

DOI:10.11918/202404068

CT 三维重构下砂岩热损伤机理及数值模拟验证

赵怡晴^{1,2}, 秦文静^{1,2}, 金爱兵^{1,2}, 李曦豪^{1,2}, 苏楠^{1,2,3}

(1. 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室(北京科技大学), 北京 100083;
2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 3. 北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211)

摘要: 在深部等复杂地质环境中, 岩石力学特性及损伤特性对高温工程的开展具有决定性影响, 为深入探究高温岩石的力学性能及其在受载过程中的损伤机理, 以不同温度(25、200、400、600、800 °C)作用后的黄砂岩为研究对象, 基于 X 射线断层扫描技术(CT)获取黄砂岩内部孔隙数据及三维模型, 分析黄砂岩孔隙率随温度变化规律, 结合数值模拟探究黄砂岩微裂纹演化规律及损伤机理, 从微观层面揭示高温作用下岩石热损伤机理。结果表明: 随温度升高, 黄砂岩总孔隙率呈二次函数形式增长, 面孔隙率均匀度随之降低; 黄砂岩产生热损伤的主要因素包括高温脱水、矿物成分热分解、矿物颗粒膨胀; 热分解及颗粒膨胀导致的孔隙率增加是造成热损伤的关键因素; 25~400 °C 阶段, 不同矿物颗粒膨胀挤压, 导致局部应力区域出现, 黄砂岩内部裂纹以晶间裂纹为主; 400~800 °C 阶段, 黄砂岩内部矿物成分相变、分解, 导致局部应力区域增大, 黄砂岩内部裂纹以晶内裂纹为主。以黄砂岩孔隙率定义损伤变量, 构建了热作用下黄砂岩损伤演化模型, 可为高温岩石力学的损伤机理研究提供理论基础和技术支撑。

关键词: 黄砂岩; CT 扫描; 三维重构; 微观结构; 热损伤

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2025)07-0012-10

Thermal damage mechanism and numerical simulation verification of sandstone by 3D reconstruction on CT images

ZHAO Yiqing^{1,2}, QIN Wenjing^{1,2}, JIN Aibing^{1,2}, LI Xihao^{1,2}, SU Nan^{1,2,3}

(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. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China)

Abstract: In complex geological environments such as deep layers, the mechanical and damage characteristics of rocks have a decisive impact on the development of high-temperature engineering. To further explore the mechanical properties of high-temperature rocks and their damage mechanisms under load, this study delves into yellow sandstone samples exposed to varying temperatures (25 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C). Based on X-ray tomography (CT) technology, obtain internal pore data and 3D model of yellow sandstone, analyze the variation law of porosity of yellow sandstone with temperature. Additionally, numerical simulations were executed to delve into the evolution of microcracks and the damage mechanisms inherent in yellow sandstone under distinct temperature conditions. This microscopic approach unveils the thermal damage mechanisms of rocks under high temperatures. Key findings include: as temperature rises, the total porosity of yellow sandstone follows a quadratic growth trend, accompanied by a decrease in pore distribution uniformity. The main factors of thermal damage in yellow sandstone include: high-temperature dehydration, thermal decomposition of mineral components, and expansion of mineral particles. The increase in porosity due to thermal decomposition and particle expansion is a key factor in thermal damage. Between 25–400 °C, differential expansion and compression of mineral grains generate localized stress zones, predominantly fostering intergranular cracks within yellow sandstone. In the 400–800 °C range, phase transitions and mineral component decomposition within yellow sandstone amplify these stress zones, favoring intragranular crack propagation. A damage evolution model of yellow sandstone under thermal action was constructed by defining the damage variable based on the porosity of yellow sandstone, which can provide theoretical basis and technical support for the study of damage mechanism in high-temperature rock mechanics.

Keywords: yellow sandstone; CT scan; 3D reconstruction; microscopic structure; heat damage

收稿日期: 2024-04-28; 录用日期: 2024-06-25; 网络首发日期: 2024-11-13

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20241113.0813.002>

基金项目: 国家自然科学基金(52174106); 国家重点研发计划(2022YFC2905102)

作者简介: 赵怡晴(1980—), 女, 教授, 博士生导师; 金爱兵(1974—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 金爱兵, jinaibing@ustb.edu.cn

国内外新型工业化建设对矿产及能源资源刚性需求巨大,且保持增长态势,随着地球浅部资源枯竭,深部资源探索及开发成为解决能源问题的必然趋势^[1-4]。深层地热环境下,岩体受高温带来的热应力作用会产生一定程度损伤,导致深部矿岩资源的开发和探索受阻,揭示热作用下岩石损伤机理成为推进深部岩石发展的关键科学问题,同时为深部岩石工程问题提供理论依据和数据支撑^[5]。

矿岩内部存在原生孔隙、裂隙、节理等缺陷结构,孔隙结构的不规则性对矿岩性能具有重要影响作用^[6-7],尤其受深部地热影响,其孔隙结构更为复杂。目前,观测岩石孔隙等内部微观结构的手段主要有高分辨X射线三维扫描系统(CT扫描)、扫描电镜(SEM)等^[8-9]。文献[10]利用SEM对高温后砂岩进行微观结构扫描,探究了孔隙率与岩石强度之间关系;文献[11]在此基础上结合了XRD试验,均发现温度通过影响孔隙率导致岩石强度降低。高温后岩石受损主要因素为岩石孔隙率变化,故观测高温后孔隙结构的变化情况为探究岩石热损伤演化规律的重点,文献[12-13]利用核磁共振(NMR)对不同温度作用下岩石进行观测,得出随温度增高、岩石总孔隙率逐渐增高为导致岩石强度降低的主要因素。文献[14]利用CT分析疲劳过程中盐岩细观孔隙演化特征,为本文技术手段选取提供了思路,相较于NMR而言,CT扫描可更直观观测岩石孔隙结构的变化情况^[15-17],故本文基于CT及XRD对高温后黄砂岩微观结构及矿物成分进行观测分析。

为进一步揭示热作用下岩石微观结构损伤机理,文献[18]对加热后砂岩进行SEM试验,认为高温岩石受损程度主要受矿物成分和成岩作用控制;文献[19]利用SEM、XRD及CT扫描对高温后砂岩微观结构和矿物成分进行分析,揭示了高温岩石孔隙率变化主要由内部矿物成分热分解所致,且突变点在600℃;文献[20-21]在此基础上,结合热重分析(TGA)和差热分析(DTA)等热分析,发现矿物成分在500℃后会产生高温脱水反应,也会对岩石孔隙结构造成损伤。岩石损伤演化分析方面,采用CT手段可更清晰揭示高温作用下岩石微观损伤演化机制^[22],文献[23]利用CT扫描系统对砂岩进行单轴和三轴压缩试验,揭示了砂岩在加载过程中的力学行为和内部损伤机制。文献[24]基于体积膨胀理论和扩展有限元法,采用数值模拟研究了混凝土的冻胀力演化规律和开裂行为。文献[25]基于数值模拟,建立高温-冷却后花岗岩等效模型,探

