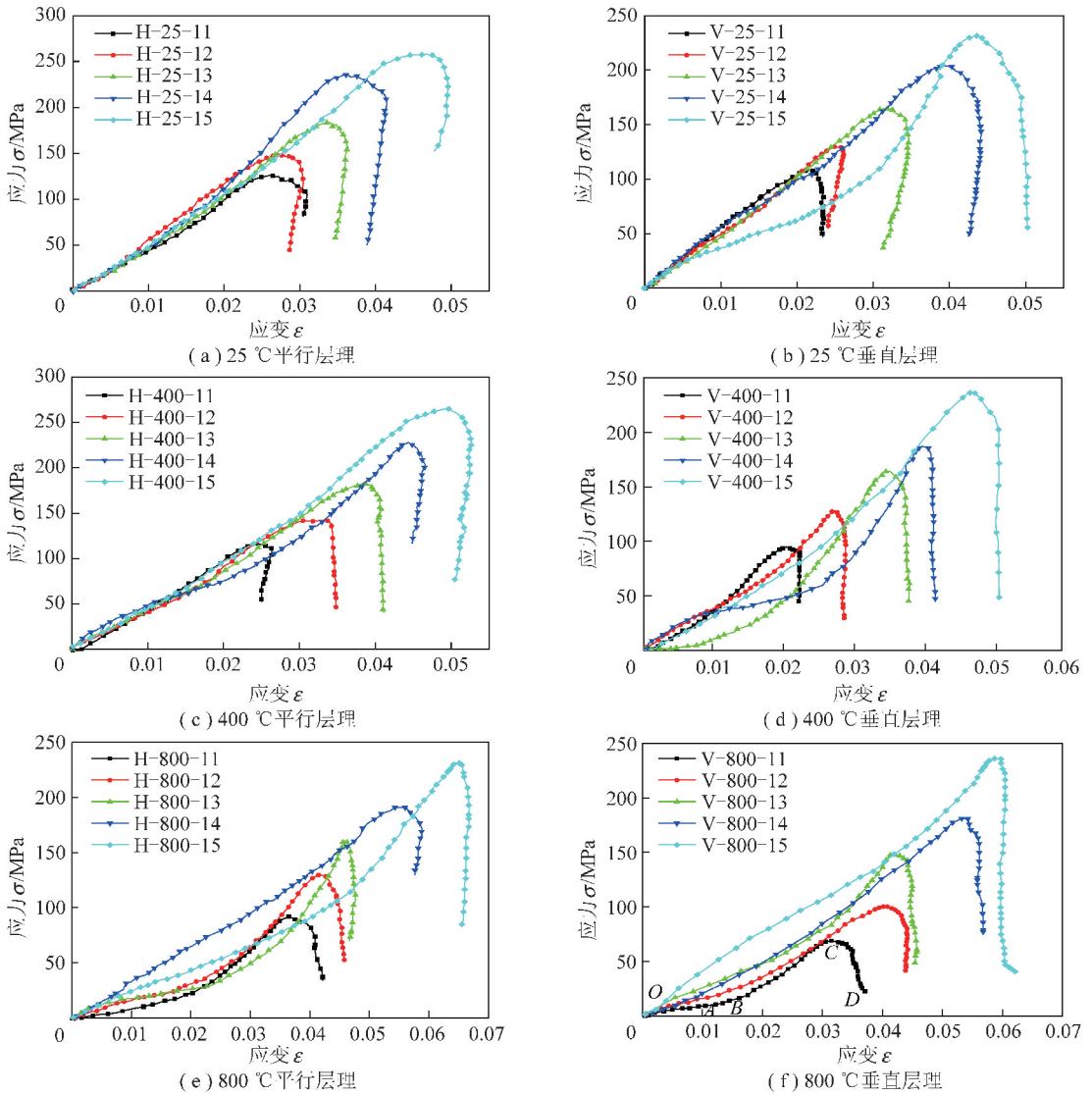


图3 冲击荷载作用下不同温度后砂岩的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of sandstone after different temperatures under impact loading

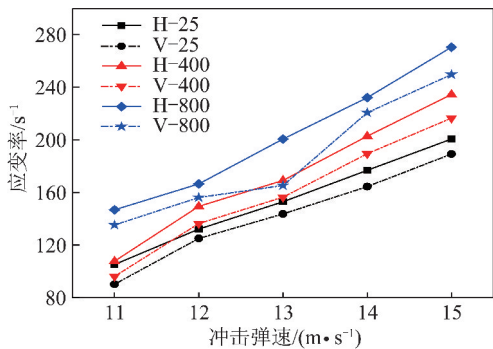


图4 应变率与冲击弹速关系曲线

Fig. 4 Strain rate and impact speed curves

高而减小;当层理方向为水平层理,弹速为 11 m/s 时,经历 400 °C 高温作用后,岩样峰值强度由常温作用后的 124 MPa 降至 116 MPa,减少 6.5%,经历 800 °C 高温作用后,岩样峰值强度由 400 °C 高温作用后的 116 MPa 降至 91 MPa,减少 21.6%;当层理

