高温作用下富黏土砂岩强度强化与劣化机制研究*

谢伟[1],倪彬[1],张伟[1],王军[1],王立[2]

(1.中国有色金属工业西安勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710061;
2.兰州有色冶金设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730099)

摘要:为了研究热处理对富黏土砂岩物理力学特性和强度变化机制的影响,对富黏土砂岩试件进行了温度分别为25 ℃、200 ℃、400 ℃、600 ℃和800 ℃的热处理,并对热处理后的试件进行了物理参数测量试验和单轴压缩试验。结果表明,随着热处理温度的升高,砂岩试件的质量不断减小、波速和弹性模量呈现出先增大后减小、孔隙率和峰值应变呈现出先减小后增大的变化趋势;砂岩试件的强度在25~600 ℃热处理温度下呈现出强化特性,而在600~800 ℃热处理温度下呈现出劣化特性。最后,从颗粒热膨胀、矿物脱水、矿物相变与热分解3个方面揭示了富黏土砂岩的强度变化机制。研究结果为富黏土砂岩热特性的研究提供了借鉴,为高温作用下地下空间岩石工程的修复加固奠定了理论基础。

关键词:富黏土砂岩;热处理;物理力学特性;强度强化;强度劣化

中图分类号:TD315 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)07-0199-09

Study on Mechanism of Strength Strengthening and Deterioration of Clay-Rich Sandstone Under High Temperature

XIE Wei[1], *NI Bin*[1], *ZHANG Wei*[1], *WANG Jun*[1], *WANG Li*[2]

(1.Xi'an Engineering Investigation and Design Research Instatute of China National Non-ferrous Metals Industry Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710061, China;
2.Lanzhou Engineering & Research Institute of Nonferrous Metallurgy Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730099, China)

Abstract: In order to study the effect of heat treatment on the physical and mechanical properties and strength change mechanism of clay-rich sandstone, the clay-rich sandstone specimens were heat treated at 25 ℃, 200 ℃, 400 ℃, 600 ℃ and 800 ℃, respectively, and the physical parameter measurement test and uniaxial compression test were carried out on the specimens after heat treatment. The results show that with the increase of heat treatment temperature, the mass of sandstone specimens decreases continuously, the wave velocity and elastic modulus increase first and then decrease, the porosity and peak strain decrease first and then increase. The strength of the sandstone specimens shows strengthening characteristics at 25-600 ℃ heat treatment temperature, and shows deterioration characteristics at 600-800 ℃ heat treatment temperature. Finally, the strength change mechanism of clay-rich sandstone is revealed from three aspects: particle thermal expansion, mineral dehydration, mineral phase change and thermal decomposition. The research results provide a reference for the study of the thermal characteristics of clay-rich sandstone, and lay a theoretical foundation for the repair and reinforcement of underground space rock engineering under high temperature.

Key words: Clay-rich sandstone, Heat treatment, Physical and mechanical property, Strength strengthening, Strength degradation

0 引言

随着浅部资源日趋枯竭,深部资源开采已逐渐成为常态[1]。砂岩作为一种常见的沉积岩,是许多矿山中主要的围岩类型之一。随着采矿深度的增加以及某些特定的热处理过程(如深部开采、地热能开发、核废料处置等),岩石会受到较高的温度影响[2]。因此,研究高温作用下砂岩的力学性能演化特征具

* **收稿日期**:2024-07-30
基金项目:江西省教育厅科研基金资助项目(GJJ210859)
作者简介:谢伟(1981—),男,四川乐山人,硕士,高级工程师,主要从事岩土工程工作与研究。E-mail:1447036073@qq.com
通信作者:王立(1992—),男,甘肃白银人,硕士,高级工程师,主要从事岩土工程工作与研究。E-mail:1798075175@qq.com

有重要意义。

众多学者对高温作用下岩石物理与力学性质的演化规律进行了大量研究,并取得了丰硕的研究成果。例如,热处理可以影响砂岩的物理性质,如表观颜色[3]、质量[3-4]、波速[3-6]、体积[4-5]、孔隙率[6]、热膨胀系数[7]、渗透率[8]和热导率[9]等。基于这些物理参数,可以对砂岩力学性质的变化进行定量或定性分析。通常认为,随着热处理温度的不断升高,砂岩力学性质会表现出显著的热劣化现象[10],即砂岩的抗压强度和弹性模量会随着温度的升高而逐渐减小[11-15],且劣化速率存在由慢到快的温度阈值,这与砂岩的矿物成分及结构构造有关。热劣化的产生机制可以总结为:矿物颗粒的热膨胀促进了砂岩内部裂纹的发育,以及高温触发了砂岩矿物发生热分解反应,导致砂岩发生不可逆转的结构破坏。但是,砂岩在热处理作用后并不仅仅表现为热劣化,在某些温度区间内,砂岩的强度和弹性模量也会逐渐增大,这种现象被称为热强化。苏承东等[16]发现粗砂岩在经过100～500 ℃热处理作用后,试件的强度和弹性模量逐渐增加,而当热处理温度超过500 ℃后,试件的承载能力和抗变形能力逐渐减弱。于鑫等[17]对高温后致密砂岩物理力学特性进行了研究,发现试件强度随温度的升高呈先增加后降低的变化趋势,400 ℃为该砂岩强度变化的温度阈值,认为热强化机制与水分蒸发和颗粒热膨胀有关。此外,不少学者[18-21]也发现了砂岩热强化的特性。

