高温下深部砂岩的宏细观结构损伤效应研究

张莹莹[1],张彩丽[2]

1.开封大学土木建筑工程学院,河南 开封 475004;
2.中原工学院智能建造与建筑工程学院,河南 郑州 450007

摘 要:为探究高温环境下深部砂岩的多尺度损伤效应,通过开展单轴压缩试验、微米CT扫描、SEM和XRD试验,系统分析岩石力学特性和结构的劣化机制。结果表明:随着热处理温度由25 ℃逐步升高至800 ℃,砂岩抗压强度呈现出显著的非线性演化特征,力学行为从高强度低延性向低强度高延性转变;当温度达到800 ℃时,砂岩强度衰减率高达38.1%,砂岩孔隙率由初始的1.68%显著增大至6.35%,且孔隙分布的离散程度也呈现出上升趋势;高温作用下砂岩的孔隙演化经历了裂隙闭合、萌生和汇集等阶段,最终形成以热破裂面为主要特征的破坏模式;在高温条件下,砂岩的绝对渗透率增幅达135.1%,其变化与孔隙率呈正比关系,印证了孔隙结构对渗透性能的主导作用;在温度升高过程中,砂岩经历结合水挥发、晶体膨胀和矿物分解等过程,微观结构的物理化学反应是驱动岩石结构多尺度损伤效应的内在因素;自由水蒸发上限温度、方解石热分解阈值温度和石英发生相变临界温度分别为200 ℃、400 ℃和600 ℃。研究结果可为高温环境下深部岩体工程的稳定性评估与控制提供理论依据。

关键词:深部采矿;砂岩;高温环境;孔隙;强度;渗透性;微观结构

中图分类号:TD315 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-2518(2026)04-0980-09 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2026.04.274

引用格式:张莹莹,张彩丽.高温下深部砂岩的宏细观结构损伤效应研究[J].黄金科学技术,2026,34(4):980-988.ZHANG Yingying,ZHANG Caili.Study on Macro and Mesoscopic Structural Damage Effects of Deep Sandstone Under High Temperatures[J].Gold Science and Technology,2026,34(4):980-988.

随着深部矿产资源开采、地热资源开采、煤炭地下气化和高放射性物质储存库等深地工程建设日渐增多,深部岩石力学问题已成为领域研究热点(谢和平等,2015;夏开文等,2021;杜广盛等,2022;何满潮等,2024;芮旭升等,2025)。其中,深部采矿的“三高”环境(高地应力、高渗透压和高地温)与“强扰动”(如爆破、开挖)共同作用,对岩体稳定性构成了复杂且多维度的挑战(赵兴东等,2021;Gao et al,2024)。对于深部岩体而言,高地温可能引发热力耦合下的岩石劣变,甚至导致热疲劳损伤,影响深部采场的长期稳定性(傅璇等,2022;都璨,2024)。因此,热损伤条件下岩体宏细观力学响应机制研究,已成为深部采矿工程防灾减灾的关键科学问题。

随着开采深度的持续增大,深部高地温效应成为影响岩石基本力学特性的关键因素之一。诸多学者围绕高地应力和高渗透压作用下的岩石力学特性开展了广泛且深入的研究,但是针对岩石热损伤效应及其内在作用机理的关注相对有限(刘磊等,2022;梁潇等,2024)。李嘉龙等(2024)对高温下的储层砂岩开展了试验和模拟研究,发现岩石强度和弹性模量均随温度的升高而显著下降,且微观缺陷显著增多。汪家畅等(2023)对砂岩开展高温三轴剪切试验,发现温度上升导致岩石抗剪强度参

收稿日期:2025-09-19;**修订日期**:2026-04-20

作者简介:张莹莹(1987—),女,河南焦作人,讲师,从事建筑材料及岩土工程方面的研究工作。E-mail:zyyhappy0110@163.com

© Editorial Department of *Gold Science and Technology* (CC BY-NC-ND)

数呈非线性衰减。Long et al(2024)测试了温度为200~600 ℃条件下深部岩层的强度衰减规律,发现应力和高温对岩石结构损伤具有耦合效应。此外,研究还发现岩石内部存在广泛发育的原生孔隙、裂隙和节理等缺陷构造,且呈现出非均匀分布特征,对岩体力学性能具有关键影响(黄晓辉等,2022;Xi et al,2023;李冕等,2025)。

综上所述,深部高温环境下的岩石孔隙和裂隙网络呈现出更为复杂的空间分布特征,高温下岩石微观结构特征是研究岩石热损伤演化机制的关键。现有研究对高温作用下岩石渗透性、强度参数及结构特征等方面有待深入(李晓科等,2024)。鉴于此,本文从深部采矿工程实际出发,对深部砂岩开展不同温度的热处理,结合强度测试、CT扫描、渗流仿真、扫描电镜和X射线衍射试验,揭示砂岩宏观力学、细观裂隙和微观特征的演化规律。本研究旨在通过探明热损伤对砂岩结构的影响规律,为后续开展高地应力与高温耦合下的复杂力学试验提供基准数据参考。

