

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.206>



实时高温作用下砂岩的热损伤与能量特征

廖安杰¹, 张岩^{2,3*}, 王飞^{2,3}, 马煜¹

1. 成都理工大学工程技术学院, 四川乐山 614000

2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川成都 610059

3. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都 610059

摘要: 岩石实时高温下的损伤破坏及能量演化特征是深部地质工程的热点与难点问题。利用 MTS815 型程控伺服刚性试验机和 PCI-II 声发射仪对砂岩开展实时高温作用下的三轴压缩试验, 基于试验结果并引入能耗演化规律, 分析探讨高温作用下砂岩的力学特性与能量特征。结果表明: (1) 温度 120~150 °C 之间存在温度阈值, 导致砂岩内部出现热损伤, 其峰值强度大幅度降低, 宏观破裂形式由剪切破坏过渡到张拉破坏; (2) 温度 25~120 °C 之间, 砂岩累计 AE 能量、储存和释放能量随着温度升高而增大, 而温度 150 °C 时, 砂岩内部开始产生热损伤, 声发射累计 AE 能量、储能能力和能量释放能力大幅度减弱; (3) 随着温度的升高, 砂岩脆性指标 BE 不断减小, 温度 120~150 °C 之间, 砂岩 BE 值从 0.5 大幅度减小到 0.26, 表现出明显的塑性破坏特征。系统地分析了温度作用对砂岩的力学性质、破坏模式、声发射活动、应变能演化过程及脆性状态的影响规律, 发现存在明显的温度阈值使砂岩的各类行为在阈值前后产生较为明显的转变。

关键词: 实时高温; 热损伤; 声发射; 应变能; 脆性; 地质工程。

中图分类号: TV223.1

文章编号: 1000-2383(2025)01-286-13

收稿日期: 2023-08-19

Thermal Damage and Energy Characteristics of Sandstone under Real-Time High Temperatures

Liao Anjie¹, Zhang Yan^{2,3*}, Wang Fei^{2,3}, Ma Yu¹

1. The Engineering & Technical College of Chengdu University of Technology, Leshan 614000, China

2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The damage and energy evolution characteristics of rocks under real-time high temperature are hot and difficult issues in deep geological engineering. MTS815 program-controlled servo rigid testing machine and PCI-II acoustic emission instrument were used for triaxial compression tests of sandstone under real-time high temperatures in this study, and the mechanical and energy characteristics of sandstone under high temperature were analyzed and discussed based on the test results and introducing the law of energy consumption evolution. The results show that: (1) There is a temperature threshold between 120 °C and 150 °C, which leads to thermal damage inside sandstone, and its peak strength is greatly reduced, and the macroscopic failure

基金项目: 四川省乐山市科技局重点研究项目(No. 21GZD019); 国家自然科学基金项目(No. 42107211); 四川省自然科学基金项目(No. 2025ZNSFSC0097); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主课题(No. SKLGP2022Z008)。

作者简介: 廖安杰(1989—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事地质工程及地质灾害防治研究。ORCID: 0009-0009-6556-3967. E-mail: 307079800@qq.com.

* **通讯作者:** 张岩, ORCID: 0000-0002-4791-7081. E-mail: zhangyan2020@cdut.edu.cn

引用格式: 廖安杰, 张岩, 王飞, 马煜, 2025. 实时高温作用下砂岩的热损伤与能量特征. 地球科学, 50(1): 286—298.

Citation: Liao Anjie, Zhang Yan, Wang Fei, Ma Yu, 2025. Thermal Damage and Energy Characteristics of Sandstone under Real-Time High Temperatures. *Earth Science*, 50(1): 286—298.

form is transformed from shear failure to tensile failure. (2) When the temperature is between 20 °C and 120 °C, the accumulated AE energy, stored energy and released energy of sandstone increase with the increase of temperature; and when the temperature is 150 °C, thermal damage occurs inside sandstone. Ac cumulative AE energy, energy storage capacity and energy release capacity were significantly reduced. (3) The brittleness index of rock *BE* decreases with the increase of temperature. At the temperature of 120–150 °C, the sandstone *BE* value decreases greatly from about 0.5 to 0.26, showing obvious plastic characteristics. The influence of temperature on the mechanical properties, failure mode, acoustic emission activity, strain energy evolution process and brittle state of sandstone is systematically analyzed. It is found that there is an obvious temperature threshold, which changes all kinds of behaviors of sandstone obviously before and after the threshold.

Key words: real-time high temperature; thermal damage; acoustic emission; strain energy; brittleness; geological engineering.

0 引言

岩土体所处的复杂地质环境使得其在不同因素耦合下的力学行为与工程地质特性各不相同,从而对工程的稳定性与安全产生重要影响(Hajiabdolmajid and Kaiser, 2003; 唐辉明等, 2007; 邓华锋等, 2014; 王新刚等, 2016; Zhang *et al.*, 2018; 汤明高等, 2022; 刘新锋等, 2022; 李长冬等, 2023). 中国西南部地区, 长大隧道多, 埋深大, 岩体常处于一定的高温环境中, 如: 新疆的布仑口-公格尔水电站引水隧洞总长 17.4 km, 掌子面最高环境温度 67 °C、钻孔内最高温度达 82 °C; 雅鲁藏布江上的墨脱水电站修建的 40 km 引水隧道, 围岩地温将达到 90 °C 以上; 大理-瑞丽铁路高黎贡山隧道, 围岩最高温度达 106 °C. 高温隧道不仅会对施工人员造成影响和危害, 同时也会对岩体内部产生热应力, 使岩石物理力学性质发生较大变化, 影响围岩的稳定性, 甚至还会促进片帮、岩爆等灾害的发生, 对隧道及地下工程的设计、施工安全造成巨大的挑战(Zunino *et al.*, 2015; Gautam *et al.*, 2016; Bai *et al.*, 2017; Kumari *et al.*, 2017; 李波波等, 2017; Zhang *et al.*, 2019; Qin *et al.*, 2020; 蒙伟等, 2022).

因此, 不少学者对此进行了大量研究, 取得了丰硕成果, 张连英等(2007)、左建平等(2008)、苏承东等(2008)、尹光志等(2009)、Yang *et al.* (2017) 在高温作用后对砂岩开展单轴压缩试验, 分析砂岩的力学性质随温度的变化关系; 万志军等(2008)开展高温三轴压缩试验, 分析花岗岩的变形破坏与力学性质随温度的变化规律; 孟陆波等(2012)在实时高温作用下对页岩进行三轴压缩试验, 分析页岩变形破坏与温度的关系; 吴刚等(2012)、李庆森等(2014)对高温作用后的砂岩开展声发射试验, 分析温度作用下砂岩的力学性质和声发射特性; 张航等(2014)在常温~130 °C 范围

内对花岗岩进行声发射测试, 分析花岗岩破坏过程中能量参数随温度的变化规律; 陈海清和孟陆波(2019)在常温~800 °C 作用后对灰岩进行声发射试验, 分析了灰岩的力学特性及声发射特征的高温后效应. 可见, 温度对岩石力学与工程特性的影响是十分重要的, 也是目前研究的热点和难点.

上述试验和研究工作都表明, 温度变化对岩石的力学性质及能量特征有重要影响, 但在实时高温作用下, 基于能耗演化规律和声发射测试研究岩石的温度效应目前仍然相对较少. 因此, 本文以砂岩为研究对象, 开展高温三轴压缩试验, 研究砂岩力学特性在高温作用下的变化规律, 并在试验过程中同步进行声发射测试, 从声发射特征和能耗演化规律分析不同温度作用下砂岩的能量特征, 以期在在高温环境岩体中从事工程活动提供一定的理论依据.

1 试验方法

试样采用砖红色砂岩, 主要由石英、斜长石、方解石及伊利石等矿物组成, 根据《水利水电工程岩石试验规程》(SL264-2001), 试件形状为圆柱体, 直径约为 50 mm, 高度约为 100 mm, 试件完整且没有明显裂纹等缺陷.

