

煤火烧变作用下砂岩力学性能研究

刘佳洪, 李海鉴*, 周彩雯

新疆大学地质与矿业工程学院 新疆乌鲁木齐

【摘要】针对煤田火区治理过程中发生的边坡垮落、塌陷等灾害问题,以新疆乌鲁木齐淮南矿区煤系砂岩为研究对象,开展了 25–1200°C 高温试验,运用 X 射线衍射 (XRD) 和单轴压缩试验等方法,重点分析了温度对煤田火区砂岩矿物组分和力学性能的影响规律。研究表明:温度对砂岩矿物组成具有显著影响,从而导致砂岩的力学性能发生改变。随着烧变温度的上升,砂岩的峰值应力、峰值应变、弹性模量总体变化同步,呈现出快速增长、缓慢增长、急剧下降三个阶段变化特征,在 600°C 砂岩强度达到峰值。结果表明,砂岩力学参数随温度变化呈现显著阶段性特征,其中 600°C 为强度由增强向劣化转变的关键阈值。

【关键词】煤田火区; 砂岩; 热损伤; 矿物组分; 力学性能

【基金项目】新疆维吾尔自治区重点研发专项 (2022B03025): 新疆煤田火区生态环境演化规律

【收稿日期】2025 年 11 月 16 日 **【出刊日期】**2025 年 12 月 17 日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20250303

Study on the mechanical properties of sandstone under the influence of coal fire metamorphism

Jiahong Liu, Haijian Li*, Caiwen Zhou

School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang

【Abstract】To address slope failures and subsidence during the remediation of coalfield fire zones, this study used coal-bearing sandstone from the Zhunan mining area in Ürümqi, Xinjiang. High-temperature experiments ranging from 25 to 1200 °C were conducted, and methods such as X-ray diffraction (XRD) and uniaxial compression tests were employed to analyze the influence of temperature on the mineral composition and mechanical properties of sandstone in coalfield fire zones. The results shows that temperature significant influences the mineral composition of sandstone, thereby altering its mechanical properties. As the calcination temperature increases, the peak stress, peak strain, and elastic modulus of the sandstone change synchronously, exhibiting three distinct stages: rapid increase, gradual increase, and abrupt decrease. The strength of the sandstone reaches its peak at 600 °C. The findings demonstrate that the mechanical parameters of sandstone show clear stage-wise characteristics with temperature variation, with 600 °C serving as the critical threshold at which strength transitions from enhancement to deterioration.

【Keywords】Coalfield fire area; Sandstone; Thermal damage; Mineral composition; Mechanical properties

1 引言

煤火灾害作为一种全球性的重大灾害与资源浪费问题,其治理与资源化利用过程中面临着复杂的岩石力学挑战。在煤田火区治理时,岩体往往处于复杂的高温环境^[1-3],导致围岩物理力学性能发生显著劣化^[4],发生地面塌陷、边坡坍塌等灾害,严重威胁治理过程中施工安全^[1,2,5]。在这一背景下,深

入研究煤田火区岩体的损伤演化与力学性能劣化机理,对于保障煤田火区安全、高效治理具有至关重要的理论与现实意义。

岩石作为多矿物集合体^[5],其力学性能的劣化主要受控于矿物颗粒的非均匀热膨胀引起的热损伤。近年来,学者们围绕温度^[6-9]系统研究了岩石力学性能的演化规律,取得了显著进展。在高温作用下岩

*通讯作者: 李海鉴

石物理特性研究方面, 现有研究多集中于 20–800°C^[6,10–12] 温度区间, 并形成普遍共识: 随温度升高, 岩石的质量、波速、强度及弹性模量等物理力学参数总体呈下降趋势, 而孔隙率与渗透率则显著提升^[13,14]。具体而言, Liu 等发现砂岩质量随温度上升逐渐减轻^[12]; Hu 等指出升温促进砂岩孔隙体积发育^[15]; Yang 等则研究了砂岩纵波波速在 150–750°C 范围内随温度升高而增大的现象^[16]。在力学性能研究方面, Shen 等^[9]指出, 温度场中岩石的热损伤主要由内部水分迁移与相变行为诱发, 而其损伤程度从根本上受控于岩石自身结构特征与矿物组成对温度响应的敏感性。Xiao 等^[7]基于热重分析与差示扫描量热法, 结合热分析动力学理论, 研究了煤系砂岩的热分解动力学参数与反应速率, 发现温度超过 400 °C 后, 岩石热破裂现象显著, 活化分子活性急剧增强, 热分解动力学过程迅速显现。在热破裂与矿物分解的共同影响下, 岩石力学性质显著弱化。此外, Gao、Liu 等^[11,12,14]通过对热处理后砂岩的系统实验研究, 将 400–600°C 识别为砂岩强度发生突变的阈值温度区间, 并据此提出了砂岩热损伤演化的三阶段规律, 即强化阶段、损伤萌生阶段与损伤发展阶段。