1 材料与方法

1.1 岩石材料

本研究所用岩石试样采自陕西省关中平原地区,采样深度为地下1 000~1 200 m,按深层地热能划分为盆地中部新生界孔裂隙型、秦岭山前构造裂隙型和渭北古生界岩溶裂隙型岩石。砂岩呈麻灰色,晶体颗粒排列致密,见图1(a)。岩石试样显微图像如图1(b)所示。砂岩的主要矿物成分为石英(66.6%)、方解石(15.9%)、钠长石(11.8%)和黑云母(5.7%)。通过岩石物理性质测试,得到岩石试样干密度为2.78 g/cm^3,纵波波速范围为3 890.2~4 437.3 m/s,平均波速为4 014.8 m/s。根据工程岩体试验方法制备标准岩样,对取回的块状岩样进行钻芯、切割和打磨,得到标准圆柱样,根据波速剔除异常岩样。

1.2 试验方案

试验方案包括样品制备、加热处理、试验操作和理论分析等过程。首先,将长度为50 cm、直径为15 cm的岩芯精细切割成高度为100 mm、直径为50 mm的标准样品。为了模拟深部高温环境的影响,对样品进行不同温度的加热处理,开展力学测试获得岩样的宏观力学性能,通过微米CT扫描分析了岩石的细观孔隙分布,结合SEM和XRD测试了岩石微观结构和矿物组成特点。



(a) 钻孔岩芯照片　(b) 岩样与显微图像

Dol-白云母; Cal-方解石;Qz-石英

图1 砂岩试样取样情况

Fig. 1 Sampling of sandstone samples

1.3 试验方法

(1)高温加热处理。采用电阻式高温加热装置对样品进行热处理操作。升温速率控制在5 ℃/min,试验温度区间设定为25~800 ℃,在恒温环境中持续加热12 h,以保证样品内部温度的均匀分布。加热结束后,将试件放置在25 ℃的室温条件下冷却48 h,再开展后续试验。

(2)单轴抗压试验。采用MTS 810型材料压力试验系统开展单轴抗压试验,按照恒定的0.15 kPa/s加载速率进行渐进式加载,并采集岩石的应力和应变数据。

(3)CT扫描试验。采用X射线CT仪对岩石样品进行内部结构的扫描,对CT图像进行平滑滤波的图像处理以减少统计误差,采用二值化分割算法提取孔隙后导入AVIZO软件,经过三维重构和渲染获得孔隙的三维孔隙模型及量化数据。

(4)微观试验与物相分析。采用TESCAN型扫描电子显微镜SEM对砂岩断口进行扫描识别。在不同温度加热后的岩石样品中截取2 cm左右厚度的断口试件进行扫描,对试件断面进行喷金和扫描,观察岩石微观形态特征。采用XRD-6100型实验仪获得岩石的X射线衍射图谱,据此确定岩石的晶体物相组成。

2 试验结果分析

2.1 岩石力学性能劣化规律

为探究不同热处理温度对砂岩力学性质的影响，通过单轴抗压试验获得岩石试件的断裂情况，如图2所示。在单轴荷载作用下，砂岩破坏形式呈现出明显且有规律的变化。随着热处理温度的升高，砂岩试件的破坏程度逐渐加剧。当温度处于相对较低的范围（≤200 ℃）时，砂岩试件的失稳破坏表现为剪切型破坏特征，表明岩石在承受压力的过程中，沿着某一特定的剪切面发生断裂。当温度进一步升高至400 ℃以上时，岩石破坏具有局部化特点，即裂隙沿着岩石内部的多个软弱面或节理面发展，砂岩失稳破坏形式由剪切型破坏转变为劈裂压碎型破坏。在升温过程中，岩石的整体结构遭受严重破坏，试件的剪切面裂缝由斜向逐渐转变为竖向，并伴随大量细碎的裂缝分支，说明高温环境下岩石的破坏模式发生了显著改变。