寻由矿物颗粒导致的岩石损伤机理。通过文献调研,发现鲜少有学者从微观层面对热作用后岩石的损伤演化进行分析,本文基于CT扫描,结合数值模拟从微观层面研究分析岩石热作用下损伤演化机制。

高温对岩石破坏为累计损伤过程,通过定义损伤变量可评估岩石损伤机理^[26-28],文献[29]利用CT技术获取冻融后岩石孔隙数据,基于损伤力学理论,以孔隙面积为损伤变量构建了损伤演化模型。文献[30]运用Weibull分布损伤模型方法,建立了不同饱和度砂岩的冻融荷载损伤变量演化曲线。文献[31]利用参与因子为损伤变量建立了倒S型损伤演化模型,且该模型与试验结果相一致。文献[32]结合统计学和损伤力学,同时引入损伤变量修正系数考虑岩石残余强度对峰后曲线的影响,建立了三轴压缩条件下岩石热力耦合统计损伤本构方程。文献[33]基于有效应力理论,引入Weibull分布函数,在微元体强度服从Hoek-brown准则的条件下,考虑残存强度影响,建立了高温作用下岩石损伤特征统计本构模型。

综上所述,可看出从微观层面对岩石热损伤演化机理进行研究分析的文章数量较少,本文以不同温度(25、200、400、600、800℃)作用后的黄砂岩为研究对象,基于X射线断层扫描技术(CT),分析黄砂岩孔隙率随温度变化规律,结合数值模拟从微观层面揭示高温作用下岩石热损伤机理,以孔隙率为损伤变量建立黄砂岩热损伤演化机制,以期对深部岩石研究提供思路和支撑。

1 试验

1.1 试样方案

根据陕西省地质调查院地质研究成果,陕西为干热岩资源优先研究靶区,以陕西汉中地区质地均匀的黄砂岩为试验对象,为保证试样均一性,5块试样均选自同一区域,将试样加工为高25mm、直径50mm的标准圆盘试样。将制备好的试验进行基础物理测试及XRD测定,该黄砂岩矿物成分主要包括石英、高岭石和云母,且纵波波速为2.962~2.980km/s。

将加工后的黄砂岩试样,使用型号为KSL-1200X的高温电阻炉将其分别进行200、400、600、800℃高温处理,仪器加热方式为电阻丝加热,防止砂岩加热过程中因温度变化过快产生热冲击,导致岩石发生热破裂,热处理加热速率为5℃/min;且为保证试样受热均匀,达到目标温度后在炉内恒温2h,将试样在炉内冷却至室温后取出,如图1所示。并在加温后再次对黄砂岩试样进行基础物理量测

试,结果见表 1,其中, m_0 为高温前试样质量, m_t 为高温后试样质量, Δm 为质量变化量, v_0 为高温前试样波速, v_t 为高温后试样波速, Δv 为波速变化量。

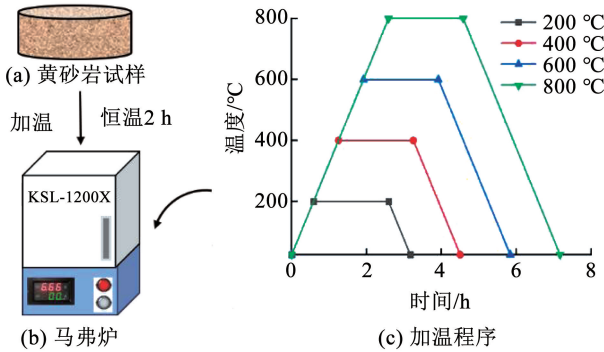


图 1 黄砂岩加温程序

Fig. 1 Heating program of yellow sandstone

表 1 不同温度下砂岩质量和纵波波速测试值

Tab.1 Fractal dimension of sandstone pores at different temperatures

$T/^\circ\text{C}$	m_0/g	m_t/g	$\Delta m/\%$	$v_0/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_t/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta v/\%$
25	111.20	111.20	—	2.976	2.976	—
200	109.85	109.53	0.29	2.970	2.944	0.88
400	110.25	109.48	0.69	2.962	2.840	4.12
600	110.35	98.22	10.99	2.968	2.232	24.80
800	111.30	93.875	14.90	2.975	1.953	34.35

1.2 微观检测试验

为探究岩石内部裂隙分布及裂纹扩展演化规律,将高温处理后黄砂岩进行高分辨 X 射线三维扫描采集。CT 试验仪器设备为高分辨 X 射线三维扫描系统天津三英 Nano Voxel-3502E,CT 扫描系统包括放射源、探测器、转台及定位装置,如图 2 所示。为获取较好扫描数据,通过计算机系统调整设置射线源与样品台间的距离(SOD)为 140 mm,探测器与样品台间的距离(SDD)为 541.36 mm;采用螺旋锥束 CT 成像模式进行试样扫描。根据试验需求,设置仪器扫描电压和电流分别为 160 kV、40 μA ,分辨率为 37.79 μm ,扫描尺寸为 25 mm \times 50 mm,最大曝光时间为 0.3 s,扫描帧数为 1 080 p。

2 CT 三维重构及结果分析

2.1 CT 扫描三维重构

CT 探测器接收到各个物质信号输出至计算机

控制系统,根据投影图像求解得试样各个截面的二维重构图像,后根据各点对 X 射线的线性衰减系数按比例转化为灰度图像,此时灰度图像为含噪图像,如图 3 中 2D CT 切片所示;二维灰度图像不断叠加,经过滤波处理最终形成图 3 中的三维扫描图像。

