

不同初始损伤白砂岩高温处理后的力学性能研究

王苏然, 陈有亮, 刘松明, 孙龙, 叶锬锬, 向伟

(上海理工大学 土木工程系, 上海 200093)

摘要: 通过进行不同初始损伤程度白砂岩在不同等级高温处理后的力学试验, 分析了温度和初始损伤对白砂岩的杨氏模量、峰值应力和显微结构等方面的影响。试验结果表明: 随着温度的升高, 受到初始损伤的白砂岩试件的杨氏模量和抗压强度都呈下降的趋势, 初始损伤越大, 高温对白砂岩造成的影响越大。通过显微镜观察到随着温度的升高, 试块的晶体变小, 颗粒的破坏更为破碎, 岩屑更多。此外, 通过对试验数据的整理, 建立了不同初始损伤等级和不同温度等级下白砂岩的本构关系曲线。

关键词: 白砂岩; 损伤; 高温; 力学性能

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)01-0206-06

Study on mechanical property of white sandstone with different initial damages after treatment of high temperature

WANG Suran, CHEN Youliang, LIU Songming, SUN Long, YE Peipei, XIANG Wei

(School of Civil Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Through the mechanical test of white sandstone with various degrees of initial damage after treatment of different high temperatures, the paper analyzed the influence of different target temperatures and initial damage on elastic modulus, peak stress and microscopic structure. The results show that elastic modulus and compressive strength of white sandstone affected by initial damage decrease with the increase of temperature. The greater the initial damage, the severer the impact of high temperature on white sandstone. Through the observation by using microscope, the crystal of specimen becomes smaller and incomplete, cuttings is more. In addition, the paper set up the stress-strain curves of white sandstone with different initial damages and temperatures.

Key words: white sandstone; damage; high temperature; mechanical property

研究高温作用或高温后的岩石工程问题是岩石力学的新课题。在能源、地质、土木等众多工程领域中, 地热的开发与利用、高放射性核废物的地层深埋处置、地下矿山煤和瓦斯爆炸等工程所处的地质环境周围岩体均可能经历一定的高温, 这就需要考虑岩石在高温作用下或高温后的物理力学性质。此外, 对于遭受突发性高温(如火灾)影响的岩石工程, 其安全性评估及灾后的修复、加固也需要分析评价高温后岩石性能的变化。目前, 国内外对岩石高温后进行了损伤机理、劣化规律、本构方程等诸多研究^[1-5], 以花岗岩、大理岩最多。而白砂岩作为人类使用最广泛的石材, 在中国西北部地区可以被广泛

的取用并被用于填入输水明渠。但迄今为止, 白砂岩的力学性能研究还未受到广泛关注, 而实际工程中岩石往往是有初始损伤的, 当在实际工程中白砂岩遇到高温情况后, 无法寻找到有参考价值的理论数据作为其安全性评估、修复和加固的依据。故有必要展开有初始损伤的岩石在高温后的力学性能的研究。

1 试验概况

1.1 试样制备

试验中采用的白砂岩均取自福建某石料矿场, 颜色较浅, 略带粉红色, 其成分主要为石英、长石、云

收稿日期: 2015-11-05; 修回日期: 2015-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(10872133); 上海市自然科学基金项目(14ZR1428200)

作者简介: 王苏然(1990-), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 研究方向: 岩石材料力学、混凝土材料力学、边坡稳定性研究等。

通讯作者: 陈有亮(1966-), 男, 河北故城人, 博士, 教授, 主要从事岩土力学和边坡稳定方面研究。

母、岩屑等,测得密度 $\rho = 2.35 \text{ g/cm}^3$ 。将白砂岩加工成标准试件 $\phi = 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 满足《工程岩体试验方法标准》^[6] 的要求: 试件两端面不平整度误差不得大于 0.05 mm ; 沿试件高度直径的误差不得大于 0.3 mm ; 端面应垂直于试件轴线最大偏差不得大于 0.25° 。试验前采用康科瑞 NM-3C 非金属超声检测仪测定了岩试件的动弹性模量, 挑选测量值相近的试件进行同一批试验, 以减小同批次岩石试件的离散性。

1.2 试验设备和试验方法

试验中所用的高温设备为上海尚群电子科技有限公司制造的型号为 SMF1900-50 的箱式电阻炉, 炉膛净空为 $500 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 额定功率为 20 kW , 最高温度可达 1900°C 。单轴压缩试验采用西安力创材料检测技术有限公司生产的微机控制刚性伺服三轴压力试验机, 其最大荷载为 $2\,000 \text{ kN}$ 。白砂岩的纵波波速和杨氏模量测量采用 V-ME-TER III 型超生脉冲速度测试仪, 微观结构观测采用德国蔡司公司研制生产的型号为 SteREO Discovery V8 的研究级智能立体显微镜, 其最大放大倍数为 120 倍。

试验前, 先随机取 10 块白砂岩试块进行单轴压缩试验, 分别测定极限抗压强度, 取平均值。将岩石试块分组编号, 分为 300°C 、 600°C 、 900°C 、 1200°C 及常温 5 个大组, 各大组又分为 6 个小组, 前小组分别经压力机压至平均极限抗压强度的 15% 、 30% 、 45% 、 60% 、 75% , 以形成不同的损伤 (为方便表述, 如对试块施加的力与平均极限抗压强度的百分比为 15% , 则称施加了 15% 的损伤, 以次类推), 另一组不施加初始损伤作为对比, 共计 150 块。单轴压缩试验采用微机控制刚性伺服三轴压力试验机, 试验时采用应力控制方式, 以 0.5 MPa/s 的加载速率施加荷载。

分别测定每个试件高温前的纵波波速和杨氏模量。将试件放入箱式电阻炉中, 以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速度达到预定温度后, 恒温 4h, 以确保试件内外温度达到均匀, 然后分别自然冷却 (炉膛中冷却) 至室温, 4 个大组的试块分别加高温至 300°C 、 600°C 、 900°C 、 1200°C , 另有 1 组不加高温以作为对比。试块冷却后再次分别测量纵波波速和杨氏模量, 利用微机控制刚性伺服三轴压力试验机对高温后的花岗岩进行单轴压缩试验, 试验采用应力控制方式, 以 0.5 MPa/s 的速率沿轴向施加荷载, 直至试件破坏。试验数据由系统自动采集, 得到试件变形与力的关系

曲线及数据, 并用立体显微镜观察岩样破坏后的微观图像。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象及表观形态

在经历高温后, 白砂岩的表观形态有所改变, 其典型变化状况的表观描述及试验现象如下:

300°C : 试块颜色稍变白, 呈灰白色, 试块上编号的字迹无变化, 体积变化微小, 略有收缩, 高温灼烧时略有刺激性气逸出, 开炉门让试块在炉腔内自然冷却后, 用手触摸试块, 较之常温状态表面更粗糙, 对于因初始损伤所造成有裂纹的试块, 其裂纹有所张大, 如图 1a。

600°C : 试块颜色变深, 呈暗灰色, 试块上编号的字迹略有隐退, 但仍清晰可见, 体积略有膨胀, 灼烧时有少量刺激性气体, 冷却后用手触摸, 其表面比较粗糙, 但较之 300°C 后要光滑一些, 如图 1b;

900°C : 试块颜色较之 600°C 略变白, 略带粉红色, 试块上编号的字迹几乎完全隐退, 少量的仍可认出其标号, 如图 1c 所示。体积略有膨胀, 灼烧时有大量刺激性气体逸出, 冷却后用手触摸, 其表面比较光滑, 表面有较多的红褐色斑点, 对于因初始损伤所造成有裂纹的试块, 其裂纹变宽且裂纹长度伸长, 裂纹伸长了约 10 mm ;

1200°C : 颜色变深, 呈红褐色, 试块上编号的字迹完全隐退 (图中为冷却后根据其位置重新写上标号) 体积有所膨胀, 灼烧时有大量刺激性气体, 开炉门后可见试块呈通红状, 如图 1d 所示, 冷却后用手触摸, 其表面非常光滑, 有较多的红色斑点, 用力在地板上划后有暗红色划痕。

2.2 相对杨氏模量

杨氏模量是材料性质的一个基本物理量, 仅由材料本身的物理性质决定。杨氏模量的大小标志了材料的刚性, 杨氏模量越大, 越不容易发生形变。为了解不同损伤下及在高温作用后白砂岩试块内部组织结构的变化, 用超声脉冲速度测试仪测其杨氏模量, 每组取平均值, 并进行比较分析。为方便描述, 记白砂岩试块未处理时的杨氏模量为 M_1 , 施加了初始损伤后的杨氏模量为 M_2 , 高温后的杨氏模量为 M_3 。由于试块的初始杨氏模量并不一样, 为便于比较, 参考 ASTM 动弹性模量的定义, 引入相对杨氏模量的概念, 即试块两种不同状态下的杨氏模量的比值, 其量纲为 1。

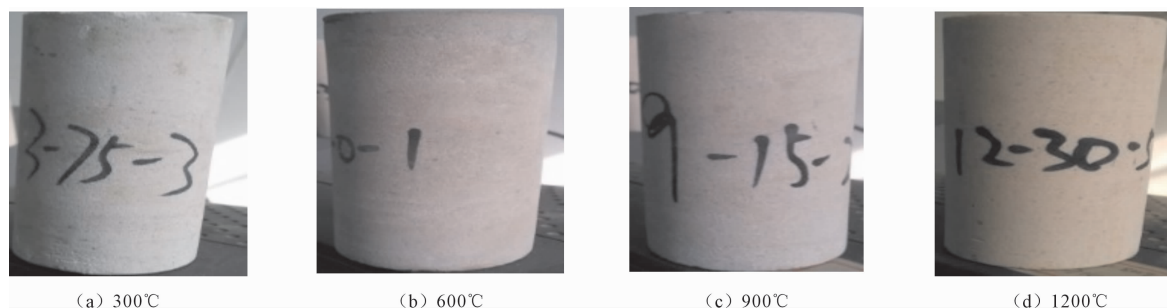


图1 不同高温后白砂岩典型试验现象

取 M_2/M_1 , 可得到白砂岩试块相对杨氏模量随不同初始损伤的关系曲线, 可反映由施加初始损伤所造成的杨氏模量变化, 如图 2 所示。可以看出, 施加不同的初始损伤后, 白砂岩试块的杨氏模量都有一定程度的减少。这是因为在经历一定的初始损伤后, 白砂岩试块内部的结构受到了一定程度上的开裂破坏, 产生了不同程度的裂纹。而从图 2 可以进一步看出: 相对杨氏模量, 由不施加初始损伤时的 1, 减小到施加 75% 初始损伤时的 0.957, 减幅为 4.3%, 虽然减幅较小, 但通过本次试验 150 块试块 (即相同初始损伤下的试块多达 25 块) 的统计分析, 可能由于试验中误差的作用, 导致损伤为 30% 和 60% 时的杨氏模量测定有偏差。但是通过数据拟合, 可以看出试件的弹性模量和损伤程度呈线性下降的趋势。损伤相对杨氏模量 (y 项) 与初始损伤 (x 项 (%)) 的关系, 可用如下函数式表示:

$$y = 0.99852 - 0.00053x \quad (R^2 = 0.9593) \quad (1)$$

取 M_3/M_2 , 即得到图 3 所示不同高温下相对杨氏模量与初始损伤的关系曲线, 可反映由高温所造成的杨氏模量变化。从图 3 可以看出: 在 300°C 到 900°C 高温时, 相对杨氏模量变化并不大, 在 300°C 时略有减小, 在 600°C 时有明显上升, 高出只加初始损伤, 不施加高温的对比组, 900°C 时又略有下降。这是因为在 300°C 时, 岩石内部水分蒸发, 而到 600°C 时, 矿物晶体在加热过程中出现体积微微增大, 内部孔隙闭合;

900°C 时, 通过脉冲波速测试出的纵波波速下降, 我们可以知道岩石内部裂缝又进一步扩展, 岩石部分颗粒破裂所致; 而加温到 1200°C 时, 相对杨氏模量骤降, 约为其他组的 50%, 结合 1200°C 试块已变通红 (图 1d), 可以判断, 此阶段岩石内部已受到了明显破坏, 晶体出现了质变, 使相对杨氏模量发生了很大的下降。

2.3 峰值应力

图 4 是相同的初始损伤下试块的峰值应力随温

度变化的曲线。从图 4 中可以看出, 随着初始损伤的增大, 试块的峰值应力也随着变小。从各曲线上可以明显地看出, 试块在 300°C 时峰值应力变小, 而到了 600°C 时峰值应力有所强化, 比常温下的峰值应力更大, 而 600°C 以后, 峰值应力随温度的增加而降低。以初始损伤为 45% 组为例, 不加高温时峰值应力为 63.6MPa, 300°C 时为 51.2MPa, 到 600°C 时达到了 74.3MPa, 峰值应力的增幅较常温组达到了 16.8%, 900°C 时为 61.9MPa, 与常温组基本持平, 而到了 1200°C 时, 峰值应力下降到了 51.42MPa, 降幅较常温组达到了 19.1%, 而 600°C 时与 1200°C 时的峰值应力差达到了 22.88MPa, 相差了 44.5%。这说明了温度对试块的破坏随温度的升高并不是单一增加的, 只有在超过一定的阈值后强度才随温度的升高而降低。因此, 实际岩石工程中如若遇到火灾、地热等高温破坏, 需首先测试其温度是否超过阈值, 若未超过阈值, 即不会发生因强度而引起的破坏。而超过阈值后, 需要警惕和预防因高温对白砂岩造成的破坏导致的事故。

2.4 应力-应变曲线

经过不同初始损伤的白砂岩试件在经历了不同高温作用后, 采用微机控制刚性伺服三轴压力试验机进行单轴压缩试验。绘出不同初始损伤不同温度作用下白砂岩的典型应力-应变曲线, 如图 5~9 所示。从图 5 中可以看出, 不同初始损伤不同温度作用下白砂岩的典型应力-应变曲线变化规律大体相似, 大致可以分为压密阶段、弹性阶段和弹塑性阶段。

从以上应力-应变曲线还可以看出, 900°C 前, 曲线有较为明显的下降区段, 这说明此时试块属于弹塑性破坏, 而 900 及 1200°C 时, 曲线已无明显的下降区段, 这说明试块已接近塑性破坏, 这也可以说明 900°C 后, 试块的内部受到的破坏显著。

不少学者通过试验、模拟等研究发现岩石应力-应变曲线形状并不完全一致, 尤其是破坏后阶段更有较大差别, 这主要与岩石的性能、大小和试件制

作的质量有关。

2.5 轴向峰值应变

由单轴压缩试验测得的轴向变形 ,除以试块的

高 100 mm,可求出轴向峰值应变,每组试件的轴向峰值应变取平均值,得到不同初始损伤不同温度作用后白砂岩的轴向峰值应变,如图 10 所示。

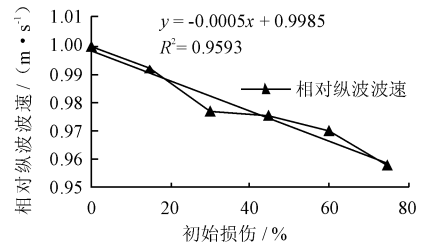


图 2 相对杨氏模量随初始损伤变化的关系曲线

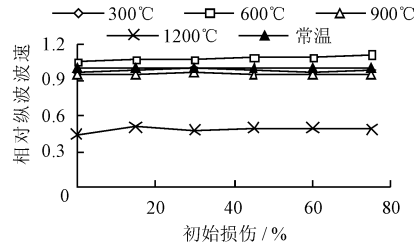


图 3 不同高温下相对杨氏模量与初始损伤的关系曲线

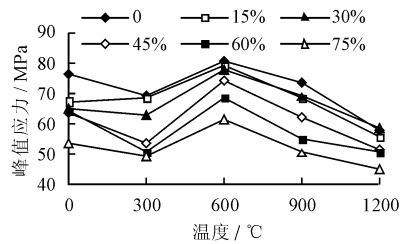


图 4 不同初始损伤白砂岩峰值应力与温度的关系曲线

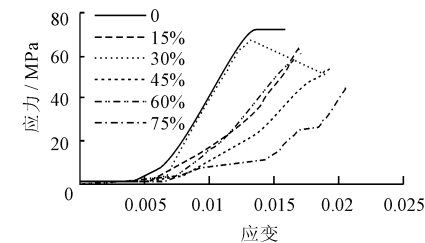


图 5 常温下不同初始损伤白砂岩应力-应变曲线

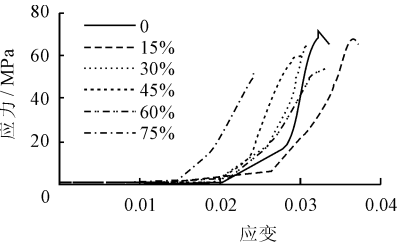


图 6 300℃ 下不同初始损伤白砂岩应力-应变曲线

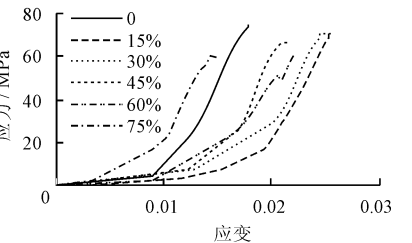


图 7 600℃ 下不同初始损伤白砂岩应力-应变曲线

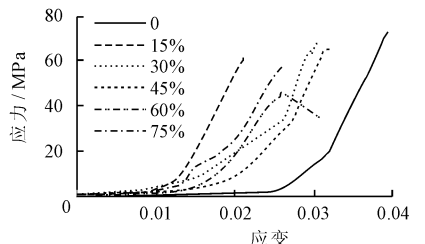


图 8 900℃ 下不同初始损伤白砂岩应力-应变曲线

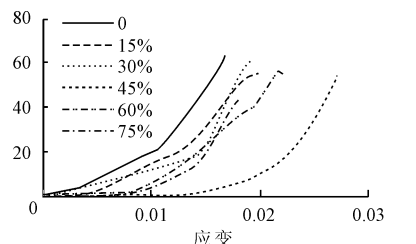


图 9 1200℃ 下不同初始损伤白砂岩应力-应变曲线

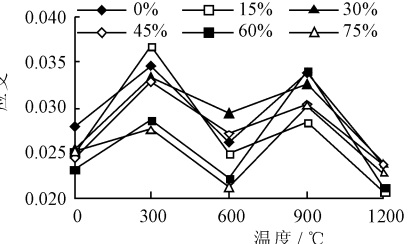


图 10 不同初始损伤白砂岩的应变与温度的关系曲线

从图 10 可以看出,试块的峰值应变在 300℃ 时变大,在 600℃ 下降,到了 900℃ 时又变大,而到了 1200℃ 时再次下降,且 1200℃ 组的应变最小。以不受初始压力组为例,经历 300℃ 后,峰值应变由不加高温时的 0.02563 变为 0.03471,增幅为 35.43%,600℃ 时,由 0.03471 变为 0.02451,降幅为 29.39%,900℃ 时,由 0.02451 变为 0.03379,增幅为 37.62%,而 1200℃ 时,由 0.03379 变为 0.02364,降幅为 30.04%。这是因为随着温度的增加,试块内会发生水分蒸发、试块热熔、结构性失水、重结晶、相变等现象,内部结构变化复杂,导致应变也有所改变。

2.6 纵波波速

目前,超声波测试技术在岩石力学领域得到了广泛的应用^[7]。通过岩石的超声波速度可以对岩石进行分级,确定岩石的可钻性;根据超声波的传播

速度、衰减特性可以研究岩石的构成及内部孔隙情况,对同一材料的岩石试块,纵波波速的差异能在一定程度上反映岩石试块间的完整性^[8]。由于试块具有一定的离散性,每一个试块的初始纵波波速并不一致,若直接取试块的纵波波速进行比较将没有意义,故本文中取试块施加初始损伤前后以及高温后的纵波波速差值进行比较。

图 11 是白砂岩试块在施加初始压力前后的纵波波速差值(施加初始损伤前的纵波波速-施加初始损伤后试块的纵波波速),由图 11 中可以看出,随着初始损伤的增加,试块的杨氏模量差也越大,说明试块受到的损伤也越大,与前几节相符。这是因为随着初始损伤的增大,试块内部的裂隙增多,结构受到破坏的程度增加,降低了其物理性能,纵波波速减小。

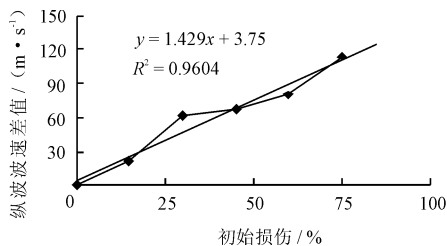


图 11 纵波波速差值与初始损伤的关系曲线

从图 12 不同高温后白砂岩纵波波速差值(高温前试块的纵波波速 - 高温后试块的纵波波速)与初始损伤的关系曲线中可以看出,300、900℃ 组的试块的纵波波速差值稳定在 200 m/s 以内,且随初始损伤的增加变化不大。600℃ 组的纵波波速差值为负数。说明高温后白砂岩试块的纵波波速反而增加了,由本文从热应力对白砂岩作用的机制分析可知,600℃ 时出现了热熔的现象,试块的物理力学性质都有所提高。1200℃ 的纵波波速差值较其他组都有很大的差别,达

到了 1200℃ 以上,可认为高温破坏了试块的结构,试块发生了质变,导致纵波波速急剧下降。

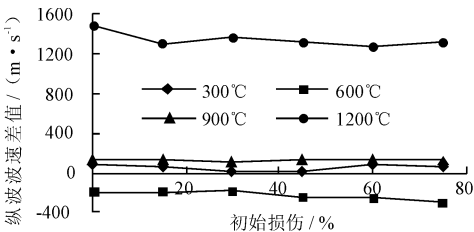


图 12 不同高温后白砂岩纵波波速差值与初始损伤的关系曲线

2.7 微观分析

施加初始损伤及高温作用后,白砂岩试块的物理力学性能都发生了一定的变化,究其根本,在于试块内部的结构发生了改变。采用研究级智能立体显微镜观察经过各种处理后的白砂岩试块,并对试块进行 30 倍的放大,以观察其破坏后的表面微观结构图,见图 13。

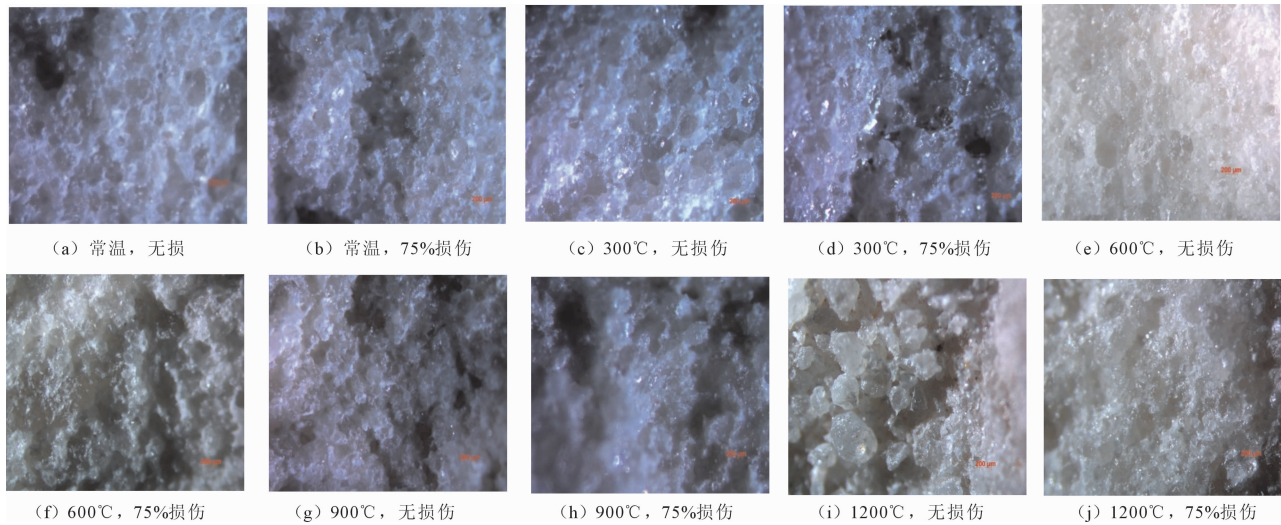


图 13 不同温度下自然状态与带初始损伤岩石微观对比图

图 13 是常温及各种高温下白砂岩在不加初始损伤,及损伤为 75% 时的 30 倍放大系数的微观图,从图中可以看出,在经历初始损伤后,试块破坏后的晶体稍有减小,颗粒破坏更加完整。从不加初始损伤不同温度下白砂岩试块的表现微观图来看,600℃ 之前,试块的晶体较大,晶体间有较多胶结物;600℃ 时,晶体的大小基本不变,胶结物减少,晶体间更为紧密;900℃ 及之后,试块的晶体变小,晶体间胶结物减少,且随着温度的升高,颗粒的破坏更为破碎,岩屑更多。可认为在 600℃ 时,并与胶结物开始热熔并在取出高温炉后冷凝,使得颗粒间的空隙被填充,颗粒间更为紧凑,与前几节 600℃ 时白砂岩的物理力学性质都有所提高相符;900℃ 时,部分颗粒开始

破裂,而 1200℃ 时,高温对试块晶体颗粒的破坏更加明显,颗粒更加破碎,与热熔的胶结物重结晶后,晶体变小,物理力学性质也发生改变。

3 高温作用下白砂岩的损伤机理分析

白砂岩随温度变化的这种趋势,可从热应力对砂岩作用的机制进行分析^[9]:随着温度的升高,由于砂岩中各种矿物的颗粒粒径、各向异性、热膨胀率以及热弹性性质的不同,引起跨颗粒边界的热膨胀不协调,进而产生颗粒间或颗粒内部的热应力(拉应力或压应力)。热应力随温度进一步增大,致使砂岩内部产生微裂纹,原生或次生裂纹的扩展、加宽与连通,在宏观上就表现为砂岩力学性质的劣

化^[10]。对本次试验中各温度段白砂岩的力学性能的改变分析如下:

(1) 300℃时,主要为受热后砂岩内部各矿物颗粒变形的调整过程,使得岩石内部原有裂隙逐渐闭合,致密程度得到改善,而一些小裂纹则逐步形成较大裂纹带或大裂纹,这致使砂岩的峰值强度有所下降、峰值应变逐步上升,而弹性模量下降,在此阶段温度对砂岩的力学性能具有减弱作用。

(2) 600℃时,由于砂岩部分矿物发生了热熔效应,导致砂岩内部一些裂缝愈合、裂纹的数量开始呈下降趋势,使得砂岩的峰值强度和峰值应变上升、弹性模量增大。总体上看,经历600℃后,温度对砂岩力学性能的影响不大,加温对砂岩力学性能有一定的增强作用。

(3) 900~1200℃时,砂岩的强度随温度的增加而降低,是由于砂岩中的矿物成分及其内部结构发生了变化所致,如石英从 α -石英转化为 α -鳞石英,尽管冷却后仍然变回 α -石英,但是相转变的过程对矿物颗粒联结也可能产生影响;当加热到900℃以上后,砂岩中矿物成分的变化包括结构水脱失、重结晶和相变等多种情况^[11-12],十分复杂,其力学性能劣化明显。

4 结 论

(1) 试块的相对纵波波速,随初始损伤程度的增加而增加;相同初始损伤下,在300℃时有所下降,600℃时增大并超过了常温下的相对纵波波速,到1200℃时显著下降至其他组的一半左右;

(2) 白砂岩试块的峰值应力,随初始损伤的增加而降低,并在300℃时有所下降,在600℃时达到最大值,600℃之后随温度的升高而降低;

(3) 白砂岩试块的应力-应变曲线大致可分为压密阶段、弹性阶段、应力软化阶段,曲线的形式与初始损伤程度无关,且在900℃之后无明显下降区段,呈现塑性破坏的趋势;

(4) 在经历初始损伤后,试块破坏后的晶体稍有减小,颗粒破坏更加完整,600℃之前,试块的晶体

较大,晶体间有较多胶结物;900℃及之后,试块的晶体变小,晶体间胶结物减少,且随着温度的升高,颗粒的破坏更为破碎,岩屑更多;

(5) 白砂岩中矿物成分随温度不同程度的改变是高温下影响白砂岩物理力学性能改变的根本原因。

参考文献:

- [1] 曹文贵,张升,赵明华. 基于新型损伤定义的岩石损伤统计本构模型探讨[J]. 岩土力学,2006,27(1):41-46.
- [2] 杨学堂,王飞. 岩体本构模型研究方法及评价[J]. 岩土工程技术,2004,18(4):213-217.
- [3] 张明,王菲,杨强. 基于三轴压缩试验的岩石统计损伤本构模型[J]. 岩土工程学报,2013,35(11):1965-1971.
- [4] 张晶瑶,马万昌,张凤鹏,等. 高温条件下岩石结构特征的研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),1996,17(1):5-9.
- [5] David C, Menendez B, Darot M. Influence of stress-induced and thermal cracking on physical properties and microstructure of La Peyratte granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(4):433-448.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T50266-2013. 工程岩体试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社,2013.
- [7] 王让甲. 声波岩石分级和岩石动弹力学参数的分析研究[M]. 北京:地质出版社,1997:13-19.
- [8] 尤明庆,苏承东,李小双. 损伤岩石试样的力学特性与纵波速度关系研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(3):458-467.
- [9] 吴刚,邢爱国,张磊. 砂岩高温后的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(10):2110-2116.
- [10] 左建平,谢和平,周宏伟. 温度压力耦合作用下的岩石屈服破坏研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2917-2921.
- [11] 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.
- [12] 杜守继,刘华,职洪涛,等. 高温后花岗岩力学性能的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(14):2359-2364.