上述研究为理解温度影响下岩石微观损伤机理及力学弱化规律提供了重要依据。然而, 对于煤田火区岩体的力学性能极其损伤机制相对匮乏, 尤其

在温度梯度场下的岩石损伤演化机制缺乏系统性研究。鉴于此, 本研究设计不同温度梯度热处理实验, 整合 XRD 矿物组分分析、单轴压缩试验力学性能测试等技术手段, 系统研究了不同温度热处理后砂岩的矿物相变特征及宏观力学性能变化。重点探讨了不同温度下砂岩的峰值应力-应变关系、弹性模量变化特征及其内在关联机制, 研究成果不仅深化了对煤田火区岩体热损伤机制的理论认知, 也为煤田火区治理过程中岩体稳定性评估提供了重要的理论依据。

2 材料和方法

2.1 样品制备

本研究所用砂岩取芯自新疆乌鲁木齐淮南矿区煤系砂岩, 试件表面平整且无肉眼可见裂纹。根据国际岩石力学学会 (ISRM) 的标准^[17], 将岩块加工成 $\Phi 50 \text{ mm} \times H100 \text{ mm}$ 的圆柱形试样, 如图 1 所示, 岩样两端面不平行度误差不大于 0.05mm; 岩样直径, 高度误差不大于 0.3 mm; 端面垂直于岩样轴线, 偏差误差不大于 0.25°。为保证试样的均一性, 所有试样均来自同一块岩板, 先用肉眼剔除有明显节理裂隙的试样, 在进行称量计算密度, 确保试件质地均匀。将试件称量后随机分为 A-H 八组试件, 每组 3 个试样, 编号为 A1-A3, 依此类推, 经热处理后的试样立马用保鲜膜包裹进行后续实验。

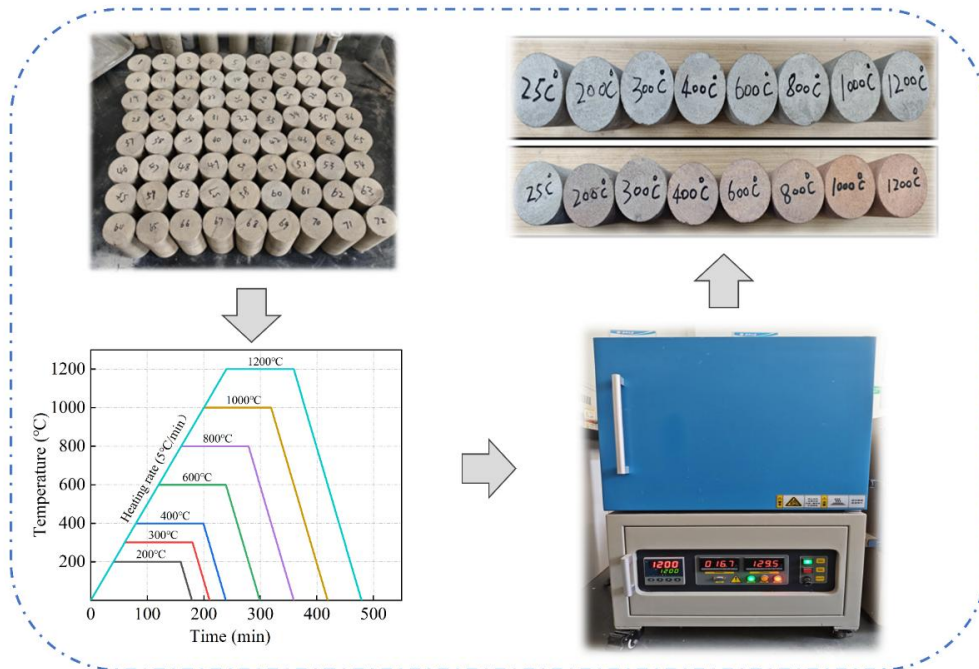


图 1 岩样热处理

2.2 实验设备及方案

实验装置包括马弗炉、X射线衍射仪、岩石力学测试系统。详细的操作及试验流程如下:

2.2.1 样品热处理

本试验采用 SRJX-4-13A 型一体式智能马弗炉加热试样, 该设备的最高加热温度可达 1400℃, 其具有以下特点: 可设置温度上限, 超过设定值会自动切断回路; 30 段智能控温调节仪, 控温精度 ±1℃; 炉膛材料为高纯氧化铝, 具有极好的保温隔热效果。热处理温度分别为 25℃、200℃、300℃、400℃、600℃、800℃、1000℃、1200℃, 具体实验步骤为, 将待加热试样放入马弗炉中, 试样之间留有一定间隔以防互相产生影响, 关好炉门, 打开电源, 按照 5℃/min 的速率将炉内温度加热至设定目标值, 然后恒温 2 小时, 待其在炉内自然降温后取出用保鲜膜包裹密封, 以供后续试验使用。