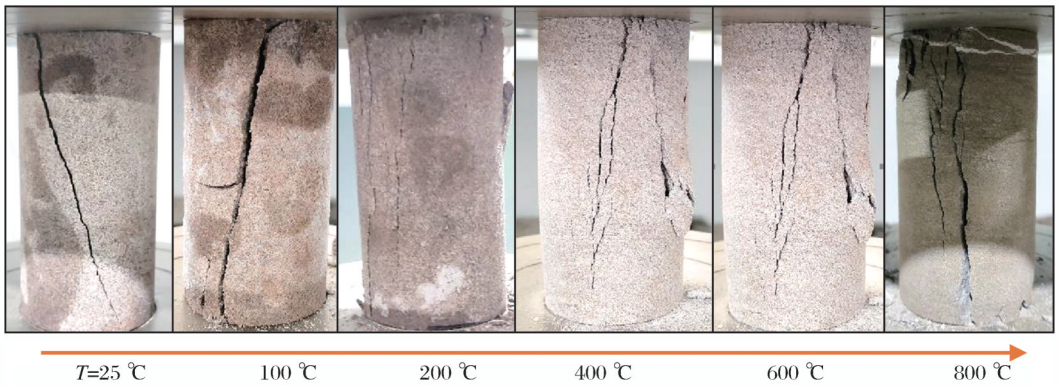


图2 不同温度下的试件断裂形态

Fig. 2 Fracture morphology of specimens at different temperatures

应力—应变曲线直观反映了岩石从开始受力直至破坏过程中变形发展规律。不同热处理温度下的砂岩试验结果如图3所示，岩石的变形经历了初始压缩、线性上升、应力屈服和应力跌落4个阶段。随着温度的持续升高，砂岩峰值应力呈现出一种渐进且持续衰减的变化趋势，变形特性发生显著变化。破坏应变随温度升高而逐渐增加，表明试验抵抗形变直至破坏的塑性变形量增加。岩石强度和变形特征的变化在温度区间为200~600 ℃时表现得尤为明显，为深入了解岩石力学行为的热损伤效应提供了重要依据。砂岩的应力—应变关系的变化说明热损伤过程中的力学行为发生变化，从高强度低延性转变为低强度高延性。由单轴应力—应变曲线提取了砂岩抗压强度，并计算了强度衰减率。如图4所示，天然状态下的砂岩单轴抗压强度达到79.5 MPa，经过100 ℃温度的热处理后，砂岩的强度上升至80.2 MPa。这种现象可以解释为在100 ℃温度作用下，岩石晶体矿物中的自由水被蒸发，颗粒间的摩擦力增强，使其整体强度提高（许巍等，2025）。当热处理温度为200 ℃、400 ℃、600 ℃和800 ℃时，砂岩的抗压强度分别为69.1 MPa和56.5 MPa，并最终降低至47.8 MPa。当温度超过600 ℃时岩石抗压强度的变化趋势明显趋缓，当热处理温度为800 ℃时强度衰减率达到38.1%。

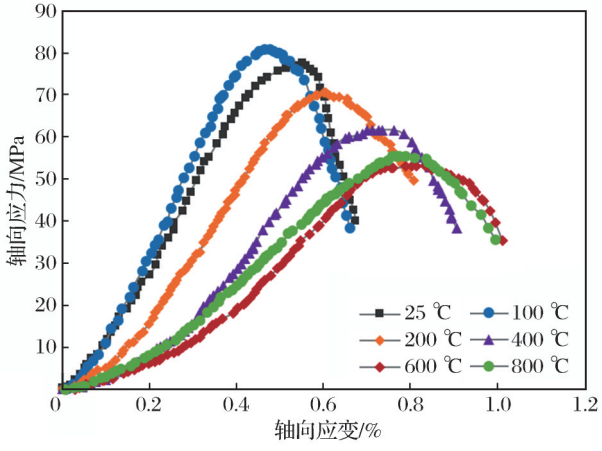


图3 不同温度下的岩石应力—应变曲线

Fig. 3 Curves of rock stress and strain at different temperatures

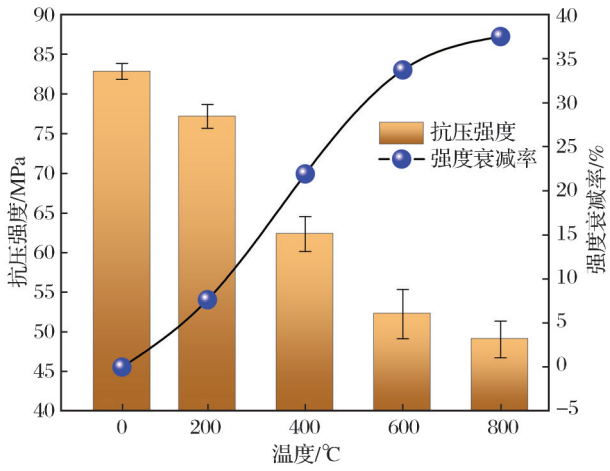


图4　不同温度下的岩石强度参数

Fig. 4　Compressive parameters of rock at different temperatures

2.2　孔隙结构与渗透特性

根据CT扫描试验得到试件的灰度扫描切片和三维孔隙模型,结果如图5所示。通过观察分析可知,岩石孔隙在高温作用下的演化进程呈现出十分突出的非均匀特性。在初始温度状态下,岩石内部结构呈现出极为致密的排列特点,经过200 ℃恒温处理后,试样内部开始出现微观裂隙;当温度升高至400 ℃时,裂隙发育程度明显提高,具体表现为裂隙密度和延伸长度同步增长;将热处理温度提升至600 ℃时,孔裂隙网络中的连通裂隙尺寸和数量急剧增多;当热处理温度为800 ℃时,裂隙的长度和宽度持续增大,且孔裂隙分布的复杂程度进一步提高。

运用二值化方法对不同高度截面的孔隙率进行提取和定量测定,结果如图6所示。表1的统计数据显示,面孔隙率在高度方向呈现出波动特征,并且其分布曲线的峰值随着热处理温度的上升而不断增大,此现象指出岩石内部孔隙结构的持续扩展进程。基于CT扫描数据的统计分析说明,随着热处理温度的升高,细观裂隙的平均尺寸呈现出十分突出的增长趋势,平均面孔隙率从初始的1.68%提升至6.35%,此外,面孔隙率方差由6.51%增长至41.35%。面孔隙率的统计方差值随着温度的升高而持续增大,该数据证实了高温作用提高了岩体内部孔隙分布的空间非均匀性和各向异性特征。因此,CT扫描试验从定性和定量2个方面揭示了岩石结构的热损伤机制,统计结果可为砂岩高温损伤的精细化分析提供重要的参考依据。

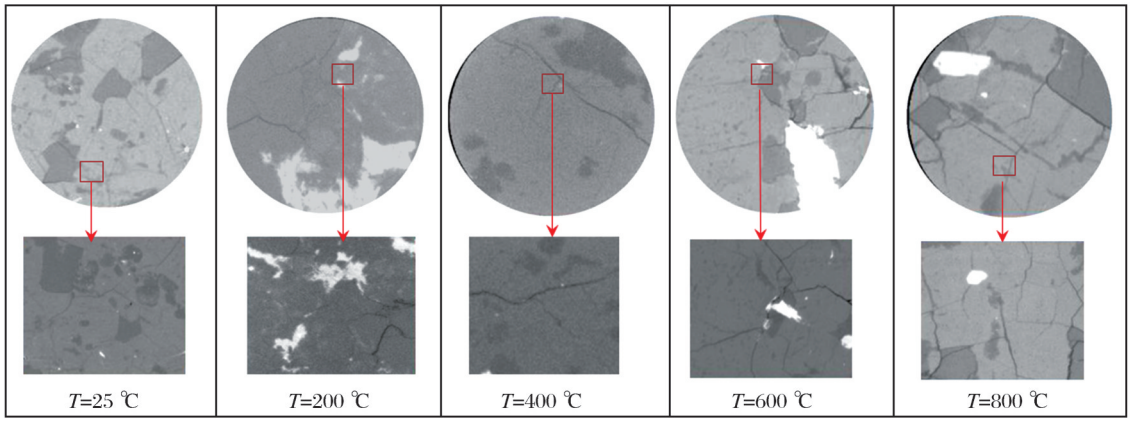


图5　岩石试件在不同温度下的CT图像

Fig. 5　CT images of the rock specimens at different temperatures

2.3　砂岩的渗流特性

利用三维CT重构技术获取砂岩内部连通裂隙分布的完整数据后,运用格子玻尔兹曼方法进行多孔介质渗流数值模拟(Yin et al,2019)。渗流仿真模拟可用来追踪流体在岩体内部的运移规律和空间分布特征(Tang,2020)。根据渗流仿真计算模型,通过水流积分运算得到试件内部流体体积流动量的精确计算结果,按照Darcy渗流定律推导出绝对渗透率K的函数,表示为

$$K=\frac{Q\mu L\gamma_{w}}{\mu A\Delta P} \tag{1}$$

式中:Q为流量(m^3/s);μ为溶液黏度(Pa·s);L为渗

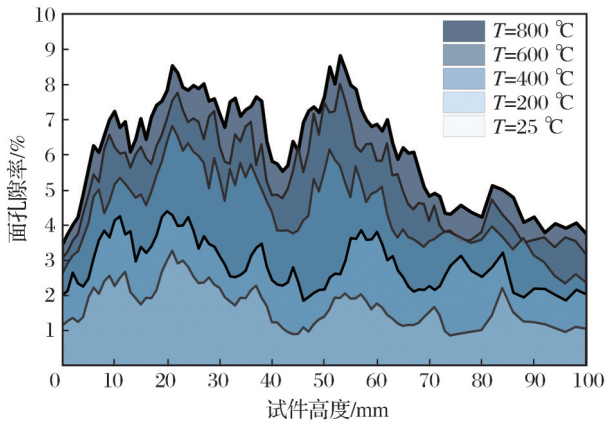


图6 岩石试样在不同高度处的面孔隙率

Fig. 6 Surface porosity of the rock specimens at different heights

流长度(m);γ_w为流体容重(kg/m^3);A为流动截面积(m^2);ΔP为压差(kPa)。

图7所示为砂岩在不同热处理温度下的流线模型,流线疏密程度与渗透性强弱呈正相关关系(安然等,2025)。随着连通裂隙数量的增加,流线的颜色未出现显著变化,但流线的分布密度明显增大。由图7可以看出,当温度低于200 ℃时,流线分布较为稀疏,连通性较差。当温度达到600 ℃以上时,岩石中形成了大量连通的流线轨迹,说明在高温加热后岩体渗透性能显著增大。在三维裂隙模型中不同位置处截取了多个立方体模型,重复计算了各模型的绝对渗透率K的平均值。在常温条件下,通过渗流数值模拟计算得到的砂岩绝对渗透率平均值为84.5 mD,与试验实测的平均值(82.9 mD)基本吻合,2组数据之间的偏差小,充分验证了模拟模型的准确性和可靠性。当经历800 ℃的高温作用后,砂岩的K值增加幅度约为135.1%。经过拟合分析发现,砂岩的孔隙率与绝对渗透率具有明显的线性正相关关系,如图8所示,表明岩石的孔隙网络结构在一定程度上决定了岩体的抗渗透特性。热破裂面源于石英、方解石和黑云母等矿物晶体间的差异热膨胀,引发穿晶与沿晶裂纹的汇合,这些破裂面构成了流体运移的通道,使得砂岩渗透性能在温度超过600 ℃后快速劣变。

