

# 石灰岩和砂岩高温力学特性的试验研究

秦本东<sup>1,2</sup>, 何 军<sup>2</sup>, 谌伦建<sup>3</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710056; 2. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454003;  
3. 河南理工大学材料科学与工程学院, 河南 焦作 454003)

**摘要:** 利用自行研制的岩石加温装置和 RMT-150C 岩石力学试验机, 对石灰岩和砂岩试样高温后的力学特性进行了试验研究。试验结果表明, 随着温度升高, 两种岩石纵波波速逐渐减小。单轴压缩过程中的全程应力应变曲线经历了压密、弹性、屈服、破坏 4 个阶段; 达到峰值应力后两种岩石均发生脆性破坏, 砂岩破坏时呈锥形炸裂, 而石灰岩则呈草捆状破坏。高温对两种岩石的强度都有一定的弱化作用, 其峰值应力都随温度升高而降低, 石灰岩 700 °C 时强度降幅达 84.59%, 而砂岩强度仅比常温降低 22% 左右。两种岩石的峰值应变都随温度升高逐渐增大, 但具体表现不尽相同, 石灰岩 500 °C 时应变增加了 30.57%, 500 °C 之后峰值应变基本无变化, 甚至到 700 °C 时还略有降低; 砂岩 700 °C 时峰值应变增加了 80.63%, 其峰值应变的变化与其微观结构变化相关。随着温度升高, 两种岩石的弹性模量和变形模量均减小, 700 °C 时石灰岩弹性模量降幅为 86.8%, 砂岩弹性模量降幅为 46.94%; 700 °C 时石灰岩变形模量下降了 83.9%, 砂岩的变形模量下降了 53.06%。

**关键词:** 石灰岩; 砂岩; 高温; 纵波波速; 力学性质; 单向约束条件

中图分类号: TU452

文献标识码: A

## 0 引言

高温作用对岩土介质的影响已在能源、地质、土木等众多领域中被提出来, 例如煤炭地下气化、矿下煤与瓦斯爆炸、煤炭开采过程中煤炭自燃、各种硐室及地下工程在经受火灾后的重建等工程都可能涉及到高温下岩石的强度和变形特性。国际上 20 世纪 60 年代开始对岩石的基本力学性质如抗压强度、变形模量、泊松比、热膨胀系数等随温度的变化规律进行研究, 总结了国际上 1980 年以前的主要研究成果; 利用声发射技术研究了岩石的热破裂问题; 分析了岩石内热应力产生的原因; 研究了岩石的破坏准则和本构方程<sup>[1-4]</sup>。近年来, 国内许多学者针对高温对岩石的力学行为及微观结构变化做了很多研究<sup>[5-14]</sup>。许锡昌等 2000 年研究了高温下花岗岩的基本力学性质<sup>[5]</sup>; 夏小和等 2004 年对大理岩高温后的强度和变形特性作了研究<sup>[6]</sup>, 认为高温后大理岩表现出软化特征, 峰后特性及残余强度宏观上表现出脆性向

收稿日期: 2009-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50274038, 50574037)

作者简介: 秦本东 (1977-), 女, 讲师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: qinbendong@hpu.edu.cn

塑性的渐次演化；张渊等 2005 年对阜新细砂岩在常温到 900 ℃ 下的矿物组分和微结构变化以及内部微裂纹的发生和发展进行了研究<sup>[7]</sup>。吴忠、秦本东等 2005—2006 年研究了河南鹤壁砂岩的力学特性和声学特性<sup>[8,9]</sup>；邱一平等 2006 年对河南某地花岗岩高温后的损伤进行了研究，总结出高温花岗岩力学性质的变化主要与其结构成分中矿物颗粒热膨胀效应发生热应力作用有关<sup>[10]</sup>；朱合华等 2006 年对不同高温后熔结凝灰岩、花岗岩及流纹状凝灰角砾岩的力学性质进行了研究，分析比较了 3 种岩石峰值应力、峰值应变及弹性模量随温度的变化规律<sup>[11]</sup>；苏承东等 2008 年研究了粗砂岩高温后各力学参数的变化<sup>[12]</sup>；谔伦建等 2005—2008 年研究了石灰岩和砂岩的膨胀特性和微观结构变化<sup>[13,14]</sup>。目前，这一方面的研究仍在多领域多途径进行。