在热处理过程中, 随着温度升高岩石内部会发生一系列物理化学变化, 包括水分的蒸发、有机物的挥发以及矿物的热分解反应, 这些过程都会导致试样质量、体积、密度发生变化。本研究采用质量损失率 K_m 、体积增加率 K_v 、和密度变化率 K_ρ 作为评价指标^[1,7,18], 质量损失率 K_m 为质量损失量与初始质量的比值; 体积增加率 K_v 为体积增加量与初始体积的比值; 密度变化率 K_ρ 为密度变化量与初始密度

的比值。具体计算公式如下:

$$K_N = \frac{\Delta N}{N_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, ΔN 为高温前后物理参数的变化量, N_0 为物理参数常温下的初始值。

2.2.2 X 射线衍射试验

实验采用 X 射线衍射仪(型号: D8 ADVANCE)对样品进行测试。先将处理好的岩粉样品均匀的平铺在玻片上, 放入设备卡槽中, 打开软件设置扫描范围和扫描角度开始测试。获得原始数据后, 先扣除背景噪声并进行平滑处理, 再通过比对国际衍射数据中心(ICDD)的标准卡片库确定各衍射峰对应的矿物相, 对于多相混合样品还可采用 Rietveld 精修等方法进行定量分析。

2.2.3 岩石力学性能测试实验

为研究热处理后砂岩的应力-应变特性, 采用 MTS 矿山岩石力学测试系统进行单轴抗压试验。本试验采用位移控制模式, 加载速率为 0.5mm/min^[1]。试验过程中的时间、应力、位移等试验数据由系统自动采集并记录。每次热处理后选取 3 块岩样进行重复试验, 分析其应力-应变曲线和强度特征。

3 实验结果及分析

3.1 高温对砂岩质量、体积和密度的影响

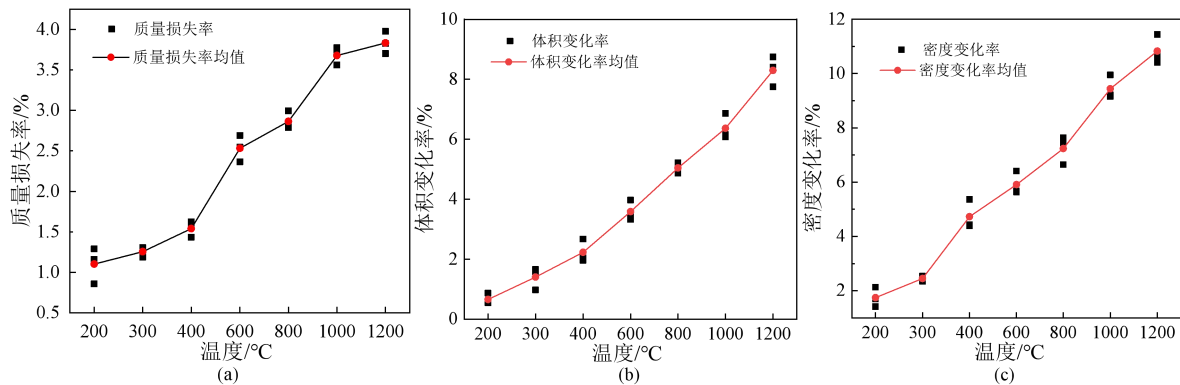


图2 高温下砂岩质量、体积和密度变化率

图2a展示了砂岩在不同热处理温度下的质量损失率变化曲线。砂岩试件在 400℃前表现为平缓的质量损失趋势, 质量损失率从 2.08%到 2.30%且变化速率较低, 这主要是由于红砂岩内部自由水和结合水的蒸发导致试件质量减少。在 400℃至 1200℃温度范围内砂岩的质量损失率从 2.30%上升到 4.15%, 呈现明显的加速损失特征, 质量损失率随温

度升高而显著增大, 特别是在 600℃以上, 质量损失变化幅度更加显著。这一快速变化阶段伴随着更为复杂的质量减少过程, 除方解石分解产生 CO_2 并促使其逸散外, 还存在矿物分解、相变及脱羟基等多重作用, 包括矿物颗粒脱落、石英相变以及高岭石脱羟基反应^[8,9,19]。砂岩质量随温度阶段性变化的过程表明, 400℃是砂岩物理变化阈值, 超过此温