力学试验和声发射试验系统是由加载系统、AE 监测系统组成, 试验设备见图 1, 加载系统采用美国生产的 MTS815 型程控伺服刚性试验机, 声发射试验系统采用美国声学物理公司研制的 PCI-II 声发射仪, 采样频率为 5 MHz, 门槛值为 55 dB.

试验温度设置为 25 °C、60 °C、90 °C、120 °C 和 150 °C, 岩石加温速率为 2 °C/min. 为了避免加温后砂岩试样内外产生较大温差, 按照试验方案对试样加热到相应温度后再恒温 4 h, 采用应力控制方式施加至预定围压值后始终保持不变. 试验围压设置

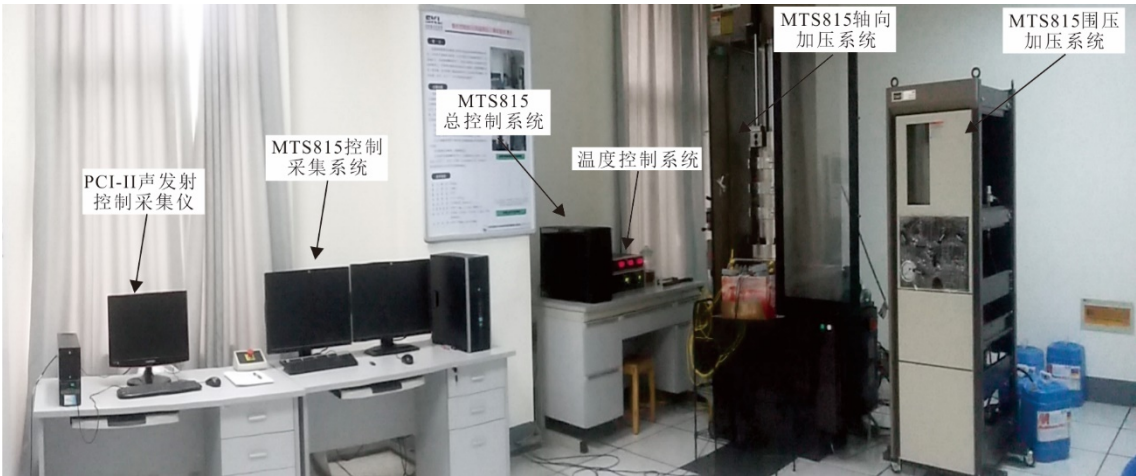


图1 MTS815型岩石力学试验系统
Fig.1 Rock mechanics testing system of MTS815

为 30 MPa,再施加轴向应力,加载速率为 0.5 kN/min,当轴向力达到 1 kN 时采用位移控制方式,加载速率为 0.1 mm/min,直至试件破坏,声发射检测与力学试验同步进行.

2 试验结果分析

在不同温度作用下,对砂岩进行了三轴压缩试验,其结果见表 1.

2.1 应力-应变曲线

高温三轴压缩下砂岩试样的应力-应变曲线如图 2 所示.由图 2 可知,不同温度下,砂岩试样应力-应变曲线基本相似,在加荷初期,岩石内部存在的大量微裂隙逐渐闭合;在弹性阶段,应力-应变曲线为线性关系;进入微裂纹扩展阶段,随着轴向应力的增大,岩石内部强度较低的微元体开始逐渐破坏,形成大量新的裂纹,随后微裂纹迅速扩展演化至贯通,形成宏观破坏面,岩石出现塑性变形;达到峰值应力后,应力-应

变曲线下降,应力瞬间跌落;温度 25~120 ℃,砂岩破坏后应力-应变曲线保持一定的残余强度,而温度 150 ℃环境下,岩样的残余强度接近于 0.

2.2 变形参数

岩石的弹性模量 E 和泊松比 μ 被用来反映岩石的变性特征.不同温度作用下砂岩的弹性模量和泊松比随温度的变化分别如图 3 和图 4 所示.由图 3 可知,温度 25~120 ℃,砂岩的弹性模量随温度的升高而增大,由 25 ℃的 30.01 GPa 增大到 31.14 Pa,增幅达到了 3.77%;120~150 ℃范围,砂岩的弹性模量随温度的升高而减小,150 ℃时弹性模量为 28.20 GPa,降幅达到了 9.44%,表明砂岩的弹性模量随着温度升高先增大后减小.此外,从图 4 中可以发现砂岩的泊松比随温度的升高呈现增加的演化趋势.

2.3 峰值强度

不同温度作用下砂岩的峰值强度与温度的关系如图 5 所示.温度 25 ℃、60 ℃、90 ℃、120 ℃、150 ℃时,砂岩的峰值强度分别为 246.41 MPa、248.33 MPa、251.98 MPa、254.07 MPa、112.29 MPa,峰值强度相较于温度 25 ℃时的变化分别为 0.78%、2.24%、3.17%、—51.76%.温度 25~120 ℃,砂岩的峰值强度随温度的变化不大,略有增长;温度超过 120 ℃,砂岩的峰值强度大幅度降低.综上所述,砂岩的峰值强度随温度的升高,先缓慢增长后急剧减小,峰值强度在温度 120 ℃时取得最大、150 ℃时取得最小.

2.4 破坏模式

不同温度作用下砂岩试样破坏形态如图 6 所示.由图 6 可知,温度 25~120 ℃范围内,砂岩的宏观

表 1 不同温度作用下砂岩试验结果
Table 1 Test results of sandstone under different temperatures

温度(℃)	弹性模量 (GPa)	泊松比	峰值强度 (MPa)
25	30.01	0.241	246.41
60	30.13	0.266	248.33
90	30.85	0.272	251.98
120	31.14	0.276	254.07
150	28.20	0.289	112.29

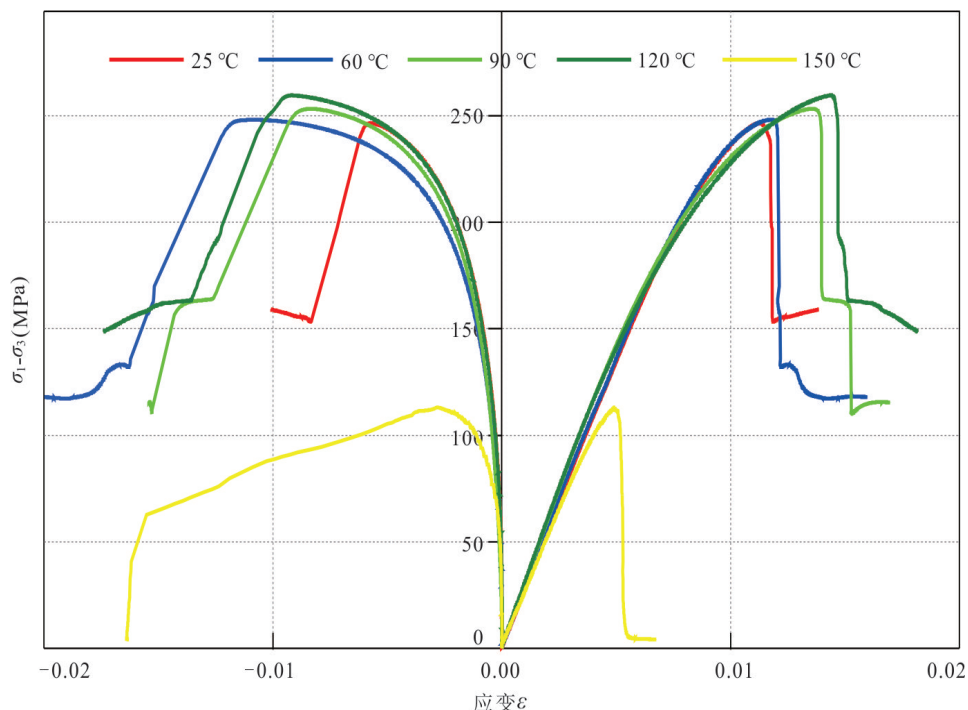
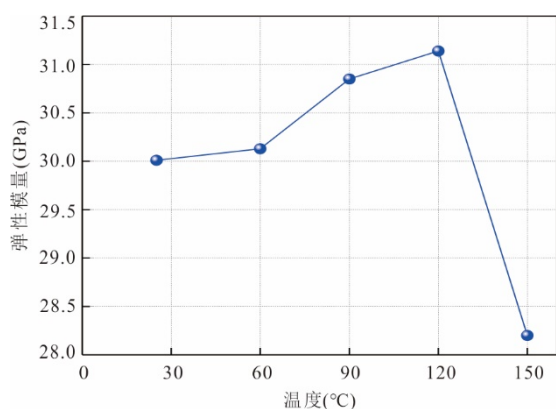
图 2 不同温度作用下砂岩 σ - ε 曲线Fig.2 The σ - ε curves of sandstone under different temperatures