由于岩石种类繁多，形成环境各不相同，矿物组成和胶结物成分也不同，即使不同地方的同种岩石，力学性质也存在差异。目前研究资料对石灰岩和砂岩等沉积岩高温作用过程中的力学特性研究成果相对较少。本文根据煤炭地下气化炉及采场和地下硐室围岩具有一个或两个自由面（也就是说，岩石不是孤立的存在，其周围 1 个或 2 个方向存在约束作用），以及地下气化时氧化区及煤层自燃和火灾现场温度高达 1200 ℃ 的现实，模拟实际环境中岩石既受高温又受单向约束的条件，通过试验研究常温至 700 ℃ 范围内石灰岩和砂岩的纵波波速、力学参数（峰值应力、峰值应变、平均弹性模量和变形模量）的变化规律，研究成果可以为比较不同类岩石或不同地方的同类岩石高温后的力学性质提供参考依据，也可以作为预测和评估地下工程火灾后围岩的安全性和稳定性以及修复、加固、支护设计的参考依据，并为煤炭地下气化及其他地下工程提供高温岩石力学基础。

## 1 岩石试样、试验方法及试验装置

### 1.1 岩石试样

所用石灰岩采自巩义大峪沟矿务局三矿煤层顶板，由岩性鉴定知该石灰岩为生物屑泥晶灰岩，石灰岩主要矿物成分为  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCO}_3$ ，粒径较细，没有肉眼可见的明显缺陷，整体质地均匀。砂岩取自焦作方庄煤矿地下 550 m 深处煤层顶板，为石英长石砂岩，其主要成分为长石、石英，含有少量云母。试样加工成边长为 50 mm 的立方体，岩样两端的不平行度小于 0.05 mm。石灰岩和砂岩试样的平均密度分别为  $2.719 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  和  $2.654 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

常温下的石灰岩呈灰黑色，高温后石灰岩试件由灰黑色逐渐变为浅灰色，600 ℃ 时试件表面呈白色，700 ℃ 时表面白色加深，厚度加大（见图 1a）。砂岩常温呈浅绿色，随着温度升高，颜色逐渐变为棕红色和粉红色（见图 1b）。

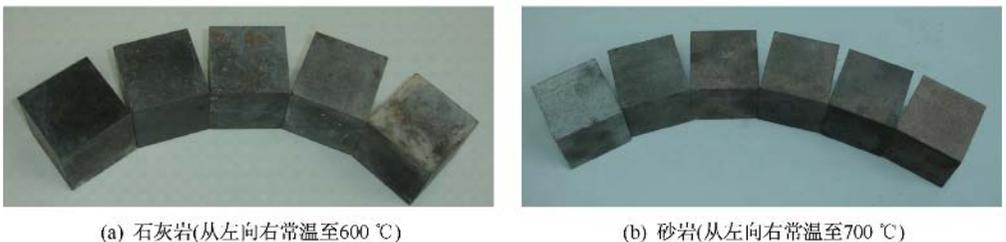


图 1 不同温度后试件的图片

Fig.1 Pictures of samples after test at different temperatures

## 1.2 试验方法

试验共分 6 组，每组至少 3 个试样，试验温度分别设置为常温 25 ℃、300 ℃、400 ℃、500 ℃、600 ℃、700 ℃。为了保证对试样加热均匀，以 5 ~ 10 ℃/min 的升温速度进行加热，达到试验预定温度后恒温 60 min，使岩石试件内外受热均匀、充分膨胀。试验时，将试样  $X$  轴线方向用石英玻璃棒约束好，先测定不同温度单向约束条件下的膨胀应力，然后将试样在炉膛中自然冷却至室温再进行单轴加压，加压方向即为施加过约束的方向。

## 1.3 试验装置

试验采用自行研制的岩石高温加热装置<sup>[15,16]</sup>，该试验装置主要由立方体高温加热炉、温度控制器、载荷传感器、电阻应变仪、试验框架和隔热垫块组成，可同时测试试样单向或双向约束条件下的膨胀应力，如图 2 所示。高温加热炉外形尺寸为 440 mm × 400 mm × 400 mm，加热元件采用硅炭棒元件加热，高性能纤维保温，最高温度可达 1000 ℃；温度控制器型号为 WDX2-A，该温度控制器可以自动控温和升温，控制精度为 ±1 ℃。



