

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0261

高温层理砂岩劈裂力学特性及裂隙演化研究

徐浩淳^{1,2,3}, 金爱兵^{1,2}, 赵怡晴^{1,2}, 王本鑫^{1,2}, 韦立昌^{1,2}

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;
3. 北京科技大学 高等工程师学院, 北京 100083)

摘 要: 对 25~1 000 °C 处理后含垂直和水平层理砂岩开展巴西劈裂试验, 采用数字图像相关技术 (digital image correlation, DIC) 记录劈裂过程高温层理砂岩水平应变场演化规律, 同时通过电镜扫描 (scanning electron microscopy, SEM) 研究不同温度下砂岩微观结构损伤。研究结果表明: 层理砂岩劈裂破坏前应变集中可以分为两种类型: 圆盘两端应变集中型 (≤ 400 °C) 和圆盘中央应变集中型 (> 400 °C)。随着温度升高, 垂直和水平层理砂岩的抗拉强度均呈现出先增大后减小的趋势, 200 °C 时达到最大值; 600~1 000 °C 时, 层理对砂岩抗拉强度的影响随温度升高逐渐降低, 800~1 000 °C 存在使得温度成为影响抗拉强度主要因素的阈值温度。微观结构损伤分析表明, 热处理温度较低时, 基质主要表现为裂纹增多、长度延展, 但晶体仍相对完整; 层理面表现为孔隙数量增多和尺度增大; 温度对层理破坏更大。温度较高时, 基质和层理破坏程度相近, 这也是热处理后, 砂岩应变演化和强度变化的主因。

关 键 词: 高温; 层理砂岩; 巴西劈裂; 数字图像相关技术; 电镜扫描

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 11-3069-10

Experimental studies on split mechanical properties and fracture evolution behavior of bedding sandstone after high-temperature treatment

XU Hao-chun^{1,2,3}, JIN Ai-bing^{1,2}, ZHAO Yi-qing^{1,2}, WANG Ben-xin^{1,2}, WEI Li-chang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, China;
3. School of Advanced Engineers, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, China)

Abstract: The Brazilian test was conducted on sandstones containing vertical and horizontal laminations after 25 °C to 1 000 °C treatment. Digital imaging correlation (DIC) was used to record the evolution of the horizontal strain field of high-temperature bedding sandstone during the splitting process. Meanwhile, microscopic structural damage characteristics of samples after different temperatures treatment were investigated using scanning electron microscopy (SEM). The results show that: (1) The strain concentration of the bedding sandstone before splitting can be divided into two types: the strain concentration at both ends of the disk (≤ 400 °C) and the strain concentration at the center of the disk (> 400 °C). (2) With the increase of temperature, the tensile strength of vertical and horizontal bedding sandstone first increases and then decreases and reaches the maximum at 200 °C. With the increase of temperature at 600~1 000 °C, the effect of bedding on the tensile strength gradually decreases. Temperature becomes the main factor affecting the tensile strength after a threshold temperature of 800~1 000 °C. (3) The microstructure damage analysis shows that the sandstone matrix is mainly characterized by increased cracks and extended length after the lower temperature treatment, while the crystal is still intact. Also, after this treatment, both the number and size of pores in the bedding plane increase and more damage in bedding occurs. However, when the temperature is higher, the damage of matrix and bedding is very similar, which is the main reason for the variations in strain and strength of the sample after heat treatment.

Keywords: high temperature; bedding sandstone; Brazilian test; digital image correlation technology; scanning electron microscopy

收稿日期: 2021-05-13

修回日期: 2021-08-03

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51674015, No. 51804018); 中央高校基本科研业务费专项资金 (No. FRF-TP-19-026A1); 北京科技大学本科生科技创新项目 (No. 20203000R); 中国博士后科学基金 (No. 2020M670138)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51674015, 51804018), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (FRF-TP-19-026A1), the Student Research Training Program of USTB (20203000R) and the China Postdoctoral Science Foundation Project (2020M670138).

第一作者简介: 徐浩淳, 男, 2000 年生, 本科, 主要从事岩石力学与工程方面的研究。E-mail: 806208712@qq.com

通讯作者: 赵怡晴, 女, 1980 年生, 博士, 副教授, 主要从事矿山岩石力学、矿山风险预警等方面的研究。E-mail: bkdtzyq@163.com

1 引言

随着我国深部矿产开采、地热资源开发、地下煤气化和核废料存储等重大工程的迅速发展,岩石工程不可避免会受到高温影响,对高温岩石力学特性以及变形破坏过程进行研究具有重要工程意义^[1]。岩石的内部组成成分复杂,在漫长的地质作用下,内部会形成各种结构面,如层理等,导致其在外因影响下具有明显的各向异性^[2],为此,有必要研究高温作用下含层理岩石力学特性变化规律及其破裂特性。

在常温含层理岩石力学性质各向异性研究方面,Yin 等^[3]研究了层理倾角对砂岩强度和破坏模式的影响,发现在层理角度大于 75° 时层理面会发生剪切滑移破坏。刘运思等^[4]对不同层理角度下的板岩进行巴西劈裂试验,将破坏形式分为 3 类:层理角度 $< 45^{\circ}$ 时为纯拉伸破坏, $45^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 时为剪切拉伸破坏, $> 75^{\circ}$ 时为剪切破坏。侯振坤等^[5]对不同层理方向的页岩进行了电镜扫描和单轴压缩试验,得出微裂隙发育、独特的破坏类型是造成各向异性的主要原因。邓华锋等^[6]分析讨论了巴西圆盘劈裂法在层状岩体抗拉强度试验中的适用性。储超群等^[7]通过单轴压缩和声发射的手段对层状砂岩力学特性与破裂特征进行研究,发现层理倾角变化对破坏模式具有显著影响。衡帅等^[8]分析了不同层理角度龙马溪组页岩的单轴和三轴压缩各向异性特征,研究表明,页岩力学特征、破坏模式和强度特征受层理面影响较大,在不同围压下层理角度为 30° 时页岩强度最低,层理角度为 0° 时最高,并指出页岩破坏机制和各向异性的根源是层状沉积结构和层理间的弱胶结作用。