方向为垂直层理,弹速为 11 m/s 时,经历 400 °C 高温作用后,岩样峰值强度由常温作用后的 108 MPa 降至 94 MPa,减少 13%,经历 800 °C 高温作用后,岩样峰值强度由 400 °C 高温作用后的 94 MPa 降至 70 MPa,减少 25.5%;岩样经历的温度低于 400 °C 时,随受热温度的升高,峰值强度的变化较小,温度超过 400 °C,峰值强度与温度呈明显的负相关关系。结合表 2 岩样组分分析可知,400 °C 作用后岩石内部结构比较稳定,组分变化较小,其强度下降主要是因为砂岩受热使内部自由水和结合水不断脱出<sup>[20]</sup>,水蒸发膨胀使得岩样内部微裂纹得以发展,减小岩石密实程度,导致岩样峰值强度下降,但其下降程度较小。经历温度 800 °C 时,其岩石组分发生明显变化,伊利石、滑石、方解石含量大幅度减少,透辉石含量大幅度提高,四者的摩斯硬度分别为 2, 1, 3, 6,由此可知,高温后岩样强度显著降低的主要原

因为,温度对内部结构的破坏而非矿物组分的改变。

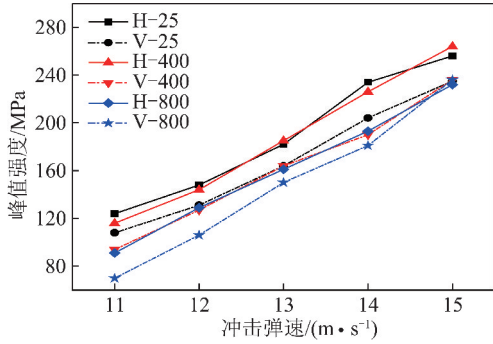


图5 峰值强度变化曲线

Fig.5 Peak intensity curves

### 2.6 层理砂岩峰值应变曲线

层理砂岩峰值应变曲线如图6所示。由图6可知,砂岩峰值应变强度随着冲击弹速的增加而增加,水平层理岩样的峰值应变曲线均高于垂直层理。层理砂岩经历高温后,峰值应变随受热温度的升高而增加;经历400,800℃高温后,层理砂岩峰值应变平均涨幅分别为8.2%,41.2%,峰值应变与温度呈正相关关系;且与400℃相比,800℃对层理砂岩的峰值应变影响更加显著。

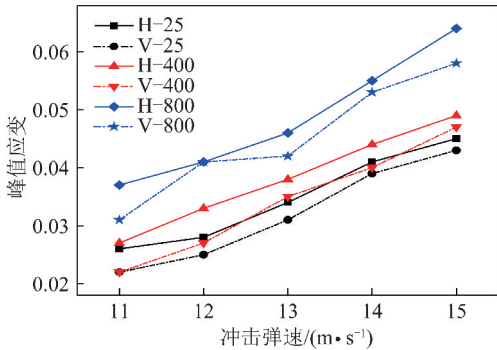


图6 峰值应变变化曲线

Fig.6 Peak strain curves

### 2.7 层理砂岩变形模量曲线

考虑到选取冲击压缩应力-应变全曲线的弹性阶段时易出现误差,本文选用变形模量来进行分析。图7为层理砂岩变形模量曲线,砂岩变形模量随着冲击弹速的增加而增加,垂直层理岩样的变形模量数据点部分高于水平层理,但大部分水平层理岩样的变形模量数据点位于垂直层理上方。层理砂岩经历高温后,变形模量呈降低的变化趋势,经历400℃高温作用后,变形模量数值与常温相近。经历800℃高温作用后,变形模量较常温作用后平均损失了约40%。

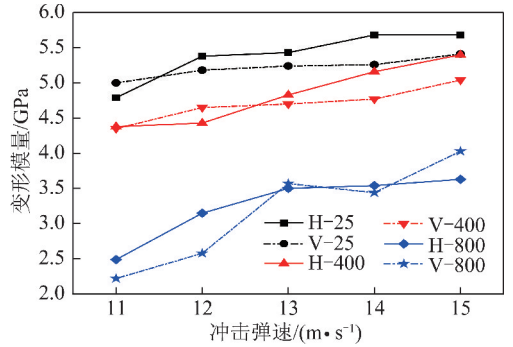


图7 变形模量变化曲线

Fig.7 Modulus of deformation modulus

态力学行为规律与裂纹扩展机理,对3组温度等级下最低与最高应变的层理砂岩试件进行破坏断口的SEM电镜扫描试验,如图8~10所示。

(1)整体上看,3种温度作用后层理砂岩在高应变率下破坏的断口表面整体度差,形貌粗糙,在低应变率下破坏的断口表面整体度好,平整光滑。岩样颗粒保持均匀分布,接触良好,排列紧密,胶结物质与颗粒黏结密实,裂隙裂纹较少,应变率较高时,颗粒接触变差,少量裂隙发展变大。

