

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.2102

升温速率对高温作用后砂岩的宏观性质影响

姜德义^{1,2}, 郭朋煜^{1,2}, 范金洋^{1,2}, 陈波^{1,2}, 陈结^{1,2}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 资源与安全学院, 重庆 400044)

摘要: 砂岩受到高温影响后, 宏观性质会发生不同程度的变化, 400 °C 和 1 000 °C 是砂岩宏观性质变化的两个重要节点。为进一步研究升温速率对高温砂岩物理性质、力学特性以及内部微观破裂的影响, 以 350 °C 和 950 °C 为目标温度, 开展了不同升温速率下砂岩的单轴压缩试验, 单轴压缩全程采用声发射监测, 采用扫描电镜分析了砂岩破坏后的细观形貌。研究表明: 经不同升温速率处理后, 350 °C 砂岩的质量、体积、密度以及纵波波速变化较小; 950 °C 砂岩的质量、密度及纵波波速显著降低, 体积明显增大, 且升温速率越高变化率越小。350 °C 砂岩的应力-应变曲线、应力-体积应变曲线、抗压强度及弹性模量受升温速率的影响较小; 950 °C 下砂岩试样应力-应变曲线随升温速率的增加向上偏移, 抗压强度和弹性模量则先增加后达到恒定。350 °C 及 950 °C 砂岩的声发射振铃累计数都有随升温速率增大而减小的趋势, 950 °C 下升温速率为 1 °C/min 时砂岩的振铃累计数最大, 突发性声发射活动区域最多。对不同升温速率砂岩进行扫描电镜分析发现, 升温速率对 350 °C 砂岩的微观形貌影响较小, 950 °C 砂岩试件则会随着升温速率的下降出现微裂纹和微孔隙数量增多、体积扩大的情况。

关键词: 高温砂岩; 升温速率; 力学特性; 声发射; 细观分析

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 10-2675-14

Effect of heating rate on macro and mesoscopic properties of sandstone after high temperature

JIANG De-yi^{1,2}, GUO Peng-yu^{1,2}, FAN Jin-yang^{1,2}, CHEN Bo^{1,2}, CHEN Jie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: After sandstone is subjected to high temperature, the macro and micro properties will change to different degrees. 400 °C and 1 000 °C are two important nodes in the change of the macro and meso properties of sandstone. In order to further study the influence of heating rate on the physical properties, mechanical properties and internal meso-fracture of sandstone, the uniaxial compression experiment of sandstone under different heating rates was carried out with 350 °C and 950 °C. The whole process of uniaxial compression was monitored by acoustic emission, and scanning electron microscope was used to analyze the meso-morphology of destructed sandstone. After treated at different heating rates, 350 °C sandstone has little change in the mass, volume, density and longitudinal wave velocity, while 950 °C sandstone decreased significantly in the mass, density and longitudinal wave velocity, and increased remarkably in the volume, and the higher heating rate, the smaller change rate. The stress-strain curve, stress-volume strain curve, compressive strength and elastic modulus of the 350 °C sandstone are virtually unaffected due to the heating rate. The stress-strain curve of the sandstone sample at 950 °C is upwardly biased with the increase of the heating rate, the compressive strength and elastic modulus first increase and then reach a constant value; the cumulative ring-down counts of acoustic emission of sandstone at 350 °C and 950 °C have a tendency to decrease with the increase of heating rate. When the temperature is 950 °C and the heating rate is 1 °C/min, the cumulative ring-down counts of sandstone and the sudden acoustic emission area are the largest; scanning electron microscopy analysis of sandstones with different heating rates showed that heating rate has little effect on the mesoscopic morphology of 350 °C sandstone; with the decrease of the heating rate, the number of microcracks and micropores of 950 °C sandstone will increase, the volume size of microcracks and micropores will also increase.

Keywords: high temperature sandstone; heating rate; mechanical properties; acoustic emission; meso-analysis

收稿日期: 2021-12-13

修回日期: 2022-06-24

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51834003, No.51904039)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51834003, 51904039).

第一作者简介: 姜德义, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 主要从事矿山岩石力学、岩土工程及盐穴能源储备方面的研究。E-mail: deyij@cqu.edu.cn

通讯作者: 范金洋, 男, 1989 年生, 博士, 副教授, 主要从事矿山动力灾害防治方面的研究。E-mail: Jinyang.f@qq.com

1 引言

能源的稳定开发是经济发展的重要支撑,但随着地表资源和传统意义上的浅部地层利用率已趋近饱和,深部资源的开采和地下空间的开发利用已成为未来发展的必然趋势^[1-2]。地下深部岩土工程如煤炭地下气化工程、地热能开采、高放射性核废料深埋地质处置以及地下硐室灾后重建等作业环境都会不可避免地受到高温影响^[3-5]。高温是影响地下岩土工程施工安全性和稳定性的重要因素,研究高温作用后岩石的力学特性以及破坏机制具有重要的意义。

岩石受到高温影响后,宏观物理性质和力学特性的研究已取得诸多进展。研究对象多为大理岩、花岗岩和砂岩等,研究内容主要涉及到密度、孔隙率、渗透率、波速、抗压强度、弹性模量和泊松比等^[6-11]。随着温度的升高,大理岩的纵波波速会逐渐下降^[12],单轴抗压强度呈减小趋势且表现出脆性向塑性转变的特性^[13]。花岗岩也表现出类似的规律,温度越高,单轴抗压强度及抗拉强度越小,损伤裂纹密度及应变能释放率呈增加趋势,在温度超过 1 000 °C 后,花岗岩的延性增强^[14-21]。高温作用后砂岩力学性能变化总体规律表现为,随着温度的增加,砂岩的压密模量、线性模量、屈服模量以及破坏模量都呈减小趋势^[22]。粗砂岩的纵波波速明显降低在 400 °C 之后,力学性质退化在 300 °C 左右^[23-24]。节理砂岩的峰值强度、峰值应变、弹性模量等参数在 400 °C 前后均呈现不同的变化趋势,当经历温度较低时,温度对于节理砂岩性质的增强效果大于削弱效果;而当温度较高时,出现相反的现象^[25-26]。细砂岩力学性质,强度及弹性模量变化节点出现在 600 °C 左右^[27-28]。

为研究高温对岩石内部结构损伤的影响,常采用声发射的方式监测岩石的破裂过程^[29-32]。在石灰岩的单轴压缩过程中,400 °C 是声发射信号的变化节点,在 400 °C 之前,声发射振铃累计数均值随着温度的升高而增加,400 °C 之后随温度升高而降低^[33]。花岗岩的弹性和塑性破坏临界温度为 330 °C,塑性破坏瞬间声发射信号会激增^[34]。在 400 °C 之前,砂岩单轴压缩过程中的声发射规律变化不明显,600~1 200 °C 之间,声发射信号数急剧上升^[35-36]。此外,诸多学者对混凝土、盐岩、煤岩等声发射规律,包括声发射振铃计数率、能量率等参数的变化规律等进行了深入研究^[37-42]。

综上所述,对于高温损伤岩石的力学性质和声

发射规律研究已取得多方面的进展。然而面对实际工况,在进行地下岩土工程例如煤炭气化开采以及大型地下硐室火灾后重建等,均会遇到围岩达到高温后恢复至初始温度的情况。砂岩是岩土工程中常见的围岩类型,砂岩的升温速率是影响砂岩力学性质和深部岩土工程稳定性的一个重要因素。在 400 °C 以下,温度对砂岩的物理和力学性质没有明显的影响,400 °C 以上时,温度对其性质的影响逐步增大^[25],400~1 000 °C 是砂岩损伤温度区间^[43]。由于部分晶体的熔化(钠长石熔点为 1 100 °C,石英熔点为 1 750 °C),当温度高于 1 000 °C 时,砂岩的内部胶结能力已基本丧失^[22]。故本文在以上相关研究的基础上,选择砂岩的力学性质还未发生明显变化前和已发生热损伤但还未完全丧失力学性能两种温度,研究不同升温速率对砂岩力学性质和声发射特性的影响,并分析了砂岩的细观破坏形貌,以期对地下岩土工程的建设提供一定参考。

2 试样制备与方法

2.1 试样制备

本次试验所用砂岩取自四川省威远县,青色,表面无肉眼可视节理裂隙,质地均匀细密。按照国际岩石力学学会(IRSM)建议的试样尺寸,将砂岩制成高径比为 2:1 的 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 标准圆柱体试样,且砂岩试样上下端面的不平行度及直径偏差满足标准,试样高度偏差及轴向偏差符合标准,加工后试样如图 1 所示。