度后, 高温对砂岩质量损失影响更为明显。

图 2b 显示砂岩的体积变化率随温度升高呈持续增长趋势, 这主要归因于红砂岩内部不同矿物组分的热膨胀系数差异, 由此引发的热裂纹促使体积发生扩张。在 0 °C 至 400 °C 的初始阶段, 体积变化率由约 1.8% 逐渐上升至 2.2%, 当温度继续升高至 400 °C 至 800 °C 范围内, 体积变化率增幅显著加快, 从约 2.2% 上升至接近 3.0%; 当温度达 1200 °C 时, 体积变化率达到约 4.0%, 这是因为矿物相变过程会加剧矿物颗粒的剥落。在冷却阶段, 开裂现象将形成更多微裂隙, 进一步增加砂岩体积。

图 2c 显示了砂岩密度变化率随温度升高呈持续

增大, 其变化过程可划分为三个阶段。在 300 °C 以下, 砂岩密度变化随温度上升缓慢增大, 主要因加热初期水分快速蒸发而体积尚未明显膨胀所致; 当温度处于 300 °C 至 600 °C 之间, 水分蒸发基本完成, 质量减少放缓, 但矿物热膨胀导致体积显著增大, 密度变化也加快; 当温度超过 600 °C 后, 密度变化率上升速度再度加快, 至 1200 °C 时体积密度累计变化约 10.5%, 这主要归因于高温引发的矿物相变与分解产生气体逸出导致质量下降, 以及热膨胀加剧造成的颗粒间隙增加与孔隙率上升, 显著增大了试样体积, 两者共同导致高温阶段试样密度变化显著。

3.2 砂岩矿物成分分析

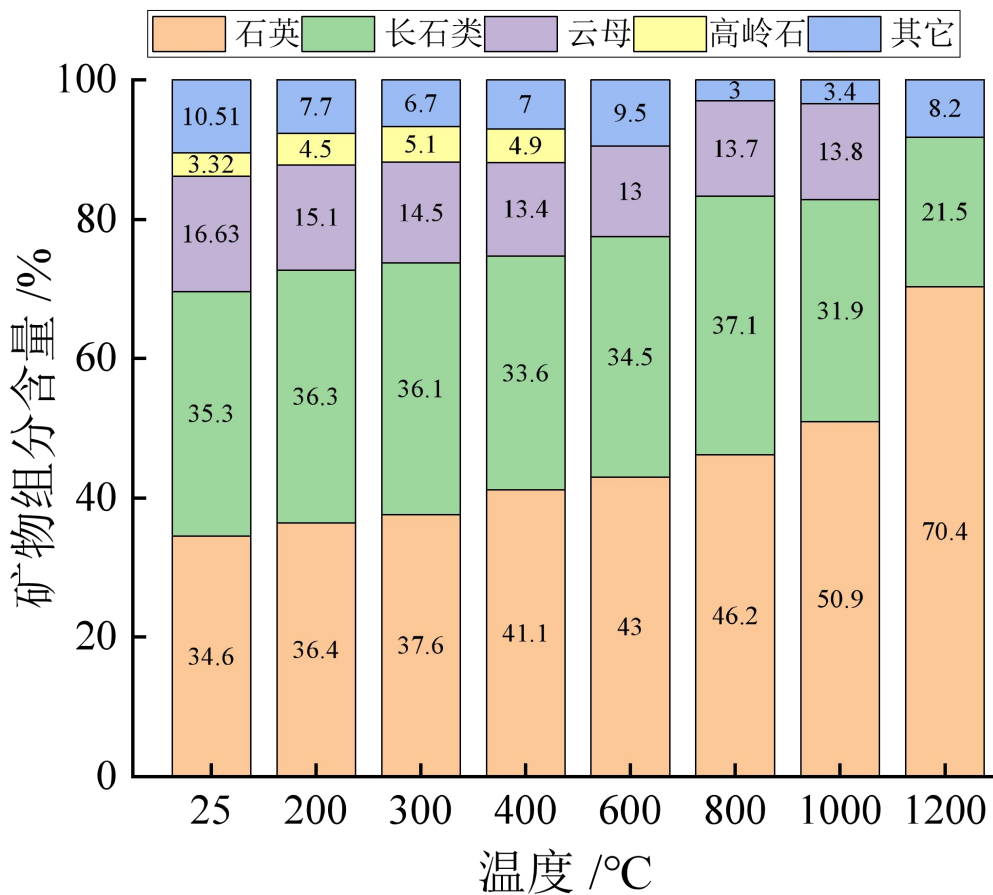


图 3 不同温度下砂岩矿物组分图

图 3 为不同温度下砂岩试样 XRD 后进行定量分析的矿物含量图。砂岩的主要成分为石英、长石、云母和其他矿物, 其中石英含量最高、长石类矿物次之、云母相对较少。石英和长石类矿物对砂岩试样的力学性质影响较大^[8]。高温后砂岩矿物发生了多晶转变, 部分矿物发生相变。