图 2 高温加热系统

Fig.2 Heating system for high temperature

高温前后均测试试样的纵波波速，超声波测试采用 NM-4A 型非金属超声检测分析仪，发射电压为 500 V，采样周期为 0.4  $\mu$ s，传感器与试样之间用黄油做耦合剂。

采用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 RMT-150C 型伺服试验机进行单轴压缩试验，力行程控制方式加载，速率为 2 kN/s；5 mm 位移传感器测量试样的轴向位移，1000 kN 的力传感器测量试样的轴向荷载。

## 2 试验结果分析

### 2.1 岩石的纵波波速

图 3 给出了 2 种岩石经历常温 25 ℃ 至 700 ℃ 纵波波速与试验温度的关系曲线。纵坐标所示纵波波速是每组 3 个岩样测试结果的平均值， $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  分别表示立方体试块的 3 个轴线方向，其中  $X$  方向施加过约束。图中曲线整体变化趋势一致，随着温度的升高，纵波波速逐渐减小。如果将曲线拟合，石灰岩纵波波速随温度升高基本线性下降，从常温 25 ℃ 至

700 °C，3 个方向的纵波波速平均值从 5700 m/s 减小到了 2904 m/s，下降了 49.04%。砂岩 X、Z 方向曲线成二次函数下降，Y 方向近似直线下降，与常温时纵波波速（4770 m/s）相比，700 °C 时 3 个方向的纵波波速平均值为 2427 m/s，下降了 49.12%。

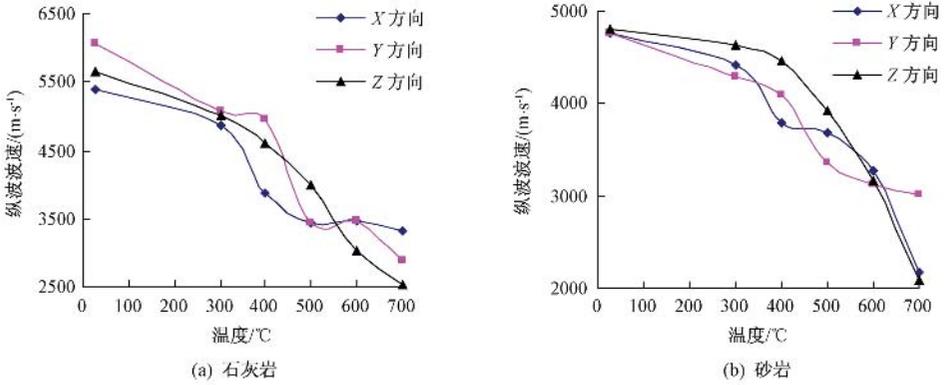


图 3 纵波波速与温度的关系

Fig.3 Relationship between longitudinal wave velocity and temperature

高温作用后，岩石内部微结构发生变化，温度越高变化越大，主要表现为岩石内部水分不断蒸发，孔隙率增加，颗粒边界裂纹出现、发展、贯通，微裂隙产生、演化，矿物成分分解，胶结物强度降低，内部结构热应力扩散，矿物颗粒相互摩擦挤压等，这些作用错综复杂，使得超声波在其中传播时传播路径不同。温度越高，岩石内孔隙率越大，裂隙越多，波速就越小。

### 2.2 岩石的全程应力应变曲线

图 4 给出了石灰岩和砂岩单轴压缩过程中的全程应力应变曲线（每个温度水平各取一个试样）。

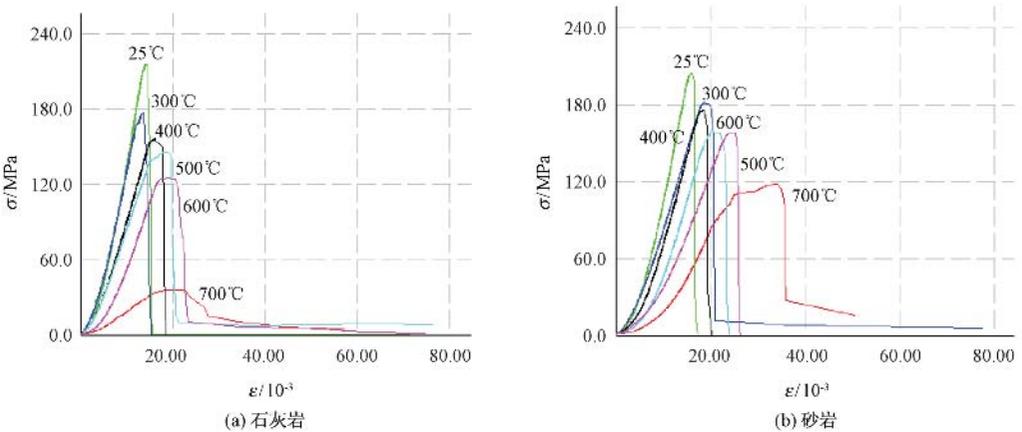


图 4 2 种岩石单轴压缩全程应力 - 应变曲线

Fig.4 Complete curve of stress and strain of two kinds of rocks under uniaxial compression

