

热处理后白砂岩物理力学参数的变化规律

刘旭阳, 陈有亮, 徐培

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 对热处理后的白砂岩进行了单轴压缩试验, 分析了白砂岩应力峰值、纵波波速、弹性模量以及破坏形态随温度的变化规律, 建立了白砂岩损伤变量与温度之间的关系式, 分析了白砂岩损伤变量与物理力学参数之间的关系。研究表明: 热处理后的白砂岩在某一温度范围内表现出一定的自愈性; 热处理后白砂岩的物理力学参数与温度之间呈现二次非线性关系; 热处理对白砂岩的破坏形态影响不大; 热处理造成的损伤对白砂岩物理参数的影响大于对其力学参数的影响。研究成果对高温环境岩石工程的建设具有重要的参考价值。

关键词: 热处理; 白砂岩; 物理力学参数; 自愈性; 应力峰值; 纵波波速; 损伤变量

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2016)05-0214-06

Variation law of physical and mechanical parameter of white sandstone after heat treatment

LIU Xuyang, CHEN Youliang, XU Pei

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The paper conducted the uniaxial compression test to white sandstone after heat treatment and analyzed the variation law of peak stress, longitudinal wave velocity, Young's modulus and damage form of white sandstone with temperature, and established the equation between temperature and damage variables of white sandstone. It analyzed the relationship between the damage variable and mechanical parameters. The result shows that after heat treatment, white sandstone shows some self-healing within a range of temperature; the relationship between physical and mechanical parameters and temperature presents quadratic nonlinear law; the heat treatment has little effect on failure mode of white stone; the damage of heat treatment has more effect on physics parameter than that on mechanical parameter. The study results have important value for the construction of rock engineering in the circumstance of high-temperature.

Key words: heat treatment; white sandstone; physical and mechanical parameter; self-healing; peak stress; longitudinal wave velocity; damage variable

1 研究背景

处理高温、高压等特殊情况下的岩石工程问题是岩石力学面临的新挑战。近年来, 随着地下深部空间的开发利用、地球深处矿产资源的开发(可燃冰的开采)、高放射性核废料地下贮存等难题的出现, 致使相关工程技术人员需要掌握岩石在高温、高压等特殊情况下以及经历不同高温后的物理力学性质的变化, 为相关岩土工程的可靠性提供依据。此外, 研究高温作用后岩石的物理力学特性有助于对

受火灾或者爆炸等意外影响的岩石工程的安全性做出正确的评估, 为灾后的修缮工作提供科学依据。

国内外对于岩石在高温、高压等特殊情况下的物理力学特性进行了广泛的研究。Hajpal^[1]运用X射线衍射技术以及扫描电子显微镜和超声检测的方法, 研究试件高温前及高温后各物理力学特性的改变。Rutqvist等^[2]以岩石为试验材料, 对试件进行热-力-湿多场耦合试验, 研究试件在此条件下的断裂强度和抗压强度等力学特性。Sheinin等^[3]在压力机上对盐岩试样进行压缩试验, 并同时记录试

收稿日期: 2016-03-13; 修回日期: 2016-06-25

基金项目: 上海市自然科学基金项目(14ZR1428200)