①25~300 °C 试样中石英的含量从 34.6% 增长到 36.4%, 长石类矿物含量从 35.3% 到 36.3%。随着温度的升高, 石英和长石类矿物含量增高, 但涨幅不大, 整体趋于稳定。

②300 °C~600 °C 试样中的石英的含量随着温度升高呈现增长趋势, 钠长石和云母类矿物含量随温

度变化不大, 高岭石等矿物在这一温度范围内受热发生分解。

③600℃~1200℃试件中石英类矿物的含量, 随着温度的升高呈现出增大变化趋势, 在 1200℃含量增大最显著; 长石类矿物含量随着温度的升高逐渐减小, 在 1000℃之后完全熔融形成硅酸盐溶体。云母类矿物含量随着温度升高变化不明显, 在 1000℃以后完全熔融形成玻璃体。

3.3 不同温度下砂岩力学参数分析

3.3.1 应力-应变曲线

不同温度条件下干燥砂岩试件的应力-应变曲线如图 4 所示。不同温度下干燥砂岩的应力-应变曲线变形过程可明确划分为压密阶段、弹性阶段、屈服阶段和峰后破坏阶段: 在初始压密阶段, 轴向应力的增加主要促使岩石内部原生裂隙逐渐压实闭合, 表现为应力-应变曲线增长速率相对平缓; 进入弹性

阶段后, 随着原生裂隙的完全闭合, 岩石内部开始均匀积累应力, 曲线呈现显著的线性增长特征; 当加载至屈服阶段时, 持续增大的轴向应力导致试件内部新生裂纹萌发, 应力场发生重新分布并形成局部应力集中, 最终引发试件失稳破坏; 值得注意的是, 砂岩在峰后阶段表现出典型的脆性破坏行为, 其特征为积聚应力骤然释放, 伴随试件瞬时破坏和明显声响。

3.3.2 砂岩力学参数变化

为探究温度和水分共同作用下砂岩力学参数变化规律, 选取了峰值强度、峰值应力和弹性模量作为指标来探究热损伤作用对岩石力学性能的影响。每个目标温度下分别统计了干燥试样各三个以避免实验偶然性, 表 1 给出了不同温度下砂岩试件的峰值应力、峰值应变和弹性模量均值。

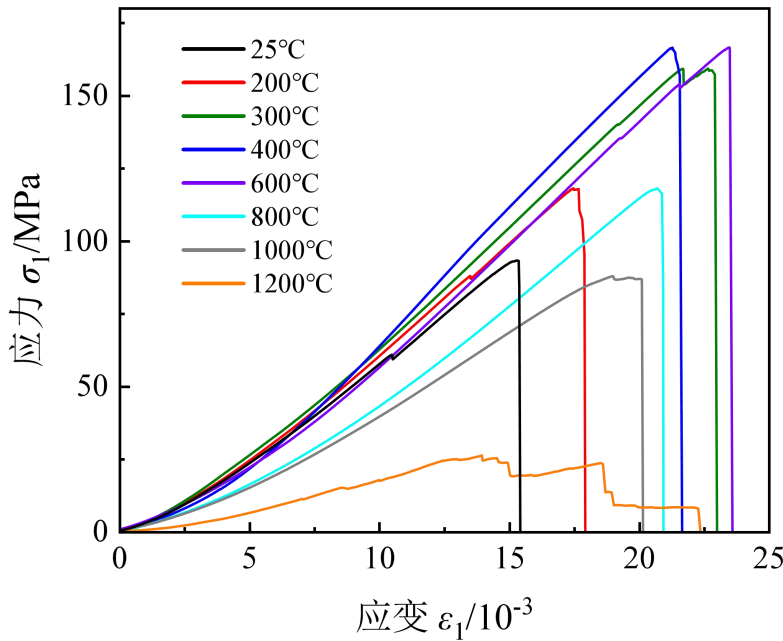


图 4 砂岩应力随温度变化曲线图

表 1 不同温度下砂岩试件力学参数均值

温度	岩样编号	峰值应力均值/MPa	峰值应变均值/10 ⁻³	弹性模量均值/GPa
25 °C	A1~A3	96.46	15.52	7.91
200 °C	B1~B3	118.73	17.28	8.34
300 °C	C1~C3	144.31	20.07	8.56
400 °C	D1~D3	162.28	20.40	8.97
600 °C	E1~E3	173.48	23.44	8.83
800 °C	F1~F3	125.45	21.39	7.59
1000 °C	G1~G3	89.80	19.99	5.98
1200 °C	H1~H3	27.40	16.91	2.76