2.4 微观结构特征

为了获取不同热处理高温环境中砂岩微观结构损伤特征,对岩石断口形貌特征进行SEM分析,结果如图9所示。在初始常温状态下,岩石内部微裂纹分布不均匀,孔隙的连通性较差[图9(a)]。在200 ℃高温作用下,岩石内部的自由水蒸发,矿物晶体产生热膨胀效应,微孔洞数量增加,裂纹处于闭合状态[图9(b)]。经过400 ℃热处理后,黑云母矿物脱水,晶体发生热膨胀,岩石软弱胶结面处出现连通热致裂纹[图9(c)]。在温度为400~800 ℃范围内,砂岩内部热致裂纹进一步扩展,裂纹的张开宽度由3 μm增加至9 μm[图9(d)],岩石微观图像直观反映了深地高温对热致裂纹的影响特点。

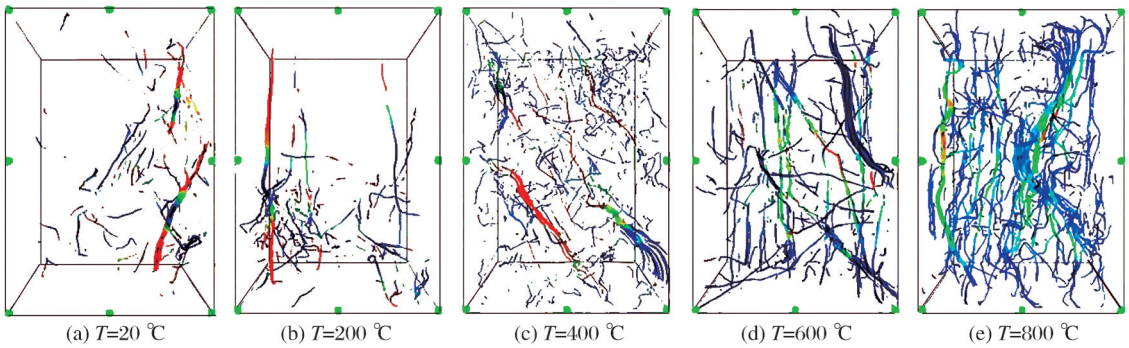


图7 岩石试样渗流模拟的流线模型

Fig. 7 Streamline models for seepage simulations of rock specimens

进一步利用X射线衍射结果来剖析高温对岩体矿物组成产生的影响,并运用Jade软件对不同温度下的物相组成数据进行定量分析。岩石的矿物成分变化如图10所示,结果表明石英、黑云母和方解石构成了砂岩的主要矿物组分,其中石英占比最大。在温度为25~200 ℃范围内,岩石的自由水(吸

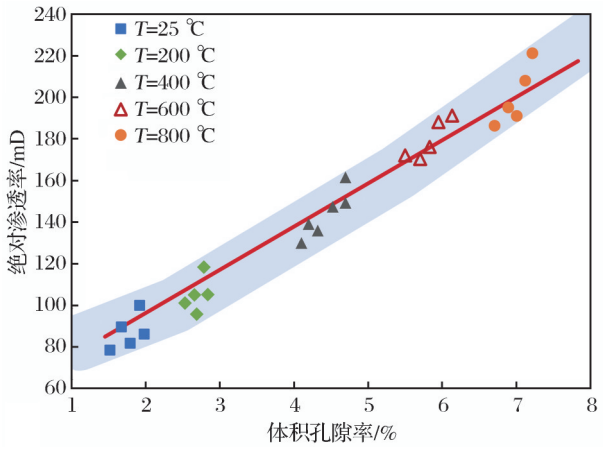


图8　岩石绝对渗透率与孔隙度关系

Fig. 8　Relationship between absolute permeability and porosity of rock

附在岩石颗粒表面和大孔隙中的水分)因受热而蒸发,部分白云石发生热解反应,方解石相对含量增加;当温度上升至400 ℃后,黑云母的热分解反应程度明显提高,方解石含量呈现出持续增长的趋势;在600 ℃高温条件下,方解石发生剧烈的热分解,其反应强度远远超过其他矿物,使得方解石含量下降,同时伴随CO_2气体逸出及$Ca(OH)_2$生成。800 ℃的高温促使石英发生相变,矿物组分及其相对含量出现较大变化。因此,在高温加热条件下,砂岩中的矿物晶格膨胀,晶体结构逐渐疏松,最终造成岩石微观结构出现显著损伤,宏观力学性能和抗渗透性能大幅降低。