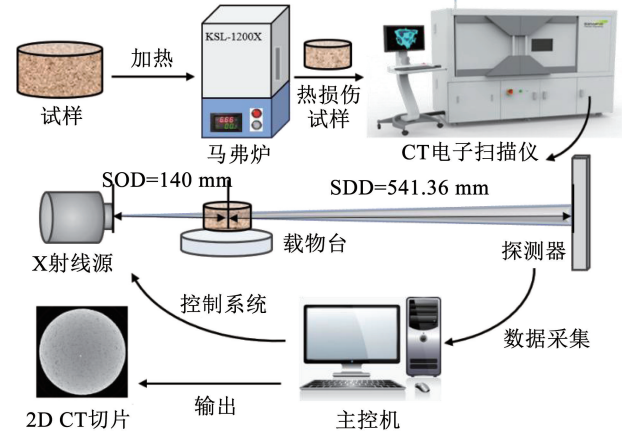


图 2 高分辨 X 射线三维扫描系统

Fig. 2 High resolution X-ray three-dimensional scanning system

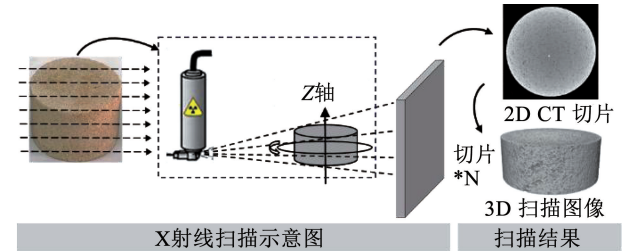


图 3 CT 扫描原理

Fig. 3 Principles of CT scanning

为抑制和消除成像过程中产生的噪声,提高数字图像质量,本文采用中值滤波法对黄砂岩 CT 含噪图像进行滤波处理,该处理技术可克服线性滤波导致的图像细节模糊问题。中值滤波处理过程相当于对二维数据序列的滤波,达到除噪目的,如图 4(a)中中值滤波原理所示;降噪后需基于阈值分割技术,根据图像灰度、颜色、纹理等特征将图像划分为互不交叠的区域,区域间明显的差异性便于三维网络模型重构和数据分析。采用 T 内置 Otsu 算法进行阈值分割构建黄砂岩孔隙识别图像,如图 4 中处理后的 CT 切片所示,观察可知,相较于原始切片重构的切片可更清晰展示试样的内部结构;后通过对黄砂岩二维切片进行叠加构建出精确的黄砂岩孔隙结构三维模型,如图 4(d)所示。

2.2 黄砂岩微观结构分析

2.2.1 不同温度下黄砂岩面孔隙率变化规律

为清晰展示黄砂岩试样内部孔隙结构,对不同温度作用下黄砂岩切片的孔隙率进行分析,如图 5 所示。

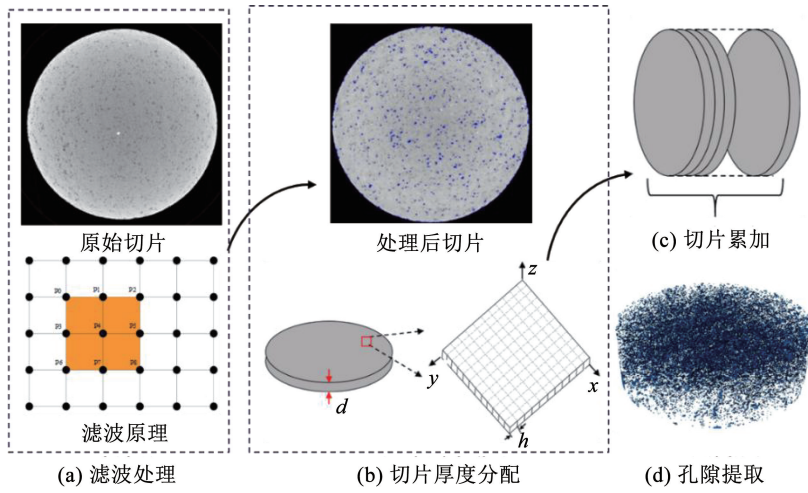


图 4 三维重构流程

Fig. 4 3D reconstruction process

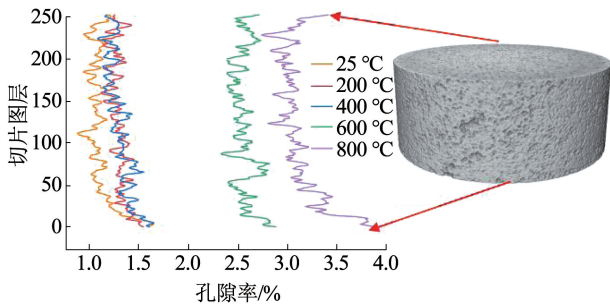


图 5 不同温度砂岩各轴向切片上的孔隙率

Fig. 5 Porosity on axial slices of sandstone at different temperatures

所有工况下黄砂岩切片上下边缘处孔隙率明显大于中间部分孔隙率, 原因为试样在升温过程中受热不均, 导致试样上下边缘受损程度高于试样中间部分。且随着温度升高, 裂隙最先从岩石外部产生, 由外而内传导, 导致微裂纹扩展发育, 说明温度是导致高温砂岩孔隙率增大以及微裂隙贯通扩展的根本原因。

2.2.2 不同温度下砂岩总孔隙率变化规律

岩石孔隙率为表征岩石孔隙结构最基本的物理量, 为研究不同温度下黄砂岩的孔隙率变化规律, 利用式(1)计算试样孔隙率:

$$\varphi = \frac{V_p}{V_T} \quad (1)$$

式中: φ 为砂岩试件总体孔隙率, V_p 为三维孔隙模型中微结构的体积, V_T 为三维孔隙模型体积。

经过计算得不同温度下黄砂岩的总孔隙率数据见表 2。通过拟合得出温度与黄砂岩孔隙率函数关系式:

$$P = 4.009T^2 - 3.709T + 1.199 \quad (2)$$

式中: P 为岩石孔隙率; T 为岩石温度, $^{\circ}\text{C}$; $R^2 = 0.909$ 。

结合表 2 和图 6 可知, 随着温度逐渐升高, 黄砂岩总孔隙率近似呈二次函数增长, 在 200 ~ 400 $^{\circ}\text{C}$ 之间, 孔隙率变化率仅为 0.57%; 在 400 ~ 600 $^{\circ}\text{C}$ 之间孔隙率增加速度最快, 孔隙变化率约 90.56%, 即黄砂岩在 600 $^{\circ}\text{C}$ 时受损严重, 为试样劣化突变点。

表 2 不同温度砂岩孔隙率及其变化规律曲线

Tab. 2 Porosity and its variation curve of sandstone at different temperatures

$T/^{\circ}\text{C}$	$P/\%$	$\Delta P/\%$
25	1.182	—
200	1.401	18.53
400	1.409	0.57
600	2.685	90.56
800	3.384	26.03