高温岩石物理力学性质研究方面,国内外学者的研究取得了一定的成果和进展^[9-16]。Nikhil 等^[17]针对砂岩力学特性随温度的变化进行了综述研究。Yang 等^[18]研究了高温对含单裂隙花岗岩变形破坏的影响。吴顺川等^[19]对 $25 \sim 800^{\circ}\text{C}$ 高温花岗岩进行了巴西劈裂试验和声发射测试,发现花岗岩热损伤阈值温度在 $400 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 。苏承东等^[20]研究了高孔隙度粗砂岩波速、抗压强度、变形模量等随温度的变化规律,研究表明, 500°C 可以认为是粗砂岩单轴抗压强度和平均模量下降的阈值温度。金爱兵等^[21]使用核磁共振和单轴压缩等手段对冻结砂岩的孔隙特征和应力-应变关系进行研究,发现冻结砂岩的孔隙率、弹性模量、峰值应变以及单轴强度在 $450 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 时发生突变。孙文进等^[22]通过数字图像相关

技术研究了 $400 \sim 1\,000^{\circ}\text{C}$ 高温处理后砂岩的劈裂力学特性,研究表明,高温对砂岩抗拉强度的影响远超抗压强度,当温度超过 800°C 时,抗拉强度大幅下降, 800°C 可视为砂岩抗拉劣化的温度阈值。孙强等^[23]研究了花岗岩物理力学参数随温度的变化特征,发现石英发生相变的 573°C 附近存在岩石强度和波速下降的加速点。

上述研究成果为高温岩石性质的分析奠定了较好的基础,但目前针对高温含层理岩石各向异性及破裂特性的研究并不多见。砂岩是沉积岩中分布很广的一类岩石,含明显层理。高温作用后,砂岩内部结构会有显著改变^[24]。基于此,本文对 $25 \sim 1\,000^{\circ}\text{C}$ 范围内 6 个温度层理砂岩进行巴西劈裂试验,利用数字图像相关技术(digital image correlation,简称 DIC)和电镜扫描(scanning electron microscopy,简称 SEM),研究高温层理砂岩劈裂力学特性和裂隙演化机制。

2 试样制备及热处理

2.1 试样制备

试验样品为取自陕西长庆地区的砂岩,层理结构面发育,所有试样均从同一岩块中按图 1(a)所示方式取芯,加工成直径为 50 mm、厚度为 25 mm 的标准巴西圆盘试样。为了控制试验结果的离散性,通过对岩样的密度、波速进行测试,选取密度和波速相近的岩样进行热处理和力学试验。

按加载时层理面与水平方向的夹角分为垂直层理和水平层理,如图 1(b)、1(c)所示。温度选取 25 (常温)、200、400、600、800、 $1\,000^{\circ}\text{C}$ 6 个梯度,根据试验规程相关规定,每组试验 3 个试样,共 36 块砂岩试样。采用 A1-200, B2-400, B3-600 等进行编号,字母 A、B 分别表示垂直层理和水平层理,1、2、3 表示该组的 3 块试样,200、400、600 表示不同的热处理温度。

2.2 试样热处理

采用 KSL-1200X 型箱式电阻炉(如图 1(d)所示)对砂岩试样分别进行 200、400、600、800、 $1\,000^{\circ}\text{C}$ 高温处理,升温速率为 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$,为使试样充分受热,到达目标温度后恒温 2 h,在炉内自然冷却至室温(25°C)。

3 巴西劈裂试验

巴西劈裂及图像采集系统分为加载设备、摄像设备和补光设备 3 个部分,如图 2 所示。加载设备

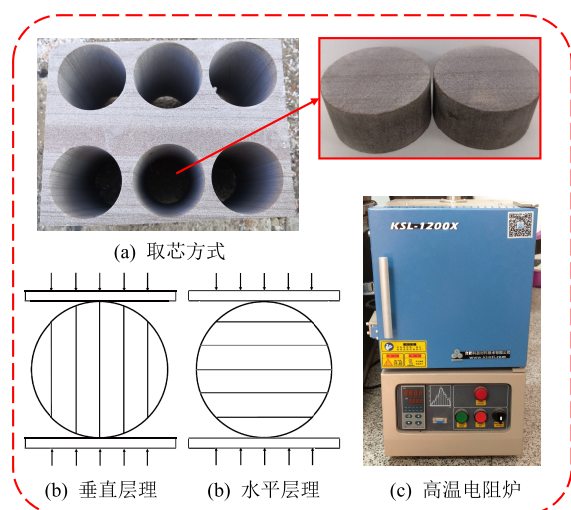


图 1 岩样制备和试验设备
Fig.1 Sample preparation and test equipment

为 YAW-600 型电液伺服刚性试验机, 试验初始荷载为 500 N, 试验过程中采用位移加载, 加载速率控制为 0.001 5 mm/s, 直至试样完全破坏。摄像设备为型号为 D5300 的尼康单反相机, 在试验中记录加载过程, 以 25 帧/s 的速率采集图像; 补光设备为两个 LED 灯, 在试验过程中提供稳定的光源。

为了分析层理砂岩在巴西劈裂过程中的劈裂破坏特征和水平应变场演化, 利用 DIC 对加载过程中巴西圆盘表面破裂演化情况进行监测。DIC 是一种根据试样表面斑点运动来得到对象表面应变的非接触变形测量方法, 可用于研究岩石试样表面变形和裂纹的演化^[22, 25-30]。在试验开始前在巴西圆盘表面制作散斑, 试验过程中利用摄像设备采集图像, 分析过程在 VIC-2D 软件上进行, 处理得到加载时试样表面应变变化数据和破裂过程。



图 2 巴西劈裂试验系统
Fig.2 Brazilian test system

3.1 不同层理砂岩常温劈裂力学特性

将常温下两种层理砂岩的荷载-位移曲线、表面水平应变场演化和破坏形态进行对比分析 (见图 3), 图中, ε_x 为水平应变。层理砂岩的荷载-位移曲线分

为压密、弹性变形和峰后跌落 3 个阶段, 本次试验中没有出现明显屈服阶段, 荷载达到峰值后迅速跌落, 呈现出明显脆性特征。

ab 为压密阶段, 对比荷载-位移曲线以及应变变化云图 (见图 3(b)) 可以看到, 水平层理砂岩压密阶段更为明显, 持续更长, 垂直层理砂岩压缩主要表现为微孔隙、微裂隙压缩, 而水平层理砂岩除微孔隙、微裂隙压缩外还有层理面压缩。

bd 为弹性变形阶段, 这一阶段的曲线近似为直线, 两种砂岩荷载-位移曲线斜率基本相同。*c* 为砂岩破坏前的一点, 荷载约为峰值的 95%, 垂直层理砂岩圆盘中央出现一条明显的水平应变带 (见图 3(c)), 水平层理砂岩圆盘除上下端部的应变集中外 (见图 3(c)), 中部水平应变带并不明显, 这主要与垂直层理面水平方向黏结较弱有关。

如图 3(d)所示, 两种层理砂岩破坏时最大应变均出现在端部, 分别为 0.19% 和 0.21%, 此外, 由于层理间黏结较弱, 垂直层理砂岩承受劈裂荷载能力明显低于水平层理砂岩。图 3(e)为两种砂岩的破坏形态, 由于层理面的存在, 垂直层理砂岩除中心主裂纹外, 还产生了一条沿层理方向延伸至圆盘中心并与主裂纹贯通的次生裂纹, 水平层理砂岩除端部产生局部破坏外, 没有产生沿层理方向的次生裂纹。

3.2 不同温度层理砂岩劈裂力学特性

3.2.1 不同温度下砂岩破坏时应变场

图 4 为不同温度层理砂岩破坏时的表面水平应变场。可以看到, 砂岩破坏前都存在一个明显的应变集中区域, 即砂岩破坏的起裂位置。根据热处理温度的不同, 层理砂岩劈裂破坏前应变集中大致可以分为两种类型: 圆盘两端应变集中型 ($\leq 400^\circ\text{C}$) 和圆盘中央应变集中型 ($> 400^\circ\text{C}$)。

(1) 当热处理温度 $T \leq 400^\circ\text{C}$ 时, 高应变区主要集中在圆盘上下两端, 并且随着温度的升高, 应变集中区向圆盘中央移动。造成这种现象的原因主要有两个: ①随着温度的升高, 水平应变显著增加, 其中, 垂直层理砂岩水平应变由 0.19% 增加到 0.38%, 水平层理砂岩由 0.21% 增加到 0.52%, 表明砂岩逐渐由脆性向塑性转变, 延性增强, 圆盘端部与加载平台的接触面积增大, 降低了端部应力集中; ②热处理温度越高, 砂岩内部裂隙越发育, 裂隙增多对岩石抗拉强度的影响大于对抗压强度的影响^[22], 而端部的应力集中主要是由压应力引起的, 砂岩内部区域更容易由于较低的抗拉强度而产生高应变区。