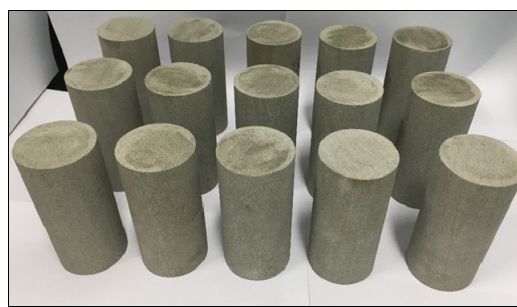


图 1 砂岩试样

Fig.1 Sandstone samples

图 2 是常温下(25 °C)砂岩试件的 XRD 图像,该砂岩试件的主要成分为石英(63%)和钠长石(30%),含有少量的绿泥石(6%)和云母(1%)。对常温下砂岩进行物理及力学参数测定得出,该类砂岩的单轴抗压强度为 64.39 MPa,弹性模量为 4.93 GPa,纵波波速为 3 030 m/s,密度为 2.37 g/cm³。

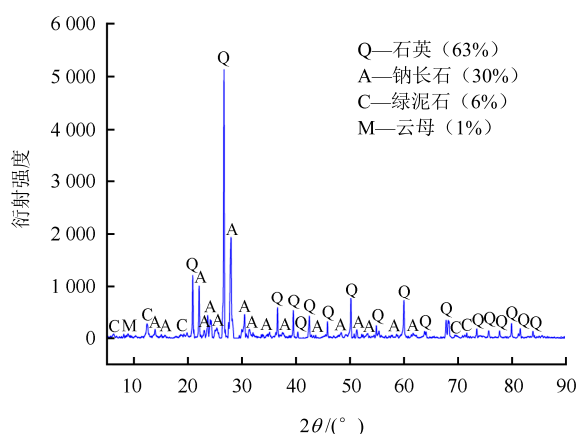


图 2 常温下 (25 °C) 砂岩试件 XRD 图像
Fig.2 XRD image of sandstone specimen at room temperature (25 °C)

2.2 试验装置

本次试验涉及到的设备主要有基本物理性质参数测试设备、试样加温设备、压力机和声发射监测仪。试样质量、直径及高度等基本物理性质参数测试设备为天平及游标卡尺。加温设备为 SX2-10-12A 型高温马弗炉。单轴压缩试验在 MTS815 压力机上

开展 (见图 3(a)), 试验中所采用的波速测试设备为美国 panametrics 超声脉冲接发仪 (见图 3(b)), 声发射信号采集设备为 PCI-2 声发射监测仪 (见图 3(c))。

2.3 试验方案

对加工好的试样进行烘干处理, 利用天平、游标卡尺及波速测试仪测出试样的质量、直径、高度及纵波波速, 然后根据测得砂岩试样的波速对试样进行分组并编号, 每组试样数量为 3 个, 若试验数据离散性大则增加试样数量。具体试验方案如下:

(1) 将目标温度分别设置为 350 °C 和 950 °C, 以 1、3、5、10 °C/min 的升温速率将试样加热至目标温度。

(2) 在目标温度保持 5 min 后进行断电冷却, 使试样在炉内以低冷却速率冷却至室温。

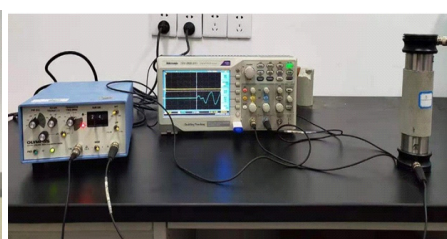
(3) 测量试样的质量、直径、高度及纵波波速。

(4) 以 0.1 mm/min 的加载速率对砂岩试样进行单轴压缩试验, 施加轴压直至破坏, 试验过程中使用声发射监测。

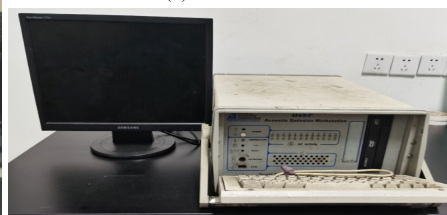
(5) 使用扫描电镜对破坏试样进行微观扫描。



(a) MTS815 压力机



(b) 波速测试设备



(c) 声发射信号采集设备

图 3 主要试验仪器图

Fig.3 Diagram of the main experimental equipment

3 砂岩宏观特性分析

3.1 物理特性分析

高温作用前后砂岩的物理性质会产生明显的差异, 过高的温度会使试件内部水分析出, 进而导致试件质量的减少以及孔隙形成。同时, 高温使得砂岩颗粒膨胀, 促使砂岩内部微裂纹和微孔隙的产生。通过测量试件高温作用前后的质量、体积、纵波波速 3 个物理量, 进而定义试件高温作用前后的体积增加率、质量减小率、密度减小率及波速减小

率 4 个指标。其中, 体积参数由多次测量后试件的平均直径 (直径数值的确定由砂岩试件顶部、1/3 处、2/3 处、底部的测量值平均而来) 和平均高度确定。通过上述 4 个指标来定量分析高温作用后砂岩物理性质的变化情况。具体定义如下:

$$\eta_v = \frac{v_a - v_0}{v_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta_m = \frac{m_0 - m_a}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$\eta_{\rho} = \frac{\rho_0 - \rho_a}{\rho_0} \times 100\% \quad (3)$$

$$\eta_p = \frac{p_0 - p_a}{p_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中： η_v 、 η_m 、 η_{ρ} 、 η_p 分别为高温作用前后砂岩的体积增加率、质量减小率、密度减小率及波速减小率； v_0 、 m_0 、 ρ_0 、 p_0 分别为热处理前砂岩试样的体积、质量、密度及纵波波速； v_a 、 m_a 、 ρ_a 、 p_a 分别为热处理后砂岩试样的体积、质量、密度及纵波波速。

表 1 反映了 350 °C 下砂岩试件质量、体积、密度以及波速随升温速率变化的情况。在不同的升温速率下，试件密度减少率均在 0.8% 以下，体积增加率不超过 0.55%，质量减小率在 0.21% 左右。可认为升温速率对 350 °C 砂岩的密度几乎无影响。纵波波速减小率也表现出相同的规律，不同升温速率下，350 °C 砂岩波速的波动值均在 1.3% 以下。

表 1 350 °C 砂岩部分物理参数变化率
Table 1 Change rate of some physical parameters of sandstone at 350 °C

升温速率/(°C · min ⁻¹)	η_v /%	η_m /%	η_{ρ} /%	η_p /%
1	0.55	0.22	0.76	1.21
3	0.47	0.21	0.67	1.23
5	0.43	0.21	0.64	1.30
10	0.42	0.21	0.63	1.20

同比而言，950 °C 下砂岩试件的物理性质受升温速率的影响十分显著，如表 2 所示。经过高温处理后，950 °C 砂岩质量减小率普遍在 2% 以上，是 350 °C 砂岩（0.2%）的 10 倍以上，体积增加率也在 2.58% 以上，是 350 °C 砂岩的 5~6 倍。体积增加率和质量减小率的大幅变化导致密度发生了明显改变，密度减少了 4.47% 以上。并且随着升温速率的变大，砂岩的质量减小率、体积增加率和密度减小率都在增加。越低的升温速率意味着砂岩越严重的热损伤和热破裂，破坏了砂岩内部颗粒的连结性，这也是波速下降幅度越来越大的原因。

表 2 950 °C 砂岩部分物理参数变化率
Table 2 Change rate of some physical parameters of sandstone at 950 °C

升温速率/(°C · min ⁻¹)	η_v /%	η_m /%	η_{ρ} /%	η_p /%
1	3.13	2.20	5.17	55.3
3	2.98	2.17	5.00	50.6
5	2.64	2.03	4.55	50.9
10	2.58	2.01	4.47	50.1

3.2 应力-应变曲线分析

不同的升温速率达到 350 °C 的砂岩试样应变

曲线簇如图 4(a) 所示，各曲线具有明显的相似特征。砂岩压缩过程可分为压密、弹性、塑性变形和破坏阶段。在最后的破坏阶段，砂岩试件在峰值应力后短时间内跌落为 0 MPa，表现出较强的脆性特征。随着升温速率的升高，砂岩应力-应变曲线会往上偏移。图 4(b) 为 350 °C 下不同升温速率处理后砂岩轴向应力-体积应变曲线，从图中可知，砂岩在达到体积应变反转点后体积会迅速膨胀，体积应变反转点所对应的体积应变与升温速率的变化关系不明显。结合图 4(a)、4(b) 的应变曲线来看，在 350 °C 高温作用后，不同升温速率下砂岩的轴向应变曲线、体积应变曲线具有较高的相似性，且在峰值应力之前重合度较高，故可认为不同的升温速率对砂岩应力轴向应变和体积应变无显著性影响。

图 4(c) 为 950 °C 下不同升温速率处理后砂岩轴向应变、径向应变与应力的关系曲线，曲线的形态和变化趋势与 350 °C 下具有相似性。与 350 °C 砂岩试件不同的是，950 °C 砂岩试件在达到峰值应力后短时间内应力并没有立即发生跌落，而是表现出应变软化特征。随着升温速率的上升，砂岩内部热破裂程度减弱，产生的裂纹数量变少，峰值应力增加，故表现出应变曲线出现了向上偏移的情况。图 4(d) 为 950 °C 应力与体积应变关系图，易知砂岩试样在达到体积应变反转点后体积会迅速膨胀；当升温速率不超过 5 °C/min 时，随着升温速率的增加，应力-体积应变曲线出现向右偏移现象，砂岩达到体积应变反转点时所对应的体积应变逐渐增加，升温速率在 5~10 °C/min 时砂岩应力-体积应变曲线变化不明显。对比 350 °C 和 950 °C 下不同升温速率对砂岩试件的应变曲线可以得出，350 °C 下升温速率对砂岩试样的应力-应变影响较小，950 °C 下升温速率对砂岩应力-应变影响较大，表现出应变软化的现象。

3.3 强度及弹性模量分析

除应力-应变曲线外，岩石力学性质的变化也可以通过单轴抗压强度和弹性模量的变化表现出来。图 5(a) 反映了不同升温速率对砂岩单轴抗压强度的影响。当砂岩试件的目标温度为 350 °C，升温速率为 1、3、5、10 °C/min 时，砂岩的单轴抗压强度分别为 71.97、72.66、73.41、75.11 MPa。随着升温速率的上升，砂岩试件的平均抗压强度相较于 1 °C/min 上升了 0.96%、2.01% 和 4.37%，增加幅度较小。结合平均值的增长幅度和实测值的散点来看，不同升温速率对 350 °C 砂岩试件的单轴抗压强度影响不明显。

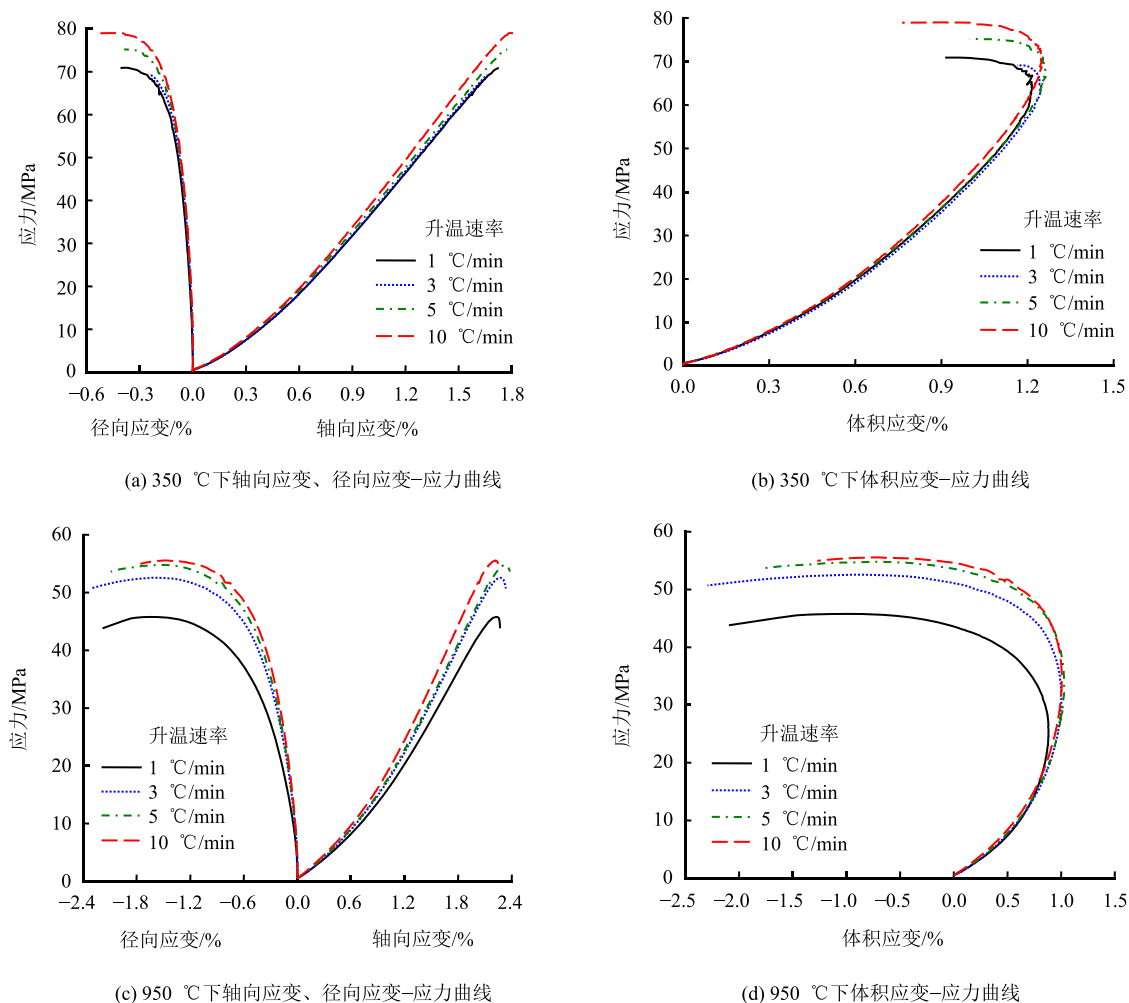


图 4 不同升温速率处理后砂岩应力-应变曲线

Fig.4 Sandstone stress-strain curves after different heating rates

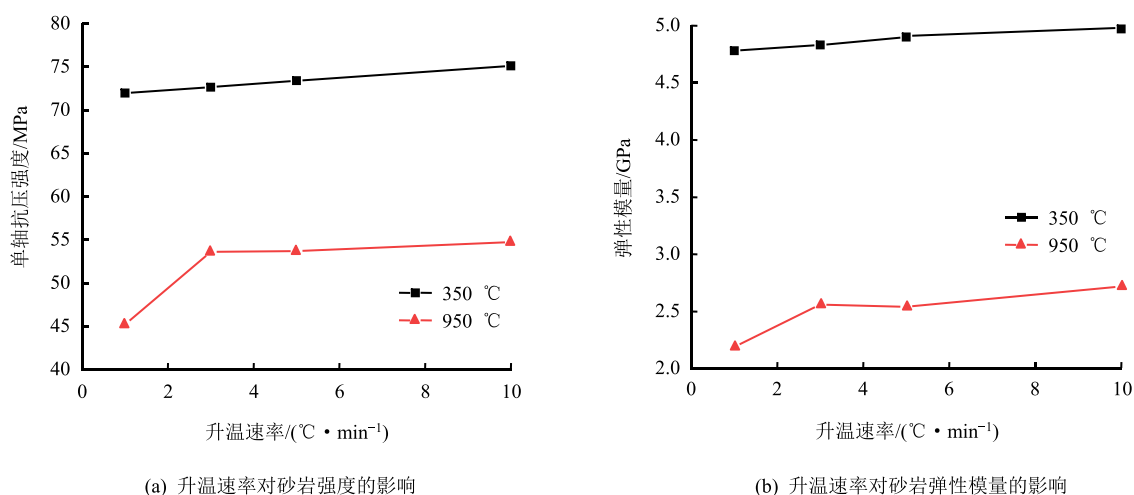


图 5 不同升温速率对砂岩强度和弹性模量的影响

Fig.5 Influence of different heating rates on strength and elastic modulus of sandstone

当砂岩试件目标温度达到 950 °C 时, 升温速率成为砂岩试件单轴抗压强度的显著影响因素。升温速率为 1 °C/min 时, 试件单轴抗压强度为 45.21 MPa。

在升温速率为 3、5、10 °C/min 时, 试件的单轴抗压强度分别为 53.60、53.69、54.74 MPa, 波动不超过 3%, 但相较于 1 °C/min 分别增加了 18.55%、

18.77%及 21.08%。这表明升温速率 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 对 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 砂岩试件单轴抗压强度的影响很大。这是由于低升温速率导致砂岩试件受高温作用的时间延长,砂岩内部产生的新生裂纹增多,砂岩的矿物结构劣化,进而导致抵抗破坏的能力显著下降。

图 5(b)为不同升温速率下砂岩试件弹性模量的变化趋势。随着升温速率的上升, $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 砂岩试件的弹性模量分别为 4.78、4.83、4.90、4.97 GPa。虽然试件的弹性模量有随着升温速率增加而上升的趋势,但增量并不明显。而 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 砂岩试件在升温速率为 1、3、5、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时,弹性模量分别为 2.49、2.86、2.84、3.02 GPa。其中升温速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的试件与其他升温速率组存在较大差异。

与单轴抗压强度的变化规律相似, $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 砂岩试件的弹性模量在升温速率为 3、5、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时变化不大,数值差异在 6%以内,试件在升温速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时的弹性模量最小。升温速率为 3、5、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时的弹性模量相较于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时分别增加了 15.24%、14.21%、21.40%。这表明升温速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时,砂岩试件内部的破裂程度更高,强度降低。

砂岩内部热应力的变化致使砂岩的强度和弹性模量下降。砂岩受到高温作用后,内部颗粒产生的热膨胀及颗粒连结处发生的热破裂使得砂岩产生不同程度的热损伤,为了进一步定量表征热损伤砂岩内部结构的劣化程度,引入了热损伤因子的概念^[22, 44]。对岩石热损伤因子的定义一般有基于纵波波速变化和基于弹性模量变化两种定义方法。基于纵波波速变化定义的热损伤因子具有较大的局限性,该方法忽略了高温引起的岩石密度和泊松比变化,有较大误差。故本文选择基于弹性模量变化定义热损伤因子的方法,对高温作用后砂岩试件进行热损伤分析,具体定义如下:

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (5)$$

式中: D 为损伤因子; E 为不同升温速率下砂岩的弹性模量; E_0 为常温下砂岩的弹性模量。

目标温度不同,热损伤因子对升温速率的敏感性也不同。在 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,砂岩的弹性模量相较于常温 ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$) 时的下降幅度较小,基本在 $-0.01\sim 0.03$ 左右,考虑到试件本身的差异性和试验的误差,可认为 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 砂岩的热损伤可忽略。而对 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的砂岩来说,随着升温速率的上升,热损伤因子出现了

明显的下降,存在较强的负相关关系。这表明在不同的升温速率下, $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 砂岩内部结构的受热状况以及热应力分布存在较大的差异,砂岩内部的结构破坏和损伤情况随升温速率逐渐降低,与砂岩强度和弹性模量的变化规律相符。

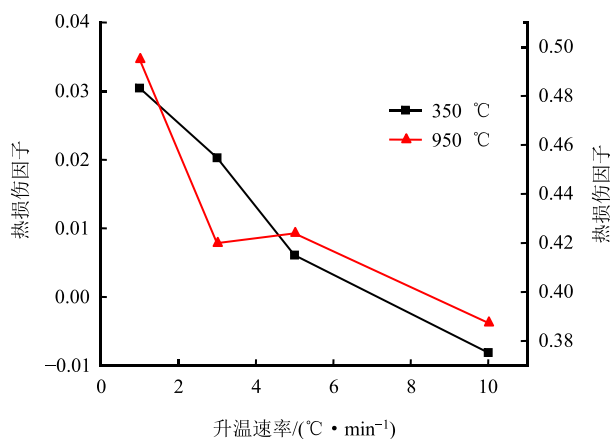


图 6 不同升温速率下砂岩热损伤因子变化

Fig.6 Changes of thermal damage factors of sandstone under different heating rates

4 砂岩细观破裂分析

4.1 声发射特性分析

岩石内部的破裂情况可以通过声波信号的形式表现出来。当岩石内部破坏产生的声波信号突破特定强度和频率阈值时,可以被声发射监测仪器探测到。每探测到一次声信号进行一次振铃计数,振铃计数越多,表明岩石内部破坏产生的声信号越多。图 7 为 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下不同升温速率处理后砂岩单轴压缩过程中声发射振铃数、振铃累计数与应力-应变关系。可以看出,声发射的振铃累计数与应力-应变曲线有良好的对应关系,并且在 4 种升温速率下,振铃计数和振铃累计数的变化趋势是相同的。

在砂岩试件的初始压实阶段,声发射信号很少,振铃计数和振铃累计数可忽略不计,微量的声发射信号来自于原生裂纹的闭合;进入弹性阶段时,声发射信号的振铃计数和振铃累计数开始增加,但此时试件并没有发生塑性变形,也无明显裂纹产生,故增加幅度很小;塑性变形阶段岩石发生了非稳定性破坏,大量新裂纹产生并不断扩展、贯通,表现出声发射振铃计数和振铃累计数迅速增加的趋势。声发射振铃计数峰值出现在峰值应力处。结合压力-应变曲线、振铃计数和振铃累计数来看,砂岩试件

经过不同的升温速率到达 350 °C 后, 岩石内部的破坏规律整体上存在很大的相似性。可认为在本次试

验中, 升温速率对 350 °C 砂岩的破坏规律无明显影响。

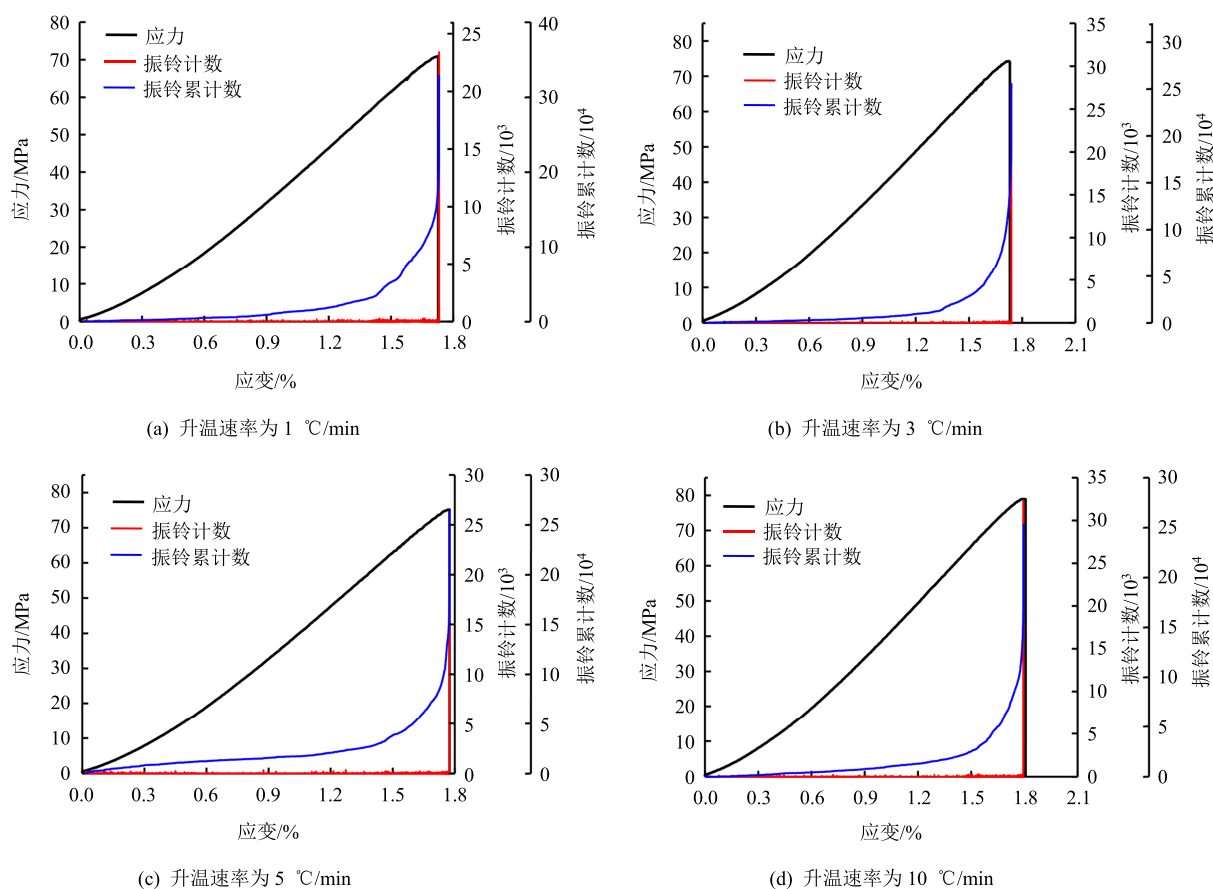


图 7 350 °C 下不同升温速率处理后砂岩声发射参数与轴向应变关系

Fig.7 Relationship between acoustic emission parameters and axial strain of sandstone under different heating rates at 350 °C

相较于不同升温速率下 350 °C 砂岩试件的声发射规律变化不明显的情况, 升温速率对 950 °C 试件的声发射事件的影响更为显著。图 8 为 950 °C 下不同升温速率处理后砂岩单轴压缩过程中声发射振铃数、振铃累计数与应力-应变的关系。由图可知, 随着升温速率的降低, 出现了振铃计数峰值增多并且峰值变大的情况。当升温速率为 1 °C/min 时, 砂岩突发性声发射活动区域最大; 升温速率在 3~10 °C/min 时, 突发性声发射活动区域较小。这表明砂岩经 950 °C 高温作用后, 升温速率是砂岩破坏的重要影响因素。突发性声发射信号的产生与材料中晶体的结构变形有关, 而砂岩试件中的晶体含量 (石英和钠长石) 在 93% 以上, 升温速率会对晶体的结构变化有较大影响, 升温速率越低, 晶体颗粒间的堆垛层错和机械孪晶现象越严重。升温速率变小的影响在微观上表现为砂岩内部结构的不断劣化和新生裂纹的逐渐出现, 以及内部晶体颗粒的膨胀、

变形、挤压等, 表现为声发射信号的峰值显著增多。

对比 350 °C 砂岩和 950 °C 砂岩的振铃累计数可得, 350 °C 的振铃累计数和 950 °C 的振铃累计数变化规律是相同的, 均为负相关关系。由图 9 可知, 当升温速率在 1~5 °C/min 之间时, 声发射振铃累计数随升温速率的增加呈线性减小; 当升温速率超过 5 °C/min 时, 声发射振铃累计数变化很小。不同之处在于升温速率对 950 °C 试件的振铃累计数影响更为显著。350 °C 试件在升温速率为 5 °C/min 和 10 °C/min 的振铃累计数相比升温速率为 1 °C/min 时分别下降了 19.67%、22.89%, 而 950 °C 试件在同等条件下振铃累计数分别下降了 35.60%、37.29%。这表明升温速率对 950 °C 砂岩热损伤的影响更加明显。总体而言, 升温速率对 350 °C 的砂岩试件影响较小, 声发射信号规律差别不大; 对 950 °C 砂岩的影响较大, 振铃计数和振铃累计数有明显不同。

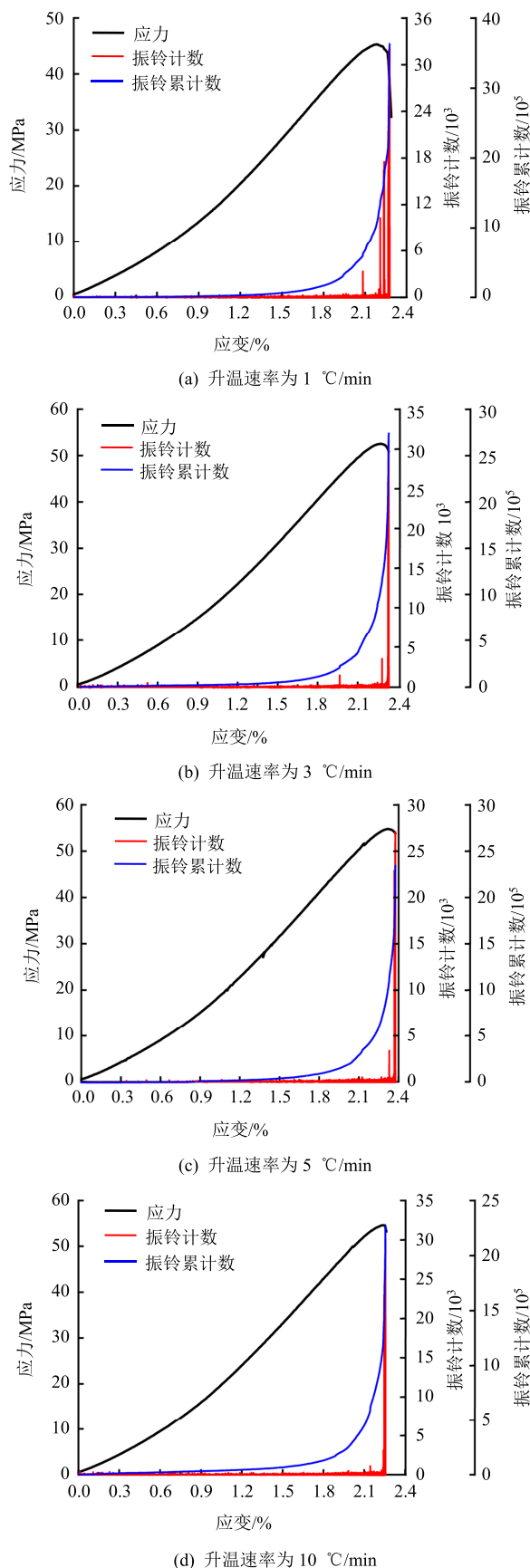


图 8 950 °C 下不同升温速率处理后砂岩声发射参数与轴向应变关系

Fig.8 Relationship between acoustic emission parameters and axial strain of sandstone under different heating rates at 950 °C

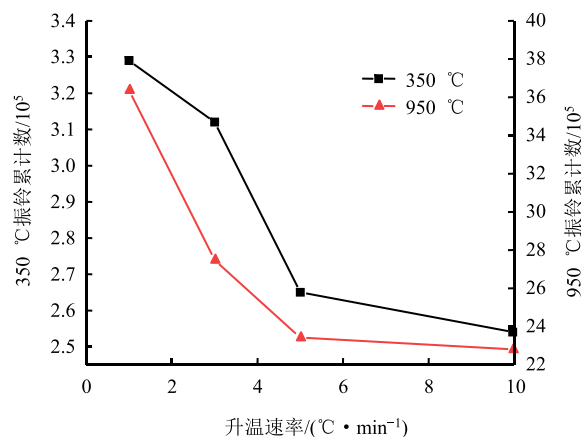


图 9 砂岩声发射振铃累计数与升温速率关系
Fig.9 Variation of ring-down accumulation counts for sandstone under different heating rates

4.2 扫描电镜分析

为进一步研究不同升温速率下砂岩热损伤的微观特征,选择砂岩破碎的中心区域样品进行电镜扫描,并对砂岩试件破碎情况进行定性定量分析。砂岩微观热损伤的主要研究对象是砂岩样品的孔隙和裂纹^[45-47]。为方便表述,本文将观测到的长度远大于宽度的孔缝统称为微裂纹(即微观裂纹),将长度与宽度接近的孔缝统称为微孔隙(即微观孔隙)。在对砂岩微观破碎情况进行定量分析时,对微孔隙和微裂纹不进行进一步分类,仅统计相对数量。砂岩微观破碎情况的统计数据如表 3 所示。

表 3 不同升温速率下砂岩微观破碎情况统计
Table 3 Statistics on microscopic fracture of sandstone under different heating rates

升温速率 (°C · min ⁻¹)	350 °C		950 °C	
	微裂纹	微孔隙	微裂纹	微孔隙
1	10	8	29	15
3	9	7	18	11
5	11	6	16	11
10	8	6	14	10

此外,采用基于定量体视学中的线分析法分析了微裂纹的密度^[48-49]。其基本原理是通过统计等间距平行测线与微裂纹的交点个数计算微裂纹密度,该方法避免了交叉裂纹对微裂纹计数的影响。交点个数越多,微裂纹密度越大。在实际操作过程中,若平行测线间距过大,则微裂纹统计精度就会偏低;若平行测线间距过小,会使得工作量增加且影响图像内容。因此,本文在对热损伤砂岩进行微裂纹密度统计时,选择原图像标尺的 1/2 作为平行测线间距,兼顾微裂纹统计的精度和图像的完整性。图 10 为测线布局图,平行线间距为 25 μm。图中, m 代

表测线条数, L 代表测线长度, P_n 代表测线与裂纹交点的个数。测线总长度为 $L_T = mL$, 则线密度 P_L 为

$$P_L = P_n / L_T \quad (6)$$

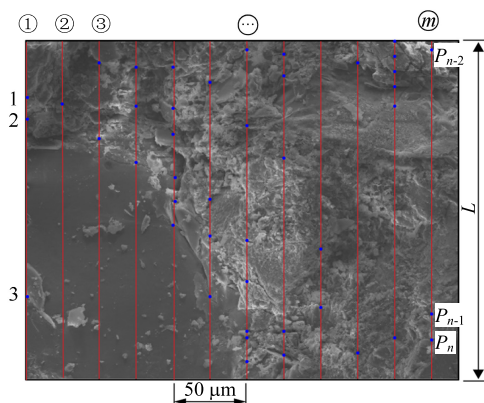


图 10 测线布局图

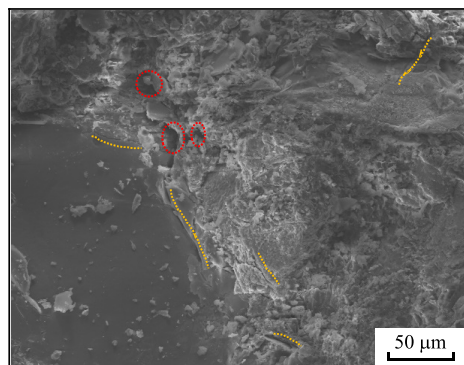
Fig.10 Measurement line layout

如表 3 中数据所示,在不同升温速率下,350 °C 高温作用后砂岩的微裂纹和微孔隙数基本相同。结合表 4 中微裂纹密度统计数据可知,砂岩内部微裂纹与平行测线的交点个数仅存在个位数差距,微裂纹密度集介于 $12.74 \sim 16.01 \text{ mm}^{-1}$ 之间,存在一定的差异性,但差距较小。在图 10 的观测尺度下,图像代表的实际尺寸为 $292 \mu\text{m} \times 229 \mu\text{m}$ 。从微孔隙个数来推算孔隙密度可得,不同升温速率下,砂岩微孔隙的密度介于 $89.73 \sim 119.64 \text{ mm}^{-2}$ 之间,微孔隙的密度亦无较大差距。图 11 是不同升温速率下 350 °C 砂岩扫描电镜图像,图中较为明显的微裂纹和微孔隙已标出。结合砂岩的微观形貌统计和电镜扫描图像可知,在不同的升温速率下,350 °C 砂岩样品的破碎情况和微裂纹表现基本相同。350 °C 高温作用后的砂岩样品具有如下特征:样品表面的大破裂情况较少,表面平整度较高,微裂纹及微孔隙的数量、大小、分布情况不具有差异性。

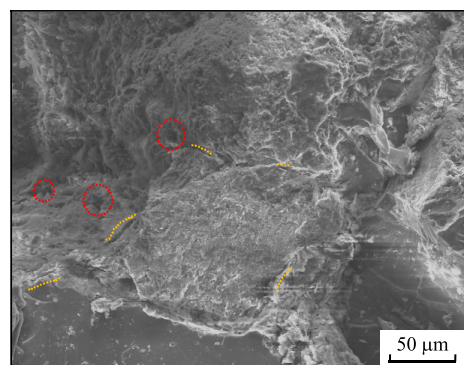
表 4 不同升温速率下砂岩微裂纹密度统计

Table 4 Density statistics of sandstone microcracks under different heating rates

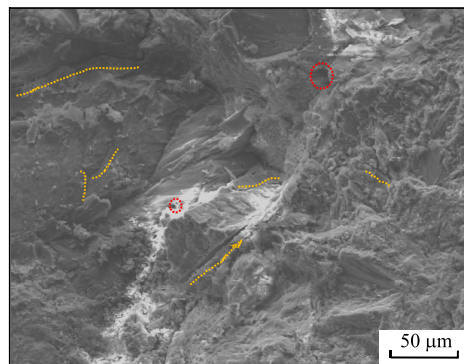
升温速率 (/°C · min ⁻¹)	350 °C		950 °C	
	交点数	裂纹密度 /mm ⁻¹	交点数	裂纹密度 /mm ⁻¹
1	44	16.01	96	34.93
3	37	13.46	68	24.74
5	39	14.19	54	19.65
10	35	12.74	52	18.92



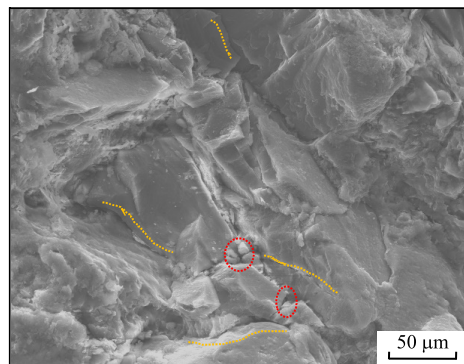
(a) 升温速率为 1 °C/min



(b) 升温速率为 3 °C/min



(c) 升温速率为 5 °C/min



(d) 升温速率为 10 °C/min

注: 代表微裂纹; 代表微孔隙。

图 11 不同升温速率下 350 °C 砂岩扫描电镜图像
Fig.11 SEM images of sandstone under different heating rates at 350 °C

由表 3 和表 4 中的破裂形貌统计可知, 950 °C 砂岩样品的细观形貌存在较大的差异。随着升温速率的提高, 样品表面的粗糙程度逐渐降低, 更加趋于平整, 样品表面的微裂纹、微孔隙的数量和密度在减小。其中升温速率在 3~10 °C 之间的微裂纹和微孔隙数量差距较小, 与升温速率为 1 °C/min 的差异明显。其中 1 °C/min 和 10 °C/min 的差别最大, 前者的微裂纹数为 29, 微孔隙数为 15 个, 而后者的微裂纹数和微孔隙数分别为 14 和 10。并且前者的微裂纹密度为 34.93 mm^{-1} , 而后者的微裂纹密度仅为 13.46 mm^{-1} , 存在 2 倍以上的数量差异。二者的微孔隙密度分别为 224.32 mm^{-2} 和 149.55 mm^{-2} , 约 1.5 倍的数量差距。从微孔隙的数量、微裂纹数量和密度来看, 升温速率为 1 °C/min 时, 950 °C 高温作用后的砂岩细观破坏最为严重。

升温速率对 350 °C 和 950 °C 砂岩的细观破坏不具有相同的规律。在 350 °C 高温作用后, 砂岩细

观性质受升温速率的影响较小, 这里主要讨论升温速率对 950 °C 砂岩的影响。如图 12 所示, 在 950 °C 高温作用后, 砂岩升温速率越低, 岩石内部的热损伤和热破裂就越严重, 并且在 1 °C/min 时破裂最严重。砂岩内部热损伤及破裂在数量上表现为微裂纹和微孔隙数量增多, 破坏形貌上则表现为微裂纹和微孔隙的面积/体积变大。升温速率对砂岩内部破裂的影响主要有以下 3 个方面: ①升温速率越低, 砂岩内部的结合水和结构水脱失就越严重, 砂岩内部的孔隙就会越多, 孔隙体积也会越大; ②随着升温速率的降低, 砂岩内部胶结物结构的劣化会越严重, 砂岩颗粒被分解为更小的颗粒, 破坏面更加粗糙; ③升温速率的降低影响砂岩内部晶体的形态和结构, 更长时间的高温作用使得石英和长石受到热膨胀的影响更大, 巨大的热应力引起裂缝的产生和扩展, 并且高温引起砂岩内部晶体产生相变和重结晶等变化, 进而引起砂岩微观结构的改变。