由上述文献分析可知,砂岩在热处理作用下会表现出热劣化和热强化两种特性。岩石由矿物颗粒、孔洞、微裂缝和弱胶结界面组成,砂岩物理性质和宏观力学性质均随温度的变化,可以归因于热处理对岩石的矿物成分和微观结构的改造。以往研究主要分析砂岩在高温作用后的热劣化机制,而有关热处理后砂岩热强化机制的研究成果较少,尤其是富黏土砂岩,其物理力学性质对温度更加敏感。基于此,本文对25～800 ℃热处理作用后的富黏土砂岩进行单轴压缩试验,分析热处理对富黏土砂岩的质量、波速、孔隙率、孔隙分布、强度、弹性模量和峰值应变的影响,并从颗粒热膨胀、矿物脱水、矿物相变和热分解等方面揭示热劣化和热强化的产生机制。研究结果可作为高温环境下地下空间工程稳定性研究及支护设计的参考依据。

1 试验概况

1.1 试件制备

本文试验岩石取自四川省内江市某煤矿煤层底板,其主要组成矿物成分为石英、高岭石、云母和伊利石。按照国际岩石力学学会(ISRM)室内试验标准对岩样进行加工处理,制备成高度为100 mm、高径比为2∶1的标准圆柱形试件,打磨和抛光至端面平整度小于0.02 mm、端面与轴向垂直角度小于0.25°。在进行热处理之前,测得试件体积范围为191.82～192.36 cm^3,质量处于502.13～505.14 g之间,密度为2.62～2.63 g/cm^3,纵波波速为2 941～2 971 m/s,具体数值见表1。

表1 热处理作用前后砂岩试件的物理参数

Table 1 Physical parameters of sandstone specimens before and after heat treatment

热处理前					热处理	热处理后	
直径/mm	高/mm	密度/(g/cm^3)	波速/(m/s)	质量/g	温度/℃	波速/(m/s)	质量/g
49.40	100.10	2.62	2 941	502.13	25	—	—
49.45	100.08	2.62	2 941	504.27	200	3 030	502.78
49.40	100.09	2.62	2 971	502.54	400	3 125	499.59
49.44	100.11	2.62	2 941	503.95	600	2 041	484.50
49.46	100.11	2.63	2 941	505.14	800	1 667	482.77

1.2 热处理试验方案

为了探究热处理对砂岩物理力学参数的影响,首先采用热处理(在力学加载试验前对试件完成高温处理)和炉内自然冷却的方法对砂岩试件进行热处理试验。热处理试验设备采用KSL-1200X-M型高温箱式马弗炉,目标温度分别设置为200 ℃、400 ℃、600 ℃和800 ℃,25 ℃作为常温对照组,即未进行热处理试验。本文以5 ℃/min的升温速率将砂岩试件加热至目标温度,达到目标温度后继续恒温4 h,随后在马弗炉内自然冷却至室温。同时,为避免常温对照组砂岩试件内部自由水对力学试验结果产生干扰,对砂岩试件进行了干燥处理。

1.3 力学试验方案

为了研究热处理后砂岩试件的物理力学性质演化规律,利用RMT-150C型岩石力学加载系统对不同温度热处理后砂岩试件进行单轴压缩试验。试验过程中,为了尽可能排除端部效应对试验结果的影响,在试件和承载平台、加载压头之间分别垫一块厚度为0.3 mm的四氟乙烯垫片,并在垫片与试件接触部位涂抹一层凡士林。本试验选择力控制的加载

方式，加载速率设置为 0.2 kN/s，操纵加载系统施加荷载，直至试件发生失稳破坏。

2　试验结果分析

2.1　质量、波速、孔隙率及孔隙分布

砂岩试件物理性质会因为热处理作用而发生改变，因此，有必要探究热处理作用后砂岩试件质量、波速、孔隙率及孔隙分布的演化特征。首先，对热处理试验前后砂岩试件质量进行测量，结果统计见表 1。