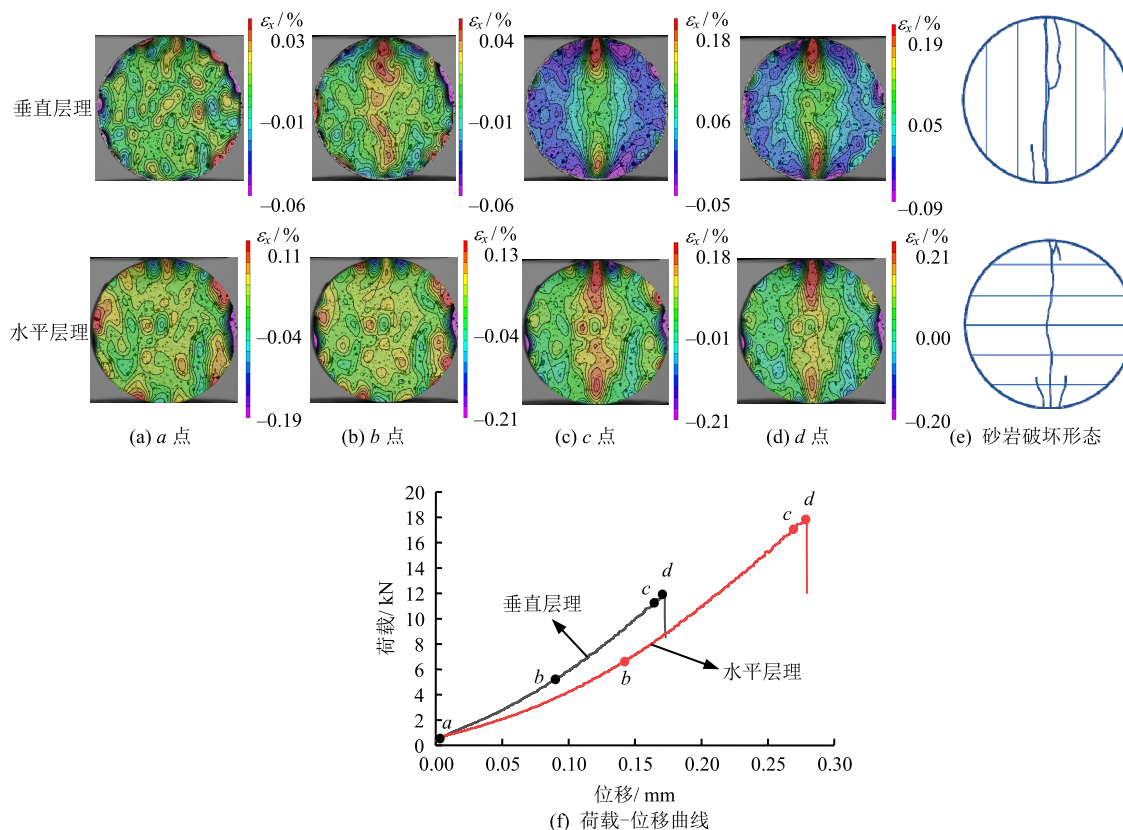


图3 两种层理方向砂岩对比
Fig.3 Comparison of sandstone in two bedding directions

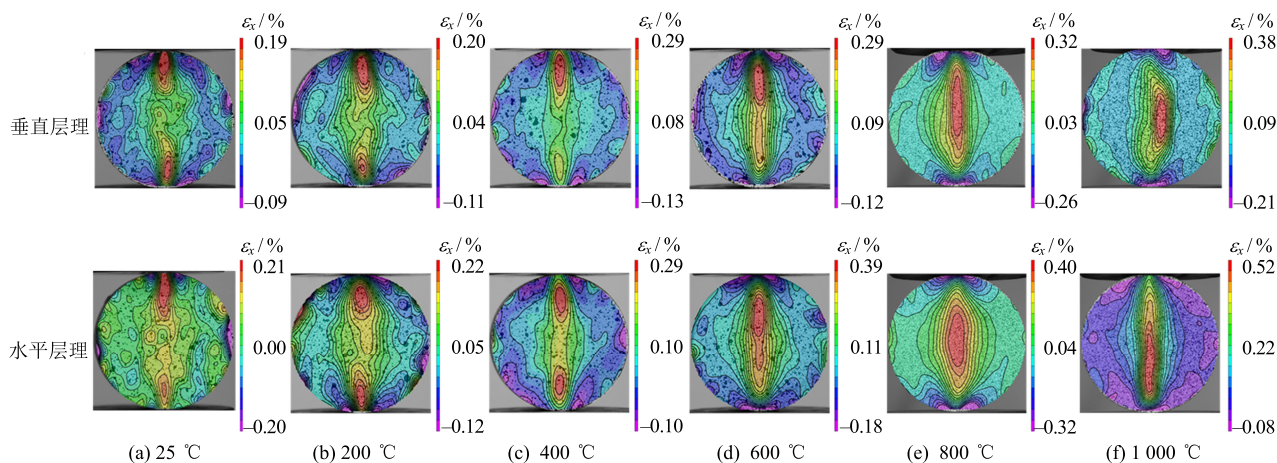


图4 砂岩破坏时的应变场
Fig.4 Strain field when the sandstone is failure

(2) 当热处理温度 $T > 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 高应变区集中在圆盘中央, $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时最为明显, $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时受层理或局部热损伤严重的影响, 应变集中区有一定偏离。

相同温度下, 垂直层理砂岩破坏时的应变集中区与水平层理相比更靠近端部, 这是因为垂直层理砂岩在劈裂时接触点直接与层理弱面接触, 端部由于应力集中的存在更容易发生局部破坏, 导致应变集中区更靠近端部。

3.2.2 破裂过程中应变与温度关系

为进一步研究劈裂过程中应变场随温度演化规律, 对峰值荷载 30%、70%、90% 和 100% 时水平层理砂岩 (垂直层理和水平层理砂岩的应变场演化随温度的变化规律相似) 圆盘表面的全局应变场进行分析。图 5 为不同温度下含水平层理砂岩荷载-位移曲线。a、b、c、d 点分别为峰值荷载的 30%、70%、90% 和 100%, 分别对应于压密阶段末期或弹性变形阶段初期、弹性变形中间阶段、弹性变形阶段末期、破坏时刻。

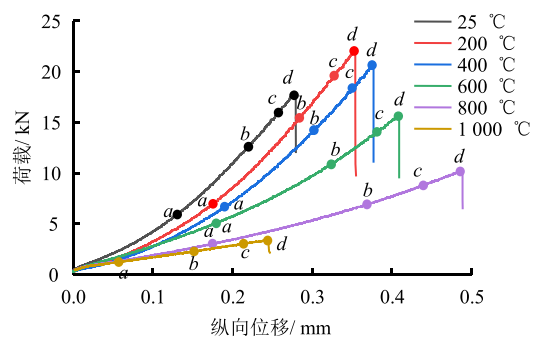


图 5 不同温度下水平层理砂岩的荷载-纵向位移曲线
Fig.5 Load - displacement curves of horizontally bedded sandstone under different temperatures

25~400 °C 砂岩在压密末期 (30%峰值荷载) 时, 未见明显应变集中 (见图 6(a)); 在弹性变形中间阶段 (70%峰值荷载) 时, 圆盘两端可见明显的应变集中 (图 6(b)); 随着荷载继续升高, 两端应变向中央发展, 最终贯通。随着温度升高, 应变集中和贯通现象越明显。600 °C 砂岩在压密末期 (30%峰值荷载) 时, 未见明显应变集中 (见图 6(a)); 在弹性变形中间阶段 (70%峰值荷载) 时, 圆盘中央可见明显的应变集中 (见图 6(b)); 随着荷载继续升高至破坏时刻 (100%峰值荷载), 应变集中逐渐聚集在圆盘中央偏上的位置 (见图 6(d)), 破裂形式跟

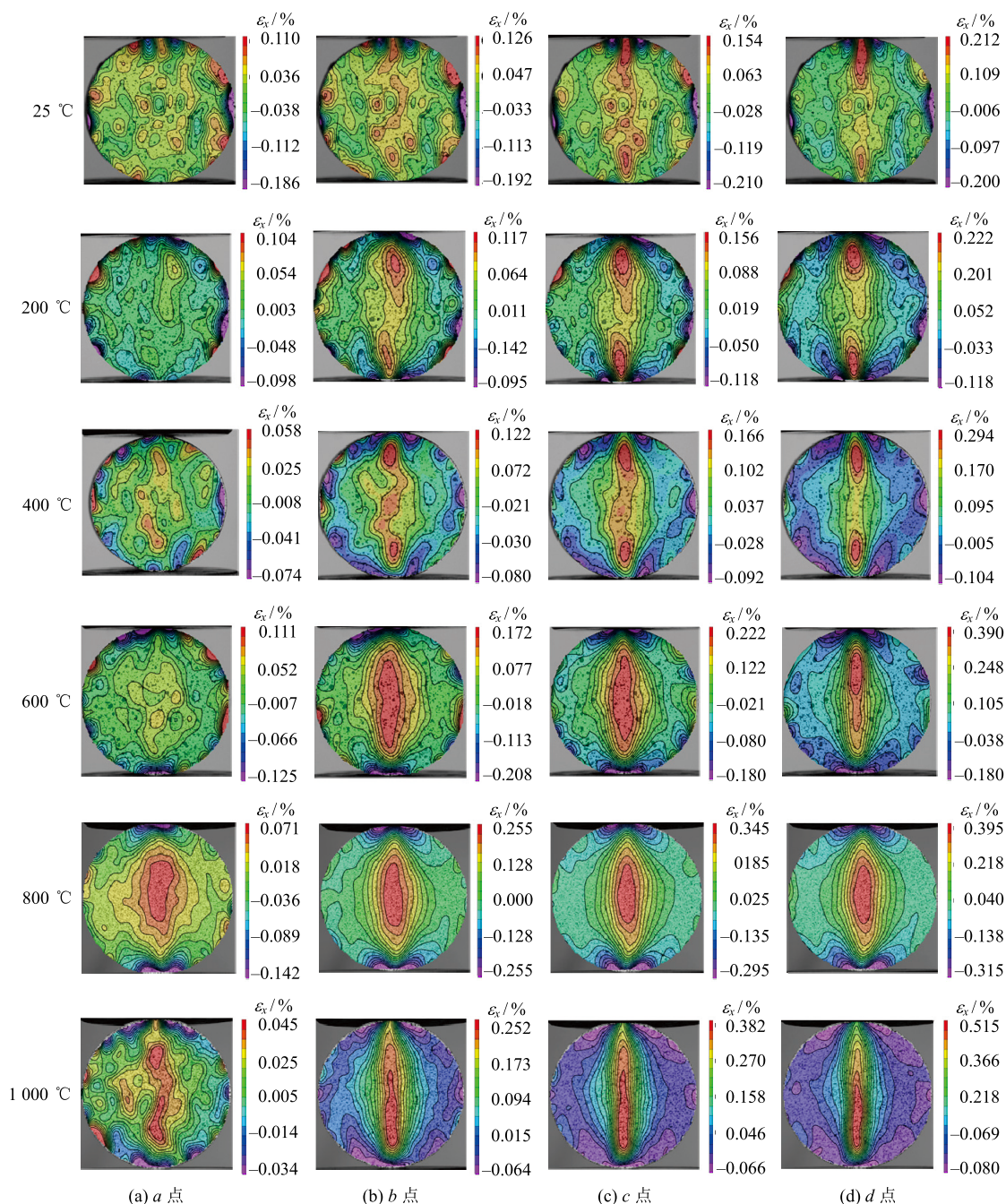


图 6 不同温度水平层理砂岩水平应变场演化

Fig.6 Evolution diagram of horizontal strain field of sandstone at different temperatures

低温下不同,以中间起裂为主,逐渐向两端发展。800~1 000 °C砂岩的应变演化与 600 °C基本相同,但圆盘中央更早显示出明显的应变集中现象。600 °C时,加载至 70%峰值荷载圆盘中央可见明显的应变集中;而 800、1 000 °C时,加载至 30%峰值荷载圆盘中央即可见明显的应变集中区。

3.3 高温对层理砂岩劈裂强度影响

表 1 为巴西劈裂试验结果。图 7 为层理砂岩劈裂抗拉强度与温度的关系。不同温度下垂直层理砂岩抗拉强度均小于水平层理砂岩,说明垂直层理面一定程度上降低了砂岩的抗拉强度。垂直层理和水平层理砂岩的抗拉强度均呈现出先增大后减小的趋势,分为两个阶段:

(1) 25~200 °C时,垂直层理砂岩抗拉强度由 5.83 MPa 提高到 7.32 MPa,增大了 25.56%,水平层理砂岩抗拉强度由 8.11 MPa 提高到 11.42 MPa,增大了 40.81%。200 °C以下主要发生自由水的蒸发,水分的丧失可使颗粒间润滑作用降低,黏结作用增强,从而表现出承载能力的提高^[31]。层理面自身黏结较弱,该增强效果不明显,因此垂直层理砂岩抗拉强度的提高低于水平层理。

(2) 200~1 000 °C时,随着温度升高,劈裂抗拉强度逐渐减小。垂直层理条件下,抗拉强度在 200~400 °C开始下降,降幅为 8.74%,在 400~1 000 °C近似为线性下降,由 6.68 MPa 降至 1.46 MPa;水平层理条件下,抗拉强度在 200~600 °C缓慢降低,由 11.42 MPa 降至 9.58 MPa,800 °C和 1 000 °C

时抗拉强度急剧劣化,与 25 °C时相比分别劣化了 35.64%和 78.67%。

图 7 三角对应值为两种层理砂岩抗拉强度的差值。25~600 °C时,差值随温度的升高逐渐增大,表明该温度区间内层理面的热损伤比基质更为明显,差值在 600 °C时达到最大值 4.6 MPa,此时水平层理砂岩的抗拉强度约为垂直层理的 2 倍。

600~1 000 °C时,差值随温度的升高逐渐减小,表明温度对层理砂岩抗拉强度的影响逐渐增强,层理对抗拉强度的影响逐渐减弱。温度达到 1 000 °C时,两种层理方向砂岩的抗拉强度几乎相同,此时温度已成为影响砂岩抗拉强度的主要因素。

4 高温对层理砂岩微观结构的影响

为探究温度对层理砂岩的破坏机制,利用扫描电镜对 25、200、400、800 °C处理后的砂岩进行观察,研究温度对砂岩基质和层理微观结构的影响。

(1) 温度对基质的影响。基质的热损伤先后经历裂纹数量增加,裂纹长度延展、裂纹宽度发育,这一现象与张渊等^[12]研究结果相似。如图 8(a)所示,25 °C时,基质中矿物颗粒比较完整,排列紧密,存在原生裂隙;200 °C时,出现晶内裂纹,但裂纹较短,晶体仍相对完整(见图 8(c));400 °C时,出现晶间裂纹,在热应力作用下裂纹长度延展(见图 8(e));800 °C时,出现大量微裂隙、微孔隙等,裂纹之间相互贯穿,张开度明显增大(见图 8(g))。

表 1 巴西劈裂试验结果
Table 1 Brazilian test results

温度 / °C	垂直层理				水平层理			
	试件编号	峰值荷载/N	抗拉强度/MPa	平均值/MPa	试件编号	峰值荷载/N	抗拉强度/MPa	平均值/MPa
25	A1-25	11 925.6	6.07	5.83	B1-25	14 112.0	7.19	8.11
25	A2-25	12 564.4	6.40	5.83	B2-25	17 848.8	9.09	8.11
25	A3-25	9 884.0	5.03	5.83	B3-25	15 793.2	8.04	8.11
200	A1-200	13 951.6	7.11	7.32	B1-200	24 324.4	12.39	11.42
200	A2-200	13 580.4	6.92	7.32	B2-200	22 036.8	11.22	11.42
200	A3-200	15 557.6	7.92	7.32	B3-200	20 918.0	10.65	11.42
400	A1-400	13 225.2	6.74	6.68	B1-400	20 774.4	10.58	11.09
400	A2-400	14 623.6	7.45	6.68	B2-400	21 149.2	10.77	11.09
400	A3-400	11 511.2	5.86	6.68	B3-400	23 411.6	11.92	11.09
600	A1-600	9 098.8	4.63	4.98	B1-600	15 800.0	8.05	9.58
600	A2-600	9 951.6	5.07	4.98	B2-600	21 469.6	10.93	9.58
600	A3-600	10 274.0	5.23	4.98	B3-600	19 183.2	9.77	9.58
800	A1-800	6 865.2	3.50	3.10	B1-800	10 516.8	5.36	5.22
800	A2-800	5 202.9	2.65	3.10	B2-800	10 014.0	5.10	5.22
800	A3-800	6 204.0	3.16	3.10	B3-800	10 204.8	5.20	5.22
1 000	A1-1000	2 662.8	1.36	1.46	B1-1000	3 352.8	1.71	1.73
1 000	A2-1000	2 347.2	1.20	1.46	B2-1000	2 958.0	1.51	1.73
1 000	A3-1000	3 560.4	1.81	1.46	B3-1000	3 874.8	1.97	1.73

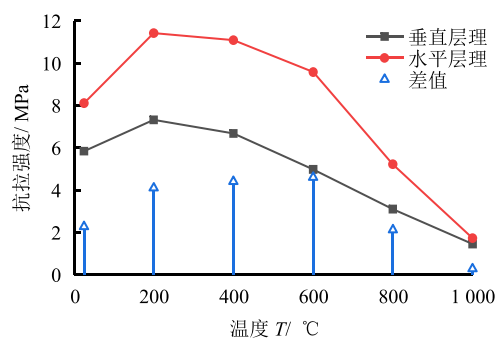
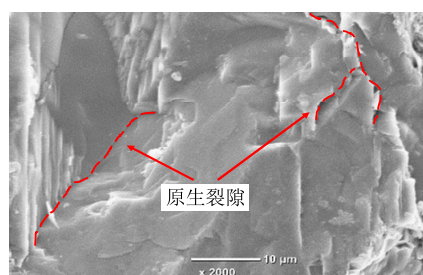


图 7 层理砂岩抗拉强度与温度的关系
Fig.7 Relationship between tensile strength and temperature of bedding sandstone

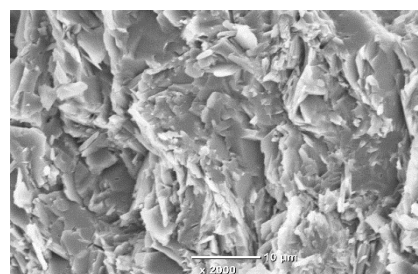
(2) 温度对层理的影响，层理的热损伤主要包括孔隙扩大、孔隙数量增加，胶结物质脱落等。25 °C 时，层理处矿物颗粒比较松散、破碎（见图 8(b)）；

200 °C 时，与 25 °C 相比出现了大孔隙（见图 8(d)）；400 °C 时，孔隙和裂隙的数量明显增加（见图 8(f)）；800 °C 时，可以看到胶状物质脱落（见图 8(h)）。

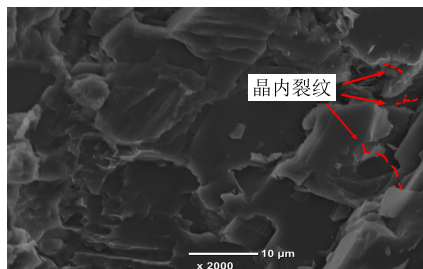
温度较低时（25~400 °C），基质部分主要表现为裂纹增多、长度延展，但晶体仍相对完整，对强度的影响有限，这与图 5 展现的水平层理砂岩抗拉强度影响规律一致；层理部分主要表现为孔隙数量的增多和尺度的增大，温度对层理的破坏程度更大。温度较高时（800 °C），基质中的石英发生相变^[23]、高岭土发生脱水^[24]，裂隙张开度增大，结构破坏严重；层理处的裂隙进一步发展，胶结物质脱落。两部分的破坏程度相近，因此在温度较高时，温度逐渐成为影响层理砂岩抗拉强度的主要因素，与图 7 中差值规律一致。



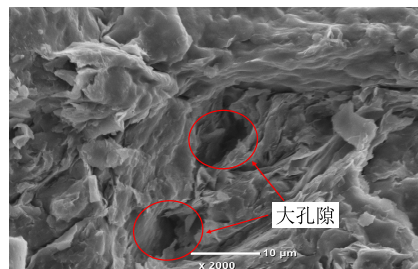
(a) T=25 °C(基质)



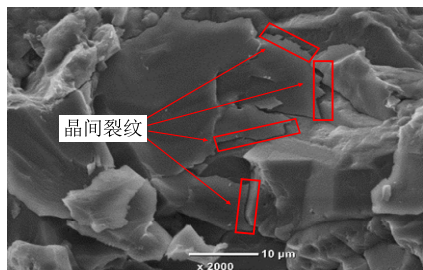
(b) T=25 °C(层理)



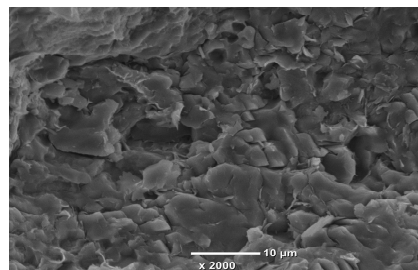
(c) T=200 °C(基质)



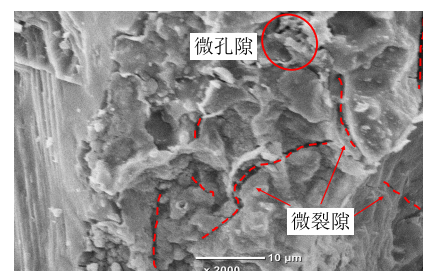
(d) T=200 °C(层理)