3　讨论

基于前文分析可知,宏、细、微观试验结果表征了深部砂岩多尺度损伤效应,高温环境对岩体稳定性构成严重威胁。深部地层的高温主要通过调控热致裂纹及晶体结构(类型与分布)影响砂岩力学性能。在室温至200 ℃范围内,未观察到明显热致裂纹,岩石力学性能表现为热强化效应;当温度超过200 ℃后,热致裂纹开始萌生并扩展,孔隙数目和裂隙尺寸显著增加,岩石力学性能随温度升高发生劣化;当温度升高至600 ℃以上时,热致裂纹全域贯通,大量穿晶裂纹导致岩石结构完整性遭受破坏,岩石强度和变形性能急剧劣化,应力—应变曲线峰后段呈现显著延性特征。

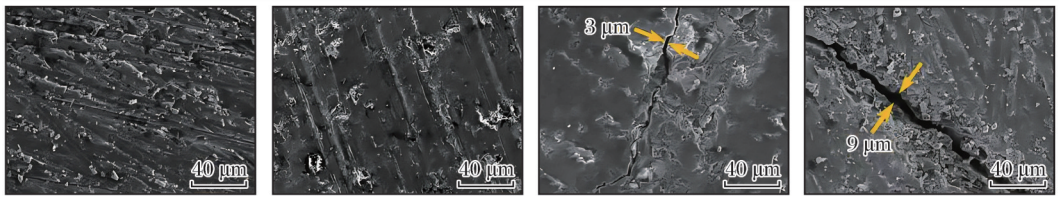


图9　不同温度下岩石的微观结构形态

Fig. 9　Micromorphology morphology of rock at different temperatures

在砂岩经历高温作用的过程中,200 ℃、400 ℃和600 ℃是其内部物理化学性质发生显著变化的3个关键温度阈值,分别标志着自由水的完全蒸发、方解石的热分解和石英发生不可逆相变的起始。当温度达到200 ℃时,砂岩中所含的自由水发生脱水直至被完全蒸发。在温度为200 ℃之前,砂岩的质量损失主要源于自由水的散失,其力学性能的变化相对平缓。由于砂岩含有碳酸盐矿物,如方解石,400 ℃是方解石发生热分解的起始温度。在此温度下,方解石会经历显著的热分解反应,生成氧化钙(CaO)和二氧化碳(CO_2)。这一化学反应不仅会导致岩石内部产生大量气体,引发微裂隙,还会因矿物成分的改变而直接削弱岩体的整体强度。除此之外,400 ℃也是砂岩力学性能由缓慢劣化转为急剧下降的突变阈值。当温度继续升高至600 ℃时,砂岩中最常见的造岩矿物石英经历相变反应,导致岩石产生不可逆的结构损伤而形成热破裂面。通过对比分析砂岩与花岗岩在相同温度区间的力学表现,发现砂岩在温度为800 ℃时的强度衰减率为38.1%,与花岗岩的研究结果相似。由于砂岩方解石含量较高,其在跨越400 ℃阈值后的矿物分解效应更为显著,导致砂岩力学性能劣化速率略高于花岗岩,进一步揭示了矿物组分对热损伤演化的影响规律(Zuo et al,2017)。综上所述,当温度

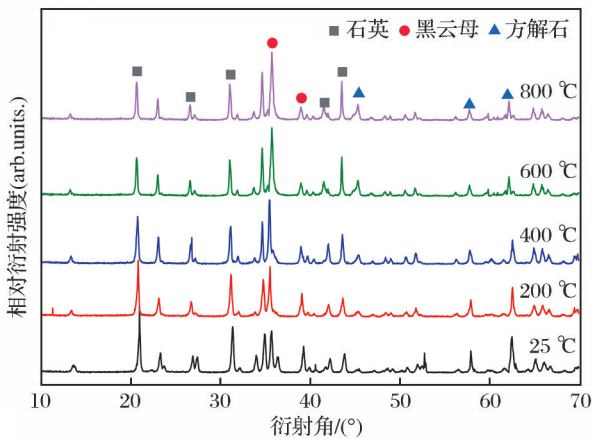


图10　岩石的矿物成分变化结果

Fig. 10　Results of mineral composition change of rcoks

达到200 ℃、400 ℃和600 ℃这3个阈值时，分别驱动了砂岩在高温作用下的脱水、矿物分解和石英相变的关键进程，从微观层面上决定了砂岩宏观物理力学性能的演化路径。

4　结论

（1）深部砂岩在温度为25~800 ℃范围内表现出显著的脆塑性转变，力学行为由高强度低延性向低强度高延性演化。由于受热损伤累积的影响，当温度为800 ℃时，岩石抗压强度大幅下降，强度衰减率达38.1%。

（2）高温引发的热破裂导致孔隙率增大且分布不均，三维数字重构揭示了孔隙网络由孤立向贯通演化的动态过程。随着环境温度的升高，绝对渗透率随孔隙率同步线性增长，证实孔隙结构的重塑决定了砂岩抗渗性能的削弱。