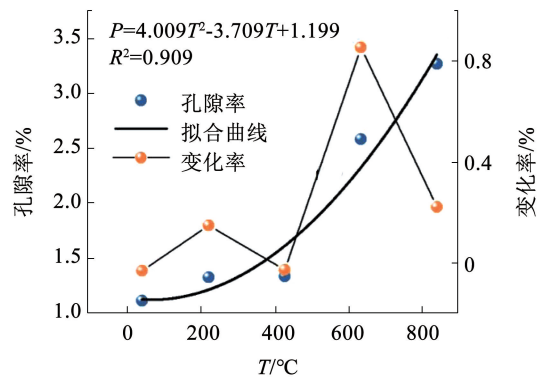


图 6 孔隙率及其变化率随温度变化曲线

Fig. 6 Porosity and its rate of change as a function of temperature

2.2.3 高温作用后黄砂岩分形维数变化

分形维数为度量岩体复杂性和不规则性的重要指标依据, 本文中采用计盒算法对砂岩孔隙分形维数。将 $M \times M$ 的图像所在平面划分为 $R \times R$ 的网格, 高度 L 方向以 $R \times L/M$ 为单位进行网格划分, 即

得到“盒子”;在 $R \times R$ 网格内找出灰度最大值 b 和灰度最小值 u ,则可以覆盖网格的盒子数为

$$n_L(i, j) = u - b + 1 \quad (3)$$

对覆盖所有 $R \times R$ 网格的盒子数求和,即

$$N_L = \sum_{i,j} n_L(i, j) \quad (4)$$

则分形维数值为式(5),计算结果为表 3。

$$D = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\log N_L}{\log L^{-1}} \quad (5)$$

通过计算得表 3 不同温度下黄砂岩孔隙分形维数,观察可得:随着温度升高,黄砂岩孔隙分形维数先升高后下降,且在 600 °C 时达到最高。25 °C 黄砂岩孔隙分形维数最低,即常温状态下砂岩孔隙结构

表 3 不同温度下砂岩孔隙分形维数

Tab.3 Fractal dimension of sandstone pores at different temperatures

$T/^\circ\text{C}$	分形维数	Δ 分形维数/%
25	1.89	—
200	2.21	16.93
400	2.32	4.98
600	2.76	18.97
800	2.53	8.33

均质性高;由于黄砂岩中矿物物质在 400 ~ 600 °C 之间发生化学物质相变和颗粒膨胀等变化,导致砂岩孔隙结构受损,从而孔隙结构产生劣化;当温度达到 800 °C,砂岩内部孔隙结构继续受损,孔隙率增高,但由于分形维数还受裂隙分布等的影响,故分形维数有所下降。

2.3 黄砂岩微裂纹演化规律

通过 CT 扫描三维重构分析,得不同温度下黄砂岩孔隙结构剖面图和三维模型,如图 7 所示,可看出随着温度升高,砂岩内部孔隙也随之增加。常温状态下(图 7(a)、7(b)),黄砂岩体内存在固有孔裂隙等缺陷结构,此为导致试样劣化损伤的基础;从剖面图可看出黄砂岩此时孔隙分布较为均匀。如图 7(c)~7(f)所示,升温至 200 ~ 400 °C 时,砂岩微裂纹发育萌生,孔隙分布不均匀,出现边缘多、中间少的现象,说明此阶段砂岩内部结构从试样边缘最先出现损伤,但损伤程度不高。如图 7(g)、7(h)所示,升温至 600 °C 时,砂岩内部结构变化,开始出现大量裂纹,产生严重劣化损伤。如图 7(i)、7(j)所示,升温至 800 °C 时,热应力从外向内传导,砂岩新生孔隙主要发生在试样边缘,且孔隙分布极度不均匀,此规律与黄砂岩孔隙率数据所得一致。

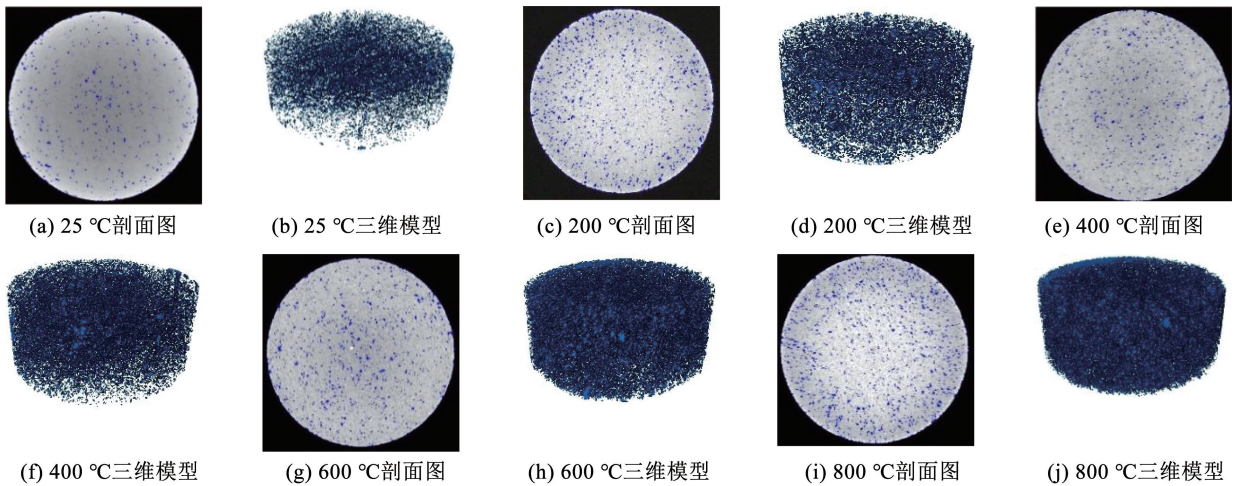


图 7 不同温度砂岩孔隙结构剖面图和三维模型

Fig. 7 Profile forms and three-dimensional models of pore structure in sandstone at different temperatures

3 热损伤机理分析

3.1 热损伤因素分析

为进一步探究砂岩热损伤机理,从热反应中物理化学反应角度对高温后黄砂岩变化情况进行分析。经检测常温下黄砂岩试样主要矿物成分为石英(SiO_2)、高岭石($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、云母,含量(质量分数)分别为 44%、21%、35%,得各矿物成分

随温度变化曲线如图 8(b) 所示。根据图 8 中黄砂岩质量、纵波波速及各个主要矿物含量随温度变化情况分析黄砂岩热损伤因素。

3.1.1 高温脱水反应

在常温状态下,黄砂岩内部通常含有自由水及结构水两种类型,随着温度开始升高,砂岩内部水分(自由水)沿砂岩孔隙等通道逸出,主要发生在 100 °C,导致黄砂岩质量降低。