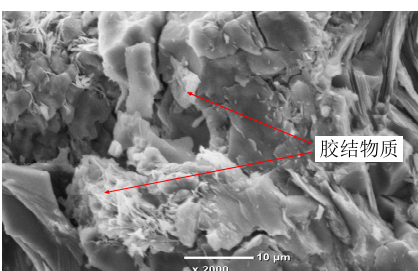
(e) T=400 °C(基质)



(f) T=400 °C(层理)



(g) T=800 °C(基质)



(h) T=800 °C(层理)

图 8 砂岩电镜扫描图片
Fig.8 Electron microscope scanning of sandstone

5 结 论

本文对 25~1 000 °C 热处理后含垂直和水平层理的砂岩进行了巴西劈裂试验, 并采用 DIC、SEM 等手段研究其应变演化和微观结构热损伤规律, 得出以下结论:

(1) 层理砂岩劈裂破坏前应变集中可以分为两种类型: 圆盘两端应变集中型 (≤ 400 °C) 和圆盘中央应变集中型 (> 400 °C)。

(2) 随着温度升高, 垂直和水平层理砂岩的抗拉强度均呈现出先增大后减小的趋势, 200 °C 时达到最大值, 分别为 7.32、11.42 MPa; 600~1 000 °C 时, 层理对砂岩抗拉强度的影响随温度升高逐渐降低, 800~1 000 °C 存在使得温度成为影响抗拉强度主要因素的阈值温度。

(3) 温度较低时, 基质主要表现为裂纹增多、长度延展, 但晶体仍相对完整; 层理主要表现为孔隙数量的增多和尺度的增大, 温度对层理的破坏程度更大。温度较高时, 微裂隙和微孔隙明显增加, 胶结物质脱落, 基质和层理破坏程度相近, 这也是热处理后, 砂岩应变演化和强度变化的主因。

参 考 文 献

- [1] 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(增刊 1): 2879-2887.
SU Hai-jian, JING Hong-wen, ZHAO Hong-hui, 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(Suppl.1): 2879-2887.
- [2] 邓华锋, 张吟钗, 李建林, 等. 含水率对层状砂岩劈裂抗拉强度影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2778-2787.
DENG Hua-feng, ZHANG Yin-chai, LI Jian-lin, et al. Effect of moisture content on splitting tensile strength of layered sandstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(11): 2778-2787.
- [3] YIN Peng-fei, YANG Sheng-qi. Experimental investigation of the strength and failure behavior of layered sandstone under uniaxial compression and Brazilian testing[J]. **Acta Geophysica**, 2018, 66(4): 585-605.
- [4] 刘运思, 傅鹤林, 饶军应, 等. 不同层理方位影响下板岩各向异性巴西圆盘劈裂试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 785-791.
- LIU Yun-si, FU He-lin, RAO Jun-ying, et al. Research on Brazilian disc splitting tests for anisotropy of slate under influence of different bedding orientations[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(4): 785-791.
- [5] 侯振坤, 杨春和, 郭印同, 等. 单轴压缩下龙马溪组页岩各向异性特征研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2541-2550.
HOU Zhen-kun, YANG Chun-he, GUO Yin-tong, et al. Experimental study on anisotropic properties of Longmaxi formation shale under uniaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(9): 2541-2550.
- [6] 邓华锋, 张小景, 张恒宾, 等. 巴西劈裂法在层状岩体抗拉强度测试中的分析与讨论[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 309-315, 336.
DENG Hua-feng, ZHANG Xiao-jing, ZHANG Heng-bin, et al. Analysis and discussion on Brazilian tests on layered rock tensile strength[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl.2): 309-315, 336.
- [7] 储超群, 吴顺川, 张诗淮, 等. 层状砂岩力学行为各向异性与破裂特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(8): 2232-2246.
CHU Chao-qun, WU Shun-chuan, ZHANG Shi-huai, et al. Mechanical behavior anisotropy and fracture characteristics of bedded sandstone[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2020, 51(8): 2232-2246.
- [8] 衡帅, 杨春和, 张保平, 等. 页岩各向异性特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 609-616.
HENG Shuai, YANG Chun-he, ZHANG Bao-ping, et al. Experimental research on anisotropic properties of shale[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 609-616.
- [9] SUN Qiang, ZHANG Wei-qiang, ZHU Yan-ming, et al. Effect of high temperatures on the thermal properties of granite[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2019, 52(8): 2691-2699.
- [10] GUO Qing-zhen, SU Hai-jian, LIU Jia-wei, et al. An experimental study on the fracture behaviors of marble specimens subjected to high temperature treatment[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2020, 225: 106862.
- [11] MENG Lu-bo, LI Tian-bin, LIAO An-jie, et al. Anisotropic mechanical properties of sandstone under unloading confining pressure at high temperatures[J]. **Arabian Journal for Science & Engineering**, 2018,