作者简介: 刘旭阳(1992-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 研究方向: 岩石力学。

通讯作者: 陈有亮(1966-), 男, 河北故城人, 博士, 教授, 研究方向: 岩石混凝土力学。

件的热力学参数的变化情况,试验结果表明盐岩应力应变曲线中的非线性变形阶段与试件的热力学特征存在一定的关系。翟松韬等^[4]在不同高温作用下研究喜马拉雅盐岩,发现该岩盐的抗压强度和弹性模量在 120 ~ 200℃ 时,随温度升高而增加,在 500℃ 以上,岩盐内部结构发生变化,应力峰值大大下降。尹光志等^[5]以某地区煤矿顶层粗砂岩为研究对象,对高温后的试件进行三轴压缩试验,并分析了粗砂岩的强度,平均模量,内摩擦角与温度和围压的关系,试验表明高温对粗砂岩内部裂隙具有一定的治愈性,使其强度增加,而当温度超过 300℃ 以后,随着温度的不断升高,粗砂岩的强度、平均模量和内摩擦角等均有所减小。朱合华等^[6]等研究了 3 种不同岩体在高温后力学性质变化的规律,得到高温后 3 种岩石的弹性模量、应力峰值均有所降低的规律,且试验的温度越高,降低的幅值就越大。秦本东等^[7]以两种不同石灰岩和砂岩作为研究对象,并对高温后试件进行力学特性分析,表明试件应力应变曲线经历了四个阶段即:压密阶段、弹性变形阶段、屈服阶段及破坏阶段,并且表明高温对试件的应力应变都有较大影响。杜守继等^[8]通过对比研究高温前后花岗岩岩体的力学特性,结果表明:在 400℃ 以内,温度对花岗岩的力学性质的影响不明显,当温度超过 400℃ 以后,花岗岩的力学性能急剧恶化,花岗岩的强度和弹性模量等特性不断降低。高温后随温度的增加,花岗岩的泊松比逐步减少,但具有一定的离散性。谌伦建等^[9]运用扫描电镜、偏光显微镜等实验仪器对砂岩进行了从常温到 1200℃ 的高温试验研究。表明高温后岩石的微观结构发生了变化,影响到岩石力学性质也发生明显的改变,高温后试件中有机物发生反应和析出,由此加剧了试件裂隙的扩展。左建平^[10]研究了在不同温度下岩石的变形和破坏规律,并以深部岩体开采为背景,综合压力作用,推导出了温度-压力耦合作用下的深部岩石的破坏准则。孟召平等^[11]运用岩石三轴压力试验机,并根据某地区砂岩所处的高温

环境,研究该地区温度作用下砂岩的力学特性。陈剑文等^[12]在微观统计学的基础上,从岩石细观力学的角度分析并对先前学者的研究成果进行整理和修正,建立起盐岩温度-应力耦合作用下的损伤演化方程。对盐岩试样进行不同围压和不同温度的试验,剖析不同围压和温度对盐岩试样特性影响,以验证方程的可靠度。

本文在前人的研究基础上,通过单轴压缩试验,对不同高温作用后的白砂岩的物理力学性质和损伤特性进行了研究。分析了白砂岩应力峰值、纵波波速、弹性模量以及应力应变关系随温度的变化规律,建立了高温作用后白砂岩损伤变量模型,分析了高温后白砂岩损伤变量与其物理力学参数之间的关系。

2 试验概述

2.1 试样

试验中采用的白砂岩(见图 1)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、云母、岩屑等,测得密度为 $\rho = 2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。将白砂岩加工成满足《工程岩体试验方法标准》要求的 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准试件,并保证试件端面不平整度误差在 0.05 mm 以内;沿试件高度直径的误差在 0.3 mm 以内。试验前采用康科瑞 NM-3C 非金属超声检测仪测定了岩石试件的动弹性模量,筛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。

2.2 试验设备

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(见图 2),炉膛净空为 500mm × 300 mm × 300 mm,额定功率为 20kW,最高温度可达 1900℃。

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(见图 3),其最大荷载为 2 000 kN,轴向负荷精度:±1%。白砂岩的纵波波速和杨氏模量测量采用 V-METER III 型超声脉冲速度测试仪(见图 4),测试精度:0.1 μs。



图 1 高温处理后白砂岩试样



图 2 箱式电阻炉



图 3 伺服三轴压力试验机

2.3 试验方法

岩石试件分为5组,分别为 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 、 Y_5 ,每组5个平行试验,测定每个试件高温前的纵波波速和杨氏模量。

将试件分别放入箱式电阻炉中,以 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速度达到预定温度后,保温4 h,确保试件加热充分,炉膛内温度场均匀,然后自然冷却(炉膛中冷却)至室温,5组试块分别加温至20、200、400、600、800 $^\circ\text{C}$,升温曲线如图5所示。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白砂岩进行单轴压缩试验,试验采用应力控制方式,以 $0.5\text{ MPa}/\text{s}$ 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。



图4 超声脉冲速度测试仪

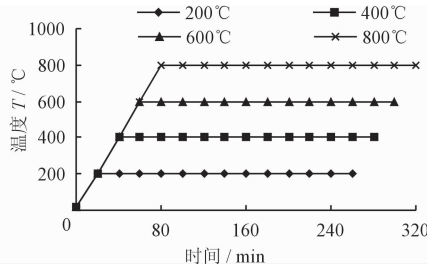


图5 白砂岩高温加载曲线

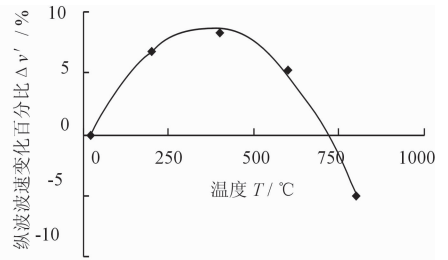


图6 白砂岩纵波波速随温度变化图

由图6可以看出:经历不同的加热温度后,白砂岩试样的纵波波速变化百分比在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 前随着温度的升高而呈二次非线性增加; $400\text{ }^\circ\text{C}$ 后白砂岩试样的纵波波速变化百分比随着温度的升高而呈二次非线性减少。相比常温下($20\text{ }^\circ\text{C}$)白砂岩的纵波波速 $3\ 150\text{ m}/\text{s}$,加热到200、400、600和 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时白砂岩纵波波速分别为 $3\ 200$ 、 $3\ 250$ 、 $3\ 160$ 和 $2\ 850\text{ m}/\text{s}$,上升幅度达到了 6.7% 、 8.3% 、 5.3% 和 -5.0% 。由图6中数据可拟合得到白砂岩纵波波速变化百分比 $\Delta v'$ 与温度 T 之间的关系式:

$$\begin{cases} \Delta v' = -7 \times 10^{-5} T^2 + 0.0535 T - 1.1007 \\ R^2 = 0.9967 \end{cases} \quad (1)$$

3.2 弹性模量

图7为白砂岩的弹性模量变化百分比(高温处理后的弹性模量与高温处理前的弹性模量的差值除以高温处理前的弹性模量所得)与温度变化值之间的关系曲线,可以看出弹性模量变化百分比随温度的变化规律与纵波波速变化百分比随温度的变化规律类似。即在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 前白砂岩试样的弹性模量变化百分比随着温度的升高而呈二次非线性增加; $400\text{ }^\circ\text{C}$

3 试验结果及分析

3.1 纵波波速

声波速度是一项能较好反映各地层岩石综合物理性质的声学指标,广泛应用于各个专业技术领域,并取得显著成效。根据声波在岩体内部传播的速度和衰减图形可以判断出岩石材料的构成及内部孔隙情况。

对于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^[13]。对白砂岩纵波波速进行统计,每组5个平行试样取平均值数据。并比较试件高温前后纵波波速的变化百分比(高温处理后的波速与高温处理前的波速差值除以高温处理前的波速所得)如图6所示。

后白砂岩试样的弹性模量变化百分比随着温度的升高而呈二次非线性减少。相对于白砂岩在常温($20\text{ }^\circ\text{C}$)的弹性模量 13.556 GPa ,加热到200、400、600和 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时白砂岩弹性模量分别为 15.283 、 15.826 、 15.861 和 12.667 GPa ,上升幅度达到了 12.7% 、 16.7% 、 17.0% 和 -6.6% 。由图7可以拟合得到白砂岩弹性模量变化百分比 $\Delta E'$ 与温度 T 之间的关系式为:

$$\begin{cases} \Delta E' = -1 \times 10^{-4} T^2 + 0.1137 T - 3.1969 \\ R^2 = 0.9394 \end{cases} \quad (2)$$

3.3 应力峰值

从图8中可以看出在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 之前,白砂岩的应力峰值变化百分比随着温度的升高呈现二次非线性增加,体现出白砂岩特有的自愈性。超过 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 后,白砂岩的应力峰值随着温度的升高呈现二次非线性降低。

在常温下($20\text{ }^\circ\text{C}$)时白砂岩的应力峰值为 70.7 MPa ,随着温度的升高,加热到200、400、600和 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时白砂岩的应力峰值分别为 78.2 、 75.6 、 71.5 和 61.1 MPa ,上升幅度分别达到了 10.6% 、 6.9% 、

1.1% 和 -13.5%。由图 8 可拟合得到白砂岩应力峰值变化百分比与温度之间的关系式:

$$\Delta\sigma'_{\max} = -7 \times 10^{-5} T^2 + 0.0478T + 69.966 \quad (3)$$

$$R^2 = 0.9892$$

3.4 自愈性分析

上述关于白砂岩纵波波速、弹性模量和应力峰值的变化规律与文献[4]和文献[5]中所得出的结论相一致。白砂岩之所以具有以上规律是因为其本身具有自愈性,且在温度到达某一限值前(本文 400℃),随着温度的上升白砂岩的自愈性增强,即表现为白砂岩物理力学特性得到优化。造成这一现象的原因是白砂岩作为高空隙度岩石,组成白砂岩的颗粒结合得不是十分紧密,颗粒之间存在较多空隙和裂隙,白砂岩内部这些较大的空隙结构在温度不是很高(低于 400℃)时,经过加热后产生的温度热应力起到容纳变形和阻止裂纹扩展的作用,矿物颗粒的受热膨胀也可能造成白砂岩中原生裂隙逐渐愈合,裂隙数量减少,密实程度提高,使得矿物颗粒之间的接触关系得到改善,摩擦特性得以增强,从而优化了白砂岩的纵波波速和应力峰值等物理力学参数。而在温度较高(大于 400℃)时,由于白砂岩矿物颗粒的不同热膨胀率引起跨颗粒边界的热膨胀不协调,各种矿物颗粒之间必然产生相互约束,从而造成颗粒间或颗粒内部的拉或压应力,即结构热应力。一旦这种结构热应力达到或超过岩石的强度极限,就会产生微裂隙,使白砂岩试样承载能力和抗变形能力减弱,而且随温度的升高,颗粒间或颗粒内应力进一步增大,致使白砂岩内部产生更多微裂隙或使原生裂纹扩展、加宽和连通,宏观上表现为白砂岩物理力学性质的劣化,纵波波速和应力峰值迅速下降。

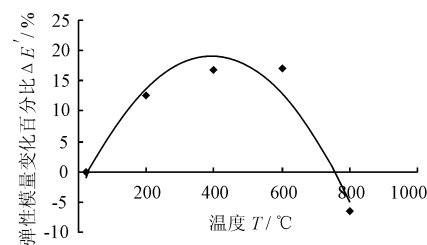


图 7 白砂岩弹性模量随温度变化图

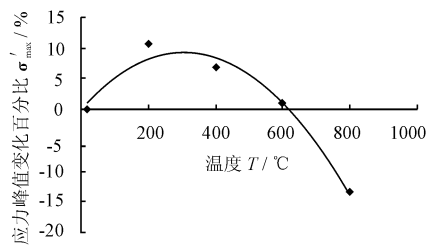


图 8 白砂岩应力峰值随温度变化图

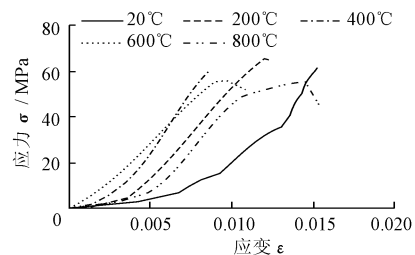


图 9 白砂岩应力应变曲线

3.6 岩石破坏形态

通过对高温作用后的白砂岩的破坏形态进行统计分析,发现单轴压缩作用下白砂岩试件的破坏形态(见图 10)主要有以下几种:

(1)圆锥形破坏:试件表面与承压板之间摩擦

由此可见,在高温作用下,此类白砂岩自愈性最强时的最优温度为 400℃。

3.5 应力应变关系

白砂岩试样在经历不同高温作用后,采用 SANS 微机控制电液伺服压力试验机对其进行单轴压缩试验。图 9 为不同高温作用后试样的典型全应力-应变曲线。

由图 9 可见不同高温处理后白砂岩应力应变曲线基本经历了 4 个阶段:

(1)压密阶段,此时曲线呈上凹形,随着应力的增大,应变发展较快,主要是由于岩石内部孔隙的闭合,裂隙被压密造成的。在 600℃之前,压密阶段的曲线的切线斜率随着温度的升高而升高,即白砂岩的弹性模量随着温度的增加而增加,这与前述关于高温作用后的白砂岩具有自愈性的规律相一致。但当温度为 800℃时,白砂岩在压密阶段的切线斜率又急速下降,弹性模量降低。

(2)弹性变形阶段,该阶段应力应变关系基本呈直线,直线段的斜率就是平均切线弹性模量。温度对白砂岩的影响与压密阶段一致,白砂岩在此阶段仍然具有自愈性。

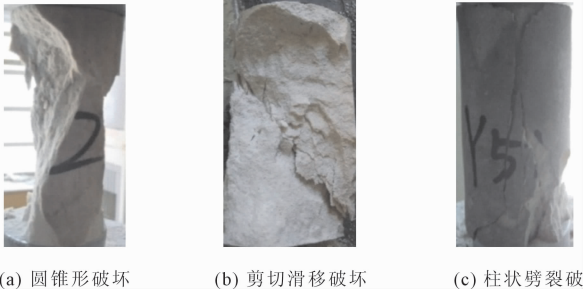
(3)塑性变形阶段,该阶段试件主要发生不可逆的塑性变形,也是试件中微裂纹的萌生、扩展及贯通的过程。该阶段曲线切线模量随着应变的增加不断下降,并随着温度的升高曲线出现明显的屈服阶段。白砂岩在 600℃后塑性变形阶段表现明显。

(4)破坏阶段,该阶段试件强度达到最大值,应变急剧增长,最终发生脆性破坏。可以发现在破坏阶段随着温度的上升白砂岩的塑性降低而脆性增加,试样破坏极其突然。

力较大造成的,随着压力的增大,试件侧向的岩石自动剥落,从而形成圆锥形状。

(2)柱状劈裂破坏:试件与承压板之间摩擦力较小,且试件内部矿物成分分布均匀,当试件受压时,内部各处受力均匀,从而形成柱状劈裂破坏形态。

(3)剪切滑移破坏:由于矿物颗粒间的剪切滑移逐渐发展使岩石发生剪切滑移破坏。常出现于试件内部有薄弱面或者软弱层时,随着压力的增大,试件随着软弱面开始滑移直至破坏。



(a) 圆锥形破坏 (b) 剪切滑移破坏 (c) 柱状劈裂破坏

图 10 白砂岩破坏形态图

对高温作用后的白砂岩的破坏形态进行统计可以发现:

(1)在单轴压缩作用下白砂岩的破坏形态包含了上述的 3 种情况。

(2)所有破坏形态中圆锥形破坏的试块居多,约占所有破坏形态的 70%,而滑移剪切破坏和柱状破坏较少。

(3)温度对白砂岩的破坏形态影响不大,各级温度下白砂岩的破坏形态没有表现出一般的规律性。

4 损伤特性的初步分析

4.1 损伤变量

损伤变量是材料内部不可逆的细观结构变化在宏观上的描述。根据宏观唯象损伤力学概念,岩石宏观物理性能的变化能够代表材料内部的劣化程度。材料的弹性模量在高温煅烧过程后更便于分析和测量,因此将高温处理后白砂岩的损伤变量表示为:

$$D_n = 1 - E_n/E_0 \quad (4)$$

式中: E_0 为初始状态白砂岩试样的弹性模量; E_n 为

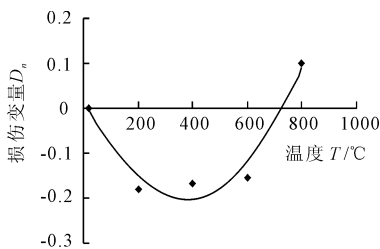


图 11 不同高温处理后白砂岩的损伤变量

经过不同温度处理后白砂岩试样的弹性模量。

由图 11 可以发现,在 400°C 之前白砂岩的损伤变量随着温度的上升呈现二次非线性减小的趋势,在 400°C 以后白砂岩的损伤变量随着温度的上升呈现二次非线性增加的趋势。当温度上升到 700°C 左右时,白砂岩试样才出现正损伤。这也验证了前述白砂岩物理力学参数随温度变化的规律的正确性。即在一定的温度范围内,高温处理后的白砂岩试样内部空隙减少、密实度提高、物理力学参数得到优化,高温处理后的白砂岩具有自愈性。本试验中温度为 400°C 时,高温对白砂岩造成的负损伤值最大,自愈性最强。当温度继续升高时,这种自愈性就会降低,当温度升高到 700°C 左右时,这种自愈性完全消失,温度的上升只会加速白砂岩的损伤劣化的进程。

由图 11 拟合得到不同高温处理后白砂岩的损伤变量与温度之间的关系式为:

$$D_n = 2 \times 10^{-6} T^2 - 0.0012T + 0.0195 \quad (5)$$

$$R^2 = 0.951$$

4.2 高温损伤对白砂岩物理力学参数的影响

由式(4)可以计算出不同温度下岩石的损伤变量,结合前述试验所得的纵波波速和应力峰值,建立损伤变量与两者之间的关系,具体见图 12 和 13,分析高温损伤对白砂岩物理力学参数的影响。由图 12 和 13 可以发现随着白砂岩损伤变量由负损伤逐渐转变为正损伤的过程,白砂岩的应力峰值和纵波波速都呈现出二次非线性减小的趋势,这也表明了白砂岩物理力学参数的变化与白砂岩的损伤程度密切相关,白砂岩物理力学参数的变化是白砂岩内部损伤的外在表现。

分别对图 12 和 13 进行多项式回归分析,得出白砂岩损伤变量与应力峰值和纵波波速之间的拟合关系式。

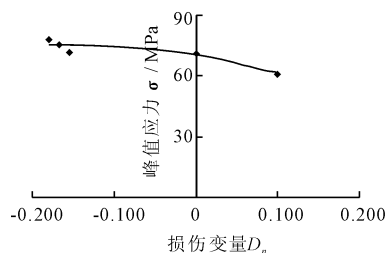


图 12 白砂岩的损伤变量与应力峰值之间的关系

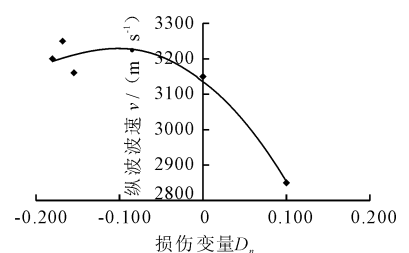


图 13 白砂岩的损伤变量与纵波波速之间的关系

损伤变量与应力峰值的关系:

$$\sigma_{\max} = -156.56D_n^2 - 61.993D_n + 69.396$$

$$R^2 = 0.8632$$

损伤变量与纵波波速的关系:

$$(6)$$

$$v = -8911.8D_n^2 - 1911.6D_n + 3136.4 \quad (7)$$

$$R^2 = 0.9425$$

由拟合关系式可以发现,纵波波速与损伤变量之间的相关性明显高于应力峰值与损伤变量之间的相关性,换言之,白砂岩高温损伤对其物理参数的影响要大于对其力学参数的影响。

5 结 论

(1)经过高温处理后,白砂岩的纵波波速、弹性模量和应力峰值表现出类似的规律。即白砂岩试样的纵波波速变化百分比、弹性模量变化百分比和应力峰值变化百分比在400℃前随着温度的升高而成二次非线性增加;在400℃后随着温度的升高而成二次非线性减少。

(2)在经历高温后,白砂岩表现出一定的自愈性,在400℃之前白砂岩的纵波波速、弹性模量和应力峰值随着温度的升高均有一定的增加,超过400℃后,纵波波速、弹性模量和应力峰值开始随着温度的升高而衰减,可见400℃是此类白砂岩自愈性最优时的温度,当温度达到700℃左右时这种自愈性消失。

(3)在经历高温后,白砂岩的应力应变关系与常温条件下类似,均经历了四个阶段:压密阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段及破坏阶段。当温度不超过600℃时,白砂岩试样的应力应变曲线在压密阶段和弹性变形阶段同样表现出了自愈性的特点;当温度超过600℃后,白砂岩塑性变形阶段十分明显,且破坏阶段脆性增加,破坏突然。

(4)在单轴压缩作用下白砂岩的破坏形态包含了圆锥形破坏、滑移剪切破坏和柱状破坏,其中圆锥形破坏的试块最多,约占所有破坏形态的70%,而滑移剪切破坏和柱状破坏较少。温度对白砂岩的破坏形态影响不大,温度与白砂岩的破坏形态之间没有一般的规律性。

(5)建立了白砂岩损伤变量和温度之间的关系式,分析了损伤变量和物理力学参数之间的关系,发现白砂岩高温损伤对其物理参数的影响要大于对其力学参数的影响。

参考文献:

- [1] Hajpal M. Changes in sandstone of historical monuments exposed to fire or high temperature [J]. Fire Technology, 2002,38(4):373-382.
- [2] Rutqvist J, Barr D, Data R, et al. Coupled thermal - hydrological - mechanical analyses of the Yucca mountain drift scale test - comparison of field measurements to predictions of four different numerical models [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005,42(5/6):680-697.
- [3] Sheinin V I, Blokhin D I. Features of thermos mechanical effects in rock salt samples under uniaxial compression [J]. Journal of Mining Science, 2012,48(1):39-45.
- [4] 翟松韬,吴刚,张渊,等.单轴压缩下高温盐岩的力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(1):105-111.
- [5] 尹光志,李小双,赵洪宝.高温后粗砂岩常规三轴压缩条件下力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(3):598-604.
- [6] 朱合华,闫治国,邓涛,等.3种岩石高温后力学性质的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(10):1945-1950.
- [7] 秦本东,何军,谌伦建.石灰岩和砂岩高温力学特性的试验研究[J].地质力学学报,2009,15(3):253-261.
- [8] 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.
- [9] 谌伦建,吴忠,秦本东,等.煤层顶板砂岩在高温下的力学性质及破坏机理[J].重庆大学学报,2005,28(5):123-126.
- [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] 孟召平,李明生,陆鹏庆,等.深部温度、压力条件及其对砂岩力学性质的影响[J].岩石力学与工程学报,2006,25(6):1177-1181.
- [12] 陈剑文,杨春和,高小平,等.盐岩温度与应力耦合损伤研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(11):1986-1991.
- [13] 尤明庆,苏承东,李小双.损伤岩石试样的力学特性与纵波波速关系研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(3):458-467.