从图 4 可以看出，曲线大体经历了压密、弹性、屈服、破坏 4 个阶段。压密阶段在 600 °C 前较短，600 °C 之后较长，因为温度越高，岩石内微裂隙越多，裂隙闭合需要的时间

越长,在曲线上就表现为应力不大时应变较大的特征,所以压密阶段较长,曲线在此阶段上凹型较明显。弹性阶段曲线基本成线性变化,曲线斜率即为岩石的平均弹性模量。图4还显示,温度越高,曲线右移趋势越明显,斜率也明显减小,不象低温时那样陡直,700℃时这一特征最明显。屈服阶段是岩石即将破坏前的阶段,低温时屈服阶段较短,岩石一旦屈服马上达到其极限强度发生脆性破坏;高温时屈服阶段相对较明显,在达到极限强度前有一个屈服台阶。破坏阶段,两种岩石都是达到峰值应力后很快发生脆性破坏,只是低温岩石峰后曲线陡直而下,残余应变较小,高温岩石峰后曲线变化复杂,残余应变较大,表现出一定的软化特征。从破坏形状上看,砂岩破坏时呈锥形炸裂,而石灰岩则呈草捆状(X形)破坏,没有炸散的特征。

### 2.3 岩石的峰值应力

图5绘出了两种岩石的峰值应力与温度的关系曲线。石灰岩在试验温度范围内峰值应力随温度升高而降低,规律变化明显。600℃前峰值应力随温度升高大致呈线性降低,其值从常温25℃时的218.611 MPa下降到了600℃时的123.384 MPa,降幅达43.56%;700℃时又急剧降低到33.68 MPa,降幅达84.59%;因试验条件限制(玻璃棒易烧坏),800℃温度水平仅试验了1块试样,其峰值应力为18.712 MPa,说明石灰岩在700℃高温后强度呈急剧下降的趋势。巩义石灰岩是生物屑泥质灰岩,主要矿物成分是 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCO}_3$ 等,光学显微镜下可见大量生物化石存在。高温作用过程中,石灰岩内矿物不断分解,孔隙率也在300℃后急剧增大(前期试验),所以峰值应力随温度升高不断降低。600℃时石灰岩表面变白,而到700℃时,试件表面不仅白色程度更明显,且白色物质的厚度也增加。试验结束一段时间后,石灰岩表面发生了各种腐蚀破坏,白色物质也逐渐从试样上脱落,这可能是加热过程中 $\text{CaCO}_3$ 等分解生成了 $\text{CaO}$ 等氧化物,加热结束后氧化物与空气中的水分结合,发生了水化反应所致。这也使得600℃和700℃时石灰岩强度降低很多。加热温度为600℃和700℃的试验中均有石灰岩试件发生爆裂现象,爆裂残余物似从层理处裂开,呈完整片状。

砂岩峰值应力随温度升高也逐渐降低,但峰值应力与温度的关系曲线上明显分为3个区间:常温25℃至400℃,400~500℃,500~700℃。400℃之前砂岩峰值应力变化不大,与常温时相比,仅降低了6.81%;500℃时峰值应力从400℃的191.149 MPa很快降低至153.995 MPa,下降了19.44%,比常温时降低了24.92%;500℃、600℃、700℃三个试验温度水平砂岩峰值应力值比较接近,均值在158 MPa左右,比常温时低22%左右。从砂岩微观结构(见图6)来看,加热温度为300℃时岩石内矿物颗粒基本完整,没有裂纹产生;400℃时部分颗粒出现破裂,且有少量裂隙出现;500℃时颗粒破裂程度增加,边界裂隙明显,且具有一定的方向性;当加热温度达到600℃时,颗粒间形成明显的裂缝,且孔洞较多,高温下微观裂隙呈明显方向性,宏观特征呈层破坏。虽然500℃后裂纹增多、加大,但由于砂岩内裂隙呈一定的方向性,所以可能导致3温度水平峰值应力值接近。

总体上,高温作用对2种岩石的强度都会有一定的弱化作用。

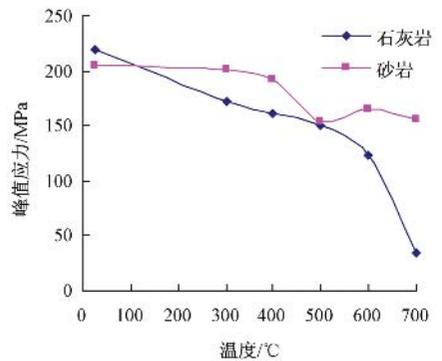


图5 峰值应力与温度的关系

Fig. 5 Relationship between peak-stress and temperature

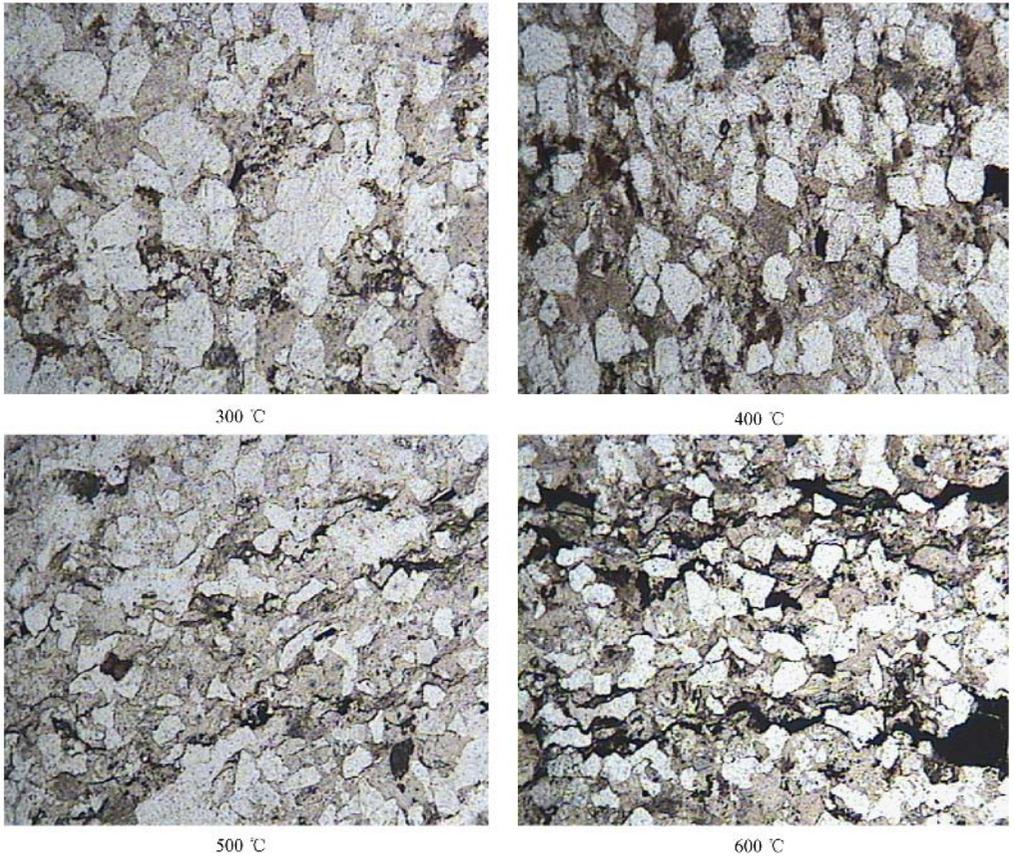


图 6 砂岩微观结构变化

Fig.6 Microstructure variation of sandstone

### 2.4 岩石的峰值应变

图 7 绘出了两种岩石峰值应变与温度的关系曲线。两种岩石的峰值应变都随温度升高逐渐增大，但具体表现不尽相同。石灰岩在 400 °C 前峰值应变增加不多，仅比常温时增加了 8.06%，500 °C 时应变增大到  $18.68 \times 10^{-3}$ ，增加了 30.57%，500 °C 之后峰值应变基本无变化，600 °C、700 °C 时峰值应变值分别为  $18.56 \times 10^{-3}$ 、 $18.2 \times 10^{-3}$ ，700 °C 时甚至还略有降低，但与常温时相比还是增加了  $3.894 \times 10^{-3}$ 。800 °C 时试验的 1 个试样峰值应变激增增至  $49.6 \times 10^{-3}$ ，是常温时的 2.5 倍左右。

砂岩峰值应变与温度的关系大致呈正相关，温度升高，峰值应变增大，400 °C 时峰值应变增大了 16.37%，比相同温度点时石灰岩增幅要大；600 °C 时峰值应变增加了 51.04%，700 °C 时增加了 80.63%，砂岩峰值应变的变化与其微观结构变化相关。

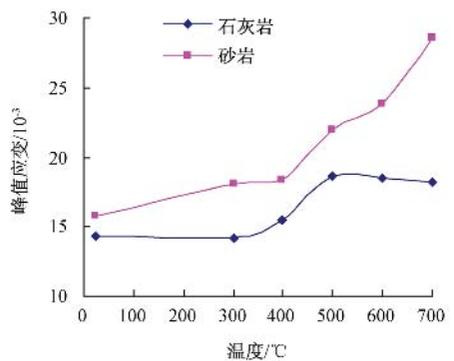


图 7 峰值应变与温度的关系

Fig.7 Relationship between peak-strain and temperature

结合图4中两种岩石的全程应力-应变曲线知,石灰岩压密阶段和弹性阶段比砂岩稍短,曲线斜率大于砂岩。峰值应变包括峰值前的弹性变形和塑性变形,特别是压密阶段裂隙闭合所产生的塑性变形<sup>[12]</sup>,高温在岩石内部产生的结构应力会导致微裂隙出现,同时胶结物的强度降低也会影响试样的变形,使试样的抗变形能力弱化。由于两种岩石内部结构和胶结物成分不同,所以温度对其变形的影响表现不同,致使两者峰值应变变化规律不同。

### 2.5 岩石的峰值平均弹性模量和变形模量

图8绘出了2种岩石不同温度水平下平均弹性模量、变形模量与温度的关系曲线。随着温度升高,两种岩石的平均弹性模量、变形模量均减小,700℃时石灰岩平均弹性模量从常温25℃的19.776 GPa下降到了2.61 GPa,降幅为86.8%,砂岩的平均弹性模量从常温25℃的16.764 GPa下降到了8.89 GPa,降幅为46.94%。700℃时石灰岩变形模量下降了83.9%,砂岩的变形模量下降了53.06%。平均弹性模量反映的是材料抵抗变形的能力,高温时,矿物颗粒热膨胀系数不同导致颗粒之间产生拉应力或者压应力,当热应力超过颗粒之间接触力时,就会产生裂纹,裂纹扩展加宽后,岩石变形增大,导致平均弹性模量逐渐减小。

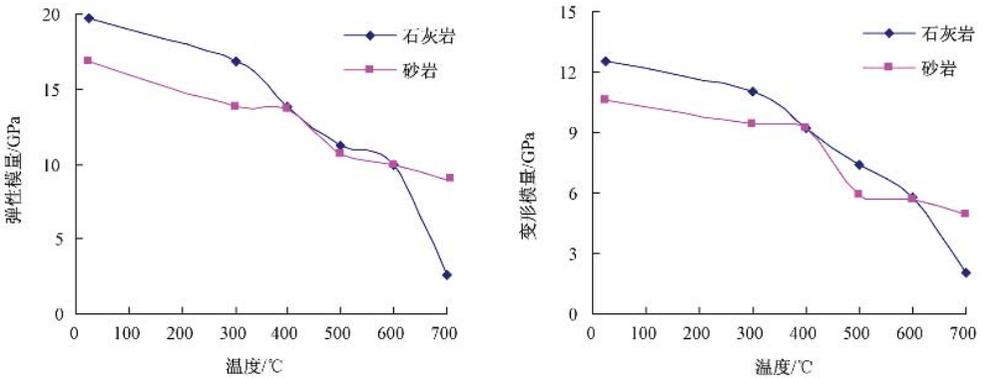


图8 弹性模量、变形模量与温度的关系

Fig.8 Relationship between elastic modulus, deformation modulus and temperature

## 3 结论

巩义石灰岩和焦作方庄砂岩试样高温单向约束条件下的力学特性试验研究表明,随着温度的升高,两种岩石纵波波速逐渐减小。从常温25℃至700℃,石灰岩试样3个方向的纵波波速平均值下降了49.04%,砂岩下降了49.12%。