(2)常温作用后,水平层理岩样在低应变率条件下,破坏断口表面主要有代表沿晶破坏的晶粒多面体外形的块状花样,并伴随少量胶结物质的破坏,在高应变率条件下,还出现了解理平台,表明该处破坏为穿晶破坏,破坏是沿晶破坏与穿晶破坏耦合的脆性破坏。垂直层理岩样在低应变率条件下,有大量晶粒多面体外形的块状花样,并伴有胶结物质破坏,在高应变率条件下,还出现了沿晶断裂与穿晶断裂重叠的现象,是一种特殊的脆性破坏(图8)。

(3)400℃高温作用后,水平层理岩样在低应变率条件下,破坏断口表面有大量晶粒多面体外形的块状花样,局部出现解理平台和胶结物质的破坏,在高应变率条件下,还出现了代表脆性破坏的河流式花样。垂直层理岩样在低应变率条件下,有大量晶粒多面体外形的块状花样,并伴随少量解理平台和胶结物质的破坏,在高应变率条件下,有极少数的沿晶破坏,主要表现为穿晶破坏,存在大量解理平台,伴有胶结物质的破坏(图9)。

(4)800℃高温作用后,水平层理岩样在低应变率条件下,以胶结物质破坏为主,出现了贯穿多个颗粒的河流式花样,在高应变率条件下,破坏形式主要是胶结物质的开裂,出现了代表塑性破坏的蛇形滑移分离状花样。垂直层理岩样在低应变率条件下,以胶结物质破坏为主,同时在局部位置有少量晶粒多面体