根据表 1 中的数据，利用公式(1)和公式(2)对砂岩试件纵波速度变化率 η 和质量损失率 δ 进行计算，并绘制二者随温度变化的拟合曲线，如图 1 所示。

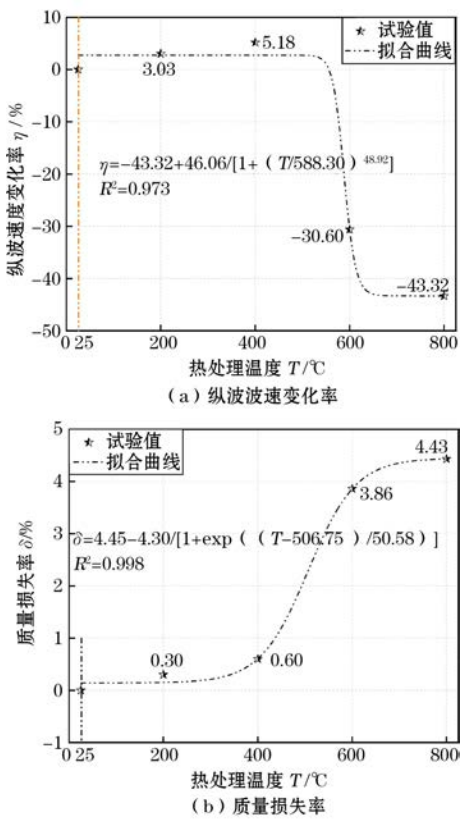


图 1　热处理作用后砂岩试件波速及质量

Fig.1　Wave velocity and quality of sandstone specimens after heat treatment

$$\eta=\frac{\nu-\nu_0}{\nu_0}\times 100\% \tag{1}$$

式中：η 为砂岩试件的纵波速度变化率；ν 为热处理后砂岩试件的纵波速度；ν_0 为热处理前砂岩试件的纵波速度。η 为正时表示纵波速度增大，反之则减小。

$$\delta=\frac{\Delta m}{m_0}\times 100\% \tag{2}$$

式中：δ 为砂岩试件的质量损失率；Δm 为热处理后砂岩试件的质量损失量；m_0 为热处理前砂岩试件的质量。

由表 1 和图 1 可知，相较于未经过热处理试验(25 ℃对照组)的砂岩试件，200 ℃和 400 ℃条件下砂岩试样纵波波速缓慢增长，变化率分别为 3.03%和 5.18%，质量损失也较缓慢，损失率分别为 0.30%和 0.60%；当砂岩试件经过 600 ℃和 800 ℃热处理后，砂岩试件纵波波速急剧减小，变化率分别为−30.60%和−43.32%，质量损失急剧增大，损失率分别为3.86%和 4.43%。分别对砂岩试件的纵波波速变化率和质量损失率的试验值进行拟合，发现二者分别收敛于 Logistic 函数和 Boltzmann 函数，相关系数 R^2 分别为 0.973 和 0.998。

为了探究热处理作用对砂岩试件孔隙率及孔隙分布的影响，利用核磁共振仪(NMR)对砂岩试件进行测试。测试前采用自然浸泡法对热处理砂岩试件进行 48 h 以上的饱水试验，待其质量不再随时间继续增长时，认为砂岩试件处于饱和状态，方可进行 NMR 孔隙率及孔隙分布的测试。根据核磁弛豫机制[19,22]，岩石中不同类型孔隙中的流体具有不同的弛豫时间，在 T_2 谱曲线上分布在不同位置。T_2 值越小，说明砂岩中微裂纹、孔隙及节理等微观缺陷结构的尺寸越小。峰面积反映了砂岩中微裂纹、孔隙及节理等微观缺陷结构的数量，峰宽反映了某一种微观缺陷结构的分布，峰的数量则反映了不同微观缺陷结构之间的孔隙连续性。砂岩试件 T_2 谱和孔隙率随热处理作用的变化曲线如图 2 所示。对砂岩试件孔隙率 φ 进行拟合，发现其收敛于 Nelder 函数，相关系数 R^2 为 0.997。

由图 2(a)可知，当热处理温度处于 25～400 ℃范围内时，砂岩试件 T_2 谱的微孔峰比较明显，中孔峰和大孔峰发育不全，表明此时砂岩试件以微孔为主。随着热处理温度的升高，微孔峰的孔隙度分量不断减小，表明微孔数量随着温度升高在不断减小，这使得图 2(b)中孔隙率由 2.367%(25 ℃)不断减小至 2.331%(200 ℃)和 2.198%(400 ℃)。

当热处理温度达到 600 ℃和 800 ℃时，T_2 谱曲线除了微孔峰外，还出现了明显的中孔峰。微孔峰的孔隙度分量和宽度在逐渐减小，而中孔峰的孔隙度分量和宽度在逐渐增大，表明微孔在热处理作用

下不断演变为中孔,平均孔径增大。虽然 600 ℃热处理后中孔数量有所增加,但 T_2 谱曲线下的面积是 5 个热处理温度组里最小的,对应的孔隙数量也最少,孔隙率为 2.188%(600 ℃)。800 ℃热处理后,砂岩试件 T_2 谱的中孔峰最明显,表明此时砂岩试件以中孔为主,孔隙度达到了试验结果的最大值 3.686%。微孔峰和中孔峰之间没有明显的边界,连通性较好;而中孔峰和大孔峰之间出现了明显界限,甚至是零值区域。大孔峰 T_2 谱曲线下面积很小,且与中孔峰的连续性不好,表明砂岩试件的大孔独立且数量很少。

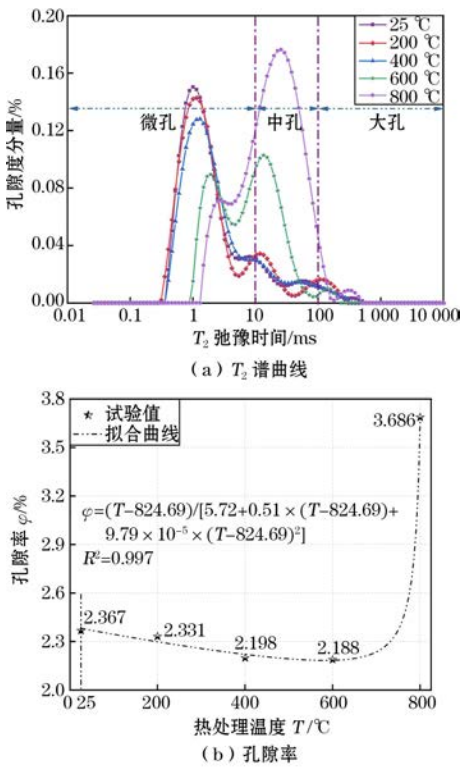


图 2 热处理作用后砂岩试件 T_2 谱及孔隙率

Fig.2 T_2 spectrum and porosity of sandstone specimens after heat treatment

2.2 应力-应变曲线

对经过 25～800 ℃热处理的砂岩试件进行单轴压缩试验并绘制全应力-应变曲线,如图 3 所示。由图 3 可知,以 800 ℃热处理为例,砂岩应力-应变曲线可分为 4 个阶段:压密阶段(*AB* 段),由于砂岩试件初始裂纹和热处理造成的热裂纹被压密,曲线呈现明显的上凹非线性特征;线弹性阶段(*BC* 段),该阶段理想状态下不会萌生新裂纹,应力-应变曲线近似为直线段;塑性变形阶段(*CD* 段),随着施加载荷的增大,砂岩试件内部新裂纹开始萌生、扩展和贯通,应力-应变曲线开始偏离直线,且曲线斜率越来越小;破坏阶段(*DE* 段),应力-应变曲线达到峰值后,砂岩试件表面出现肉眼可见的宏观裂纹,发生失稳破坏的瞬间伴有强烈的音爆声。

在 25～400 ℃间,随着热处理温度的升高,应力-应变曲线的压密阶段逐渐变短,表明热处理使得砂岩内部颗粒产生热膨胀,颗粒之间的微裂纹得到一定的修复,导致压密阶段变形量越来越小;弹性变形阶段逐渐变长,且没有明显的塑性变形,整个加载过程中应变很小,砂岩试件表现出典型的脆性破坏特征。而对于 600 ℃和 800 ℃热处理后的砂岩试件,应力-应变曲线的压密阶段明显变长,表明该热处理温度使得岩石内部损伤严重,微孔隙和微裂纹增多,使得裂纹孔隙被完全压密,需要更大的变形;弹性变形阶段较短,峰值强度之前具有很明显的塑性变形,峰值之后试件表现出延性破坏特征。

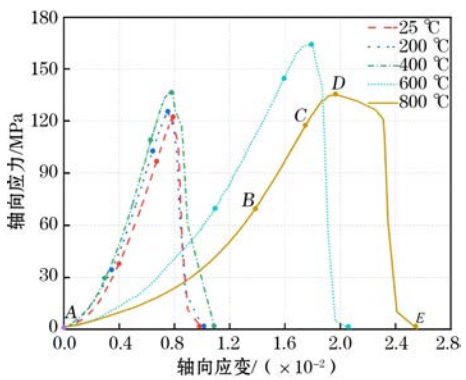


图 3 热处理作用后砂岩试件应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of sandstone specimen after heat treatment

2.3 强度、峰值应变及弹性模量

将图 3 中各热处理作用后砂岩试件应力-应变曲线 *D* 点对应的应力值记为强度,*D* 点对应的应变值记为峰值应变,并根据 *BC* 段(弹性阶段)斜率计算弹性模量。热处理作用后砂岩试件力学参数见表 2。

表 2 热处理作用后砂岩试件力学参数

Table 2 Mechanical parameters of sandstone specimens after heat treatment

热处理温度/℃	强度/MPa	峰值应变/%	弹性模量/MPa
25	122.25	0.78	23.77×10^3
200	125.92	0.73	24.79×10^3
400	136.95	0.77	26.74×10^3
600	164.34	1.80	16.98×10^3
800	135.30	1.97	13.02×10^3

根据表 2 中的各组力学参数统计数据，绘制出砂岩试件强度、峰值应变及弹性模量与热处理温度的变化曲线，如图 4 所示，对应的拟合公式见式(3)至式(5)。

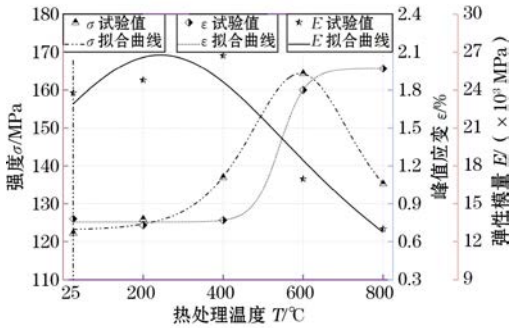


图 4　热处理作用后砂岩试件强度、峰值应变及弹性模量

Fig.4　Strength, peak strain and elastic modulus of sandstone specimens after heat treatment

$$\sigma=123.04+165.24\exp[[(592.98-T)/85.36]/[1+[(592.98-T)/85.36]^2]],R^2=0.990 \quad (3)$$

$$\varepsilon=1.97-1.22/[1+\exp((T-541.55)/32.23)],R^2=0.997 \quad (4)$$

$$E=1/(1.32\times10^{-7}T^2-6.45\times10^{-5}T+4.52\times10^{-2}),R^2=0.841 \quad (5)$$

由表 2 与图 4 可知，砂岩试件的强度随温度的升高呈现出强度强化和强度劣化两种效应，在 25～600 ℃范围内，强度由 122.25 MPa(25 ℃)分别增加到 125.92 MPa(200 ℃)、136.95 MPa(400 ℃)和 164.34 MPa(600 ℃)，强度最大提高了 34.43%，表现出显著的强度强化效应；而当温度从 600 ℃上升到 800 ℃时，强度由 164.34 MPa 降低至 135.30 MPa，强度降低了 17.67%，表现出强度劣化效应。并对砂岩试件强度的试验值进行拟合，发现其收敛于 Logistpk 函数，相关系数 R^2 为 0.990。砂岩试件的峰值应变随温度的升高先平缓过渡再快速增长，200 ℃和 400 ℃热处理后，砂岩试件的峰值应变略小于 25 ℃；而当热处理温度大于 400 ℃后，峰值应变成倍增长，这是因为高温使得砂岩试件逐渐由脆性向延性转变。并对砂岩试件峰值应变的试验值进行拟合，发现其收敛于 Boltzmann 函数，相关系数 R^2 为 0.997。另外，在 400 ℃前后，砂岩试件的弹性模量表现出截然相反的两种变化趋势，在 25～400 ℃范围时，弹性模量缓慢增大，由 23.77 GPa(25 ℃)分别增加到 24.79 GPa(200 ℃)和 26.74 GPa(400 ℃)；当热处理温度超过 400 ℃后，弹性模量快速减小，由 26.74 GPa(400 ℃)分别减小到 16.98 GPa(600 ℃)和 13.02 GPa(800 ℃)。并对砂岩试件弹性模量的试验值进行拟合，发现其收敛于 Holliday 函数，相关系数 R^2 为 0.841。

3　强度变化机制

为了揭示热处理作用后富黏土砂岩强度的变化机制，对砂岩试件的质量、波速、孔隙率和孔隙分布、峰值应变及弹性模量进行了研究，从宏-细-微观层次解析砂岩力学性能的变化规律。本文主要探讨砂岩矿物颗粒热膨胀、黏土矿物脱水、矿物的物相与热分解这 3 个因素对砂岩强度的影响。

3.1　砂岩矿物颗粒热膨胀的双重效应

(1) 第一重效应。热膨胀促使砂岩试件结构更加致密。砂岩内部存在大量非均匀分布的原生微裂纹和孔隙缺陷，这些微观缺陷结构会对砂岩的热膨胀行为产生影响，导致主要造岩矿物石英颗粒具有较高的体积膨胀率，富含石英矿物的岩石通过热膨胀获得更致密的结构[23]。因此，当热处理温度小于 500 ℃时，初始热膨胀致使砂岩试件内部原生的微裂纹和缺陷逐渐闭合，抑制原生微裂纹连通，从而使得砂岩试件内部结构的致密度逐渐增大[5,17]。当热处理温度为 25～400 ℃时，砂岩试件的波速不断增大，孔隙度分量和孔隙率均降低，表明矿物颗粒的热膨胀促使砂岩试件拥有更致密的结构。而在单轴压缩过程中，矿物颗粒界面的摩擦剪切阻力增加，这在力学性质结果中体现为砂岩试件强度和弹性模量不断增大、峰值应变略有减小(见表 2 和图 4)。因此，热膨胀促使砂岩试件结构更加致密，是热处理温度为 25～400 ℃时砂岩试件的强度呈现出强化效应的主要原因。

(2) 第二重效应。热膨胀诱导微裂纹发育和扩展。原生裂纹的扩展或新裂纹的发育归因于矿物的热膨胀，不同矿物颗粒、颗粒与胶结物热膨胀率的不同会促进矿物接触处微裂纹的产生[5,23]。同时，单个矿物热膨胀的各向异性也会导致晶内微裂纹的发育[23-24]。而当砂岩试件被加热到 500 ℃以上时，这类热膨胀损伤效应才会逐渐占据主导地位[25]。孔隙率和波速都是表征孔隙结构的重要参数，当砂岩试件经过 600 ℃热处理后，波速减小，孔隙度分量和孔隙率略微降低，表明 600 ℃热处理作用下，热膨胀诱导微裂纹发育和扩展的作用有限，但并不能作为强度和峰值应变增大，弹性模量减小的主导因素。当砂岩试件经过 800 ℃热处理作用后，波速急剧减小，孔隙度分量和孔隙率急剧增加，表明 800 ℃下热

膨胀诱导微裂纹发育和扩展,峰值应变增大,强度和弹性模量迅速减小的作用明显。值得注意的是,热膨胀诱导微裂纹如果是取向不利的,可能会抑制应力诱导微裂纹的萌生和合并[23,26],这是 600 ℃热处理作用下砂岩试件强度发生强化效应的部分原因。

3.2 黏土矿物脱水的双重影响

除了微观结构的变化外,砂岩试件成分的变化也会导致其力学性质发生改变,黏土砂岩具有丰富的胶结物,使其力学性质对温度的变化更加敏感。不同状态的水(自由水、结合水、结晶水和结构水)会从温度升高的砂岩黏土矿物(高岭石、伊利石和云母)中逐渐析出[23]。黏土矿物在脱水过程会对岩石力学性能产生双重影响。

(1) 第一重影响。脱水硬化增加了颗粒之间的摩擦力。表 1 和图 1(b)中质量的降低很好地解释了砂岩试件在热处理过程中的脱水现象。热处理温度为 100 ℃左右时,高岭石中的自由水被排出,自由水的蒸发会暂时增大有效应力[11],使岩石表面的微孔隙暴露,为岩石提供了更多的压密空间,热膨胀的压密作用更加显著,新裂纹萌生所需要的温度水平更高,从而导致岩石强度增大。热处理温度为 400 ℃左右时,高岭石中的结合水和结晶水开始析出[26-27],同时云母在 200～600 ℃温度区间发生脱水反应[26,28],都增加了砂岩试件矿物颗粒之间的摩擦力。因此,当热处理温度处于 25～600 ℃范围内时,高岭石和云母矿物脱水硬化增加颗粒之间的摩擦力是砂岩试件强度强化效应产生的另一个原因。

(2) 第二重影响。脱水收缩导致结构解体[23]。热处理温度为 550 ℃左右时,高岭石中的结构水脱出,并发生分解反应变成偏高岭石[27],分解过程见式(6)。

$$Al_2Si_2O_5(OH)_4 \rightarrow Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + 2H_2O \quad (6)$$

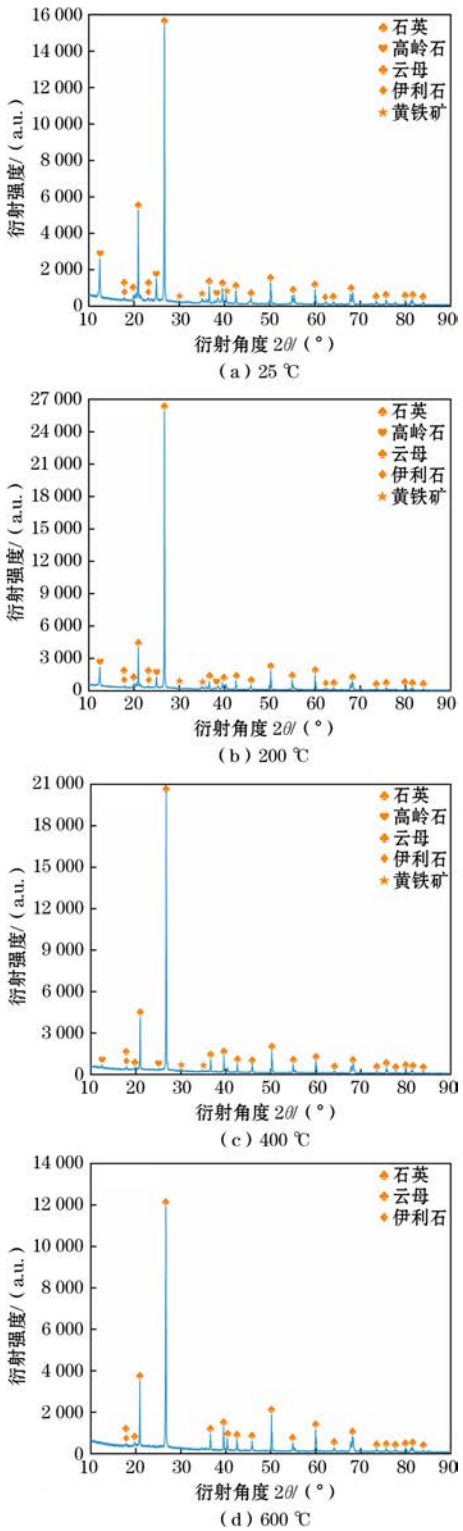
伊利石在 500～750 ℃温度区间发生脱水反应[26,29],脱水反应过程见式(7)。

$$K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2 \rightarrow \frac{1}{2}K_2O + \frac{1}{2}Al_2O_3 + 3SiO_2 + H_2O + 3(Mg,Fe)O \quad (7)$$

当热处理温度超过 500 ℃后,砂岩试件中的高岭石和伊利石矿物开始收缩,更高的热处理温度作用下,砂岩试件的波速急剧降低(800 ℃)、孔隙率增大,说明黏土矿物收缩导致岩体结构严重解体。因此,脱水收缩导致结构解体是造成 800 ℃砂岩试件在宏观上强度劣化的原因之一。

3.3 矿物的相变和热分解

化学反应在较低温度范围内是不活跃的,更高的热处理温度会触发和促进矿物的热反应,加速矿物结构解体,高温作用下砂岩的 XRD 矿物分析结果如图 5 所示。



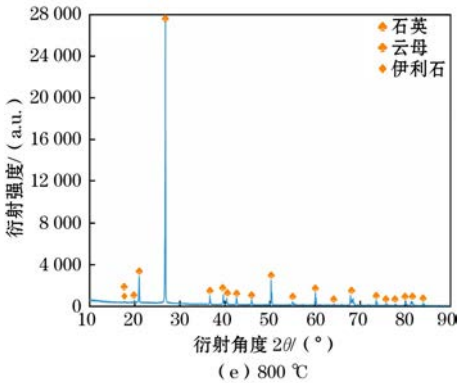


图 5　高温作用下砂岩的 XRD 矿物分析结果

Fig.5　XRD mineral analysis results of sandstone under high temperature conditions

573 ℃高温作用下，石英晶体从 α-石英转变为 β-石英[29-30]。

黏土矿物的热分解也会导致其发生不可逆转的结构破坏，当热处理温度超过 700 ℃时，偏高岭石会完全热分解为 $Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$[27]，分解过程见式(8)。

$$2(Al_2O_3 \cdot 2SiO_2) \rightarrow 2Al_2O_3 \cdot 3SiO_2 + SiO_2 \quad (8)$$

砂岩试件的波速降低和孔隙率增大都是石英的相变和偏高岭石的热分解导致其结构解体破坏的结果。因此，矿物的相变和热分解导致结构解体是造成 800 ℃砂岩试件在宏观上强度劣化的另一个主要原因。

4　结论

本研究对 25～800 ℃热处理后的富黏土砂岩进行了物理参数测量试验和单轴压缩试验，分析了热处理后砂岩试件物理力学性质的演化规律。发现砂岩试件的强度随温度升高呈现出强度强化和强度劣化两种特性，并从颗粒热膨胀、矿物脱水及矿物的物相和热分解 3 个方面揭示了强度变化机制。主要研究结论如下。

(1) 随着热处理温度升高，砂岩试件的质量不断减小，波速和弹性模量呈先增大后减小的变化趋势，孔隙率和峰值应变呈先减小后增大的变化趋势。

(2) 热处理温度为 25～400 ℃时，砂岩试件的强度由 122.25 MPa(25 ℃)分别增加到 125.92 MPa(200 ℃)和 136.95 MPa(400 ℃)，表现出显著的强度强化特性。其机制为：石英颗粒热膨胀促使砂岩试件结构更加致密，以及高岭石和云母的脱水硬化增加了颗粒之间的摩擦力。

(3) 热处理温度为 400～600 ℃时，砂岩试件的强度由 136.95 MPa 增加到 164.34 MPa，表现出显著的强度强化特性。其机制为：热膨胀微裂纹取向不利，抑制了应力诱导微裂纹的扩展，以及云母的脱水硬化增加了颗粒之间的摩擦力。在富黏土砂岩中，二者的强化作用大于石英相变的劣化作用。

(4) 热处理温度为 600～800 ℃时，砂岩试件的强度由 164.34 MPa 降低至 135.30 MPa，表现出显著的强度劣化特性。其机制为：伊利石脱水收缩和偏高岭石热分解导致砂岩试件内部结构解体。

(5) 热处理作用导致矿物发生热膨胀、脱水、相变和热分解，均对富黏土砂岩强度变化产生了显著影响，可考虑将该影响机制推广到富黏土沉积岩热特性的研究中。

参考文献(References)：

[1] 周航，张广泽，赵晓彦，等.深部极高地应力花岗岩隧道岩爆破坏特征及成因机理研究[J].工程地质学报，2024，32(3)：1098-1111.
ZHOU Hang, ZHANG Guangze, ZHAO Xiaoyan, et al. Rockburst failure characteristics and formation mechanism of deep granite tunnel with extremely high geo-stress[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(3): 1098-1111.

[2] 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)：75-99.
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): 75-99.

[3] 平琦，张传亮，孙虹键.不同高温循环作用后砂岩动力特性试验研究[J].采矿与安全工程学报，2021，38(5)：1015-1024.
PING Qi, ZHANG Chuanliang, SUN Hongjian. Experimental study on dynamic characteristics of sandstone after different high temperature cyclings[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(5): 1015-1024.

[4] 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 Jianhong, WEI Sijiang, SU Chengdong. 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.

[5] 何国梁，吴刚，黄醒春，等.砂岩高温前后超声特性的试验研究[J].岩土力学，2007，28(4)：779-785.
HE Guoliang, WU Gang, HUANG Xingchun, et al. Experimental study on ultrasonic properties of sandstone before and after high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4): 779-785.

[6] 赵洪宝,尹光志,谌伦建.温度对砂岩损伤影响试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊1):2784-2788.
ZHAO Hongbao, YIN Guangzhi, CHEN Lunjian. Experimental study on effect of temperature on sandstone damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(Suppl.1):2784-2788.

[7] 马占国,唐芙蓉,戚福周,等.高温砂岩热膨胀系数变化规律试验研究[J].采矿与安全工程学报,2017,34(1):121-126.
MA Zhanguo, TANG Furong, QI Fuzhou, et al. Experimental study on thermal expansion coefficient changing rule of sandstone under high temperature[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(1): 121-126.

[8] 李学成,冯增朝,郭纪哲,等.温度和应力对砂岩渗透率影响规律研究[J].煤炭科学技术,2019,47(4):96-100.
LI Xuecheng, FENG Zengchao, GUO Jizhe, et al. Study on influence laws of temperature and stress on sandstone permeability[J]. Coal Science and Technology,2019,47(4): 96-100.

[9] 吕超,孙强,邓舒,等.砂岩和灰岩热导率温度作用效应的实验研究[J].高校地质学报,2017,23(4):626-632.
LYU Chao, SUN Qiang, DENG Shu, et al. Research on the thermal conductivity of sandstone and limestone after high temperature treatment[J]. Geological Journal of China Universities,2017,23(4):626-632.

[10] 吴顺川,李利平,张晓平.岩石力学[M].北京:高等教育出版社,2021.
WU Shunchuan, LI Liping, ZHANG Xiaoping. Rock Mechanics[M]. Beijing:Higher Education Press,2021.

[11] 明杏芬,明晓东.高温条件砂岩力学性能与热损伤特性试验研究[J].矿业研究与开发,2017,37(7):57-60.
MING Xingfen, MING Xiaodong. Experimental study on mechanical properties and thermal damage characteristics of sandstone under high-temperature environment[J]. Mining Research and Development,2017,37(7):57-60.

[12] 尹土兵,李夕兵,殷志强,等.高温后砂岩静、动态力学特性研究与比较[J].岩石力学与工程学报,2012,31(2):273-279.
YIN Tubing, LI Xibing, YIN Zhiqiang, et al. Study and comparison of mechanical properties of sandstone under static and dynamic loadings after high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012, 31(2):273-279.

[13] 王珍珍,秦本东,郭佳奇,等.高温作用对煤系砂岩力学性能和能量演化机制的影响[J].河南理工大学学报(自然科学版),2022,41(6):181-187.
WANG Zhenzhen, QIN Bendong, GUO Jiaqi, et al. Influence of high temperature treatment on mechanical properties and energy evolution mechanism of sandstone[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2022,41(6):181-187.

[14] 贾蓬,王茵,李博,等.高温遇水冷却岩石循环加卸载力学性能试验研究[J].北京理工大学学报,2023,43(2):126-134.
JIA Peng, WANG Yin, LI Bo, et al. Experimental study on mechanical properties of water-cooled high temperature rock under cyclic loading[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2023,43(2):126-134.

[15] 姜德义,郭朋煜,范金洋,等.升温速率对高温作用后砂岩的宏细观性质影响[J].岩土力学,2022,43(10):2675-2688.
JIANG Deyi, GUO Pengyu, FAN Jinyang, et al. Effect of heating rate on macro and mesoscopic properties of sandstone after high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(10):2675-2688.

[16] 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 Chengdong, GUO Wenbing, LI Xiaoshuang. Experimental research on mechanical properties of coarse sandstone after high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(6):1162-1170.

[17] 于鑫,李皋,陈泽,等.川西须家河组致密砂岩高温后的物理力学特征参数试验研究[J].地质力学学报,2021,27(1):1-9.
YU Xin, LI Gao, CHEN Ze, et al. Experimental study on physical and mechanical characteristics of tight sandstones in the Xujiahe Formation in western Sichuan after high-temperature exposure[J]. Journal of Geomechanics,2021,27(1):1-9.

[18] 任松,李凯鑫,张平.动力扰动和高温联合作用下砂岩力学特性及破坏特征[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(3):1087-1097.
REN Song, LI Kaixin, ZHANG Ping. Mechanical properties and failure characteristics of sandstone under combined effect of dynamic disturbance and high temperature[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2023,54(3):1087-1097.

[19] 金爱兵,王树亮,魏余栋,等.不同冷却条件对高温砂岩物理力学性质的影响[J].岩土力学,2020,41(11):3531-3539+3603.
JIN Aibing, WANG Shuliang, WEI Yudong, et al. Effect of different cooling conditions on physical and mechanical properties of high-temperature sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics,2020,41(11):3531-3539+3603.

[20] 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):2249-2259.
ZHANG Yi, LI Gao, WANG Xiyong, et al. Microfabric characteristics of tight sandstone of Xujiahe formation in western Sichuan after high temperature and the effect on mechanical properties[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(11):2249-2259.

[21] 梁忠豪,秦楠,孙嘉彬,等.高温作用后黄砂岩三轴压缩及细观破裂机制[J].科学技术与工程,2021,21(24):10430-10439.
LIANG Zhonghao, QIN Nan, SUN Jiabin, et al. Triaxial compression and meso fracture mechanism of yellow sandstone after high temperature[J]. Science Technology and Engineering,2021,21(24):10430-10439.

[22] ZHAO K, ZHANG L, YANG D X, et al. Cyclic impact damage and water saturation effects on mechanical properties and Kaiser effect of red sandstone under uniaxial cyclic loading and unloading compression [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2024,57(1):181-195.

[23] WONG L N Y, ZHANG Y H, WU Z J. Rock strengthening or weakening upon heating in the mild temperature range [J]. Engineering Geology,2020,272:105619.

[24] GRIFFITHS L, HEAP M J, BAUD P, et al. Quantification of microcrack characteristics and implications for stiffness and strength of granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2017,100:138-150.

[25] RATHNAWEERA T D, RANJITH P G, GU X, et al. Experimental investigation of thermomechanical behaviour of clay-rich sandstone at extreme temperatures followed by cooling treatments [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2018,107:208-223.

[26] ZHANG L, YANG D X, ZHAO K, et al. Investigation of high-temperature effects on the strengthening and degradation of mechanical property in sandstone[J]. Applied Energy,2024,357:122532.

[27] LI M, MAO X B, CAO L L, et al. Effects of thermal treatment on the dynamic mechanical properties of coal measures sandstone [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2016,49(9):3525-3539.

[28] 李艳,程禹翰,翟越,等.高温后花岗岩微观结构演化特性与动态力学性能研究[J].岩土力学,2022,43(12):3316-3326.
LI Yan, CHENG Yuhan, ZHAI Yue, et al. Micro-structure characteristics and dynamic mechanical properties of granite after high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(12):3316-3326.

[29] 邵珣,张凝凝,麻栋,等.煤中典型矿物在高温下演变规律[J].洁净煤技术,2019,25(6):111-117.
SHAO Xun, ZHANG Ningning, MA Dong, et al. Evolution law of typical minerals in coal under high temperature[J]. Clean Coal Technology,2019,25(6):111-117.

[30] 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 Zhizhen, 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.