图 3 弹性模量与温度的关系

Fig.3 Relationship between elastic modulus and temperature

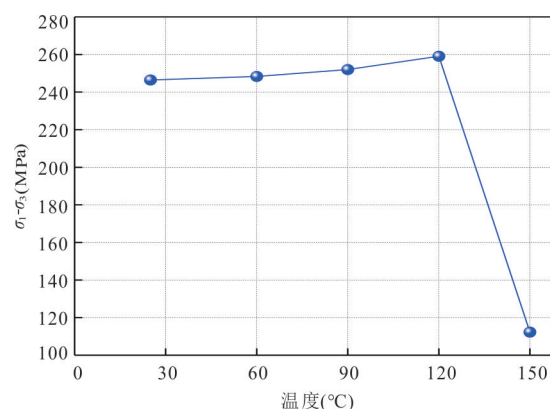


图 5 峰值强度与温度关系

Fig.5 Relationship between peak stress and temperature

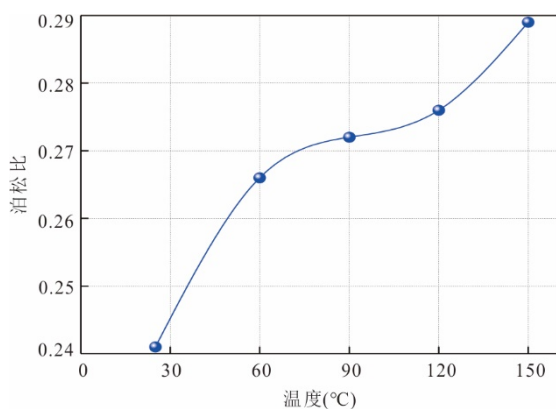


图 4 泊松比与温度的关系

Fig.4 Relationship between Poisson's ratio and temperature

破裂形式为剪切破坏,剪切面为单一且贯穿整个试样的平整破裂面;而温度 150 °C 时,试样外形出现鼓胀现象,岩石破坏加剧,破裂面数量增多,试样中上部位出现张拉破裂面,中下部位出现剪切破坏面,导致试样的宏观破裂形式为张剪破坏.表明随着温度的升高,该砂岩的破坏模式由剪切破坏过渡到张拉破坏.

2.5 声发射特征

声发射试验能直观反映岩石内部损伤以及变形破坏的演化过程(王珍珍等,2022).其中 AE 能量是声发射的重要参数,能量的大小则反映了声发射

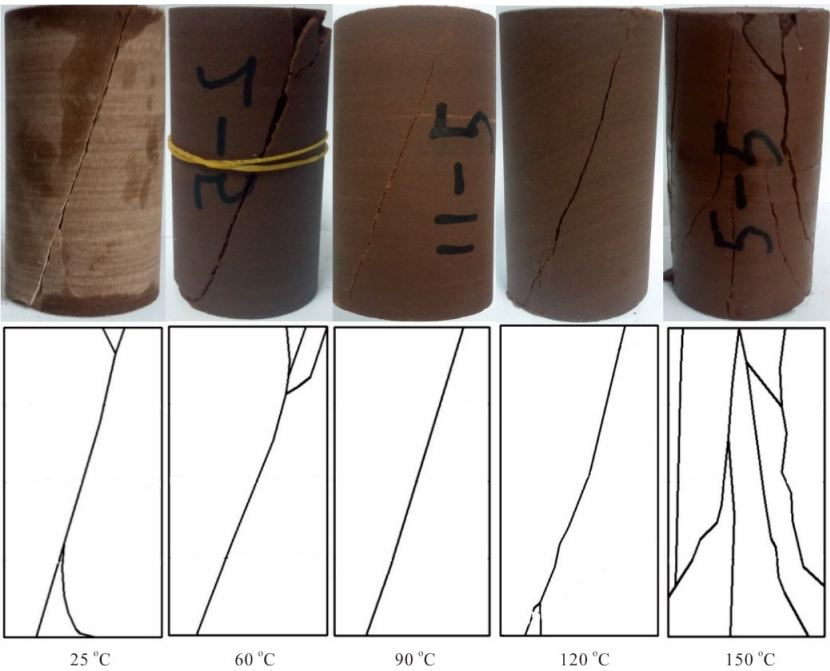


图 6 不同温度作用下试样破坏形态

Fig.6 Failure patterns of specimens under different temperatures

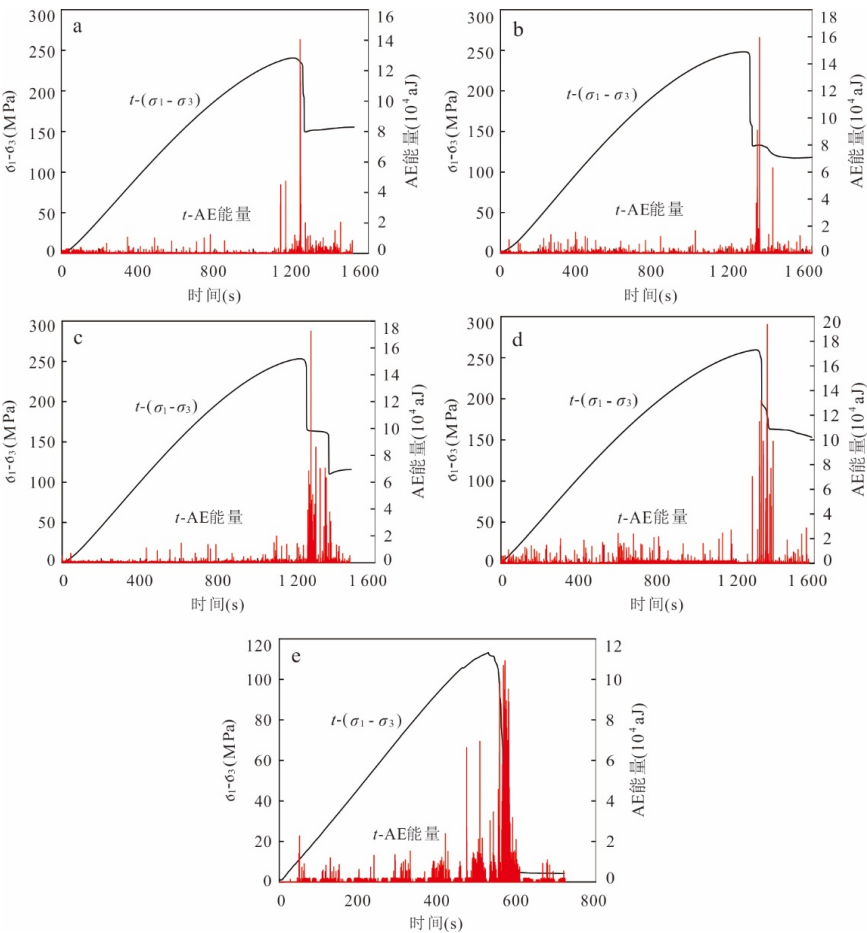


图 7 不同温度作用下砂岩应力、AE 能量与时间的关系

Fig.7 The curves of stress and AE energy with time for sandstone under different temperatures

