

温度对大理岩力学性质影响的细观研究

李道伟¹, 朱珍德¹, 蒋志坚², 渠文平¹

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 深圳市水利规划设计院, 广东 深圳 518036)

摘要 对不同温度下的大理岩进行单轴压缩试验, 结果表明, 经过高温后大理岩单轴抗压强度和弹性模量都大幅度降低, 阈值温度在 100℃ 左右. 采用扫描电镜对各温度下大理岩断口进行扫描并对 SEM 图像进行了分析, 对得到的不同温度下微裂隙的长度、方位角、间距等参数进行了统计分析, 得到了细观结构几何参数在不同温度下的分布概型: 长度在温度 20 ~ 300℃ 时服从对数正态分布, 450 ~ 600℃ 时服从 Weibull 分布, 方位角在不同温度下服从正态分布, 间距在温度 20 ~ 300℃ 时服从对数正态分布, 450 ~ 600℃ 时服从指数分布.

关键词 大理岩 细观结构 微裂隙 力学性质 温度

中图分类号 : TU458⁺.3

文献标识码 : A

文章编号 : 1000-1980(2008)03-0375-04

温度是影响岩石力学性能的主要因素之一. 高温环境下或高温后的岩石工程问题是岩石力学的新课题. 核废料的深埋处理、地热资源的开发、城市大深度地下空间的开发利用都需要考虑岩石在高温作用下或高温后的物理力学性质. 温度对岩石力学性质的影响与岩石矿物性质和内部结构有关, 温度的变化会影响岩石矿物成分和岩石的晶格^[1-5]. 因此, 岩石在温度作用下损伤细观破坏机理和常温下有较大的区别. 张晶瑶等^[6]用显微镜观察高温(600℃)影响下 2 种含铁石英岩的微结构. 许锡昌等^[7-8]研究了 20 ~ 600℃ 范围内花岗岩的基本力学性质, 提出了热损伤的概念. 夏小和等^[9]对 100 ~ 800℃ 的大理岩在不同的应力水平作用下进行了超声波传播特性的试验研究, 探讨了大理岩的 $V_p \sim H$ 的特性以及影响大理岩 $V_p \sim H$ 关系的主要力学及物理原因.

本文以四川锦屏大理岩为主要研究对象, 首先对高温后的大理岩进行单轴压缩试验, 然后应用扫描电镜对断口进行分析, 获取大量细观结构图像, 再对得到的 SEM 图像应用图像处理程序进行处理并提取微观结构参数, 统计分析不同温度下各参数的分布规律.

1 试验概述

1.1 试样制备

试验分 3 步, 一是试样加温, 二是对加温后的试样做单轴压缩试验, 三是应用扫描电镜对断口进行分析. 试样加工成圆柱形, 直径 50 mm, 高 100 mm. 结合试验目的, 共加工了 15 个, 试样按温度不同分为 5 组(20℃, 100℃, 300℃, 450℃, 600℃), 每组各 3 个试样.

1.2 试验内容

应用 RMT-150B 型多功能全自动刚性岩石伺服试验机(图 1)进行单轴压缩试验, 得到不同温度下的弹性模量、峰值应力、峰值应变.

应用日本电子株式会社(JEOL)制造的新型数字化 JSM-5610LV 钨灯丝扫描电镜(图 2), 对压缩后断口进行分析, 得到其结构图像.

应用河海大学岩土工程研究所渠文平^[10]研制的图像分析程序, 得到不同温度下微裂隙各参数(长度、方位角、间距等), 统计其分布规律.

具体试验过程见文献^[11].



图1 RMT-150B 全自动刚性岩石伺服试验机
Fig.1 RMT-150B full automatic inflexible
rock servo test machine



图2 JSM-5610LV 钨灯丝扫描电镜
Fig.2 JSM-5610LV tungsten filament
scanning electron microscopy

2 试验结果

2.1 单轴压缩试验结果

试验得到各温度下的弹性模量、峰值应力和峰值应变,见表1.

从表1可以看出,大理岩的弹性模量、峰值应力、峰值应变均在100℃左右时达到最大或最小值.温度高于100℃时,弹性模量随温度的升高而减小,在300℃,450℃,600℃时,分别降低为100℃时的58.6%,45.8%,26.7%.峰值应力随温度的升高而减小,在300℃,450℃,600℃时,分别降低为100℃时的75.8%,66.2%,55.8%;峰值应变随温度的升高而增大,在300℃,450℃,600℃时,分别增大为100℃时的126.3%,163.0%,203.0%.

不同温度下的大理岩单轴压缩应力-应变曲线如图3所示.

2.2 SEM 试验结果

对不同温度下的试样断口进行扫描,得到SEM图像,如图4所示.

3 图像处理及结果分析

随着温度的变化,微裂隙长度、方位角和数量都会有所变化.依据渠文平^[10]编制的图像处理程序,对得到的大量SEM图像进行处理,得到裂隙长度、面积、方位角、间距等数据,对其分析,分别得到其统计规律.

表1 单轴压缩试验结果

Table 1 The results of uniaxial
compression tests

温度/℃	弹性模量 E/GPa	峰值应力 σ_{max}/MPa	峰值应变 $\epsilon_{max}/10^{-3}$
20	20.6	84.05	4.87
100	21.05	84.64	4.63
300	12.32	64.17	5.86
450	9.64	56.04	7.55
600	5.61	47.24	9.40

注:各温度下的试验结果均取3个试样的平均值.

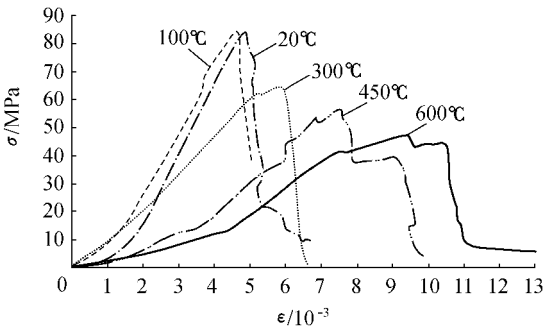


图3 不同温度下大理岩单轴
压缩应力-应变曲线

Fig.3 The stress-strain curve of the marbles under
different temperature in uniaxial compression tests

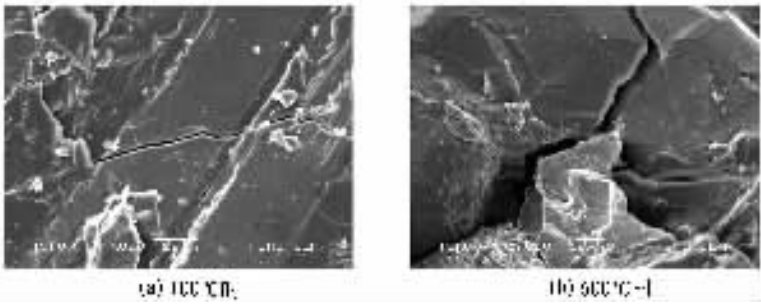


图4 大理岩 SEM 图像

Fig.4 The SEM images of the marbles

3.1 微裂隙长度分布规律

对长度数据进行假设检验,结果表明微裂隙长度在 20 ~ 300℃时服从对数正态分布:

$$f(L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma L} e^{-\frac{(\ln L - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (L > 0)$$

450 ~ 600℃时服从 Weibull 分布:

$$f(L) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{L}{\eta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{L}{\eta}\right)^m} \quad (L > 0)$$

采用矩法估计分别得到对数正态分布和 Weibull 分布的无偏估计量,见表 2.

3.2 微裂隙方位角分布规律

微裂隙方位角分布主要分为 2 个方向,以 0°为界,将数据分为正负 2 组. 假设其分布服从正态分布,显著性概率都大于 5%,所以可以认为方位角服从正态分布:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

采用点估计方法,分别得到不同温度下的 μ 和 σ 的无偏估计量,见表 3.

表 2 微裂隙长度分布参数的无偏估计量

Table 2 Unbiased estimator of the distribution of microcracks' length

温度/℃	对数正态分布		Weibull 分布	
	$\bar{\mu}$	$\bar{\sigma}$	$\bar{m}$	$\bar{\eta}$
20	3.400 2	0.767 1		
100	3.731 2	0.810 3		
300	4.539 5	0.947 4		
450			1.836	162.477
600			2.512	190.615

表 3 微裂隙方位角分布参数的无偏估计量

Table 3 Unbiased estimator of the distribution of microcracks' azimuth angle

温度/℃	正角		负角	
	$\bar{\mu}$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\mu}$	$\bar{\sigma}$
20	67.714	13.103	-50.641	12.534
100	59.417	12.915	-39.253	14.783
300	67.648	14.016	-58.125	11.837
450	58.378	11.471	-62.397	12.685
600	52.456	13.357	-46.582	13.468

3.3 微裂隙间距分布规律

随着温度的升高,在有限的面积内微裂隙数目不断增加,间距随之减小. 通过对裂隙间距的拟合检验,结果表明温度在 20 ~ 300℃时微裂隙间距服从对数正态分布,450 ~ 600℃时服从指数分布. 对数正态分布见式(1),指数分布密度函数为

$$f(s) = \lambda e^{-\lambda s} \quad (s \geq 0)$$

采用矩法估计分别得到对数正态分布和指数分布的无偏估计量,见表 4.