- 43(10): 5283-5294.
- [12] 张渊, 张贤, 赵阳升. 砂岩的热破裂过程[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3): 656-659.
- ZHANG Yuan, ZHANG Xian, ZHAO Yang-sheng. Process of sandstone thermal cracking[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2005, 48(3): 656-659.
- [13] 朱合华, 闫治国, 邓涛, 等. 3 种岩石高温后力学性质的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 1945-1950.
- ZHU He-hua, YAN Zhi-guo, DENG Tao, et al. Testing study on mechanical properties of tuff, granite and breccia after high temperatures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(10): 1945-1950.
- [14] 苏海健, 靖洪文, 赵洪辉. 高温后砂岩单轴压缩加载速率效应的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1064-1071.
- SU Hai-jian, JING Hong-wen, ZHAO Hong-hui. Experimental investigation on loading rate effect of sandstone after high temperature under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(6): 1064-1071.
- [15] 马建宏, 韦四江, 苏承东. 高温对弱黏结中砂岩物理力学性质的影响[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(1): 155-162.
- MA Jian-hong, WEI Si-jiang, SU Cheng-dong. Effect of high temperature on the mechanical properties of the sandstone physical weak bond[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2017, 34(1): 155-162.
- [16] 邓龙传, 李晓昭, 吴云, 等. 基于巴西劈裂试验的砂岩热损伤及声发射特征研究[J/OL]. 工程地质学报: 1-12 [2021-02-14]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-365>.
- DENG Long-chuan, LI Xiao-zhao, WU Yun, et al. Study on thermal damage of sandstone and acoustic emission based on Brazilian splitting test[J/OL]. **Journal of Engineering Geology**: 1-12[2021-02-14]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-365>.
- [17] NIKHIL N S, TRILOK N S, RANJITH P G. Thermal alterations in the poro- mechanical characteristic of an Indian sandstone-A comparative study[J]. **Engineering Geology**, 2017, 226: 208-220.
- [18] YANG S Q, HUANG Y H, TIAN W L, et al. Effect of high temperature on deformation failure behavior of granite specimen containing a single fissure under uniaxial compression[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2019, 52(7): 2087-2107.
- [19] 吴顺川, 郭沛, 张诗淮, 等. 基于巴西劈裂试验的花岗岩热损伤研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊 2): 3805-3816.
- WU Shun-chuan, GUO Pei, ZHANG Shi-huai, et al. Study on thermal damage of granite based on Brazilian splitting test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(Suppl.2): 3805-3816.
- [20] 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.
- SU Cheng-dong, GUO Wen-bing, LI Xiao-shuang. Experimental research on mechanical prosperities of coarse sandstone after high temperatures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(6): 1162-1170.
- [21] 金爱兵, 吴常贵, 赵怡晴, 等. 热处理对冻结砂岩物理力学性质的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(9): 2207-2214.
- JIN Ai-bing, WU Chang-gui, ZHAO Yi-qing, et al. Effect of heat treatment on physical and mechanical properties of frozen sandstone[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2019, 50(9): 2207-2214.
- [22] 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 DIC method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(2): 511-518.
- [23] 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 Zhi-zhen, XUE Lei, et al. Physico-mechanical properties variation of rock with phase transformation under high temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(5): 935-942.
- [24] 赵怡晴, 吴常贵, 金爱兵, 等. 热处理砂岩微观结构及力学性质试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 1-8.
- ZHAO Yi-qing, WU Chang-gui, JIN Ai-bing, et al. Experimental study on microstructure and mechanical properties of sandstone after heat treatment at high temperature[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(7): 1-8.
- [25] 王来贵, 张阳, 刘向峰, 等. 高温后砂岩抗拉强度及应变场演化实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018,

- 14(3): 57-64.
- WANG Lai-gui, ZHANG Yang, LIU Xiang-feng, et al. Experimental study on tensile strength and strain field evolution of sandstone after high temperature[J]. **Journal of Safety Science and Technology**, 2018, 14(3): 57-64.
- [26] 金爱兵, 王树亮, 王本鑫, 等. 基于 DIC 的 3D 打印交叉节理试件破裂机制研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 3862-3872.
- JIN Ai-bing, WANG Shu-liang, WANG Ben-xin, et al. Study on the fracture mechanism of specimens containing 3D-printed cross joint based on DIC technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(12): 3862-3872.
- [27] 伍天华, 周喻, 王莉, 等. 单轴压缩条件下岩石孔-隙相互作用机制细观研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊 2): 463-472.
- WU Tian-hua, ZHOU Yu, WANG Li, et al. Mesoscopic study of interaction mechanism between circular hole and fissures in rock under uniaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(Suppl. 2): 463-472.
- [28] ZEINAB A, ZHAO G F, ADRIAN R. R. Crack development in transversely isotropic sandstone discs subjected to Brazilian tests observed using digital image correlation[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2019, 119: 211-221.
- [29] ZEINAB A, ZHAO G F, ADRIAN R. R. Failure, crack initiation and the tensile strength of transversely isotropic rock using the Brazilian test[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2019, 122: 104073.
- [30] LI D Y, LI B, HAN Z Y, et al. Evaluation on rock tensile failure of the Brazilian discs under different loading configurations by digital image correlation[J]. **Applied Sciences**, 2020, 10(16): 5513.
- [31] 邓建华, 黄醒春, 彭结兵, 等. 膏溶角砾岩不同天然含水率情况下力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1203-1207.
- DENG Jian-hua, HUANG Xing-chun, PENG Jie-bing, et al. Mechanical properties of gypsum breccia with different water contents[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(8): 1203-1207.
-
- 上接第 3050 页
- [23] 张春生, 陈祥荣, 侯靖, 等. 锦屏二级水电站深埋大理岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1999-2009.
- ZHANG Chun-sheng, CHEN Xiang-rong, HOU Jing, et al. Research on mechanical properties of deep-buried marble at Jinping II Hydropower Station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(10): 1999-2009.
- [24] MARTIN C D. The strength of massive Lac du Bonnet granitic around underground opening[D]. Winnipeg: University of Manitoba, 1993.
- [25] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003-3010.
- XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. Rock strength and global failure criteria based on the principle of energy dissipation and release[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3003-3010.
- [26] 李景龙, 朱子涵, 蔚立元, 等. 大理岩峰前卸荷损伤表征及再承载破坏耗能特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2429-2438.
- LI Jing-long, ZHU Zi-han, WEI Li-yuan, et al. Unloading damage characterization and reloading failure energy dissipation characteristics of marble in front of peaks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(12): 2429-2438.
- [27] 黄达, 黄润秋, 张永兴. 粗晶大理岩单轴压缩力学特性的静态加载速率效应及能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 245-255.
- HUANG Da, HUANG Run-qiu, ZHANG Yong-xing. Experimental study on static loading rate effect and energy mechanism of uniaxial compression mechanical properties of coarse-grained marble[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(2): 245-255.
- [28] 马秋峰, 刘志河, 秦跃平等. 基于能量耗散理论的岩石塑性-损伤本构模型[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1210-1220.
- MA Qiu-feng, LIU Zhi-he, QIN Yue-ping, et al. Rock plasticity-damage constitutive model based on energy dissipation theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(5): 1210-1220.
- [29] 徐晓冬, 孙光华, 姚旭龙, 等. 基于能量耗散与释放的充填体失稳尖点突变预警模型[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 3003-3012.
- XU Xiao-dong, SUN Guang-hua, YAO Xu-long, et al. Early warning model of instability cusp mutation of backfill based on energy dissipation and release[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(9): 3003-3012.