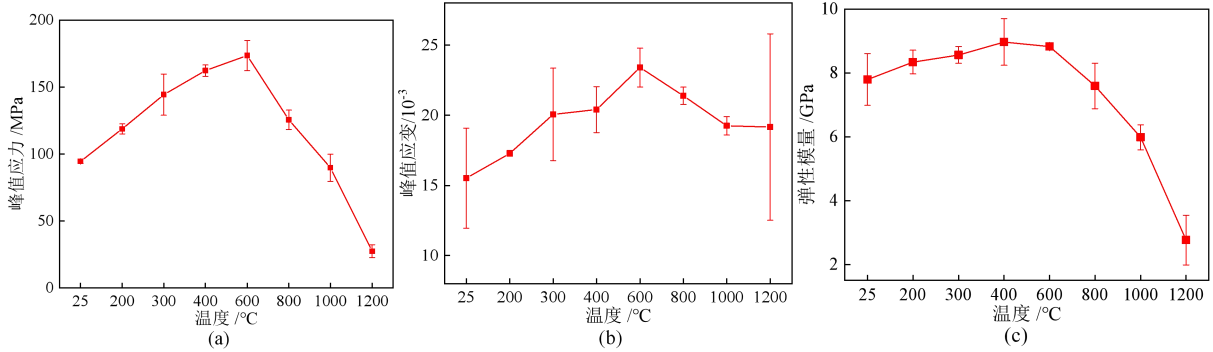


图5 不同温度下砂岩力学参数随温度变化规律: (a) 峰值应力 (b) 峰值应变 (c) 弹性模量

(1) 峰值应力

根据图 5a 和表 1 的试验结果可以看出, 干燥状态下砂岩的应力-应变曲线在不同温度条件下呈现出明显的阶段性变化特征, 整体变化规律为随温度的升高, 单轴抗压强度表现出先增大后减小的趋势, 这一结果与^[1,10,13,19]等研究相似, 尽管在某些温度下由于试件本身品质的差异性导致单轴抗压强度异常, 但差异变化较小, 仍在正常分散范围内。对于砂岩试件, 温度对单轴抗压的影响主要为三个阶段: 快速增长阶段 (25 °C~300 °C), 试件单轴抗压强度均值分别为 94.45、118.40、144.33MPa, 涨幅分别为 25.36%、21.90%, 表明在此阶段温度对砂岩的单轴抗压强度影响最为显著。稳定增长阶段 (300 °C~600 °C), 试件的单轴抗压强度均值分别为 144.33、162.28、173.48MPa, 涨幅分别为 12.44%、6.90%, 此阶段砂岩单轴抗压强度增长速率明显减缓, 表明温度对其影响减弱。急速下降阶段 (600 °C~1200 °C), 此阶段三个温度下砂岩的抗压强度均值分别为 125.45、89.8、27.4MPa, 其下降幅度依次达到 27.69%、28.42%和 69.49%。

(2) 峰值应变

从图 5b 可以看出, 砂岩的峰值应变和峰值应力变化规律基本同步。在 25 °C~600 °C 范围内砂岩的峰值应变随温度升高而有所增大。当温度达到 600 °C 时, 砂岩的峰值应变均值达到最大值 23.44×10^{-3} , 是常温下的峰值应变的 1.51 倍。当温度在 600 °C 以后, 砂岩的峰值应变均值随温度的升高而整体呈现出下降趋势, 但整体下降幅较小。在 1000 °C~1200 °C 以后部分砂岩在高温作用下, 表面已经出现少许宏观裂纹, 裂纹的数量及开裂方向会影响到试件的峰值应变大小, 因此在这一温度范围

内部分砂岩的峰值应变呈现出离散性。在整个温度变化过程中, 砂岩的峰值应变均值从 25 °C 时的 15.52×10^{-3} 增加到 23.44×10^{-3} , 在 1200 °C 时下降到 16.91×10^{-3} , 整体呈现出先增大后减小的趋势。

(3) 弹性模量

由图 5c 可知, 在低温阶段 (<400 °C), 弹性模量呈现缓慢上升趋势, 由常温下的 7.91GPa 增至 8.97GPa, 增幅为 13.40%。这一现象可归因于岩石内部自由水蒸发导致的孔隙连通性改善, 从而在一定程度上增强了岩石的变形抗力。当温度升至 400~600 °C 区间时, 弹性模量出现小幅下降, 这主要源于矿物组分间热膨胀系数的差异诱发的微裂纹萌生。在高温阶段 (>600 °C), 弹性模量呈现急剧下降趋势, 特别是在 1000 °C 后降幅更为显著, 至 1200 °C 时, 弹性模量均值降至 2.76GPa, 较常温状态下降达 65.11%。这种高温劣化效应主要归因于矿物相变引发的体积膨胀, 导致颗粒间热应力积聚并超过胶结强度, 进而形成宏观裂纹网络。随着温度升高, 裂纹的扩展与贯通显著增大了岩石的变形能力, 使其力学行为由脆性逐渐向延性转变, 最终造成弹性模量的显著降低。