a. 25 °C; b. 60 °C; c. 90 °C; d. 120 °C; e. 150 °C

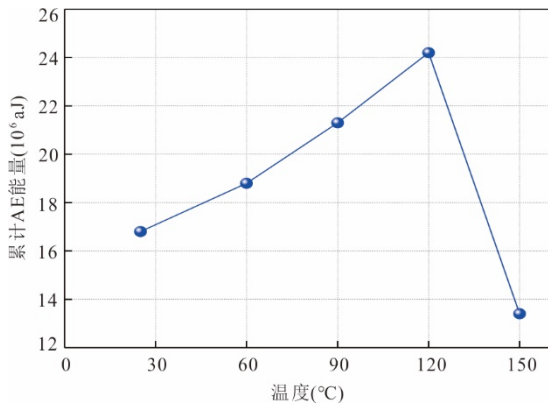


图8 累计AE能量与温度关系

Fig.8 Relationship between accumulative energy and temperature

事件的强弱.不同温度作用下砂岩应力和AE能量与时间的关系曲线如图7所示.由图7可以看出:(1)在压密阶段,岩样内部的初始微裂隙不同程度地被压密、闭合,声发射活动较少,有少量的能量释放;弹性阶段为能量释放的平静期,声发射活动微弱,释放的能量也较少;当试样进入微裂纹扩展及加速扩展阶段,随着轴向力的增大,岩石内部形成大量新的微裂纹,并迅速扩展、演化,声发射活动逐渐增强,释放能量,当砂岩达到峰值应力,岩样发生破坏,声发射瞬间释放大量的应变能,声发射AE能量取得最大值;随后声发射活动减弱.(2)温度25~120 °C,声发射活动中释放的高能量都主要集中在裂纹加速扩展阶段和应力跌落阶段,表明砂岩出现明显的脆性破坏;温度150 °C时,虽然最大AE能量仍出现在裂纹加速扩展阶段和应力跌落阶段,但是弹性阶段、微裂纹扩展阶段能量的释放也相对增强,声发射事件更为分散,能量释放强度也明显降低,表明砂岩呈现一定的塑性破坏特征.

图8给出了不同温度下砂岩累计AE能量与温度的关系.由图8可以看出:温度25~120 °C,声发射累计AE能量随温度升高而增大,砂岩储存能量和释放能量的能力增强,砂岩脆性特征明显;而温度150 °C,声发射累计能量大幅度降低,在高温作用下砂岩内部产生热损伤,砂岩储能能力和能量释放能力减弱,塑性特征增强.

温度对砂岩声发射活动影响较为明显,砂岩累计AE能量随温度的升高,先增大后降低,累计AE能量在温度120 °C取得最大、150 °C时取得最小.表明在试验温度范围内,120~150 °C之间存在温度阈值,导致砂岩的声发射活动和AE能量发生突变.

3 基于能耗演化规律的温度效应

温度条件对岩石的力学性质会造成较大的影响,因此本文引入能量观点,从能耗演化规律进一步分析不同温度条件对砂岩试样的影响.

3.1 能量原理

图9显示了岩石单元总能量 U 、弹性应变能 U^e 和耗散能 U^d 的关系(谢和平等,2005).在荷载作用下岩石单元会产生变形,根据热力学第一定律,假设岩石在试验过程中与外界没有热量交换,力对岩石所做的功被岩石全部吸收,则岩石吸收的总能量 U 可以根据下式计算:

$$U = U^e + U^d, \quad (1)$$

式中: U^e 为弹性应变能, U^d 为耗散能.

由于本次试验中 $\sigma_2 = \sigma_3$,则岩体单元的总能量和弹性应变能可表示为:

$$U = \int \sigma_1 d\epsilon_1 + 2 \int \sigma_3 d\epsilon_3, \quad (2)$$

$$U^e = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\mu(2\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2)], \quad (3)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为最大主应力、最小主应力; ϵ_1 、 ϵ_3 分别为轴向应变、横向应变; E 、 μ 为岩石的弹性模量和泊松比.

3.2 岩石破坏全过程能耗特征

在外力作用下岩石会发生变形破坏,从能量角度认为,能量耗散主要出现在岩石内部裂纹的产生和扩展阶段,能量释放则是岩石发生破坏的内在原因(李天斌等,2015).图10为砂岩应力-轴向应变-应变能的关系曲线.从图10可以看出在压密阶段(OA)和弹性阶段(AB),在荷载作用下砂岩会吸收能量,并以弹性应变能的形式储存在岩石内部,总

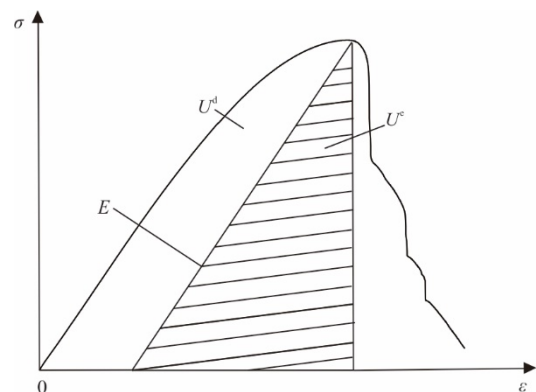


图9 岩石单元能量关系图(谢和平等,2005)

Fig.9 Energy relationship diagram of rock unit (Xie et al., 2005)