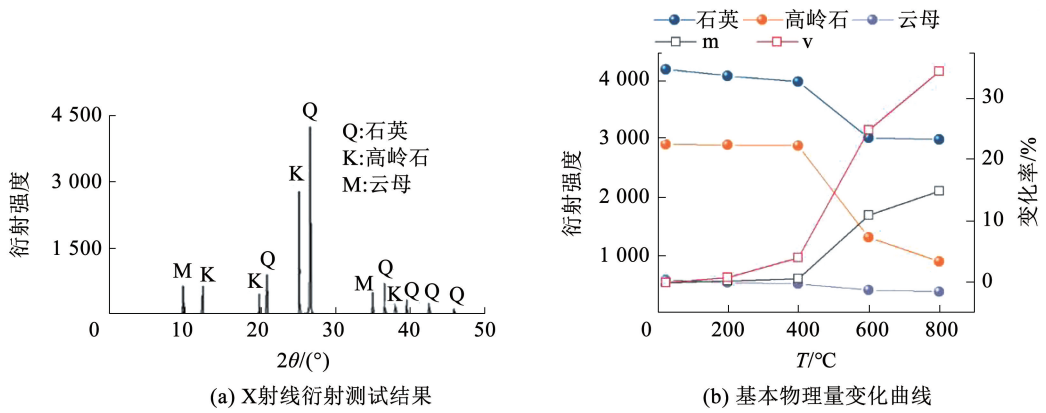
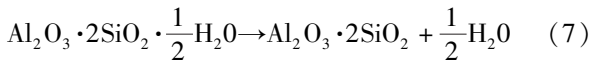
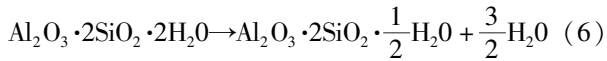


图8 黄砂岩矿物成分及物理量随温度变化情况

Fig. 8 The variation of mineral composition and physical quantities of yellow sandstone with temperature

结构水通常以 OH⁻ 形式赋存于矿物晶格中, 温度为 100 ~ 800 °C 阶段, 矿物成分会产生脱水反应, 当温度达到 480 °C 时, 高岭石经脱水反应转变为偏高岭石 (Al₂O₃·2SiO₂), 化学方程式为式(6)、(7)^[12]。



3.1.2 矿物热分解

由于高岭石在脱水反应过程中, 分解为偏高岭石 (Al₂O₃·2SiO₂), 主要为热分解反应, 此时导致砂岩晶格遭受破坏, 颗粒结构失稳, 微观表现为裂隙发育扩展, 是黄砂岩在 600 °C 时孔隙率急剧增高的主要原因之一。

3.1.3 矿物成分膨胀

岩石为不同矿物颗粒组成的非均质体, 随温度

升高, 岩石体内矿物颗粒在不同温度情况下随之膨胀, 黄砂岩体内主要膨胀矿物为石英。石英晶体在 573 °C 发生相变, 由 α - 石英转变为 β - 石英, 矿物体积快速膨胀, 石英颗粒周围受应力破坏导致大量孔裂隙发育, 形成晶间裂隙和晶内裂隙。

3.2 数值模拟研究

3.2.1 数值模拟方案

为明确黄砂岩内部损伤机理, 采用 PFC 模拟黄砂岩热损伤过程, 过程如图 9 所示。利用 PFC 研究岩石力学特性时广泛采用平行黏结模型 (PBM), 如图 9(a) 所示, 该模型能较好地传递法向及切向应力, 通过标定细观参数, 可以模拟岩石宏 - 细观力学行为, 故采用平行黏结模型来模拟砂岩热损伤下宏细观破裂特征, 如图 9(b) 所示。

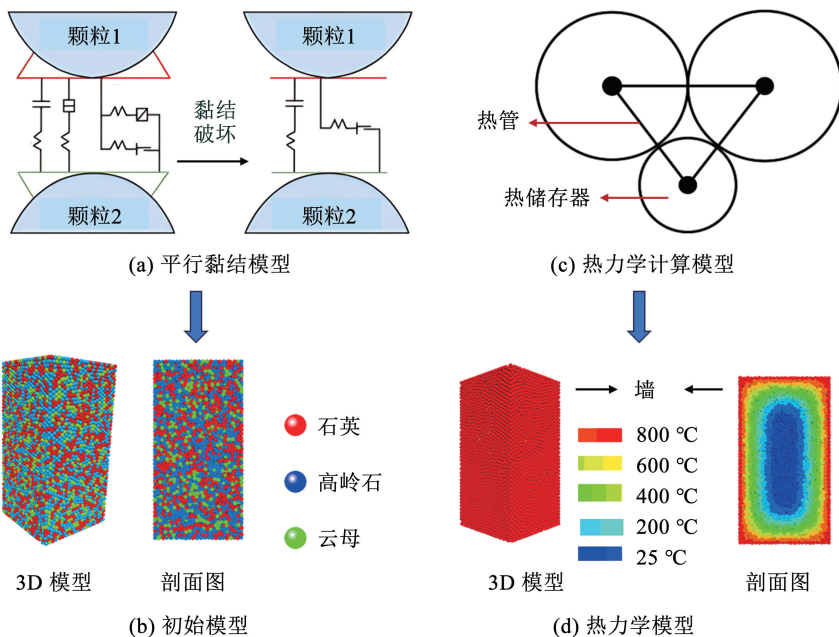


图9 黄砂岩 PFC 模型构建

Fig. 9 Construction of PFC model for yellow sandstone

对于高温下岩石矿物的化学变化和微裂隙产生过程的模拟亦是通过对颗粒间平行键所携带矢量力的法向分量变化来等效的,即不同温度下通过 PFC 热计算模块使模型具有不同的黏结力,从而使其强度发生变化,以此来等效矿物相变、膨胀等导致的岩石应力变化。采用 PFC3D 中内置热传导及热存储模型,如图 9(c) 所示,可同时模拟由温度导致的位移和应力变化。连续体中的热传导所涉及的变量为温度和热流矢量。通过“ball thermal attribute temperature”命令将温度赋予模型颗粒,并通过“contact. thermal. activate”和“contact. thermal. inhibit”命令来控制模型热接触点激活和关闭。设置相关颗粒物理及模型黏结参数,其中,颗粒半径、颗粒粒径比、颗粒密度、颗粒摩擦系数分别为 0.10 ~ 0.15 mm、1.50、2 300 kg/m³、0.50,孔隙度、刚度比、平行黏结模量、局部阻尼系数分别为 1.18、1.30、5 GPa、0.70,岩石导热系数为 5.91 W·m⁻¹·K⁻¹。最终建立黄砂岩热损伤模型如图 9(d) 所示。模型包括石英(Q)、高岭石(K)、云母(M)3种矿物成分,石英、高岭石、云母的热膨胀系数分别为 1.37 × 10⁻⁴ K⁻¹、0.53 × 10⁻⁴ K⁻¹、2.80 × 10⁻⁴ K⁻¹。

3.2.2 数值模拟结果

根据上述模拟方案对不同温度作用下的砂岩进行高温损伤模拟试验,共 4 个温度层 25、200、400、600、800 °C,根据试验结果对高温前后黄砂岩孔隙率变化率、热应力和微裂纹进行规律分析。

图 10(a) 为不同温度加热下微裂纹数量及孔隙率变化规律,随温度升高,微裂纹数量和孔隙率均呈非线性增长,此规律与室内实验中规律一致,故可验证数值模型的有效性。由图 10(b) ~ 10(e) 可看出裂纹发育位置,在 25 ~ 400 °C 时,裂纹主要发生在各个矿物颗粒之间,主要原因为颗粒之间的膨胀挤压,导致石英-高岭石(Q-K)、高岭石-云母(K-M)、云母-石英(M-Q)晶间裂纹产生。在 400 ~ 800 °C 时,主要发生在石英-石英(Q-Q)、高岭石-高岭石(K-K)、

云母-云母(M-M)之间的晶内裂纹。图 11 为各阶段热应力分布云图,随着温度升高,砂岩应力区域逐渐形成,且首先出现在试样边缘,从边缘向内部扩展。在 25 ~ 400 °C 时,矿物颗粒产生不同程度的膨胀变形,砂岩局部发生热应力变化,当应力超过黏结强度时,黏结断裂产生裂纹,导致砂岩模型损伤失效,主要黏结键为 Q-K、K-M、M-Q。在 400 ~ 800 °C 时,热应力区域逐渐增加,主要断裂黏结键为 Q-Q、K-K、M-M,如图 11(e)、11(f) 所示。

3.3 黄砂岩热损伤机理分析

图 12、13 分别为黄砂岩损伤演化和损伤机理。在 25 ~ 400 °C 时孔隙率变化率分别为 18.53%、0.57%,损伤程度较小,主要的反应有:黄砂岩内部水分(自由水)沿砂岩孔隙等通道逸出,导致质量烧失;部分矿物热膨胀挤压导致孔裂隙挤压破裂,阻碍波速传导,孔隙率及纵波波速同时降低,形成应力集中区域萌生新孔裂隙,如图 13(a) 所示。在 400 ~ 600 °C 时孔隙率变化率为 90.56%,此时损伤程度加剧,主要的反应有:高岭石热分解为偏高岭石且存在脱水反应、石英相变膨胀,两者反应共同作用下,产生大面积应力集中区域,造成晶内裂隙和晶间裂隙萌生,导致试样受损严重,如图 13(b) 所示。在 600 ~ 800 °C 时孔隙率变化率为 26.03%,矿物继续发生热分解及热膨胀,使损伤增长,导致孔裂隙之间相互贯通连接,如图 13(c) 所示。

3.4 黄砂岩热损伤定量分析

损伤力学认为岩石破坏过程的本质是有效微单元数量的减少,导致材料损伤程度的逐渐增加。热损伤主要是由于高温作用下,岩石内部细观孔裂隙的发育萌生所致,即黄砂岩在高温作用下,其孔隙率的变化为导致试样损伤的主要影响因素。因此,本文利用孔隙率定义损伤变量 D 来表征高温作用下黄砂岩的损伤程度,即

$$D = 1 - \left(\frac{P_0}{P_T} \right)^2 \quad (8)$$

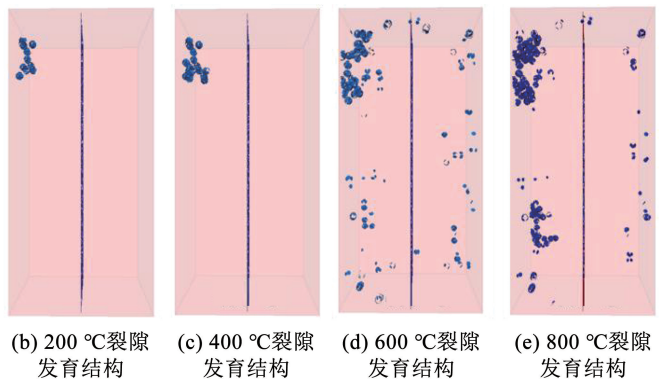
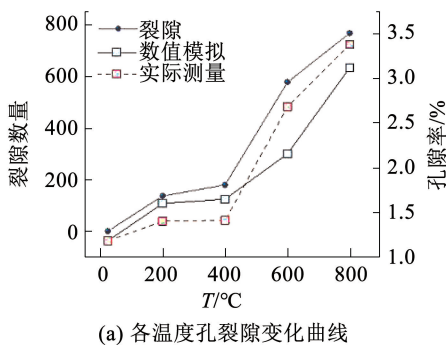


图 10 数值模拟各温度下孔裂隙变化趋势

Fig. 10 Numerical simulation of the variation trend of pore cracks at different temperatures

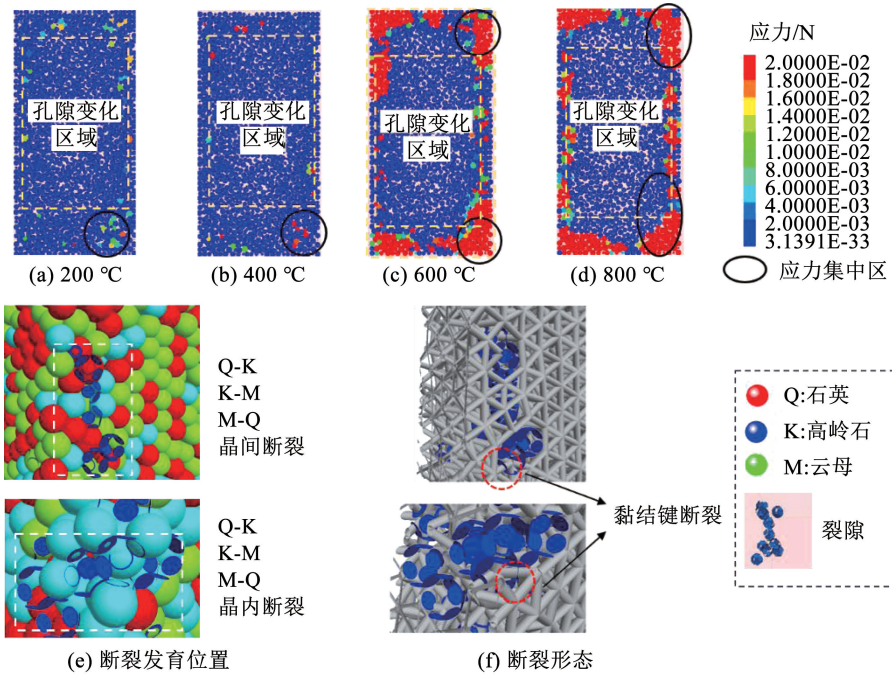


图 11 数值模拟各温度下热应力变化趋势

Fig. 11 Numerical simulation of the trend of thermal stress changes at different temperatures