4 讨论

岩石的矿物组分是决定其力学性质的根本因素之一。在热处理过程中, 矿物组分随温度升高发生相变, 直接影响岩石的宏观力学性能。本次实验砂岩试样的主要矿物包括石英、云母、钠长石及其他长石类矿物。随着热处理温度上升, 砂岩内部矿物发生多晶型转变及相变过程, 导致矿物成分与结构产生显著变化, 进而对其力学行为产生重要影响。

在 400 °C 以前, 砂岩样品中, 黏土类矿物发生脱水反应, 这种脱水作用可能导致岩石内部孔隙结

构和数量发生变化, 从而增强了岩石内部矿物颗粒间的摩擦, 导致岩石的强度和弹性模量在低温阶段有所强化。

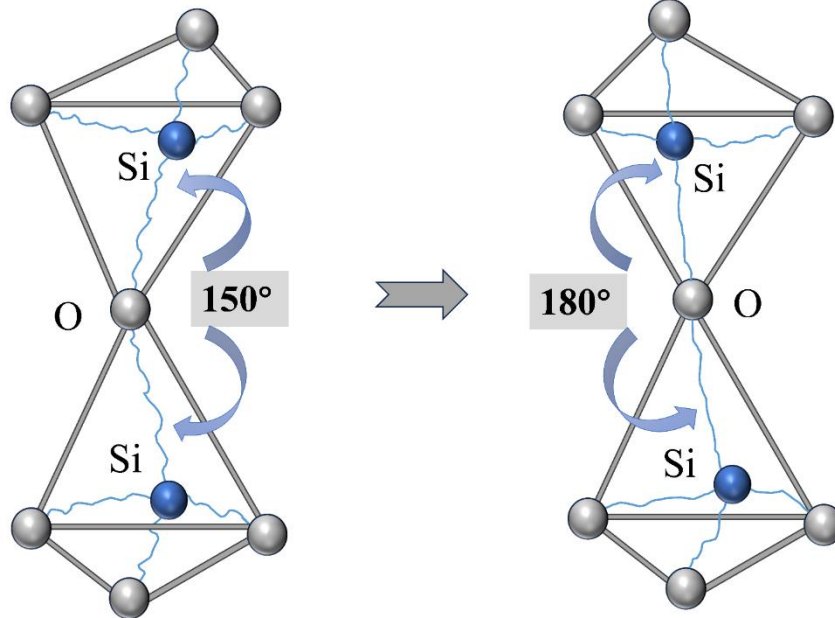
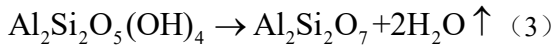
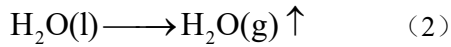
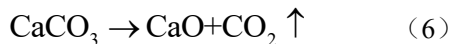


图6 α - β 石英键角变化示意图

图6当温度到573℃左右时石英矿物发生同质多象转变, α -石英结构中的两个Si-O化学键呈150°夹角转变为 β -石英结构中的两个Si-O化学键呈180°夹角^[1,13,16], 部分长石转化为石英, 与 α -石英相比, β -石英具有更高的硬度和更致密的晶体结构。因此, 在石英含量增加和结构优化的双重影响下, 岩石强度在600℃左右达到峰值。

600-800℃热处理过程中, 长石类矿物和碳酸盐类矿物开始分解, 云母类矿物发生脱羟基作用, 晶体结构分解, 生成氧化铝、氧化硅、氧化钠等产物, 石英含量逐渐上升。这些产物的物理化学性质与钠长石不同, 可能导致矿物成分变化引起结构重组, 新生裂隙与原生裂隙相互贯通, 导致力学性能开始出现劣化。此外, 长石类矿物的热膨胀系数也可能与周围矿物的热膨胀系数不同, 导致岩石内部产生热应力, 进一步加速岩石劣化。



在800-1200℃时, 岩石内部硅酸盐类矿物在高温作用下发生熔融反应, 这种转变伴随着体积变化, 产生了巨大的内部应力, 在冷却过程中释放导致岩石内部整体骨架结构发生变化。同时, 新形成的矿

物相在结构上与原有矿物不兼容, 样品从板状表面发生微观结构转变为具有空洞和孔隙的表面, 伴随着孔隙度的急剧增加, 导致岩石强度和弹性模量大幅降低。



5 结论

本研究煤田火区砂岩在不同温度下的矿物组分和力学性能变化, 通过开展X射线衍射实验、矿物组分分析、单轴压缩试验, 从微观角度阐明了温度对火区砂岩矿物组成的影响及其原因、岩石的热损伤机理, 得出以下结论:

(1) 砂岩的质量、体积及密度变化率均随温度升高呈上升趋势, 400℃左右为砂岩物理性质变化加剧的关键温度。低温阶段(>400℃), 温度升高主要影响砂岩内部孔隙水及吸附水蒸发, 引起质量显著下降, 进而使密度降低, 体积变化相对有限。在高温阶段(<400℃), 砂岩主要发生了矿物分解和

相变导致质量下降, 部分矿物热膨胀系数不同导致砂岩体积发生急剧膨胀, 在质量和体积同时变化下密度变化率随温度逐渐增大。

(2) XRD 分析显示, 在 400 °C 以下, 砂岩的主要矿物组成保持相对温度稳定, 受温度影响较小。超过 400 °C 时, 石英含量逐渐增加, 长石和云母含量的减少, 在 1200 °C 之后, 砂岩主要有石英和长石类矿物。

(3) 不同温度热处理后, 砂岩的峰值应力、峰值应变和弹性模量随温度升高均呈现先增大后减小的变化规律。砂岩强度变化可划分为不同的阶段, 600 °C 以下砂岩主要发生物理变化导致岩石强度增强; 600 °C 之后发生的多种化学反应则显著弱化了岩石的强度。600 °C 左右为砂岩物理和力学性能变化的转折点。

参考文献

- [1] WU L, HUANG Y, LI J, et al. Macro- and micro-mechanical response and damage mechanism of sandstone under high-temperature conditions[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2025, 35(2): 265-274.
- [2] XIAO W, ZHANG D, LI S, et al. Microstructural and thermal properties of coal measure sandstone subjected to high temperatures[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, 16(8): 2909-2921.
- [3] WONG L N Y, ZHANG Y, WU Z. Rock strengthening or weakening upon heating in the mild temperature range ?[J]. *Engineering Geology*, 2020, 272: 105619.
- [4] ZHANG J, HUANG J, BU Y, et al. Experimental study on the mechanical properties of sandstone under different temperatures and cooling methods[A]. SSRN, 2025[2025-08-08].
- [5] GUO H, SUN Q, FENG G, et al. In-situ observations of damage-fracture evolution in surrounding rock upon unloading in 2400-m-deep tunnels[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 33(4): 437-446.
- [6] LIU L, JIN J, LIU J, et al. Mechanical properties of sandstone under in-situ high-temperature and confinement conditions[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2025, 32(4): 778-787.
- [7] XIAO W, ZHANG D, LI S, et al. Microstructural and thermal properties of coal measure sandstone subjected to high temperatures[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, 16(8): 2909-2921.
- [8] LI X, PENG J, XIE Y, et al. Influence of high-temperature treatment on strength and failure behaviors of a quartz-rich sandstone under true triaxial condition[J]. *Lithosphere*, 2022, 2022(Special 10): 3086647.
- [9] SHEN M, ZHAO Y, BI J, et al. Micro-damage evolution and macro-mechanical property of preloaded sandstone subjected to high-temperature treatment based on NMR technique[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 369: 130638.
- [10] XIAO W, YU G, LI H, et al. Experimental study on the failure process of sandstone subjected to cyclic loading and unloading after high temperature treatment[J]. *Engineering Geology*, 2021, 293: 106305.
- [11] GAO S, WU Y, YANG X. Experimental study on the changes to the microstructures and dynamic mechanical properties of layered sandstone after high-temperature treatment[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(24): 11729.
- [12] LI M, LIU X. Effect of thermal treatment on the physical and mechanical properties of sandstone: insights from experiments and simulations[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(6): 3171-3194.
- [13] SHEN Y, YANG Y, YANG G, et al. Damage characteristics and thermo-physical properties changes of limestone and sandstone during thermal treatment from -30 °C to 1000 °C[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2018, 54(11): 3389-3407.
- [14] LIU S, HUANG Z. Exploration of microstructure characteristics and mechanical behaviors of thermal-damaged argillaceous sandstone via LF-NMR and μ -CT technologies[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2023, 9(1): 27.
- [15] JIN P, HU Y, SHAO J, et al. Influence of temperature on the structure of pore-fracture of sandstone[J]. *Rock*

- Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(1): 1-12.
- [16] YANG S Q, RANJITH P G, JING H W, et al. An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behavior of granite after exposure to different high temperature treatments[J]. Geothermics, 2017, 65: 180-197.
- [17] ULUSAY R. The present and future of rock testing: highlighting the ISRM suggested methods[M]//ULUSAY R. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014. Cham: Springer International Publishing, 2015: 1-22[2025-10-17].
- [18] 吴星辉, 蔡美峰, 任奋华, 等. 不同热处理作用下花岗岩纵波波速和导热能力的演化规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(3): 457-467.
- [19] LIN H, LIU W, ZHANG D, et al. Study on the degradation mechanism of mechanical properties of red sandstone under static and dynamic loading after different high temperatures[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 11611.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS