

# 高温状态下大理岩力学性能实验研究

张连英<sup>1,2</sup>, 茅献彪<sup>2</sup>, 孙景芳<sup>1</sup>, 卢爱红<sup>2</sup>

(1. 徐州工程学院 数理学院, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 理学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 采用电液伺服材料力学试验系统对常温~800℃高温作用下大理岩的力学性能进行了研究, 考察了大理岩的全应力-应变曲线、峰值应力 $\sigma_p$ 、峰值应变 $\epsilon_p$ 、弹性模量 $E$ 等量的变化特征。结果表明: 随受热温度升高大理岩的峰值应力和弹性模量不同程度上渐次降低, 尤其是在不同温度段岩石强度降低具有突变性, 而峰值应变不同程度渐次增长。800℃时大理岩的延性明显增强, 应力达到峰值后, 应变仍表现出缓慢增加特性, 但最终大理岩破坏方式仍以脆断为主。研究结果一定程度上反映了大理岩在温度作用下内部结构变化的特征, 可为相关岩体工程设计与研究提供参考。

**关键词:** 大理岩; 高温作用; 力学性能; 实验研究

中图分类号: TU458<sup>+</sup>.3 文献标志码: A 文章编号: 1006-7329(2008)06-0046-05

## Mechanical Properties of Marble at High Temperature

ZHANG Lian-ying<sup>1,2</sup>, MAO Xian-biao<sup>2</sup>, SUN Jing-fang<sup>1</sup>, LU Ai-hong<sup>2</sup>

(1. School of Math and Physical Science, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221008, P. R. China; 2. School of Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, P. R. China)

**Abstract:** The mechanical properties of marble were studied using the MTS810 Rock Mechanics servo-controlled testing system at temperatures up to 800°C. This was done to analyze the stress-strain curve, peak stress, peak strain, and modulus of elasticity of marble. The results show that the peak stress and elastic modulus decrease with increasing temperatures, and the rock mechanical strength decreases suddenly in certain temperature ranges while the peak strain increases stepwise as the temperature rises. Marble ductility increased greatly at 800°C. The strain increases slowly as temperature rises after the peak stress occurs, but brittle fracturing is the main destructive manner of marble. The results also reflect the fundamental regulation of interior structural change in sandstone at different temperatures, providing a reference for rock engineering design.

**Key words:** marble; high temperature effect; mechanical properties

处理高温环境下的岩石工程问题是对岩石力学新的挑战。高放射性核废料的地质深埋处置、地热资源开发以及大都市圈的大深度地下空间开发利用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的强度及变形特性, 以便为岩石工程的设计、施工提供参数和依据。

长期以来, 国内外许多学者对岩石的热力学特性作了大量的研究, 主要有以下几个方面: (1) 基本物理力学参数的测定<sup>[1-4]</sup> (包括岩石的变形模量、泊松比、抗

拉强度、抗压强度、内聚力、内摩擦角、粘度、热膨胀系数等); (2) 热裂化问题研究<sup>[5-6]</sup>; (3) 变形机制的研究<sup>[7-8]</sup>; (4) 破坏准则和本构方程等<sup>[9-10]</sup>, 并取得理论意义和实用价值的研究成果。但由于岩石中矿物成分、结构不同, 即内部微裂纹的发育程度、分布形式的差异, 故岩石的力学特性受温度的响应极其复杂。不同岩石的强度、变形表现出不同的温度特性, 即使同一种岩石在不同的地质及赋存条件下, 其温度相应特性也会有巨大差异。

\* 收稿日期: 2008-05-28

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50490273); 教育部重点科技项目(106084); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209400); 江苏省高校自然科学基金基础研究项目(08KJD130003); 徐州工程学院校级项目(XKY2007219)

作者简介: 张连英(1971-), 女, 讲师, 博士, 主要从事工程力学研究。(E-mail) zhanglianying@126.com

茅献彪(联系人), 男, 教授, 博士生导师。(E-mail) xbmiao@cumt.edu.cn  
欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

本文将通过大理岩的单轴压缩试验,研究大理岩在常温~800℃高温下的力学特性,探讨大理岩其主要力学性能参数随温度的变化规律,为此类岩石工程问题的研究提供基础。

## 1 试验装置及试验方案

### 1.1 试样采集与制备

本试验所用岩样采自徐州贾汪地区某矿区的大理岩。一般地,不同尺寸、形态对岩石材料力学性能参数测定具有明显影响,但考虑到本试验中使用的高温环境炉内腔容积的限制,将本试验的岩样加工成直径为20.0 mm、高为45.0 mm左右的圆柱体。加工时首先用钻筒钻取相同直径的岩样,然后用切割机截取相同高度岩样,最后用打磨机将岩样的两个截面磨平,以改善测试结果的离散性。试验分  $T = \text{常温}(20\text{ }^{\circ}\text{C})$ 、100℃、200℃、300℃、400℃、500℃、600℃、700℃、800℃下9个不同温度段,每个温度段加工岩样5~6块。

### 1.2 试验设备及方法

试验采用美国MTS810电液伺服材料试验系统(Electro-Hydraulic Servo-controlled Rock Mechanics Testing System)和其配套的高温环境炉MTS652.02进行,如图1所示。整个试验过程由试验系统配套的Teststar II系统按照事先要求设定的程序完成。该系统通过计算机对测试过程有一个最迅速的控制,利用主窗体的菜单,可分配传感器,定义控制模式、设置边界、让敏感元件自动调零、选取输出信号,且在必要时设置一些参数,该系统软件包括图形用户接口、数据接口、软件功能发生器、程序设计以及系统工具。

试验时,首先将岩样正确放置到高温环境炉

MTS652.02内,然后以2℃/s的升温速率将岩样温度升至预定温度。为确保岩样受热均匀,参照国内外学者的实际经验,将岩样恒温时间2.0 h。采用电液伺服位移控制方式对岩样实施加载,位移加载速率设定为0.004 mm/s,直至岩样破坏为止。加载过程中利用Teststar II控制程序来按预定的要求完成实验过程,同时记录下相关物理量的值:轴向载荷、轴向位移、轴向应力及应变等。



图1 MTS810电液伺服材料试验系统与MTS652.02高温环境炉

## 2 高温作用下大理岩的力学性能

根据大理岩单轴压缩试验的轴向荷载-位移曲线,进一步分析得出高温状态下大理岩单轴压缩试验的应力-应变全过程曲线,如图2所示。同时获得每块试样的峰值应力 $\sigma_p$ ,峰值应变 $\epsilon_p$ ,利用应力-应变全过程曲线上达到峰值应力前的近似直线段数据,进行线性拟合,计算得出大理岩切线弹性模量 $E_t$ 和变形模量 $E$ ,见表1。

表1 高温下大理岩基本力学特性测试结果

序号	$T$ /℃	$\sigma_p$ /MPa		$\epsilon_p$		$E$ /GPa	
		测试值	均值	测试值	均值	测试值	均值
1		100.169		0.005 022		16.305	
2	20	74.951	87.56	0.065 1	0.005 766	19.149	17.727
3		87.568		0.005 698		17.82	
4		112.333		0.005 488		20.388	
5	100	98.728	105.65	0.005 605	0.005 646	19.114	19.693
6		105.902		0.005 844		19.577	
7		51.475		0.003 96		13.748	
8	200	53.719	52.87	0.002 847	0.003 432	14	14.242
9		52.87		0.003 488		14.978	
12		71.822		0.004 786		16.56	
13	300	77.009	75.78	0.005 133	0.004 959	17.262	16.882 67
14		78.56		0.004 959		16.825 6	

续表 1

序号	$T$ /°C	$\sigma_p$ /MPa		$\epsilon_p$		$E$ /GPa	
		测试值	均值	测试值	均值	测试值	均值
15		42.95		0.004 756		9.776 8	
16	400	68.18	52.12	0.006 539	0.005 934	12.711	10.544 93
17		45.229		0.006 507		9.147	
18		51.482		0.006 602		10.204	
19	500	65.558	54.33	0.006 396	0.006 639	9.670 6	10.507 2
20		45.948		0.006 919		11.647	
21		56.881		0.005 638		12.685	
22	600	44.41	50.64	0.005 757	0.005 698	10.015	11.35
23		50.645		0.005 67		11.65	
24		45.648		0.006 323		8.831	
25	700	56.056	44.65	0.005 308	0.005 836	11.57	10.051 67
26		32.264		0.005 876		9.754	
28		62.324		0.009 169		8.118 9	
29	800	54.8	59.1	0.009 198	0.009 838	7.618 5	7.568 7
30		60.2		0.011 146		6.968 7	

## 2.1 应力-应变全过程曲线

图 2 给出了不同温度下大理岩的应力-应变曲线。从图中看到,从常温~700°C 范围内,大理岩的应力应变曲线主要表现为三个阶段,即:(1)初始压密阶段,其曲线呈上凹型,随应力的增加,变形发展较快,这主要是由于岩石内的微裂隙在外力作用下发生闭合所致。(2)近似线弹性变形阶段,这一阶段的曲线近似呈直线,应力应变呈比例关系,该曲线在此直线段的斜率即为平均切线弹性模量。(3)破坏阶段。

总之,从常温~700°C 范围内,温度的变化对大理岩的应力-应变曲线没有太大影响,大理岩岩样的破坏均表现为位于峰值应力点的突然脆性破坏。但温度达到 800°C 时,应力-应变曲线除具有以上 3 个阶段外还呈现出塑性变形阶段,其曲线呈下凹型,大理岩的延性明显增强,应力达到峰值后,应变仍表现出缓慢增加特性,但最终的破断方式仍为脆性破坏。

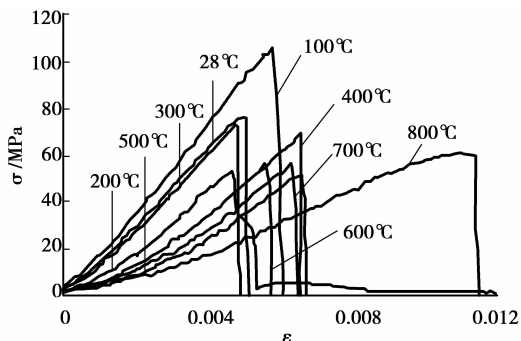


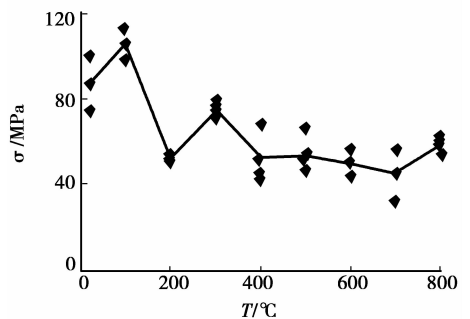
图 2 大理岩高温下单轴压缩应力-应变全过程曲线

## 2.2 峰值应力 $\sigma_p$ 的变化特征

高温作用下大理岩的峰值应力( $\sigma_p$ )随温度( $T$ )的变化规律如图 3 所示,图中的黑点为实测的数据点。

从试验结果上看,大理岩在各温度点峰值应力具有一定的离散性,总体上呈现随经历温度的升高而降低的趋势。高温作用下的大理岩,峰值应力的最大值不超过 120MPa,属于中低强度的岩石。

将同一温度段岩样的峰值应力  $\sigma_p$  取平均值(见表 2),得到大理岩在高温状态下的峰值应力均值与温度变化之间的关系如图 3 所示,可以看到,大理岩峰值应力均值随温度呈起伏状变化:

图 3 大理岩峰值应力  $\sigma_p$  均值随温度  $T$  的变化

(1)常温~100°C 内大理岩的峰值应力呈上升状态,初步推测是由于结构热应力造成岩石内部裂隙闭合所致。(2)100°C~200°C 平均峰值应力发生突发性降低,从 106 MPa 左右降低到 53 MPa 左右,降低了约 50%,强度发生突发性降低是否意味着 200°C 是大理岩内部结构变异的临界温度值,这还有待做更进一步

的研究与探讨;(3)200 °C~300 °C 峰值应力从 52 MPa 左右上升到 76 MPa 左右,上升了约 46%。(4) 300 °C~400 °C 峰值应力又降低,从 76 MPa 左右下降到 52 MPa 左右,降低了约 32%。400 °C~800 °C 峰值应力随有波动,但变化不大。

### 2.3 峰值应变 $\epsilon_p$ 的变化特征

高温作用下大理岩峰值应变均值随温度变化情况如图 4 所示,可见:

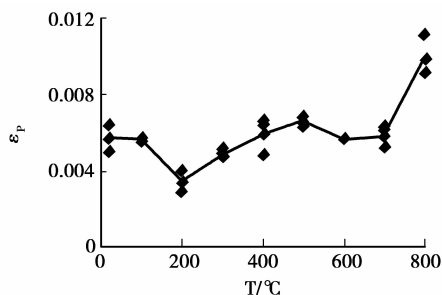


图 4 大理岩峰值应变  $\epsilon_p$  均值随温度 T 的变化

(1)在常温~200 °C 之间随着温度升高其峰值应变逐渐降低,这可能是由于大理岩在此温度段受结构热应力作用导致岩石内的微裂隙发生闭合所致。(2)当经历的温度超过 200 °C 以后,峰值应变随受热温度的升高又逐渐增长,在 800 °C 高温时,大理岩平均峰值应变由 200 °C 时的 0.003 4 增长到 0.009 8,增长幅度约 200%。

### 2.4 弹性模量 E 的变化特征

高温作用下大理岩弹性模量随温度变化情况见图 5,从图中看出:

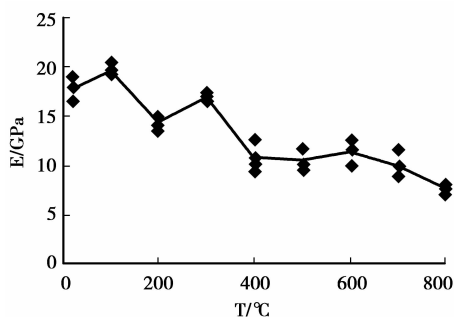
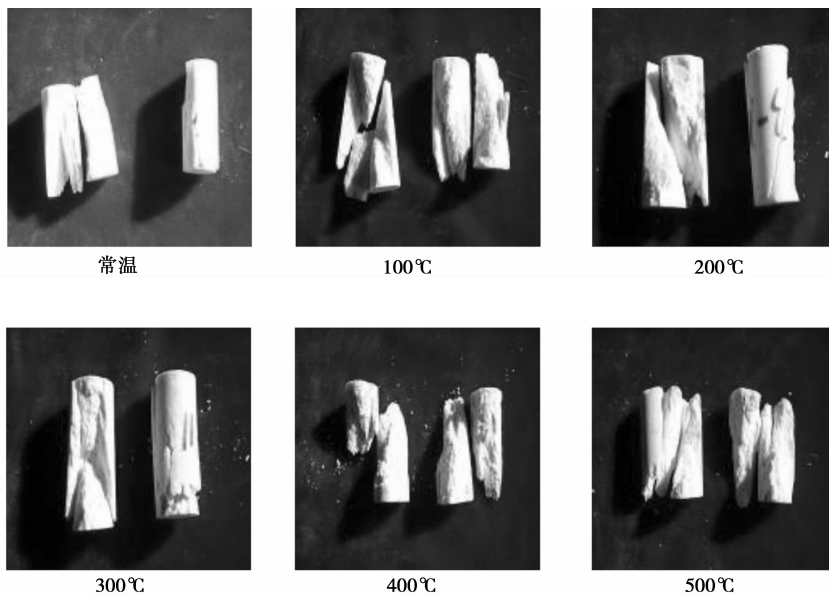


图 5 大理岩弹性模量均值 E 随温度 T 的变化

(1)大理岩的弹性模量的分布离散性不大,表明大理岩均匀性、致密性较好。大理岩的弹性模量总体上随着温度升高而降低;(2)大理岩经历 800 °C 高温作用时,其弹性模量与常温相比,从 18 GPa 下降到约 7.5 GPa,降低幅度约 58%。由于弹性模量代表了大理岩弹性阶段的变形性质,所以大理岩在经历 800 °C 高温作用,温度对其弹性模量影响较大。

### 3 温度对大理岩破坏方式的影响

由图 2 给出了大理岩单轴压缩全应力—应变曲线可见,常温(25 °C)~700 °C 范围内,大理岩试样达到峰值应力后,即发生崩裂破坏,表明:大理岩的破坏是脆性破坏。图 6 给出了常温(25 °C)~700 °C 范围内大理岩试样破坏断面形状照片,可以看到:(1)从常温(25 °C)~700 °C,试样的破裂面与试件轴向存在一夹角  $\varphi$ ,且随着温度 T 的升高  $\varphi$  的值逐渐变小,试样由压剪破坏



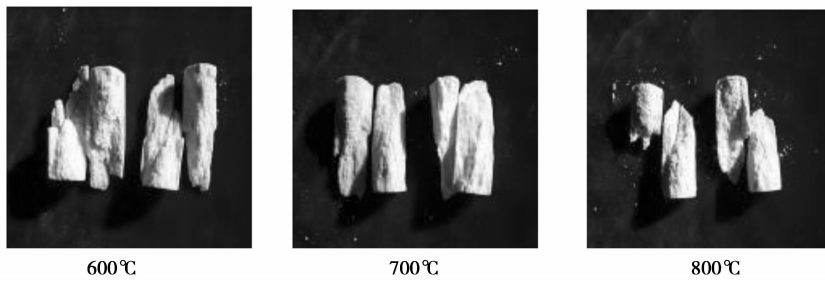


图6 大理岩岩样破断面形状照片

方式逐渐转变为张拉破坏;(2)当温度  $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,主要呈现为张拉破坏。事实上从位错的力学性质来看,在裂纹端部,位错繁殖源自然地起显著作用,这些繁殖源在裂纹尖端的变形区内产生高密度的滑移带,它们在微结构障碍物处依次塞积,并在主裂纹前缘产生大量次生裂纹,这些次生裂纹扩展发育,并且与主裂纹会合直至到破坏。

#### 4 结 论

通过对大理岩高温状态下用单轴压缩的试验方法进行力学实验研究,分析了大理岩的力学特性,主要得出如下结论:

1)随着作用温度升高,大理岩的应力—应变全过程曲线的峰后特性渐趋明显,岩石宏观上表现为由低温状态下的脆性向高温状态下的延性转化。

2)与常温下比较,高温下大理岩的力学性质有所差异,随温度升高大理岩平均峰值应力、弹性模量等都不同程度的呈现出下降的趋势;平均峰值应变不同程度的呈现出上升趋势。

3)对于高温作用下大理岩单轴压缩破断面:在常温( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )~ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内,破裂面与试件轴向夹角  $\varphi$  随着温度  $T$  的升高逐渐减小,即试样由压剪破坏方式逐渐转变为张拉破坏。

#### 参考文献:

[1] HEUZE F E. High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks—a review [J]. *Int J Rock Mech Min Sci and Geo mech Abstr*, 1983, 20(1):3-10.

[2] LAU J S O, GORSKI B, JACKSON R. The effects of temperature and water saturation on mechanical properties of Lac du Bonnet pink granite [C]. 8th international congress on Rock Mech, Tokyo, 1995, 1167-1172.

[3] 杜守继,刘华. 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.

DU Shou-ji, LIU Hua. Testing study on mechanical properties of post-high-temperature granite [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23

(14):2359-2364.

[4] 吴忠,秦本东,谌伦建. 煤层顶板砂岩高温状态下力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(11):1863-1867.

WU Zhong, QIN Ben-dong, CHEN Lun-jian. 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.

[5] JOHNSON B, GANGI A F, HANDIN J. Thermal cracking of rock subject to slow, uniform temperature changes[C]. *Proc 19th US Symp Rock Mech*, 1978, 259-267.

[6] 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*, 2000, 22(3):332-335.

XU Xi-chang, LIU Quan-sheng. A preliminary study on basic mechanical properties for granite at high temperature [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 22(3):332-335.

[7] SIMPSON C. Deformation of granitic rocks across the brittle-ductile transition [J]. *J Struct Geol*, 1985, 7(4):503-511.

[8] VANDER MOLEN I. The shift of the  $\alpha$ - $\beta$  transition temperature of quartz associated with the thermal expansion of granite at high pressure [J]. *Tectonophysics*, 1981, 73(2):323-342.

[9] 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(5):643-671.

[10] 尤明庆,华安增. 岩石试件单轴压缩的破坏形式与承载力的降低[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(3):292-296.

YOU Ming-qing, HUA An-zeng. Fracture of rock specimen and decrement of bearing capacity in uniaxial compression. [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(3):292-296.

(编辑 陈 蓉)