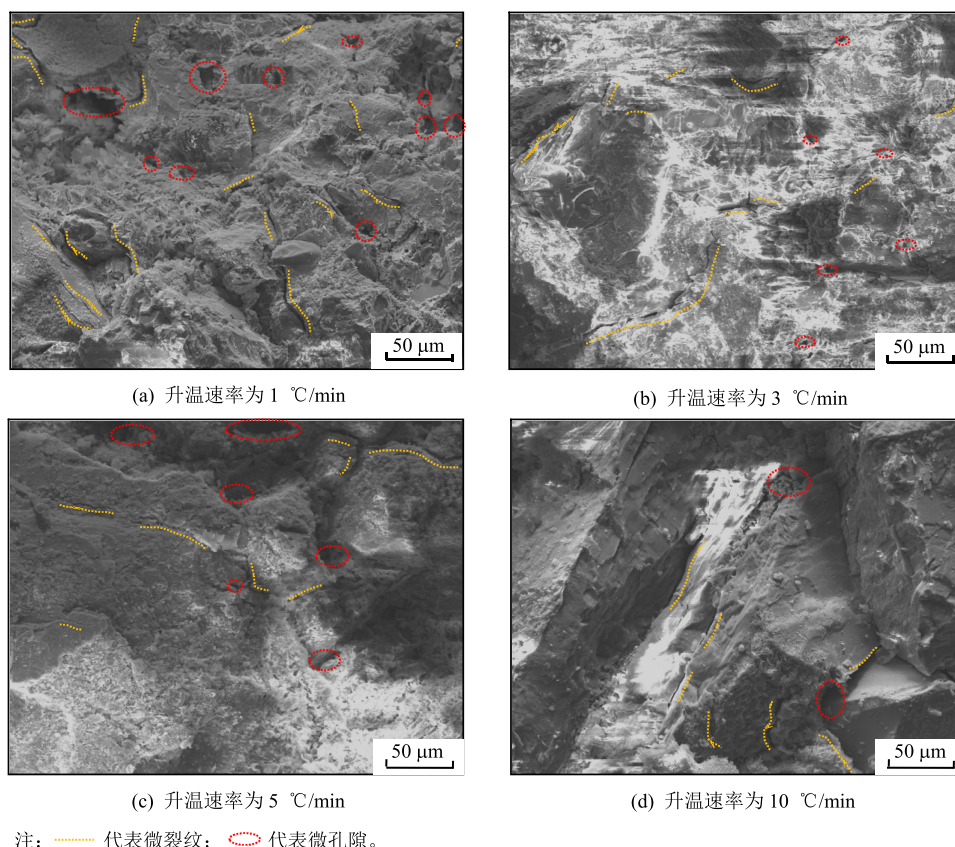


图 12 不同升温速率下 950 °C 砂岩扫描电镜图像

Fig.12 SEM images of sandstone under different heating rates at 950 °C

5 结 论

为了研究升温速率对高温砂岩宏细观性质的影响, 对目标温度分别为 350 °C 和 950 °C 的砂岩进行

了单轴压缩试验, 研究了不同升温速率下砂岩的物理性质、力学性质的变化。并通过声发射监测和扫描电镜观察的方法对砂岩内部破裂情况进行了分析, 主要的结论有以下几点:

(1) 总体而言, 350 °C 砂岩试件的物理性质、力学性质, 细观破碎过程和破裂形貌受到升温速率的影响较小。

(2) 不同升温速率下, 950 °C 砂岩的物理性质变化较大, 出现了体积增大, 质量、密度以及纵波波速显著下降的现象。

(3) 升温速率对 950 °C 砂岩试件力学性质有显著影响, 随着升温速率的不断降低, 力学性质不断劣化, 出现了应力-应变曲线向上偏移、砂岩的延性增强、强度以及弹性模量减小的现象。

(4) 950 °C 砂岩试件的内部破碎情况随升温速率的降低不断加强。升温速率越低, 声发射活动和振铃累计数也越多, 突发性声信号区域增多。这表明升温速率越低, 砂岩内部破坏越严重, 破坏阶段越多。

(5) 950 °C 砂岩试件的微观形貌变化和结构劣化受升温速率的影响较大。升温速率降低, 砂岩破坏面的粗糙程度越高, 出现了微孔隙数量增多、微裂纹数量增多和密度变大的情况。

参 考 文 献

- [1] 蓝航, 陈东科, 毛德兵. 我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 39-46.
LAN Hang, CHEN Dong-ke, MAO De-bing. Current status of deep mining and disaster prevention in China[J]. **Coal Science and Technology**, 2016, 44(1): 39-46.
- [2] 齐庆新, 潘一山, 李海涛, 等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害防控理论基础与关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1567-1584.
QI Qing-xin, PAN Yi-shan, LI Hai-tao, et al. Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining[J]. **Journal of China Coal Society**, 2020, 45(5): 1567-1584.
- [3] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
XIE He-ping. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory[J]. **Journal of China Coal Society**, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [4] 刘淑琴, 畅志兵, 刘金昌. 深部煤炭原位气化开采关键技术及发展前景[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(3): 261-270.
LIU Shu-qin, CHANG Zhi-bing, LIU Jin-chang. Key technologies and prospect for in-situ gasification mining of deep coal resources[J]. **Journal of Mining Science and Technology**, 2021, 6(3): 261-270.
- [5] 周祥运, 孙德安, 罗汀. 核废料处置库近场温度半解析研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊 1): 246-254.
ZHOU Xiang-yun, SUN De-an, LUO Ting. Semi-analytical solution of near-field temperature in nuclear waste disposal repository[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(Suppl. 1): 246-254.
- [6] 蔡燕燕, 罗承浩, 俞缙, 等. 热损伤花岗岩三轴卸围压力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1173-1180.
CAI Yan-yan, LUO Cheng-hao, YU Jin, et al. Experimental study on mechanical properties of thermal-damage granite rock under triaxial unloading confining pressure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(7): 1173-1180.
- [7] 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.
LIANG Yong-qing. Research on mechanical properties of sandstone under high temperature effect[J]. **Coal Technology**, 2016, 35(3): 76-78.
- [8] ZHAN Jin-yuan, SHEN Yan-jun, YANG Geng-she, et al. Inconsistency of changes in uniaxial compressive strength and P-wave velocity of sandstone after temperature treatments[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2021, 13(1): 143-153.
- [9] 金爱兵, 王树亮, 魏余栋, 等. 不同冷却条件对高温砂岩物理力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3531-3539.
JIN Ai-bing, WANG Shu-liang, WEI Yu-dong, et al. Effect of different cooling conditions on physical and mechanical properties of high-temperature sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(11): 3531-3539.
- [10] 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.
- [11] 孙文进, 金爱兵, 王树亮, 等. 基于 DIC 的高温砂岩劈裂力学特性研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 511-518.
SUN Wen-jin, JIN Ai-bing, WANG Shu-liang, et al. Study on sandstone split mechanical properties under high temperature based on the DIC technology[J]. **Rock**

- and Soil Mechanics**, 2021, 42(2): 511-518.
- [12] 夏小和, 陆雅萍, 黄醒春, 等. 高温后大理岩在不同应力水平下超声波特性的实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(7): 1225-1228.
- XIA Xiao-he, LU Ya-ping, HUANG Xing-chun, et al. Experimental research on ultrasonic characteristic of marble under the action of high temperature[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2004, 38(7): 1225-1228.
- [13] 张连英, 茅献彪, 李天珍. 高温环境下大理岩热损伤特性的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 505-511.
- ZHANG Lian-ying, MAO Xian-biao, LI Tian-zhen. Experimental research on thermal damage properties of marble at high temperature[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2010, 27(4): 505-511.
- [14] 支乐鹏, 许金余, 刘志群, 等. 高温后花岗岩巴西劈裂抗拉实验及超声特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 1): 61-66.
- ZHI Le-peng, XU Jin-yu, LIU Zhi-qun, et al. Research on ultrasonic characteristics and Brazilian splitting-tensile test of granite under post-high temperature[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(Suppl. 1): 61-66.
- [15] 邱一平, 林卓英. 花岗岩样品高温后损伤的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 1005-1010.
- QIU Yi-ping, LIN Zhuo-ying. Testing study on damage of granite samples after high temperature[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(6): 1005-1010.
- [16] 陈腾飞, 许金余, 刘石, 等. 经历不同高温后砂岩的动态力学特性实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(2): 195-201.
- CHEN Teng-fei, XU Jin-yu, LIU Shi, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of post-high-temperature sandstone[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2014, 34(2): 195-201.
- [17] 方新宇, 许金余, 刘石, 等. 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, 2016, 35(增刊 1): 2687-2694.
- FANG Xin-yu, XU Jin-yu, LIU Shi, et al. Research on splitting-tensile tests and thermal damage of granite under post-high temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Suppl. 1): 2687-2694.
- [18] 高经纬, 席岩, 范立峰, 等. 热损伤花岗岩内细观裂隙分布非均匀性的研究[J]. 实验力学, 2021, 36(3): 350-358.
- GAO Jing-wei, XI Yan, FAN Li-feng, et al. Investigation on heterogeneity of microcracks distribution in thermally damaged granite[J]. **Journal of Experimental Mechanics**, 2021, 36(3): 350-358.
- [19] 吴阳春, 邵保平, 王磊, 等. 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), 2020, 51(1): 193-203.
- WU Yang-chun, XI Bao-ping, WANG Lei, et al. Experimental study on physico-mechanical properties of granite after high temperature[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2020, 51(1): 193-203.
- [20] 张宇皓, 段志波, 张帆. 高温水冷后花岗岩微观孔径及渗透性分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(1): 297-302.
- ZHANG Yu-hao, DUAN Zhi-bo, ZHANG Fan. Analysis of micro-pore structure and permeability of granite after heating and water quenching[J]. **Science Technology and Engineering**, 2021, 21(1): 297-302.
- [21] 孙中光, 姜德义, 谢凯楠, 等. 基于低场磁共振的北山花岗岩热损伤研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 1081-1088.
- SUN Zhong-guang, JIANG De-yi, XIE Kai-nan, et al. Thermal damage study of Beishan granite based on low field magnetic resonance[J]. **Journal of China Coal Society**, 2020, 45(3): 1081-1088.
- [22] 王鹏, 许金余, 刘石, 等. 砂岩的高温损伤与模量分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 211-216.
- WANG Peng, XU Jin-yu, LIU Shi, et al. Analysis of high temperature damage and modulus of sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Suppl. 2): 211-216.
- [23] 许崇帮, 周荷生. 高温后粗砂岩三轴抗压强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 2811-2818.
- XU Chong-bang, ZHOU He-sheng. Test investigation of triaxial compressive strength of coarse sandstone after high temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Suppl. 1): 2811-2818.
- [24] 尹光志, 李小双, 赵洪宝. 高温后粗砂岩常规三轴压缩条件下力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 598-604.
- YIN Guang-zhi, LI Xiao-shuang, ZHAO Hong-bao. Experimental investigation on mechanical properties of coarse sandstone after high temperature under