## 3 断口微观分析

### 3.1 断口微观形貌分析

为分析不同温度作用后各向异性砂岩试件的动



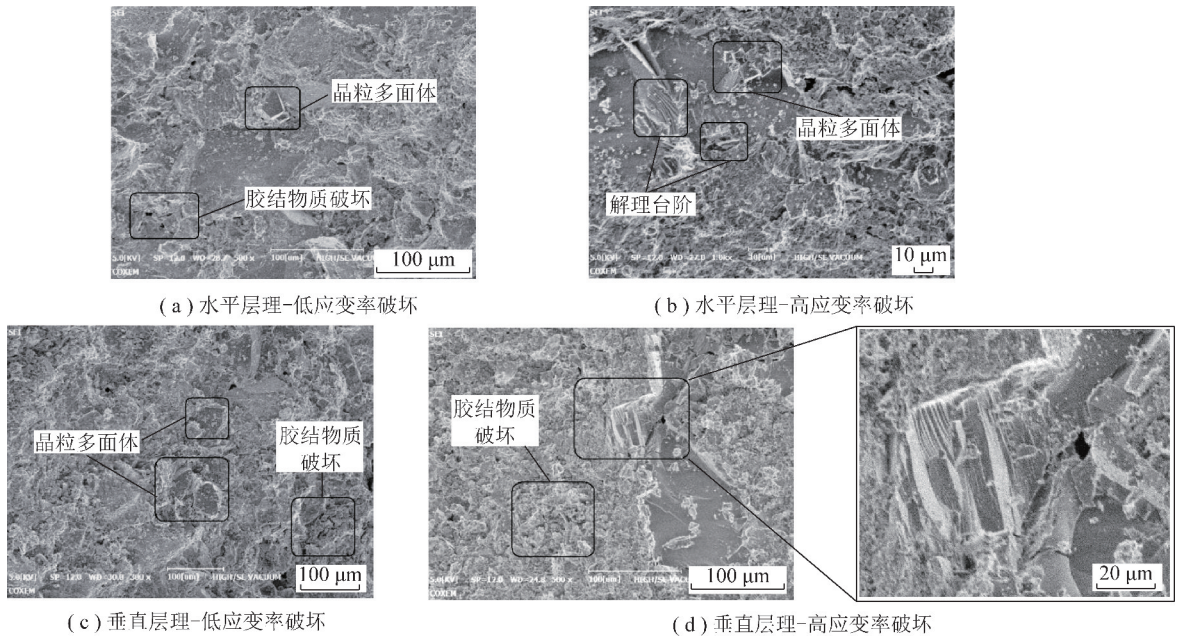


图 8 25 °C 条件下破坏断口的典型细观形貌

Fig. 8 Typical micro-structure of sandstone fracture of 25 °C

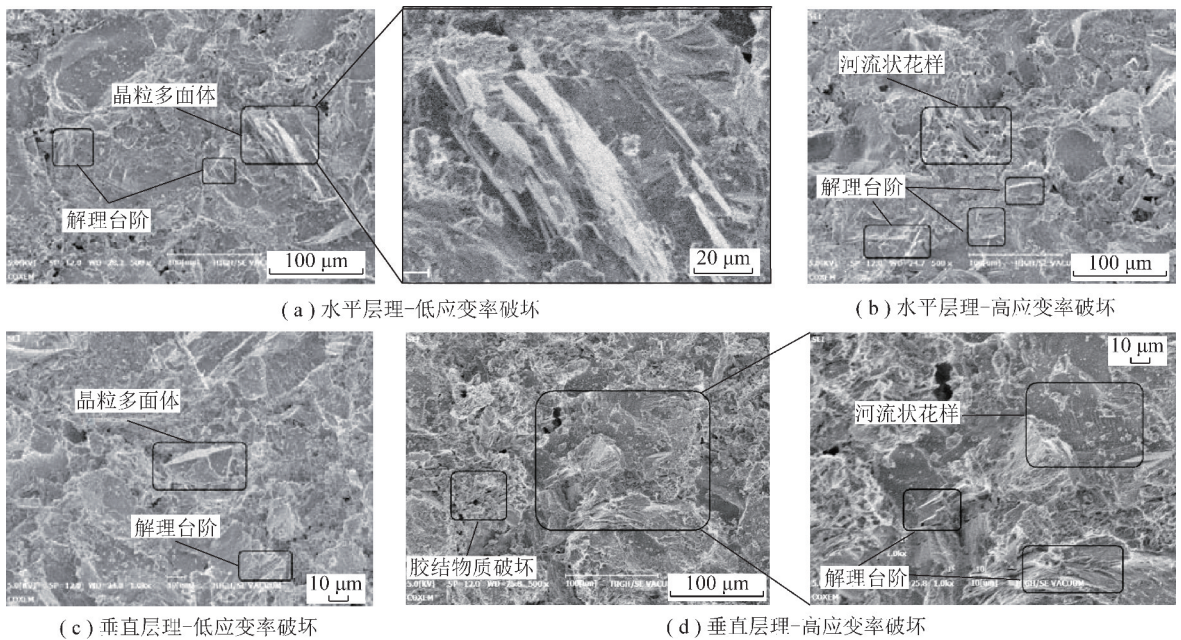


图 9 400 °C 条件下破坏断口的典型细观形貌

Fig. 9 Typical micro-structure of sandstone fracture of 400 °C

外形的块状花样,在高应变率条件下,破坏形式主要是胶结物质的开裂,局部出现代表韧性破坏的窝坑(图 10)。

胶结物质断裂(低) ≤ 沿晶断裂(较低) ≤ 穿晶断裂(一般) ≤ 准解理断裂(较高) ≤ 韧性断裂(高)  
脆性断裂

将断口细观形貌分析列表,推出相应的损伤断裂模式<sup>[22]</sup>,并对其耗能规律总结(表 3)。由表 3 可得以下规律:

### 3.2 破坏断口的能耗分析

从断裂力学角度,冲击荷载作用下岩石损伤断裂模式的耗能大小排列<sup>[21]</sup>为

(1)砂岩在高应变率下破坏时能耗普遍高于低应变率破坏。这是因为,岩石在外力作用下具有整体的弹性应变能,弹性应变能做功、塑性功与表面能做



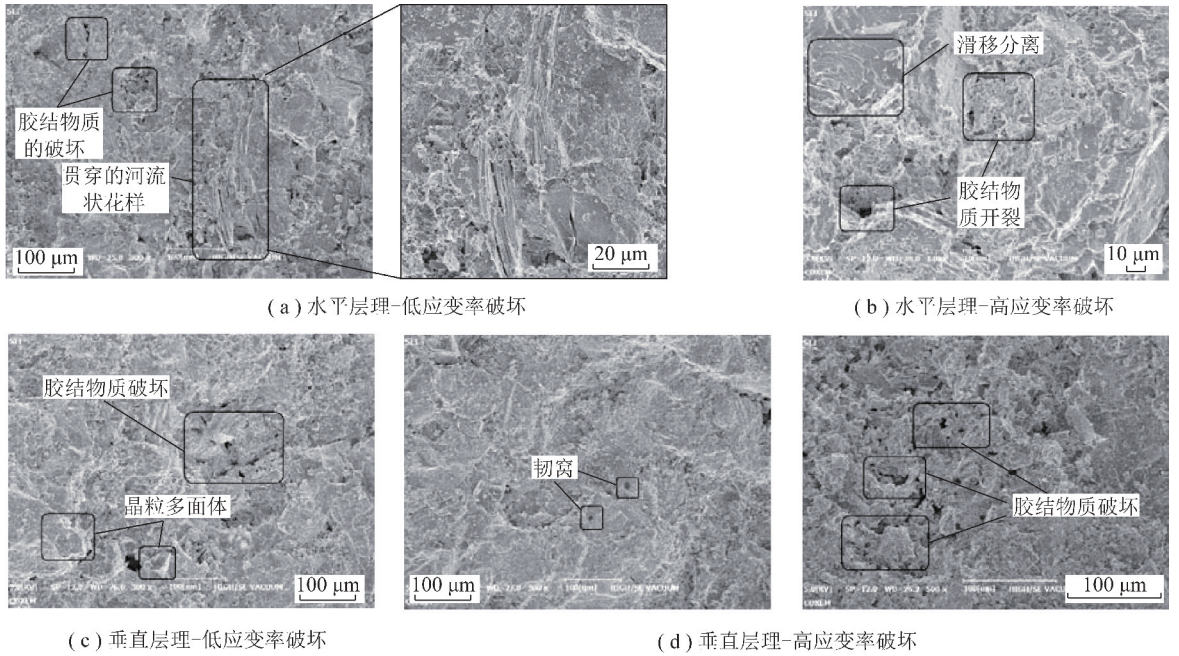


图 10 800 °C 条件下破坏断口的典型细观形貌

Fig. 10 Typical micro-structure of sandstone fracture of 800 °C

表 3 砂岩断口能耗的变化规律

Table 3 Variation of energy consumption in sandstone fracture

| T/°C | 层理方向 | 弹速/(m · s <sup>-1</sup> ) | 断口细观形貌                               | 损伤断裂模式                    | 耗能等级 | 主要影响作用 |
|------|------|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------|------|--------|
| 25   | 水平   | 11                        | 主体:晶粒多面体<br>局部:解理台阶、胶结物质开裂           | 以沿晶断裂为主<br>局部有穿晶断裂、胶结物质断裂 | 一般   | 荷载     |
|      |      | 15                        | 主体:解理台阶、晶粒多面体<br>局部:胶结物质开裂           | 以穿晶与沿晶的耦合断裂为主<br>局部胶结物质断裂 | 较高   | 荷载     |
|      | 垂直   | 11                        | 主体:晶粒多面体<br>局部:解理台阶、胶结物质开裂           | 以沿晶断裂为主<br>局部有穿晶断裂、胶结物质断裂 | 一般   | 荷载     |
|      |      | 15                        | 主体:解理台阶、晶粒多面体<br>局部:胶结物质开裂           | 以穿晶与沿晶的耦合断裂为主<br>局部胶结物质断裂 | 较高   | 荷载     |
|      | 水平   | 11                        | 主体:晶粒多面体<br>局部:解理台阶、胶结物质开裂           | 以沿晶断裂为主<br>局部有穿晶断裂、胶结物质断裂 | 一般   | 荷载     |
|      |      | 15                        | 主体:解理台阶(大量)、河流状花样<br>局部:晶粒多面体、胶结物质开裂 | 以穿晶断裂为主<br>局部有沿晶断裂、胶结物质断裂 | 较高   | 荷载     |
| 400  | 垂直   | 11                        | 主体:晶粒多面体<br>局部:解理台阶                  | 以沿晶断裂为主<br>局部有穿晶断裂        | 较低   | 荷载     |
|      |      | 15                        | 主体:解理台阶(大量)、胶结物质开裂<br>局部:晶粒多面体       | 以穿晶断裂、胶结物质断裂为主<br>局部有沿晶断裂 | 一般   | 荷载     |
|      | 水平   | 11                        | 主体:胶结物质开裂<br>局部:晶粒多面体、河流状花样          | 以胶结物质断裂为主<br>局部有沿晶断裂、穿晶断裂 | 较低   | 温度-荷载  |
|      |      | 15                        | 主体:胶结物质开裂<br>局部:蛇形滑移花样               | 以胶结物质断裂为主<br>局部有韧性断裂      | 较高   | 温度-荷载  |
|      | 垂直   | 11                        | 主体:胶结物质开裂<br>局部:晶粒多面体                | 以胶结物质断裂为主<br>局部有沿晶断裂      | 低    | 温度-荷载  |
|      |      | 15                        | 主体:胶结物质开裂<br>局部:韧窝                   | 以胶结物质断裂为主<br>局部有韧性断裂      | 较高   | 温度-荷载  |

功三者之和是裂纹扩展的能量阈值。在裂纹扩展的过程中,只有外部能量超过这一阈值,裂纹才能开始扩展。在低应变率条件下,外部能量输入相对较小,在此期间只有能量阈值相对低的裂纹得以发育,参与破坏的裂纹数量少,损伤断裂模式耗能相对较低。在高应变率条件下,能量输入大,裂纹会呈分叉式扩展,并形成羽毛状裂纹面<sup>[23]</sup>,目的是用最短的时间消耗最多的能量,当裂纹扩展速度达到极限时,便不能消耗多余的能量,此时能量阈值高的裂纹得到足够能量而被激活,开始新一轮的裂纹扩展,因此高应变率条件下,岩样的损伤断裂模式耗能较高。

(2) 25 °C 与 400 °C 条件下破坏耗能相近,略高于 800 °C 条件下的破坏。这是因为,800 °C 高温会对岩石造成热破裂、热熔融以及热挥发作用,其矿物颗粒结构在未施加荷载前就已存在裂隙,在冲击荷载作用下,颗粒很容易发生破裂,造成大量胶结物质开裂,以此来消耗输入能量,导致其耗能反而较低。

(3) 断口以脆性破坏与胶结物质开裂为主要破坏模式,但在高温、高应变率下出现局部的塑性断裂特征,这也证实了温度对此起了重要作用。

### 3.3 细观结构数值化分析

仅依靠断口细观形貌的定性分析很难发现规律,为量化、确切地分析动荷载与温度耦合作用下的岩石断面裂隙特征的变化规律,选取 3 种冲击弹速试样,采用 Image-Pro Plus (IPP) 软件对其 SEM 电镜扫描后的细观图片进行量化处理,得到裂隙裂纹的相关数量信息。