石灰岩和砂岩单轴压缩过程中的全程应力应变曲线经历了压密、弹性、屈服、破坏4个阶段。温度越高,曲线右移趋势越明显,曲线斜率也明显减小。两种岩石达到峰值强度后发生脆性破坏,砂岩破坏时呈锥形炸裂,而石灰岩则呈草捆状(X形)破坏,没有炸散的特征。

在试验温度范围内,石灰岩和砂岩的峰值应力都随温度升高而降低。石灰岩700℃时峰值应力降幅达84.59%,其峰值应力降低主要是内部微观结构变化、矿物分解,孔隙率增大等因素引起的。砂岩峰值应力400℃之前变化不大,500~700℃时峰值应力值比较接近且比常温时降低了22%左右。总体上,高温作用对两种岩石的强度都有一定的弱化作用。

两种岩石的峰值应变都随温度升高逐渐增大,但具体表现不尽相同。石灰岩500℃时应

变增加了 30.57%，500℃之后峰值应变基本无变化，甚至到 700℃时还略有降低；砂岩 700℃时峰值应变增加了 80.63%，砂岩峰值应变的变化与其微观结构变化相关。

随着温度升高，两种岩石的平均弹性模量、变形模量均减小。700℃时石灰岩平均弹性模量降幅为 86.8%，砂岩的降幅为 46.94%；700℃时石灰岩变形模量下降了 83.9%，砂岩的变形模量下降了 53.06%。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Heuze F E. High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks-a review [ J ]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1983, 20 ( 1 ): 3 ~ 10.
- [ 2 ] Johnson B, Gangi A F, Handin J. Thermal cracking of rock subject to slow, uniform temperature changes [ A ]. In: Proceedings of 19th U S Rock Mechanics [ C ]. Nevada: 1978. 259 ~ 267.
- [ 3 ] Kingery W D. Factors affecting thermal stress resistance of ceramic materials [ J ]. Journal of the American Ceramic Society--Kingery, 1955, 38 ( 1 ): 3 ~ 17.
- [ 4 ] Heueckel T, Peano A, Pellegrini R. A constitutive law for thermo-plastic behavior of rocks: An analogy with clays [ J ]. Surveys in Geophys, 1994, 15: 643 ~ 671.
- [ 5 ] 许锡昌, 刘泉声. 高温下花岗岩基本力学性质初步研究 [ J ]. 岩土工程学报, 2006, 25 ( 10 ): 2071 ~ 2078.  
XU Xi-chang, LIU Quan-sheng. A preliminary study on basic mechanical properties for granite at high temperature [ J ]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 25 ( 10 ): 2071 ~ 2078.
- [ 6 ] 夏小和, 王颖轶, 黄醒春, 等. 高温作用对大理岩强度及变形特性影响的实验研究 [ J ]. 上海交通大学学报, 2004, 38 ( 6 ): 996 ~ 1002.  
XIA Xiao-he, WANG Ying-yi, HUANG Xing-chun, et al. Experimental study on high temperature effect's influence to the strength and deformation quality of marble [ J ]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38 ( 6 ): 996 ~ 1002.
- [ 7 ] 张渊, 张贤, 赵阳升. 砂岩的热破裂过程 [ J ]. 地球物理学报, 2005, 48 ( 3 ): 656 ~ 659.  
ZHANG Yuan, ZHANG Xian, ZHAO Yang-sheng. Process of sandstone thermal cracking [ J ]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48 ( 3 ): 656 ~ 659.
- [ 8 ] 吴忠, 秦本东, 谔论建, 等. 煤层顶板砂岩高温状态下力学特征试验研究 [ J ]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 ( 11 ): 1863 ~ 1867.  
WU Zhong, QIN Ben-dong, CHEN Lun-jian, et al. Experimental study on mechanical character of sandstone of the upper plank of coal bed under high temperature [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 ( 11 ): 1863 ~ 1867.
- [ 9 ] 秦本东, 谔论建, 罗运军, 等. 煤层顶板砂岩高温状态下超声传播特征试验研究 [ J ]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25 ( 1 ): 42 ~ 44.  
QIN Ben-dong, CHEN Lun-jian, LUO Yun-jun, et al. Experimental research on character of ultrasonic wave spreading in sandstone on upper plank of coal bed at high temperature [ J ]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25 ( 1 ): 42 ~ 44.
- [ 10 ] 邱一平, 林卓英. 花岗岩样品高温后损伤的试验研究 [ J ]. 岩土力学, 2006, 27 ( 6 ): 1005 ~ 1050.  
QIU Yi-ping, LIN Zhuo-ying. Testing Study on Damage of Granite Samples after High Temperature [ J ]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 ( 6 ): 1005 ~ 1050.
- [ 11 ] 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.  
ZHU He-hua, YAN Zhi-guo, DENG Tao, et al. Testing study on mechanical properties of tuff, granite and breccias after high temperatures [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 ( 10 ): 1945 ~ 1950.
- [ 12 ] 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 Cheng-dong, GUO Wen-bing, LI Xiao-shuang. Experimental research on mechanical properties of coarse sandstone after high temperatures [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 ( 6 ): 1162 ~ 1170.