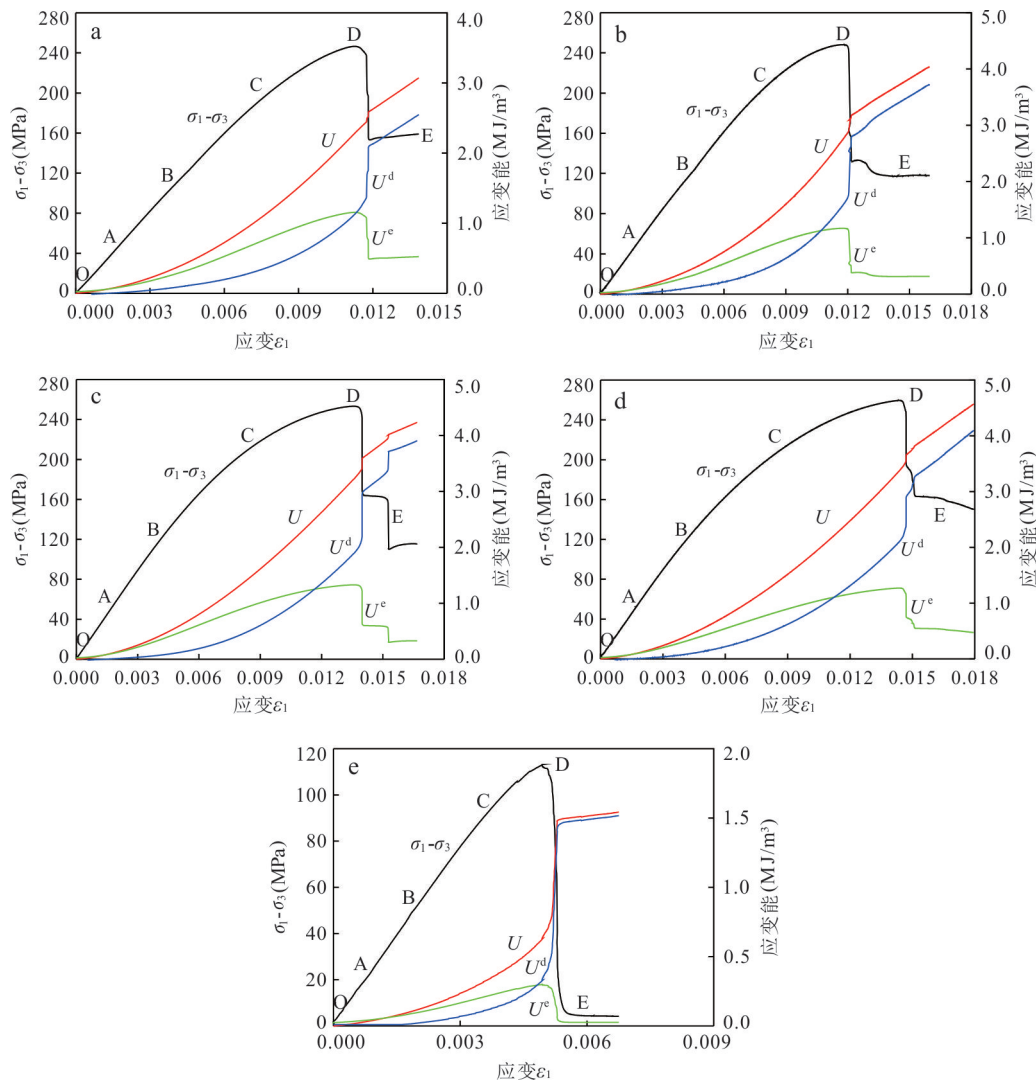


图 10 不同温度作用下砂岩应力-轴向应变-应变能的关系曲线
Fig.10 The curves of stress-axial strain-strain energy for sandstone under different temperatures
a. 25 °C; b. 60 °C; c. 90 °C; d. 120 °C; e. 150 °C

能量和弹性应变能不断增大,而耗散能较小,总能量曲线和弹性应变能曲线基本重合;进入微裂纹扩展阶段(BC),由于岩石内部强度较低的微元体开始逐渐破坏,形成大量新的裂纹,耗散能开始增加,弹性应变能的增速变缓,导致总能量曲线和弹性应变能曲线开始分叉;到裂纹加速扩展阶段(CD),岩石内部微裂纹迅速扩展至出现宏观裂纹贯通,总能量和弹性应变能均达到最大值,弹性应变能变化较小(基本保持不变),耗散能迅速增大,表明该阶段岩石从外界吸收的能量几乎以耗散能的形式耗散;应力跌落阶段(DE),砂岩取得峰值应力而发生破坏,内部储存的弹性应变能快速释放,耗散能急剧增大,最后由于围压的作用,弹性应变能保持一定的残余水平。

3.3 温度对能量特征影响

为了进一步分析砂岩能量随温度的变化,对 25~150 °C 温度下的砂岩应力-应变-能量曲线进行统计分析,得出砂岩能量参数与温度的关系曲线,如图 11 所示.从图 11 可知,总能量、弹性应变能和耗散能随温度的变化规律一致,25~120 °C,砂岩能量参数随温度升高而增大,超过 120 °C,能量参数大幅度减小.

如图 12 所示为曲线峰值点处砂岩的弹性应变能和耗散能占总能量比例关系.从图中看出,弹性应变能比例和耗散能比例随温度的变化相反,25~120 °C,弹性应变能比例随温度升高而减小,耗散能比例随温度升高而升高;温度超过 120 °C,弹性应变能比例明显增大,而耗散能比例减小.这是由

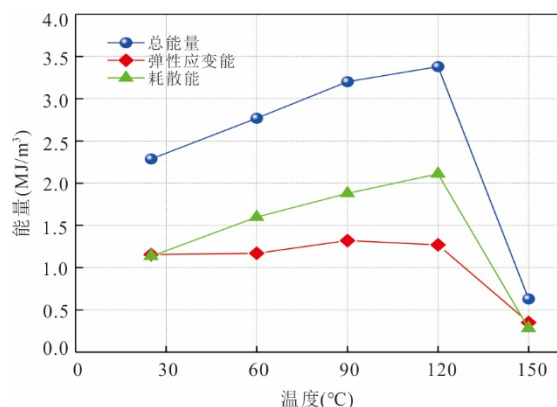


图 11 能量参数与温度的关系

Fig.11 Relationship between energy parameters and temperature

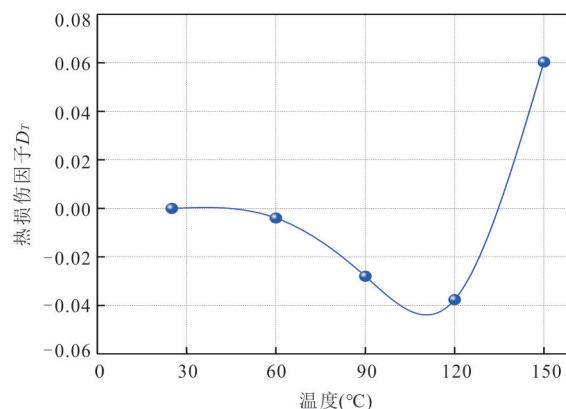


图 13 砂岩热损伤与温度的关系

Fig.13 Relationship between thermal damage and temperature

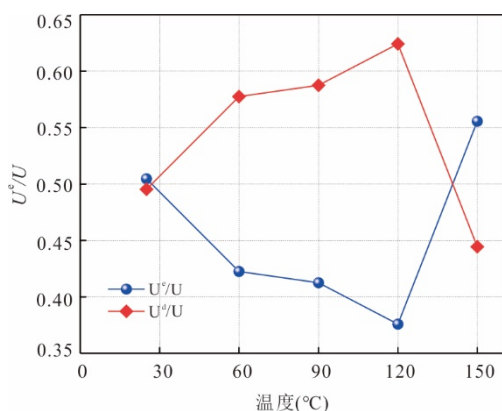


图 12 能量比例与温度的关系

Fig.12 Relationship between energy ratio and temperature

于温度 25~120 °C, 砂岩强度略有所提高, 岩石能更多地从外界吸收并积聚能量, 当岩石内部微裂纹迅速扩展至出现宏观破坏面时所需的耗散能也明显增多; 温度超过 120 °C, 砂岩的强度大幅度降低, 砂岩内部产生热损伤, 岩石发生破坏时所需的耗散能较少。

4 讨论

砂岩在不同温度作用下, 三轴压缩峰值强度、弹性模量、破坏模式以及声发射测试结果均有一定影响。

4.1 温度对力学特征的影响

岩石受到温度作用后, 由于水分蒸发作用、岩石内部介质的软化、热破裂作用等影响, 岩石的力学参数弹性模量会发生明显变化。为了描述不同温度作用下砂岩内部热损伤变化情况, 采用弹性模量来定义砂岩的热损伤因子 D_T (刘泉声和许锡昌, 2000; 蒋浩

鹏等, 2021; 梁书锋等, 2021), 假设常温 25 °C 时砂岩的损伤为 0 (不考虑砂岩的初始损伤), 则其他温度下的损伤因子为:

$$D_T = 1 - \frac{E_T}{E_0}, \quad (4)$$

式中: E_T 、 E_0 分别为砂岩在温度 T 和 25 °C 时的弹性模量。

砂岩热损伤随温度的变化关系如图 13 所示。从图 13 可知, 温度 25~120 °C 时, 砂岩热损伤因子为负值, 称为“负损伤”; 而 150 °C 时, 热损伤因子为正值, 砂岩内部出现热损伤, 表明岩石的热损伤存在某个阈值。

为了进一步探究热损伤对砂岩的力学性质劣化的微观作用, 对不同温度作用下的砂岩表面进行 SEM 扫描, 结果如图 14 所示。可以看出温度 25 °C 时砂岩表面较为光滑, 棱角分明, 出现切晶断裂和晶间断裂; 温度 60~120 °C, 砂岩表面比较粗糙, 断口处堆积着大量岩粉和矿物碎片, 微观破坏仍为切晶断裂和晶间断裂, 与常温相比, 砂岩裂隙数量和张开度较小, 矿物颗粒较为紧密; 温度 150 °C 时, 砂岩表面不平整, 裂隙较多, 微观破坏为撕裂断裂, 碎片剥落较多, 主要堆积在撕裂裂隙中及附近。