首先对断口细观图像进行预处理,如图 11 所示,对图像进行灰度检测,灰度值指图中点的颜色深度,数值范围为从 255 代表的白色到 0 代表的黑色。由图 11 可知,本组细观图像中裂隙的灰度值普遍低于 80,故设置二值分割的界限灰度值为 80,得到二值图,如图 12(a) 所示。然后调整其像素值及去除伪影点等杂质,最后将所得细观图像进行量化处理,得到裂隙网络计算图,如图 12(b) 所示,图中白色块状物质即为裂隙。

(1) 裂隙数量:对冲击弹速为 11, 13, 15 m/s 的层理砂岩断口细观图进行上述处理,得到 3 种弹速下裂隙数量的变化规律,如图 13 所示。由图可知,层理方向与温度等级相同时,断口裂隙数量与冲击弹速成正比,这主要是因为裂隙的产生、发展需要消耗能量,当冲击弹速较低时,只有消耗能量较少的裂隙才能产生,此时产生的裂纹较少,随着冲击弹速的增加,提供给岩样的能量不断升高,使得裂纹不断产生,因而裂隙数量不断增加;水平层理的裂隙数量普遍高于垂直层理;断

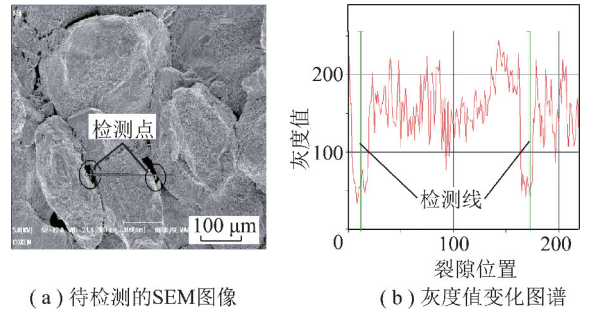


图 11 灰度值检测

Fig. 11 Gray value detection

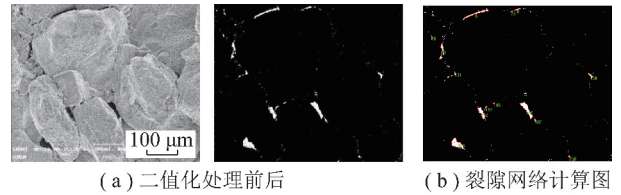


图 12 图像处理过程

Fig. 12 Image processing process

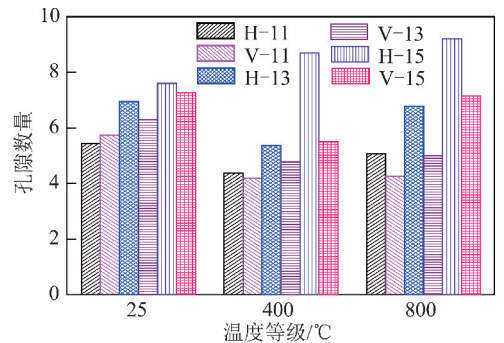


图 13 裂隙数量变化规律

Fig. 13 Variation regularity of crack quantity

口裂隙数量与温度等级并无明显的变化规律。

(2) 裂隙面积:定义平面微观裂隙率  $P$ ,  $P$  值代表断面上的固体颗粒排列松散程度,其值越大表明排列越松散<sup>[24]</sup>。即  $P = A_b/A_1$ , 其中,  $A_b$  为断口裂隙网络面积,即图 12(b) 中白色块状部分的面积;  $A_1$  为整幅 SEM 图像面积。经过先期对比发现,300 倍的放大倍数适中,方便计数且具有准确性,适用于本次细观参数量化试验,结果如图 14 所示。由图 14 可知,整体上看,经过 800 °C 高温作用后,断口微观裂隙率最大,明显高于 25 和 400 °C; 25 °C 和 400 °C 的断口微观裂隙率基本相同,差异较小;层理方向与温度等级相同时,微观裂隙率随着冲击弹速的增加而增加,所以冲击弹速与岩样的破碎响应有直接关系;冲击弹速与温度等级相同时,平行层理岩样的微观裂隙率曲线低于垂直层理岩样。