（3）微观层面的结合水散失、矿物颗粒差异性膨胀及多尺度裂隙发育，构成了砂岩细观结构的渐进性损伤逻辑，这种微观层面的破裂效应不断累积，最终演化为岩体宏观强度与渗透稳定性的劣化。

（4）在200 ℃温度条件下，砂岩的自由水蒸发，结构未出现损伤效果；在400 ℃环境中，高温诱发矿物成分分解，砂岩结构密实度下降；在600 ℃高温环境下，石英矿物发生相变，引发砂岩差异性的热破裂。上述结果表明高温环境驱动了砂岩从内部矿物演化到宏观物理力学性能劣化的过程。

参考文献（References）：

Gao H, Xie H P, Zhang Z T, et al, 2024. True triaxial energy evolution characteristics and failure mechanism of deep rock subjected to mining-induced stress [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 176: 105724.

Long K, Wu Y Q, Zhang R J, et al, 2024. Variations of physical and mechanical properties of granite with different cooling treatments: an experimental study [J]. Physics of Fluids, 36 (12): 127105.

Tang Z C, 2020. Experimental investigation on temperature-dependent shear behaviors of granite discontinuity [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 53(9): 4043-4060.

Xi Y, Xing J H, Jiang H L, et al, 2023. Pore characteristic evolution and damage deterioration of granite subjected to the thermal and cooling treatments combined with the NMR method [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 82(5): 182.

Yin Q, Liu R C, Jing H W, et al, 2019. Experimental study of nonlinear flow behaviors through fractured rock samples after high-temperature exposure [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 52(9): 2963-2983.

Zuo J P, Wang J T, Sun Y J, et al, 2017. Effects of thermal treatment on fracture characteristics of granite from Beishan, a possible high-level radioactive waste disposal site in China [J]. Engineering Fracture Mechanics, 182: 425-437.

安然，蔡苏童，汪亦显，等，2025. 干燥过程中花岗岩风化土开裂与收缩特征的试验研究[J]. 岩土工程学报，47(3): 652-658. An Ran, Cai Sutong, Wang Yixian, et al, 2025. Experimental study on cracking and shrinkage characteristics of granite weathered soil during drying process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 47(3): 652-658.

都璨，2024. 冷却冲击下高温岩石物理力学特性及孔隙结构损伤演化机理[D]. 贵阳：贵州大学. Du Can, 2024. Physical and mechanical properties of high temperature rock and damage evolution mechanism of pore structure under cooling shock [D]. Guiyang: Guizhou University.

杜广盛，陈世江，武海龙，2022. 温度影响下花岗岩宏、细观力学性质演化规律[J]. 黄金科学技术，30(6): 935-947. Du Guangsheng, Chen Shijiang, Wu Hailong, 2022. Evolution of macro and meso mechanical properties of granite under the influence of temperature [J]. Gold Science and Technology, 30(6): 935-947.

傅璇，黄麟淇，陈江湛，等，2022. 迎接深部开采高地温环境的挑战——岩石真三轴试验机地温模拟平台研究[J].

黄金科学技术,30(1):72-84.Fu Xuan, Huang Linqi, Chen Jiangzhan, et al, 2022.Meeting the chanllenge of high geothermal ground temperature environment in deep mining—Research on geothermal ground temperature simulation platform of rock true triaxial testing machine[J].Gold Science and Technology,30(1):72-84.

何满潮,武毅艺,高玉兵,等,2024.深部采矿岩石力学进展[J].煤炭学报,49(1):75-99.He Manchao, Wu Yiyi, Gao Yubing, et al, 2024.Research progress of rock mechanics in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 49(1):75-99.

黄晓辉,刘科伟,周占星,等,2022.高温后红砂岩压剪下声发射及其微观特性研究[J].黄金科学技术,30(5):764-777. Huang Xiaohui, Liu Kewei, Zhou Zhanxing, et al, 2022. Study on acoustic emission and microscopic characteristics of red sandstone under compression-shear after high temperature[J]. Gold Science and Technology, 30(5):764-777.

李嘉龙,康凤新,白通,等,2024.砂岩热储温度场对回灌参数的响应机理与规律[J].地球科学,49(9):3318-3333. Li Jialong, Kang Fengxin, Bai Tong, et al, 2024.Response process and mechanism of sandstone geothermal reservoir temperature to reinjection parameters[J].Earth Science,49(9):3318-3333.

李冕,严张萍,唐鑫,2025.富有机质页岩高温作用后微观力学特征与热力耦合模拟研究[J].工程地质学报,33(2):491-502. Li Mian, Yan Zhangping, Tang Xin, 2025. Study of the micro-mechanical characteristics and thermal-mechanical coupling behavior of organic-rich shale after exposure to high temperatures[J].Journal of Engineering Geology,33(2):491-502.

李晓科,邵保平,蔡佳豪,等,2024.瞬态高温热冲击下岩石传热规律试验研究[J].矿业研究与开发,44(11):155-162.Li Xiaoke, Xi Baoping, Cai Jiahao, et al, 2024.Experimental study on heat transfer law of rock under transient high-temperature thermal shock[J]. Mining Research and Development,44(11):155-162.