这是由于温度在 25~120 °C 时, 岩石内部的水分和气体挥发, 在荷载作用下为砂岩的压密提供空间, 微裂纹逐渐闭合, 导致砂岩的强度略有所提高, 微观破坏为切晶断裂和沿晶断裂, 和宏观破裂形式为剪切破坏相吻合; 砂岩中含有大量以方解石、伊利石等为重要成分的钙质胶结和黏质胶结, 当温度超过 120 °C, 在高温作用下, 胶结物结构发生变化, 造成矿物颗粒之间的胶结作用减弱, 甚至颗粒与胶

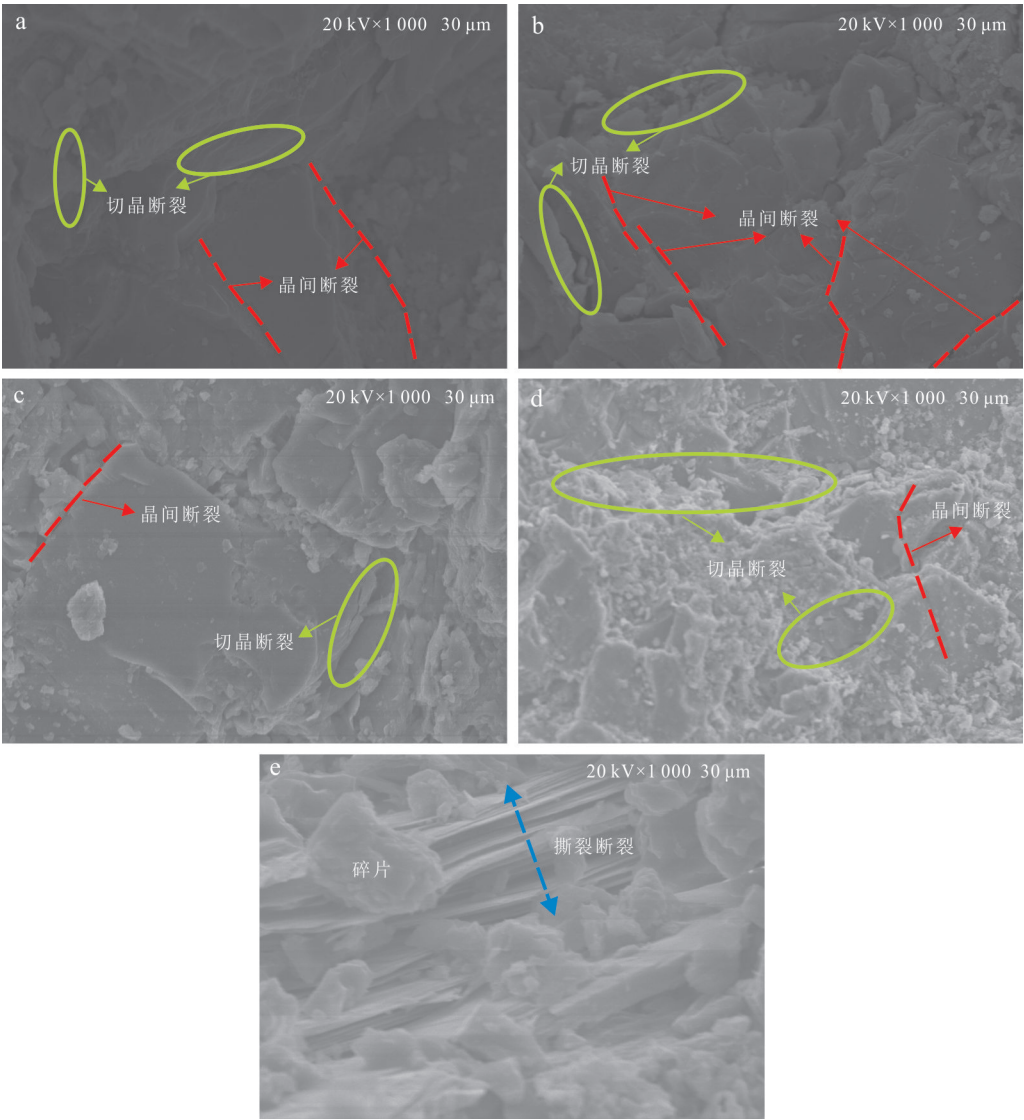


图 14 不同温度作用下砂岩 SEM 扫描图

Fig.14 SEM scanning images of sandstone under different temperatures

a. 25 °C;b. 60 °C;c. 90 °C;d. 120 °C;e. 150 °C

结分离；砂岩的抗拉强度随之降低，使得砂岩内部微裂纹扩展或产生大量新裂缝，且裂纹发展方向与轴向应力平行；微观变形出现撕裂断裂，加快砂岩的内部损伤，导致砂岩的峰值强度大幅度降低，并发生张拉破坏。

因此,对于该砂岩而言,在试验温度范围内,120~150 °C之间存在阈值温度,导致砂岩内部产生热损伤,力学性质和破坏模式均发生突变。

4.2 温度对砂岩脆性的影响

岩石脆性是一种非常重要的力学指标,脆性评价对于岩体工程意义重大(Altindag, 2003; Tarasov and Potvin, 2013; Ai *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2019; 温韬等, 2021; Zhang *et al.*, 2021)。

由于岩石的脆性破坏与其内部微裂纹产生、蔓延、贯通以及峰后岩石破坏模式等全过程密切相关,陈国庆等(2020)综合考虑峰前弹性能的积聚特性和峰后弹性能的释放特性,提出了一种基于弹性能演化全过程的岩石脆性评价指标 BE ,该评价指标能较为全面反映岩石脆性特征。本文采用岩石脆性指标 BE 来分析温度对砂岩试样脆性、塑性破坏的影响,其计算公式如下:

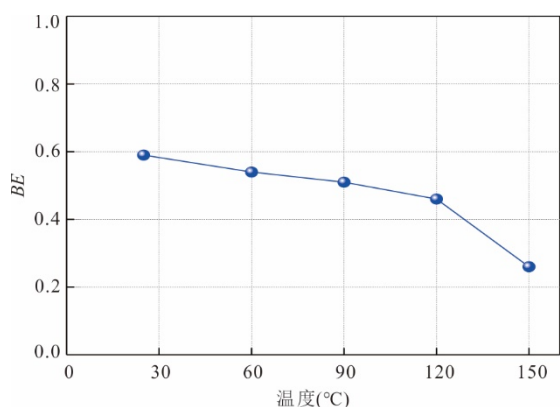
$$BE = \frac{BE_{pre} + BE_{post}}{2}, \tag{5}$$

BE_{pre} 为岩石峰前脆性指标,可用峰前弹性能积聚率表示; BE_{post} 为峰后脆性指标,可用峰后弹性能耗散率表示。

表 2 不同温度作用下砂岩脆性指标结果

Table 2 Results of brittleness index of sandstone under different temperatures

温度 (°C)	S_1 (MPa)	S_2 (MPa)	S_3 (MPa)	S_4 (MPa)	BE_{pre}	BE_{post}	BE
25	1.13	1.01	0.27	0.38	0.47	0.70	0.59
60	1.45	1.02	0.31	0.45	0.42	0.66	0.54
90	1.67	1.03	0.36	0.43	0.39	0.63	0.51
120	1.94	1.04	0.55	0.41	0.37	0.55	0.46
150	0.43	0.22	0.89	0.01	0.33	0.19	0.26

图 15 脆性指标 BE 与温度的关系Fig.15 Relationship between brittleness index BE and temperature

$$BE_{pre} = \frac{S_2}{S_1 + S_2}, \quad (6)$$

$$BE_{post} = \frac{S_2 - S_4}{S_2 + S_3 - S_4}, \quad (7)$$

$$S_2 = \frac{\sigma_p^2}{2E}, \quad (8)$$

$$S_4 = \frac{\sigma_r^2}{2E}, \quad (9)$$

式中: S_1 为峰前耗散能, 等于峰前机械能减去峰前弹性能; S_2 为峰前弹性能; σ_p 为应力-应变曲线峰值强度; E 为弹性模量; S_3 为峰后外力对岩石的机械功增量, 以维持岩石的峰后破裂行为, 弥补峰前储存弹性能的不足, 即峰后机械能; S_4 为岩石处于残余应力状态时内部残留的弹性能. σ_r 为应力-应变曲线残余强度.