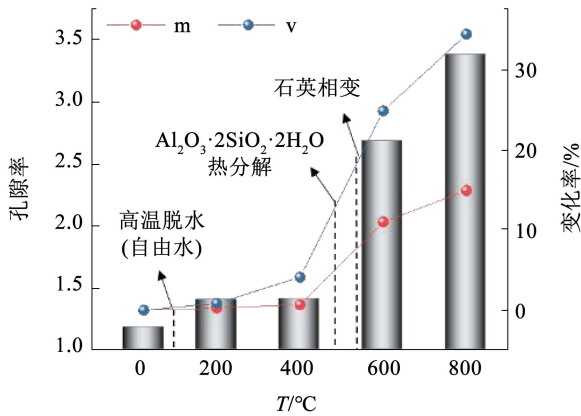


图 12 各阶段黄砂岩损伤演化

Fig. 12 Damage evolution of yellow sandstone in each stage

式中: D 为高温下黄砂岩损伤值; P_0 为常温下岩石孔隙率; P_T 为升温后岩石孔隙率。计算得图 14 为黄砂岩损伤演化曲线, 随着温度升高, 黄砂岩损伤值随之不断增加, 这是由于热损伤作用下, 导致黄砂岩内部孔裂隙扩展、贯通所致, 但损伤值始终在 $[0, 1]$ 之内, 拟合曲线为

$$D = 1.37 \exp \frac{x}{1648.63} \quad (9)$$

观察图 14 可得, 加载过程中试样损伤变量随温度变化曲线可直观表达岩石损伤 3 个阶段: 阶段 I 为初始损伤阶段, 此时微裂纹发育, 损伤程度较小; 阶段 II 为损伤发展阶段, 此时 $D > 0.5$, 岩石受温度影响, 矿物成分大量分解膨胀, 试样劣化严重; 阶

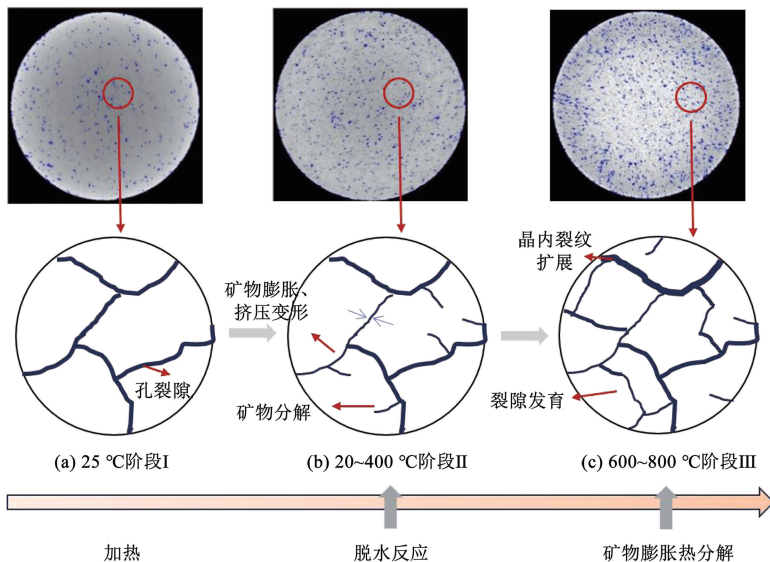


图 13 各阶段黄砂岩损伤机理

Fig. 13 Damage mechanism of yellow sandstone in different stages

段Ⅲ为损伤破坏阶段,此时损伤程度超过 80%,直至 D 达到 1 则判定岩石损伤破坏。

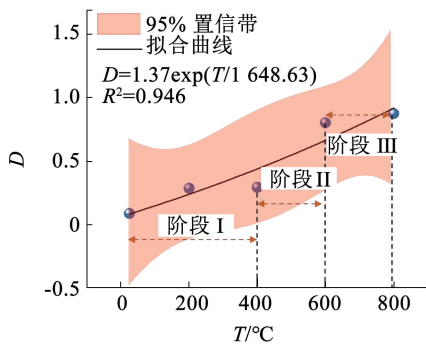


图 14 黄砂岩损伤演化曲线

Fig. 14 Damage evolution curve of yellow sandstone

4 结 论

本文利用高分辨 X 射线三维扫描系统(CT),结合数值模拟试验,分析不同温度下黄砂岩孔隙率、裂纹发育数量随温度变化规律,揭示热作用下黄砂岩损伤机理,构建黄砂岩热损伤演化模型,得出如下结论:

1) 随温度升高,总孔隙率呈二次函数形式增长,相关函数关系式为 $P = 4.009T^2 - 3.709T + 1.199$;面孔隙率均匀度随之降低。

2) 黄砂岩产生热损伤的主要因素包括高温脱水、矿物成分热分解、矿物颗粒膨胀。热分解及颗粒膨胀导致的孔隙率增加是造成砂岩热损伤的关键因素。

3) 在 25 ~ 400 °C 阶段,不同矿物颗粒膨胀挤压,导致局部应力区域出现,黄砂岩内部裂纹以晶间裂纹为主;在 400 ~ 800 °C 阶段,黄砂岩内部矿物成分相变、分解,导致局部应力区域增大,黄砂岩内部裂纹以晶内裂纹为主。

4) 构建了以黄砂岩孔隙率作为损伤变量的构建热损伤下黄砂岩损伤演化模型,整体呈下凹型上升,且 800 °C 时未达到完全损伤。

本文为高温岩石损伤机理及损伤演化规律提供理论基础及研究思路,以为地热资源开发、深井工程及隧道工程失火灾后重建等高温岩体工程设计提供有意义的参考。

参考文献

[1] WANG Peitao, MA Chi, CAI Meifeng. Relationships between rock ultrasonic properties with loading stresses and challenges in deep mining[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(11): 3737. DOI:10.1007/s11771-023-5473-7

[2] ZHANG Weiqiang, SUN Qiang, HAO Shuqing, et al. Experimental study on the variation of physical and mechanical properties of rock after high temperature treatment[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 98: 1297. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2016.01.010

[3] 何满潮, 武毅艺, 高玉兵, 等. 深部采矿岩石力学进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 75
HE Manchao, WU Yiyi, GAO Yubing, et al. Research progress of rock mechanics in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 75. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2023.1400

[4] HE Manchao, WANG Qi. Rock dynamics in deep mining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, 33(9): 1065. DOI:10.1016/j.ijmst.2023.07.006

[5] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 1
XIE Heping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 1. DOI:10.15961/j.jsuese.201700025

[6] ZHAO Yiqing, QIN Wenjing, JIN Aibing, et al. Research and analysis of the impact of the pore structure on the mechanical properties and fracture mechanism of sandstone[J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 107753. DOI:10.1016/j.mtcomm.2023.107753