梁潇,吴俊,齐文超,等,2024.高温作用下页岩动态力学特性及微观损伤特征研究[J].矿产保护与利用,44(4):48-57.Liang Xiao, Wu Jun, Qi Wenchao, et al, 2024.Study on the dynamic characteristics and microscopic damage features of shale under high temperature[J].Conservation and Utilization of Mineral Resources,44(4):48-57.

刘磊,李睿,秦浩,等,2022.高温后深部矽卡岩动力学特性及微观破坏机制研究[J].岩土工程学报,44(6):1166-1174. Liu Lei, Li Rui, Qin Hao, et al, 2022.Dynamic mechanical properties and microscopic damage characteristics of deep skarn after high-temperature treatment[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,44(6):1166-1174.

芮旭升,杨青帅,周传洪,等,2025.深部高温高压岩体剪切力学特性研究进展[J].矿产保护与利用,45(2):1-13. Rui Xusheng, Yang Qingshuai, Zhou Chuanhong, et al, 2025.Research progress on shear mechanical properties of deep high-temperature and high-pressure rock mass[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 45(2):1-13.

汪家畅,康健婷,康天合,等,2023.高低温循环冲击作用下砂岩孔裂隙结构的演化特征[J].煤炭科学技术,51(11):139-147.Wang Jiachang, Kang Jianting, Kang Tianhe, et al, 2023. Evolutionary characteristics of sandstone pore-fracture structure under the action of high and low temperature cyclic impact[J].Coal Science and Technology,51(11):139-147.

夏开文,王帅,徐颖,等,2021.深部岩石动力学实验研究进展[J].岩石力学与工程学报,40(3):448-475.Xia Kaiwen, Wang Shuai, Xu Ying, et al, 2021.Advances in experimental studies for deep rock dynamics[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,40(3):448-475.

谢和平,高峰,鞠杨,2015.深部岩体力学研究与探索[J].岩石力学与工程学报,34(11):2161-2178.Xie Heping, Gao Feng, Ju Yang, 2015. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 34(11):2161-2178.

许巍,魏然,阎泽华,等,2025.高温应力差条件下致密砂岩电性实验研究[J].长江大学学报(自然科学版),22(2):12-17,27.Xu Wei, Wei Ran, Yan Zehua, et al, 2025.Experimental study of the electrical properties of tight sandstones under high temperature and differential stress[J]. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition),22(2):12-17,27.

赵兴东,周鑫,赵一凡,等,2021.深部金属矿采动灾害防控研究现状与进展[J].中南大学学报(自然科学版),52(8):2522-2538.Zhao Xingdong, Zhou Xin, Zhao Yifan, et al, 2021. Research status and progress of prevention and control of mining disasters in deep metal mines[J].Journal of Central South University(Science and Technology),52(8):2522-2538.

Study on Macro and Mesoscopic Structural Damage Effects of Deep Sandstone Under High Temperatures

ZHANG Yingying[1], ZHANG Caili[2]

1.*School of Civil Engineering and Architecture, Kaifeng University, Kaifeng* 475004, *Henan, China*;

2. *Institute of Intelligent Construction and Architectural Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou* 450007, *Henan, China*

Abstract: To examine the multi-scale damage effects of deep sandstone subjected to high-temperature conditions, a comprehensive analysis was conducted using uniaxial compression tests, micrometer-scale computed tomography(CT) scanning, scanning electron microscopy(SEM), and X-ray diffraction(XRD). This study systematically investigates the mechanisms underlying the degradation of mechanical properties and structural deterioration. The findings indicate that as the heating temperature rises from 25 ℃ to 800 ℃, the compressive strength of sandstone demonstrates significant nonlinear evolution, transitioning from high-strength and low-ductility to low-strength and high-ductility mechanical behavior. At a temperature of 800 ℃, the rate of strength degradation in sandstone reaches 38.1%. Additionally, the porosity of the sandstone increases markedly from an initial 1.68% to 6.35%, accompanied by an increase in the heterogeneity of pore distribution. Under conditions of elevated temperature, the pore evolution in sandstone progresses through distinct stages, including microcrack closure, initiation, and coalescence, ultimately resulting in a damage pattern characterized by a thermal fracture surface. The absolute permeability of sandstone increases by 135.1% at high temperatures, exhibiting a proportional relationship with porosity, thereby affirming the predominant influence of pore structure on permeability performance. These physical and chemical transformations, encompassing the evaporation of bound water, crystal expansion, and mineral decomposition, fundamentally driving the multi-scale thermal damage effect observed in sandstone. The three critical temperature thresholds of 200, 400, 600 ℃ correspond to the key processes of dehydration, mineral decomposition, and phase transformation, respectively, under high-temperature conditions. Collectively, these processes dictate the evolution of the macroscopic mechanical properties of sandstone.

Key words: deep mining; sandstone; high temperature environment; pore structure; strength; permeability; microstructure