脆性指标 BE 的取值范围为 $(0, 1)$, 对于理想脆性岩石, $BE_{pre} = BE_{post} = 1$, 则 $BE = 1$; 对于理想塑性岩石, $BE_{pre} = BE_{post} = 0$, 则 $BE = 0$.

按照 BE 指标的计算方法对试验数据进行分析, 得到结果如表 2 所示, 砂岩脆性指标 BE 与温度关系见图 15. 整体来看, 随着温度的升高, 砂岩的脆

性指标 BE 表现为不断减小的变化规律, 温度 25~120 °C 范围内, 砂岩 BE 值维持在 0.46~0.59, 而 150 °C 时, 砂岩 BE 值大幅度减小到 0.26, 试样表现出明显的塑性特征. 表明在温度 120~150 °C 之间确实存在阈值温度, 砂岩试样从脆性逐渐向塑性转化.

5 结论

本文对砂岩开展不同温度作用下三轴压缩试验和声发射测试, 基于试验结果并引入能耗演化规律, 分析探讨高温作用下砂岩的力学特性与能量特征, 得出如下结论:

(1) 温度作用对砂岩力学性质和破坏模式有明显影响, 温度 120~150 °C 之间存在温度阈值, 导致砂岩内部出现热损伤, 其峰值强度大幅度降低, 宏观破裂形式由剪切破坏过渡到张拉破坏.

(2) 砂岩总能量、弹性应变能和耗散能随温度的变化规律一致, 25~120 °C, 砂岩能量参数随着温度升高而增大, 超过 120 °C, 能量参数大幅度减小; 而弹性应变能比例和耗散能比例随温度的变化规律相反.

(3) 温度对砂岩声发射活动影响也较为明显, 温度 20~120 °C, 声发射累计 AE 能量随温度升高而增大, 砂岩储存能量和释放能量的能力增强, 脆性明显; 150 °C, 砂岩内部产生热损伤, 声发射累计 AE 能量大幅度降低, 砂岩储能能力和能量释放能力减弱, 塑性增强.

(4) 岩石脆性指标 BE , 随着温度的升高, 砂岩脆性指标 BE 不断减小. 温度 120~150 °C, 砂岩 BE 值从 0.5 左右大幅度减小到 0.26, 表现出明显的塑性特征, 表明高温作用下, 试样从脆性逐渐向塑性转化.

References

- Ai, C., Zhang, J., Li, Y. W., et al., 2016. Estimation Criteria for Rock Brittleness Based on Energy Analysis during the Rupturing Process. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(12): 4681—4698. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1078-x>
- Altindag, R., 2003. Correlation of Specific Energy with Rock Brittleness Concepts on Rock Cutting. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 103 (3): 163—171.
- Bai, F. T., Sun, Y. H., Liu, Y. M., et al., 2017. Evaluation of the Porous Structure of Huadian Oil Shale during

- Pyrolysis Using Multiple Approaches. *Fuel*, 187: 1—8. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.09.012>
- Chen, G. Q., Jiang, W. Z., Sun, X., et al., 2019. Quantitative Evaluation of Rock Brittleness Based on Crack Initiation Stress and Complete Stress-Strain Curves. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(8): 5919—5936. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01486-2>
- Chen, G.Q., Wu, J.C., Jiang, W.Z., et al., 2020. An Evaluation Method of Rock Brittleness Based on the Whole Process of Elastic Energy Evolution. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(5): 901—911 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H.Q., Meng, L.B., 2019. Mechanical Characteristics and Acoustic Emission Characteristics of Limestone Triaxial Unloading after High Temperature Effect. *Safety in Coal Mines*, 50(4): 58—62 (in Chinese with English abstract).
- Deng, H. F., Yuan, X. F., Li, J. L., et al., 2014. Fracture Mechanics Characteristics and Deterioration Mechanism of Sandstone under Reservoir Immersion Interaction. *Earth Science*, 39(1): 108—114 (in Chinese with English abstract).
- Gautam, P. K., Verma, A. K., Maheshwar, S., et al., 2016. Thermomechanical Analysis of Different Types of Sandstone at Elevated Temperature. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(5): 1985—1993. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0797-8>
- Hajiabdolmajid, V., Kaiser, P., 2003. Brittleness of Rock and Stability Assessment in Hard Rock Tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(1): 35—48. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(02\)00100-1](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00100-1)
- Jiang, H. P., Jiang, A. N., Yang, X. R., 2021. Statistical Damage Constitutive Model of High Temperature Rock Based on Weibull Distribution and Its Verification. *Rock and Soil Mechanics*, 42(7): 1894—1902 (in Chinese with English abstract).
- Kumari, W. G. P., Ranjith, P. G., Perera, M. S. A., et al., 2017. Mechanical Behaviour of Australian Strathbogie Granite under In-Situ Stress and Temperature Conditions: An Application to Geothermal Energy Extraction. *Geothermics*, 65: 44—59. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.07.002>
- Li, B.B., Yang, K., Yuan, M., et al., 2017. Effect of Pore Pressure on Seepage Characteristics of Coal and Rock at Different Temperatures. *Earth Science*, 42(8): 1403—1412 (in Chinese with English abstract).
- Li, C.D., Meng, J., Xiang, L.Y., et al., 2023. Multi-Scale Evolution Mechanism of Sandstone Structure in Baihetan Reservoir Head Region. *Earth Science*, 48(12): 4658—4667 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q.S., Yang, S.Q., Chen, G.F., 2014. Strength and Deformation Properties of Post-High-Temperature Joint Sandstone. *Journal of China Coal Society*, 39(4): 651—657 (in Chinese with English abstract).
- Li, T.B., Chen, Z.Q., Chen, G.Q., et al., 2015. An Experimental Study of Energy Mechanism of Sandstone with Different Moisture Contents. *Rock and Soil Mechanics*, 36(S2): 229—236 (in Chinese with English abstract).
- Liang, S. F., Fang, S. Z., Wei, G. H., et al., 2021. Experiments on Mechanical Properties of Siliceous Sandstone after High Temperature. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 42(3): 87—92 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. S., Xu, X. C., 2000. Damage Analysis of Brittle Rock at High Temperature. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 19(4): 408—411 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. F., Zhao, Y. Q., Wang, X. R., et al., 2022. Current Status and Prospects of Research on Fatigue Damage and Failure Precursors of Rocks. *Earth Science*, 47(6): 2190—2198 (in Chinese with English abstract).
- Meng, L.B., Li, T.B., Xu, J., et al., 2012. Experimental Study on Influence of Confining Pressure on Shale Mechanical Properties under High Temperature Condition. *Journal of China Coal Society*, 37(11): 1829—1833 (in Chinese with English abstract).
- Meng, W., He, C., Wu, F. Y., et al., 2022. Effects of Thermal Stress of Rock Masses Generated by Geothermal Gradient on Rockburst Prediction. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 57(4): 903—909 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Y., Tian, H., Xu, N. X., et al., 2020. Physical and Mechanical Properties of Granite after High-Temperature Treatment. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53: 305—322. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01919-0>
- Su, C.D., Guo, W.B., Li, X.S., 2008. Experimental Research on Mechanical Properties of Coarse Sandstone after High Temperatures. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(6): 1162—1170 (in Chinese with English abstract).
- Tang, H.M., Zhang, Y.H., Sun, Y.Z., 2007. A Study of Equivalent Deformability Parameters in Rock Masses. *Earth Science*, 32(3): 389—396 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Tang, M. G., Xu, Q., Deng, W. F., et al., 2022. Degradation Law of Mechanical Properties of Typical Rock in Sichuan-Tibet Traffic Corridor under Freeze-Thaw and Unloading Conditions. *Earth Science*, 47(6): 1917—1931 (in Chinese with English abstract).
- Tarasov, B. G., Potvin, Y., 2013. Universal Criteria for Rock Brittleness Estimation under Triaxial Compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 59(4): 57—69. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.12.011>
- Wan, Z.J., Zhao, Y.S., Dong, F.K., et al., 2008. Experimental Study on Mechanical Characteristics of Granite under High Temperatures and Triaxial Stresses. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(1): 72—77 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.G., Hu, B., Tang, H.M., et al., 2016. Triaxial Rheological Experiments and Rheological Constitutive of Mudstone under Hydro-Mechanical Coupling State. *Earth Science*, 41(5): 886—894 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.Z., Qin, B.D., Guo, J. Q., et al., 2022. Influence of High Temperature Treatment on Mechanical Properties and Energy Evolution Mechanism of Sandstone. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 41(6): 181—187 (in Chinese with English abstract).
- Wen, T., Zhang, X., Sun, J. S., et al., 2021. Brittle Evaluation Based on Energy Evolution at Pre-Peak and Post-Peak Stage. *Earth Science*, 46(9): 3385—3396 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G., Wang, D. Y., Zhai, S. T., 2012. Acoustic Emission Characteristics of Sandstone after High Temperature under Uniaxial Compression. *Rock and Soil Mechanics*, 33(11): 3237—3242 (in Chinese with English abstract).
- Xie, H.P., Ju, Y., Li, L.Y., 2005. Criteria for Strength and Structural Failure of Rocks Based on Energy Dissipation and Energy Release Principles. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(17): 3003—3010 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Q., Ranjith, P. G., Jing, H. W., et al., 2017. An Experimental Investigation on Thermal Damage and Failure Mechanical Behavior of Granite after Exposure to Different High Temperature Treatments. *Geothermics*, 65: 180—197. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.09.008>
- Yin, G.Z., Li, X.S., Zhao, H.B., 2009. Experimental Investigation on Mechanical Properties of Coarse Sandstone after High Temperature under Conventional Triaxial Compression. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(3): 598—604 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Li, T.B., Chen, G.Q., et al., 2014. Acoustic Emission Characteristics of Granite in a Triaxial Compression Test at Different Temperatures. *Modern Tunneling Technology*, 51(5): 33—40 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Ai, C., Li, Y. W., et al., 2018. Energy-Based Brittleness Index and Acoustic Emission Characteristics of Anisotropic Coal under Triaxial Stress Condition. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51: 3343—3360. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1535-9>
- Zhang, L.Y., Lu, W. T., Mao, X. B., 2007. Experimental Research on Mechanical Properties of Sandstone at High Temperature. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 24(3): 293—297 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Feng, X. T., Yang, C. X., et al., 2019. Fracturing Evolution Analysis of Beishan Granite under True Triaxial Compression Based on Acoustic Emission and Strain Energy. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 117: 150—161. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.03.029>
- Zhang, Y., Feng, X. T., Yang, C. X., et al., 2021. Evaluation Method of Rock Brittleness under True Triaxial Stress States Based on Pre-Peak Deformation Characteristic and Post-Peak Energy Evolution. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54: 1277—1291. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02330-w>
- Zunino, F., Castro, J., Lopez, M., 2015. Thermo-Mechanical Assessment of Concrete Microcracking Damage Due to Early-Age Temperature Rise. *Construction and Building Materials*, 81: 140—153. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.126>
- Zuo, J.P., Zhou, H.W., Xie, H.P., et al., 2008. Meso-Experimental Research on Sandstone Failure Behavior under Thermal-Mechanical Coupling Effect. *Rock and Soil Mechanics*, 29(6): 1477—1482 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈国庆, 吴家尘, 蒋万增, 等, 2020. 基于弹性能演化全过程的岩石脆性评价方法. *岩石力学与工程学报*, 39(5): 901—911.
- 陈海清, 孟陆波, 2019. 灰岩三轴卸荷力学特性及声发射特征的高温后效应. *煤矿安全*, 50(4): 58—62.