[7] SONG Cheng, FENG Guorui, BAI Jinwen, et al. Progressive failure characteristics and water-induced deterioration mechanism of fissured sandstone under water-rock interaction[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 128: 104151. DOI:10.1016/j.tafmec.2023.104151

[8] ZHANG Fan, ZHAO Jianjian, HU Dawei, et al. Laboratory investigation on physical and mechanical properties of granite after heating and water-cooling treatment[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51: 677. DOI:10.1016/j.ijstr.2018.05.026

[9] YU Jin, CHEN Shaojie, CHEN Xu, et al. Experimental investigation on mechanical properties and permeability evolution of red sandstone after heat treatments[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2015, 16: 749. DOI:10.1631/jzus.A1400362

[10] 徐浩淳, 金爱兵, 赵怡晴, 等. 高温层理砂岩劈裂力学特性及裂隙演化研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 3069
XU Haochun, JIN Aibing, ZHAO Yiqing, et al. Experimental studies on split mechanical properties and fracture evolution behavior of bedding sandstone after high-temperature treatment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(11): 3069. DOI:10.16285/j.rsm.2021.0261

[11] VIDANA P S, GRATCHEV I. Engineering properties of sandstone heated to a range of high temperatures[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(3): 2415. DOI:10.1007/s10064-020-02065-6

[12] 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): 2233
ZHAO Yiqing, WU Changgui, JIN Aibing, et al. Experimental study of sandstone microstructure and mechanical properties under high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2233. DOI:10.16285/j.rsm.2019.1436

[13] 赵亚永, 魏凯, 周佳庆, 等. 三类岩石热损伤力学特性的试验研究与细观力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 142
ZHAO Yayong, WEI Kai, ZHOU Jiaqing, et al. Laboratory study and micromechanical analysis of mechanical behaviors of three thermally damaged rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 142. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2015.1750

- [14] WANG Junbao, LIU Xiao, ZHANG Qiang, et al. Fatigue properties and damage constitutive model of salt rock based on CT scanning [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 34(2): 245. DOI:10.1016/j.ijmst.2024.01.002
- [15] PROMENTILLA M A B, SUGIYAMA T. X-ray microtomography of mortars exposed to freezing-thawing action[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2010, 8(2): 97. DOI:10.3151/jact.8.97
- [16] RENARD F, BERNARD D, DESRUES J, et al. 3D imaging of fracture propagation using synchrotron X-ray microtomography[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 286(1/2): 285. DOI: 10.1016/j.epsl.2009.06.040
- [17] RAYNAUD S, VASSEUR G, CÉLÉRIER B, et al. Experimental study of the relation between the permeability of kaolinite and its deformation at micro and macro scale[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(4): 559. DOI: 10.1016/j.ijmms.2010.04.007
- [18] KEPPERT M, FÖRT J, TRNÍK A, et al. Behavior of sandstones under heat treatment[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2017, 38: 1. DOI:10.1007/s10765-017-2191-0
- [19] 王刚, 郑金叶, 刘义鑫, 等. 不同温度作用下砂岩微观结构变化与演化规律实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(3): 600
WANG Gang, ZHENG Jinye, LIU Yixin, et al. Experimental study on the microstructure change and evolution law of sandstone under different temperatures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(3): 600. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2023.0681
- [20] SIRDESAI N N, MAHANTA B, RANJITH P, et al. Effects of thermal treatment on physico-morphological properties of Indian fine-grained sandstone [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78: 883. DOI:10.1007/s10064-017-1149-6
- [21] 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
ZHANG Yi, LI Gao, WANG Xiyong, 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. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2021.0135
- [22] YU Qinglei, LIU Hongyuan, YANG Tianhong, et al. 3D numerical study on fracture process of concrete with different ITZ properties using X-ray computerized tomography[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2018, 147: 204. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2018.05.026
- [23] YANG Shengqi, RANJITH P G, GUI Yilin. Experimental study of mechanical behavior and X-ray micro CT observations of sandstone under conventional triaxial compression[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, 38(2): 179. DOI:10.1520/GTJ20140209
- [24] ZHOU Yun, TAN Xianjun, YANG Diansen, et al. A numerical method to consider the interaction between multiple fractures in frozen rocks based on XFEM[J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 169: 106240. DOI:10.1016/j.compgeo.2024.106240
- [25] BU Mohua, ZHANG Peng, GUO Pingye, et al. Deterioration of equivalent thermal conductivity of granite subjected to heating-cooling treatment[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, 16(10): 4229. DOI:10.1016/j.jrmge.2023.11.014
- [26] ZHENG Fu, JIANG Annan, JIANG Tengfei, et al. Study on mechanical characteristics and damage model of layered sandstone after high temperature action [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 19: e02601. DOI:10.1016/j.cscm.2023.e02601
- [27] SHEN Mingxuan, ZHAO Yu, BI Jing, et al. Softening properties and damage evolution of the preloaded building sandstone after exposure to high-temperature [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 414: 134970. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134970
- [28] LIU Hui, YANG Gengshe, YUN Yehui, et al. Investigation of sandstone mesostructure damage caused by freeze-thaw cycles via CT image enhancement technology[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 1. DOI:10.1155/2020/8875814
- [29] XIAO Jianqing, DING Dexin, JIANG Fuliang, et al. Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(3): 461. DOI:10.1016/j.ijmms.2009.11.003
- [30] 宋勇军, 杨慧敏, 谭皓, 等. 冻融环境下不同饱和度砂岩损伤演化特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(8): 1513
SONG Yongjun, YANG Huimin, TAN Hao, et al. Study on damage evolution characteristics of sandstone with different saturations in freeze-thaw environment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(8): 1513. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0089
- [31] WANG Zhi, YANG Yuxiang, QIN Wenjing, et al. Experimental investigation on the effect of alkaline environment on the mechanical properties of aggregate rock[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 35: 105867. DOI:10.1016/j.mtcomm.2023.105867
- [32] XU Xiaoli, KARAKUS M, GAO Feng, et al. Thermal damage constitutive model for rock considering damage threshold and residual strength[J]. *Journal of Central South University*, 2018, 25(10): 2523. DOI:10.1007/s11771-018-3933-2
- [33] 贾宝新, 陈国栋, 刘丰溥. 高温下岩石损伤本构模型及其验证[J]. *岩土力学*, 2022, 43(增刊2): 63
JIA Baoxin, CHEN Guodong, LIU Fengpu. Damage constitutive model of rock under high temperature and its verification. *Rock and Soil Mechanics* [J]. 2022, 43(Sup. 2): 63. DOI:10.16285/j.rsm.2021.1973