表 4 微裂隙间距分布参数的无偏估计量

Table 4 Unbiased estimator of the distribution of microcracks' spacing

温度/℃	对数正态分布		$\bar{\lambda}$ (指数分布)
	$\bar{\mu}$	$\bar{\sigma}$	
20	5.152 3	0.892 2	
100	5.223 7	0.774 3	
300	4.868 1	1.184 4	
450			0.006 67
600			0.009 02

4 结 论

- a. 大理岩阈值温度在 100℃左右. 大理岩内部在初始状态下就含有大量微裂隙,在加温到 100℃前,内部矿物颗粒受热膨胀,减小了岩石原生裂隙的长度和面积,甚至使原生裂隙闭合,减少了微裂隙数目,单轴抗压强度和弹性模量均大于常温.
- b. 温度继续升高,超过 100℃后,内部裂隙随温度升高而产生、扩展,使得微裂隙数目、长度、面积变大,岩石单轴抗压强度和弹性模量都会大幅度降低.
- c. 微裂隙长度在温度超过阈值温度时,随温度的升高不断增长,其长度在温度 20 ~ 300℃时服从对数正态分布,450 ~ 600℃时服从 Weibull 分布. 方位角在不同温度下分布范围为 -90° ~ 90°,服从正态分布,而且角度的主要分布范围都接近于最大应力方向. 微裂隙的间距随温度的升高而不断减小,在温度 20 ~ 300℃时服从对数正态分布,450 ~ 600℃时服从指数分布.

参考文献:

[1] HUEZE F E. Hightemperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks review[J]. Int J Rock Mech Min Sci &

- Geomech Abstr,1983,20(1) 3-10.
- [2] HOMAND E F,HOUPERT R. Thermally induced microcracking in granites :characterization and analysis[J]. Int J Rock Mech & Min Sci, 1989,26(2) :125-134.
- [3] 王靖涛,赵爱国,黄明昌. 花岗岩断裂韧度的高温效应[J]. 岩土工程学报,1989,11(6) :113-118.
- [4] HEUECKEL T,PEANO A,PELLEGRINT R. A constitutive law for thermo-plastic behaviour of rocks :an analogy with clays[J]. Surveys in Geophys,1994,15(4) :643-671.
- [5] 刘泉声,王崇革. 岩石时-温等效原理的理论与实验研究 第一部分 岩石时-温等效原理存在的热力学基础[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(2) :193-198.
- [6] 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.
- [7] 许锡昌. 花岗岩热损伤特性研究[J]. 岩土力学,2003,24(增刊) :188-191.
- [8] 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.
- [9] 夏小和,陆雅萍,黄醒春,等. 高温后大理岩在不同应力水平下超声波特性的研究[J]. 上海交通大学学报,2004,38(7) :1225-1228.
- [10] 渠文平. 基于数字图像处理技术的岩石细观量化试验研究[D]. 南京 :河海大学,2006.
- [11] 蒋志坚. 大理岩高温后力学性质及其细观试验研究[D]. 南京 :河海大学,2007.

Microstructural investigation of mechanical characteristics of marbles under different temperatures

LI Dao-wei¹, ZHU Zhen-de¹, JIANG Zhi-jian², QU Wen-ping¹

(1. *Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;*

2. *Water Conservancy Planning and Design Institute of Shenzhen, Shenzhen 518036, China*)

Abstract : Uniaxial compression tests of marbles under different temperatures were conducted. The results show that the uniaxial compression strength and elastic modulus of the heated rock decreases dramatically, and the threshold temperature of marbles is about 100℃. Using scanning electron microscopy (SEM), the fracture microstructure of marbles under different temperatures was examined. From the SEM images, the microcracks' microstructural parameters, including length, azimuth angle and spacing, were obtained and statistically analyzed. The lengths of the microcracks fit log-normal distribution from 20℃ to 300℃ and Weibull distribution from 450℃ to 600℃, the azimuth angles fit normal distribution in any temperature range, and the microcracks' spacing fits logarithmic normal distribution between 20℃ and 300℃ and exponential distribution between 450℃ and 600℃.

Key words : marble ; microstructure ; microcrack ; mechanical characteristics ; temperature