- 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等, 2014. 浸泡作用下砂岩断裂力学特性及劣化机理. 地球科学, 39(1): 108—114.
- 蒋浩鹏, 姜谟男, 杨秀荣, 2021. 基于 Weibull 分布的高温岩石统计损伤本构模型及其验证. 岩土力学, 42(7): 1894—1902.
- 李波波, 杨康, 袁梅, 等, 2017. 不同温度下孔隙压力对煤岩渗流特性的影响机制. 地球科学, 42(8): 1403—1412.
- 李长冬, 孟杰, 项林语, 等, 2023. 白鹤滩库首区砂岩结构多尺度演变机制. 地球科学, 48(12): 4658—4667.
- 李庆森, 杨圣奇, 陈国飞, 2014. 高温后节理砂岩强度及变形破坏特性. 煤炭学报, 39(4): 651—657.
- 李天斌, 陈子全, 陈国庆, 等, 2015. 不同含水率作用下砂岩的能量机制研究. 岩土力学, 36(S2): 229—236.
- 梁书锋, 方士正, 韦贵华, 等, 2021. 高温作用后硅质砂岩力学性能试验. 郑州大学学报(工学版), 42(3): 87—92.
- 刘泉声, 许锡昌, 2000. 温度作用下脆性岩石的损伤分析. 岩石力学与工程学报, 19(4): 408—411.
- 刘新锋, 赵英群, 王晓睿, 等, 2022. 岩石疲劳损伤及破坏前兆研究现状与展望. 地球科学, 47(6): 2190—2198.
- 孟陆波, 李天斌, 徐进, 等, 2012. 高温作用下围压对页岩力学特性影响的试验研究. 煤炭学报, 37(11): 1829—1833.
- 蒙伟, 何川, 吴枋胤, 等, 2022. 地温梯度孕育的岩体热应力对岩爆预测的影响. 西南交通大学学报, 57(4): 903—909.
- 苏承东, 郭文兵, 李小双, 2008. 粗砂岩高温作用后力学效应的试验研究. 岩石力学与工程学报, 27(6): 1162—1170.
- 唐辉明, 张宜虎, 孙云志, 2007. 岩体等效变形参数研究. 地球科学, 32(3): 389—396.
- 汤明高, 许强, 邓文锋, 等, 2022. 冻融及加卸荷条件下川藏交通廊道典型岩石力学特性的劣化规律. 地球科学, 47(6): 1917—1931.
- 万志军, 赵阳升, 董付科, 等, 2008. 高温及三轴应力下花岗岩体力学特性的实验研究. 岩石力学与工程学报, 27(1): 72—77.
- 王新刚, 胡斌, 唐辉明, 等, 2016. 渗透压-应力耦合作用下泥岩三轴流变实验及其流变本构. 地球科学, 41(5): 886—894.
- 王珍珍, 秦本东, 郭佳奇, 等, 2022. 高温作用对煤系砂岩力学性能和能量演化机制的影响. 河南理工大学学报(自然科学版), 41(6): 181—187.
- 温韬, 张馨, 孙金山, 等, 2021. 基于峰前和峰后能量演化特征的岩石脆性评价. 地球科学, 46(9): 3385—3396.
- 吴刚, 王德咏, 翟松韬, 2012. 单轴压缩下高温后砂岩的声发射特性. 岩土力学, 33(11): 3237—3242.
- 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 2005. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则. 岩石力学与工程学报, 24(17): 3003—3010.
- 尹光志, 李小双, 赵洪宝, 2009. 高温后粗砂岩常规三轴压缩条件下力学特性试验研究. 岩石力学与工程学报, 28(3): 598—604.
- 张航, 李天斌, 陈国庆, 等, 2014. 不同温度下花岗岩三轴压缩试验的声发射特性. 现代隧道技术, 51(5): 33—40.
- 张连英, 卢文厅, 茅献彪, 2007. 高温作用下砂岩力学性能实验. 采矿与安全工程学报, 24(3): 293—297.
- 左建平, 周宏伟, 谢和平, 等, 2008. 温度和应力耦合作用下砂岩破坏的细观试验研究. 岩土力学, 29(6): 1477—1482.