- conventional triaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(3): 598-604.
- [25] 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 Qing-sen, YANG Sheng-qi, CHEN Guo-fei. Strength and deformation properties of post-high-temperature joint sandstone[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(4): 651-657.
- [26] 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.
GU Chao, XU Jin-yu, MENG Bo-xu, 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.
- [27] 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 Cheng-dong, WEI Si-jiang, QIN Ben-dong, 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.
- [28] 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 Cheng-dong, WEI Si-jiang, QIN Ben-dong, 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.
- [29] 翟松韬, 吴刚, 孙红, 等. 高温下大理岩的声发射特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 177-183.
ZHAI Song-tao, WU Gang, SUN Hong, et al. Acoustic emission characteristics of thermal cracking of marble under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Suppl. 2): 177-183.
- [30] 吴刚, 赵震洋. 不同应力状态下岩石类材料破坏的声发射特性[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 82-85.
WU Gang, ZHAO Zhen-yang. Acoustic emission character of rock materials failure during various stress states[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(2): 82-85.
- [31] 郭清露, 荣冠, 姚孟迪, 等. 大理岩热损伤声发射力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(12): 2388-2400.
GUO Qing-lu, RONG Guan, YAO Meng-di, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics and mechanical behaviours of thermally damaged marble[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(12): 2388-2400.
- [32] 张玉良, 吴必胜, 赵高峰. 基于声发射监测的岩石热损伤实时演化研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2945-2958.
ZHANG Yu-liang, WU Bi-sheng, ZHAO Gao-feng. Study on thermal damage evolution of rock based on acoustic emission[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2021, 52(8): 2945-2958.
- [33] 王德咏, 吴刚, 葛修润. 高温作用后石灰岩受压破裂过程的声发射试验研究[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(5): 743-748.
WANG De-yong, WU Gang, GE Xiu-run. Acoustic emission characteristics of limestone during compression and fracture after high temperature[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2011, 45(5): 743-748.
- [34] 武晋文, 赵阳升, 万志军, 等. 高温均匀压力花岗岩热破裂声发射特性实验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(7): 1111-1117.
WU Jin-wen, ZHAO Yang-sheng, WAN Zhi-jun, et al. Experimental study of acoustic emission of granite due to thermal cracking under high temperature and isostatic stress[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(7): 1111-1117.
- [35] 吴刚, 王德咏, 翟松韬. 单轴压缩下高温后砂岩的声发射特征[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3237-3242.
WU Gang, WANG De-yong, ZHAI Song-tao. Acoustic emission characteristics of sandstone after high temperature under uniaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(11): 3237-3242.
- [36] 张斌, 孔彪, 苏成林, 等. 高温后砂岩受载破坏声发射时频特性实验研究[J]. 煤炭技术, 2019, 38(10): 37-41.
ZHANG Bin, KONG Biao, SU Cheng-lin, et al. Experimental study of acoustic emission during destruction of sandstone after high temperature[J]. **Coal Technology**, 2019, 38(10): 37-41.
- [37] 朱明政. 卸荷条件下煤岩变形破坏机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
ZHU Ming-zheng. Research on deformation and failure

- mechanism of coal and rock under unloading conditions[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [38] 陈伟强, 靖洪文, 高远, 等. 高温后混凝土损伤评估的声发射试验研究[J]. 混凝土, 2020(3): 54-58.
CHEN Wei-qiang, JING Hong-wen, GAO Yuan, et al. AE test study on damage evaluation of concrete after high temperature treatment[J]. **Concrete**, 2020(3): 54-58.
- [39] 吴刚, 翟松韬, 孙红, 等. 高温下盐岩的声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1203-1211.
WU Gang, ZHAI Song-tao, SUN Hong, et al. Experimental study of acoustic emission of salt rock under high temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(6): 1203-1211.
- [40] 姜德义, 张水林, 范金洋, 等. 砂岩多步压剪的声发射特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(4): 1001-1007.
JIANG De-yi, ZHANG Shui-lin, FAN Jin-yang, et al. Study on acoustic emission characteristics of sandstone under multi-step compression and shear tests[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2019, 15(4): 1001-1007.
- [41] 姜德义, 张水林, 陈结, 等. 砂岩循环冻融损伤的低场核磁共振与声发射概率密度研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 436-444.
JIANG De-yi, ZHANG Shui-lin, CHEN Jie, et al. Low field NMR and acoustic emission probability density study of freezing and thawing cycles damage for sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(2): 436-444.
- [42] 刘汉龙, 金林森, 姜德义, 等. 煤与砂岩复合岩声发射统计效应的试验与最大似然理论[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1544-1551.
LIU Han-long, JIN Lin-sen, JIANG De-yi, et al. Experimental and maximum likelihood theory on acoustic emission statistic effect of coal-sandstone composite rock[J]. **Journal of China Coal Society**, 2019, 44(5): 1544-1551.
- [43] 张毅, 李皋, 王希勇, 等. 川西须家河组致密砂岩高温后微组构特征及对力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2249-2259.
ZHANG Yi, LI Gao, WANG Xi-yong, et al. Microfabric characteristics of tight sandstone of Xujiache formation in western Sichuan after high temperature and the effect on mechanical properties[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(11): 2249-2259.
- [44] 刘泉声, 许锡昌. 温度作用下脆性岩石的损伤分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 408-411.
LIU Quan-sheng, XU Xi-chang. Damage analysis of brittle rock under temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(4): 408-411.
- [45] 郎颖娴, 梁正召, 段东, 等. 基于 CT 试验的岩石细观孔隙模型重构与并行模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1204-1212.
LANG Ying-xian, LIANG Zheng-zhao, DUAN Dong, et al. Three-dimensional parallel numerical simulation of porous rocks based on CT technology and digital image processing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(3): 1204-1212.
- [46] 陈益峰, 李典庆, 荣冠, 等. 脆性岩石损伤与热传导特性的细观力学模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 1959-1969.
CHEN Yi-feng, LI Dian-qing, RONG Guan, et al. A micromechanical model for damage and thermal conductivity of brittle rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(10): 1959-1969.
- [47] 袁小平, 刘红岩, 王志乔. 考虑微裂纹相互作用的岩石细观力学弹塑性损伤模型研究[J]. 固体力学学报, 2012, 33(6): 592-602.
YUAN Xiao-ping, LIU Hong-yan, WANG Zhi-qiao. An interacting crack-mechanics based model for elastoplastic damage model of brittle materials under compression[J]. **Chinese Journal of Solid Mechanics**, 2012, 33(6): 592-602.
- [48] 王金涛. 热处理后北山花岗岩细观疲劳破坏行为研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020.
WANG Jin-tao. Research on the meso-fatigue failure behaviors of thermally treated Beishan granite[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2020.
- [49] UNDERWOOD E E. Stereology, or the quantitative evaluation of microstructures[J]. **Journal of Microscopy**, 1969, 89(2): 161-180.