(3) 裂隙形状:定义裂隙形状因子,表示裂隙形状的规则程度,其值越大表明规则度越差,越接近 1



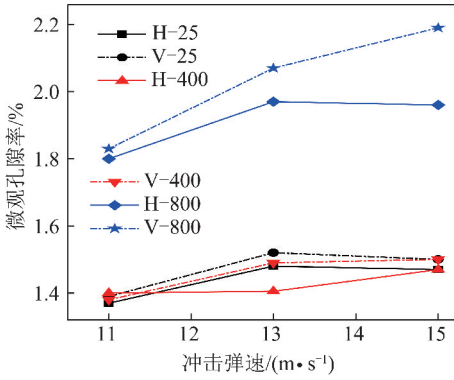


图 14 微观裂隙率变化规律

Fig. 14 Variation law of microscopic fracture rate

表明规则度越好。即  $\eta = L_x/L_y$ , 其中,  $L_x$  为裂隙外包矩形沿长轴方向的长度;  $L_y$  为裂隙外包矩形沿短轴方向的长度。裂隙形状因子  $\eta$  的变化规律如图 15 所示, 由图 15 可知, 整体上看, 岩样形状因子大小处于 1.0 ~ 1.4, 说明本试验所使用的红砂岩样的裂隙规则程度较好; 冲击弹速与温度等级相同时, 垂直层理的形状因子普遍小于水平层理, 表明裂隙的规则程度存在各向异性差异, 这主要是因为, 水平层理岩样在动态破坏试验过程中, 施压方向与层理方向垂直, 裂隙在发展过程中受到层理面的阻碍, 发生转向, 沿着层理方向扩展, 当遇到层理缺陷处时, 发生第 2 次转向, 导致裂隙规则度较差。而垂直层理岩样施压方向与层理平行, 裂隙在发展过程中沿着层理弱面发展, 受到阻碍较少, 裂隙发展较为规则; 将 3 种温度等级下形状因子的最小值和最大值画线区分, 可知随着温度的增加, 形状因子的大小逐渐变小, 表明高温处理后岩样动态破坏断口的裂隙形态趋于规则。

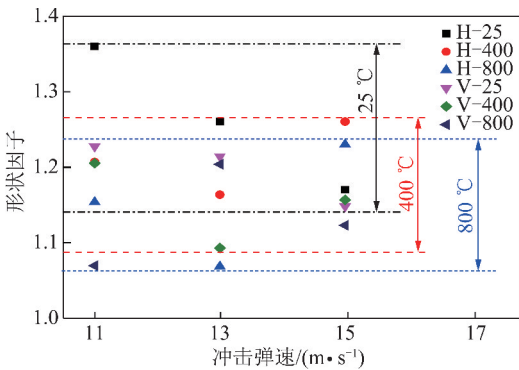


图 15 裂隙形状因子变化规律

Fig. 15 Variation regularity of fracture shape factor

## 4 结 论

(1) 高温作用后各向异性砂岩的动态力学性能受冲击弹速、温度效应、层理各向异性的共同影响。冲击弹速对砂岩力学性能有强化效应; 随着温度的升

高, 砂岩峰值强度减小, 峰值应变增大, 而变形模量减小; 当冲击弹速为 11 m/s, 相较于常温状态下的峰值强度, 经历 400 °C 和 800 °C 高温作用后的水平层理岩样分别减少了 6.5%, 26.6%, 垂直层理岩样分别减少了 13%, 35.2%; 相较于常温状态下的峰值应变, 经历 400, 800 °C 高温后的层理砂岩的平均涨幅分别为 8.2%, 41.2%; 相较于常温状态下, 经历 400 °C 高温作用后的砂岩变形模量与常温相近, 经历 800 °C 高温作用后的砂岩变形模量平均损失了约 40%。平行层理砂岩的峰值强度、峰值应变、变形模量普遍高于垂直层理岩样, 整体性更好。

(2) 断口微观形貌能较好地反映出层理砂岩内部裂纹产生情况。层理砂岩在高应变率下破坏的断口表面比在低应变率下整体度差, 形貌更加粗糙。经历温度不大于 400 °C 时, 破坏面主要以沿晶破坏和穿晶破坏为主, 表现为脆性断裂。经历温度为 800 °C 时, 破坏面主要以胶结物质破坏为主, 出现了代表塑性破坏和韧性破坏的滑移分离状花样和窝坑。砂岩在高应变率下破坏时能耗普遍高于低应变率破坏。

(3) 从裂隙的数量、裂隙的面积、裂隙的形状 3 个方面分析了高温作用后砂岩动态破坏断口的裂隙特征。裂隙的数量、裂隙的面积、裂隙的形状三者均存在明显的各向异性差异, 水平层理的裂隙数量普遍高于垂直层理; 水平层理岩样的微观裂隙率曲线低于垂直层理岩样; 垂直层理的裂隙形状普遍比水平层理规则。高温处理后岩样动态破坏断口的裂隙形态趋于规则。断口裂隙数量与冲击弹速成正比; 微观裂隙率随着冲击弹速的增加而增加; 裂隙形状与冲击弹速无显著关系。

## 参考文献 (References):

[1] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[2] 孙强, 张志镇, 薛雷, 等. 岩石高温相变与物理力学性质变化 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 935-942.  
SUN Qiang, ZHANG Zhizhen, XUE Lei, et al. Physical-mechanical properties variation of rock with phase transformation under high temperature [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 935-942.

[3] 苏承东, 韦四江, 秦本东, 等. 高温对细砂岩力学性质影响机制的试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 623-630.  
SU Chengdong, WEI Sijiang, QIN Bendong, et al. Experimental study of influence mechanism of high temperature on mechanical properties of fine-grained sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 623-630.

[4] 苏承东, 韦四江, 秦本东, 等. 高温作用对 3 种砂岩物理参数特征的影响分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(2): 341-348.