- [ 13 ] 谯伦建, 赵洪宝, 顾海涛, 等. 煤层顶板砂岩在高温下微观结构变化的研究 [ J ]. 中国矿业大学学报, 2005, 34 ( 4 ): 443 ~ 446.  
CHEN Lun-jian, ZHAO Hong-bao, GU Hai-tao, et al. Study on microstructure of coal roof sandstone under high temperature [ J ]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34 ( 4 ): 443 ~ 446.
- [ 14 ] 谯伦建, 赵洪宝, 刘希亮, 等. 砂岩与石灰岩热膨胀力试验研究 [ J ]. 中国矿业大学学报, 2008, 37 ( 5 ): 670 ~ 674.  
CHEN Lun-jian, ZHAO Hong-bao, LIU Xi-liang, et al. Experimental research on heat swelling power of sandstone and limestone [ J ]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37 ( 5 ): 670 ~ 674.
- [ 15 ] 顿志林, 晁俊奇, 刘希亮, 等. 高温双向约束下岩石膨胀应力测试装置的研制 [ J ]. 河南理工大学学报, 2008, 27 ( 6 ): 685 ~ 688.  
DUN zhi-lin, CHAO Jun-qi, LIU Xi-liang, et al. The test device design of swelling stress of rock under bidirection restraints and high temperature [ J ]. Journal of Henan Polytechnic University, 2008, 27 ( 6 ): 685 ~ 688.
- [ 16 ] 晁俊奇. 高温双向约束下灰岩组构及物理力学性能试验研究 [ D ]. 焦作: 河南理工大学土木工程学院, 2008.  
CHAO Jun-qi. Experiment research of compages and physical mechanics of limestone under high temperature with both directions restricted [ D ]. Jiaozuo: College of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, 2008.

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON MECHANICAL PROPERTIES OF LIMESTONE AND SANDSTONE UNDER HIGH TEMPERATURE

QIN Ben-dong<sup>1, 2</sup>, HE Jun<sup>2</sup>, CHEN Lun-jian<sup>3</sup>

( 1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaan'xi 710054, China ;

2. College of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China ;

3. College of Material Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China )

**Abstract:** The mechanical properties of limestone and sandstone under high temperature were investigated by the experiment device used to heat rock designed by ourselves and servo-control testing machine RMT-150C. The results show that the longitudinal wave velocity of two kinds of rocks gradually reduced with temperature increasing. The complete curve of stress and strain under uniaxial compression went through 4 stages, namely densification, elasticity, yielding and failure. They both displayed brittle fracture after reaching peak strength, with the sandstone rupturing and the limestone showing failure like a bundle of grass. The high temperature weakened their strength. Their peak stresses reduced with temperature increasing. At 700 °C, the peak strength of limestone decreased by 84.59%, while that of sandstone only decreased by 22%. Their peak strain increased with temperature increasing, but differed in details. For limestone, its peak strain increased by 30.57% at 500 °C, but almost kept unchanged at the higher temperature, and even shaw a little decrease at 700 °C. For sandstone, however, the peak strain increased by 80.63% at 700 °C, displaying a connection with the variation of microstructure. With temperature increasing, their elastic modulus and deformation modulus decreased. At 700 °C, limestone decreased by 86.8% in elastic modulus and by 83.9% in deformation modulus, while sandstone decreased by 46.94% in elastic modulus and by 53.06% in deformation modulus.

**Key words:** limestone; sandstone; high temperature; longitudinal wave velocity; mechanical properties