- SU Chengdong, WEI Sijiang, QIN Bendong, et al. Research on physical parameters of three kinds of sandstone after high temperature [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(2):341-348.
- [5] RUTQVIST J, BARB D, DATTA R. Coupled thermal hydrological mechanical analyses of the Yucca mountain drift scale test comparison of field measurements to predictions of four different numerical models[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(5/6):680-697.
- [6] HAJPAL M. Changes in sandstone of historical monuments exposed to fire or high temperature [J]. Fire Technology, 2002, 38(4):373-382.
- [7] TIEN Y M, KUO M C. A Failure criterion for transversely isotropic rocks[J]. International Journals of Rock Mechanic & Mining Science, 2001, 38(3):399-412.
- [8] 苏海健, 靖洪文, 赵洪辉, 等. 高温处理后红砂岩抗拉强度及其尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1):2879-2887.
- SU Haijian, JING Hongwen, ZHAO Honghui, et al. Study on tensile strength and size effect of red sandstone after high temperature treatment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1):2879-2887.
- [9] 吴刚, 邢爱国, 张磊. 砂岩高温后的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10):2110-2116.
- WU Gang, XING Aiguo, ZHANG Lei. Mechanical characteristics of sandstone after high temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10):2110-2116.
- [10] 徐贻, 陈有亮, 王苏然, 等. 单裂隙岩石高温作用下的力学性能分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(2):216-222.
- XU Pei, CHEN Youliang, WANG Suran, et al. Analysis of mechanical property single fracture rock under action of high temperature [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(2):216-222.
- [11] 李庆森, 杨圣奇, 陈国飞. 高温后节理砂岩强度及变形破坏特性[J]. 煤炭学报, 2014, 39(4):651-657.
- LI Qingsen, YANG Shengqi, CHEN Guofei. Strength and deformation properties of post-high-temperature joint sandstone[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(4):651-657.
- [12] 刘石, 许金余, 刘志群, 等. 温度对岩石强度及损伤特性的影响研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(4):583-588.
- LIU Shi, XU Jinyu, LIU Zhiqun, et al. Temperature effect on strength and damage property of rock mass [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(4):583-588.
- [13] 翟科韬, 吴刚, 张渊, 等. 单轴压缩下高温盐岩的力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1):105-111.
- ZHAI Songtao, WU Gang, ZHANG Yuan, et al. Mechanical characteristics of salt rock subjected to uniaxial compression and high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1):105-111.
- [14] 张传虎, 张强, 蒋斌松. 高温后花岗岩变形特性试验研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(3):70-72.
- ZHANG Chuanhu, ZHANG Qiang, JIANG Binsong. Experimental study on deformation characters of granite after high temperature [J]. Coal Technology, 2018, 37(3):70-72.
- [15] 戎虎仁, 白海波, 王占盛. 不同温度后红砂岩力学性质及微观结构变化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(2):463-469.
- RONG Huren, BAI Haibo, WANG Zhansheng. Experimental research on mechanical properties and microstructure change law of red sandstone after different temperatures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2):463-469.
- [16] 工程岩体试验方法标准 (GBT 50266—2013) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [17] 王成虎, 王红才, 刘立鹏, 等. 高温对玄武质凝灰岩力学性能的影响及其机理分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10):1827-1835.
- WANG Chenghu, WANG Hongcai, LIU Lipeng, et al. Effects of high temperatures on mechanical performance of basaltic tuff and mechanism analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(10):1827-1835.
- [18] RAMAMURTHY T, VENKATAPPA Rao, SINGH J. Engineering behaviour of phyllites [J]. Engineering Geology, 1993, 33(3):209-225.
- [19] 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.
- XU Jinyu, LIU Shi. Research on fractal characteristics of marble fragments subjected to impact loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11):3225-3229.
- [20] 顾长光. 浅论粘土矿物的脱水机理与热分析[J]. 贵州地质, 1990(3):243-251.
- GU Changguang. A discussion on dewatering mechanism of clay minerals and heat analysis [J]. Geology of Guizhou, 1990(3):243-251.
- [21] 李明. 高温及冲击载荷作用下煤系砂岩损伤破裂机理研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- LI Ming. Research on rupture mechanisms of coal measures sandstone under high temperature and impact load [J]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [22] 左建平, 谢和平, 周宏伟, 等. 温度-拉应力共同作用下砂岩破坏的断口形貌[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12):2444-2457.
- ZUO Jianping, XIE Heping, ZHOU Hongwei, et al. Fractography of sandstone failure under temperature-tensile stress coupling effects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12):2444-2457.
- [23] Meyers MA 著, 张庆明, 译. 材料的动力学行为 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [24] 闻名, 许金余, 王浩宇, 等. 低温-动荷载耦合作用下砂岩破坏断口的形貌分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S2):3822-3830.
- WEN Ming, XU Jinyu, WANG Haoyu, et al. Fractography analysis of sandstone failure under low temperature-dynamic loading coupling effects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S2):3822-3830.