

文章编号:0253-9993(2011)02-0248-07

# 不同温度循环作用后大理岩细观损伤特征的定量研究

倪晓慧<sup>1,2,3</sup>, 李晓娟<sup>1,2,3</sup>, 朱珍德<sup>2,3</sup>

(1. 绍兴文理学院 土木工程系, 浙江 绍兴 312000; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 3. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:**通过单轴压缩试验和细观损伤特征量化试验,对经历20、100、300、450、600℃五种温度循环后的四川锦屏大理岩试样的宏观力学性质及相应的细观损伤特征进行了研究。试验结果表明:①经历不同温度循环的大理岩单轴压缩破坏试样的细观尺度微裂纹主要由沿晶裂纹、穿晶裂纹及晶内裂纹组成,且裂纹相应的基本几何信息服从广义极限统计分布特征;②由于试样中的沿晶裂纹和穿晶裂纹的100℃温度阈值特征,致使宏观尺度的大理岩试样在温度100℃前后表现出不同力学性质;③沿晶裂纹是在经历温度循环后大理岩试样单轴压缩破坏中起主导作用的微裂纹,穿晶裂纹有一定贡献,而晶内裂纹并未发挥显著作用。

**关键词:**温度;大理岩;单轴压缩;微裂纹

**中图分类号:**TU458 **文献标志码:**A

## Quantitative test on meso-damage characteristics of marble after different temperatures

NI Xiao-hui<sup>1,2,3</sup>, LI Xiao-juan<sup>1,2,3</sup>, ZHU Zhen-de<sup>2,3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Based on the uniaxial compression test and the quantitative meso-damage test, the mechanical properties and meso-damage characteristics of the Jinping marble in Sichuan Province after different high temperatures were studied. The temperature varied in the range of 20, 100, 300, 450, 600 °C. The results show that there are three main microcracks, which are intergranular cracks, transgranular cracks and intracrystalline cracks, in marble specimens under uniaxial compression. The geometric parameters of the microcracks fit generalized extreme value distribution. There are the different mechanical properties under 100 °C and under higher temperatures because the threshold temperature of intergranular cracks and transgranular cracks is about 100 °C. The intergranular cracks play a dominant role during the damage of marble samples.

**Key words:** temperature; marble; uniaxial compression; microcracks

随着核废物的地层深埋处置、地热资源的开发等工程进行,由于工程所处环境岩体可能经历高温作用,因此研究高温后的岩石物理力学性质特征成为岩石力学界所关心的新课题<sup>[1-2]</sup>。由于岩石材料损伤宏观尺度的破坏失稳过程实质上是其细观结构累积的变形破坏的宏观反映这一特征,因此有必要从细观尺度对经历温度循环后的岩石物理力学特征进行研

究。近年来,国内外学者开展了一些与温度相关的岩石物理力学性质的研究。INADA等<sup>[3]</sup>得到不同温度的循环影响和孔隙结构等都是影响岩石强度的重要因素的结论。张晶瑶等<sup>[4]</sup>研究了温度变化对两类石英岩微结构变化的影响。刘泉声、许锡昌等<sup>[5-6]</sup>研究了温度变化对花岗岩的物理力学特征的影响。夏小和等<sup>[7]</sup>对100~800℃的大理岩在不同的应力水平作

收稿日期:2010-08-16 责任编辑:常琛

基金项目:国家自然科学基金项目(50674040);浙江省教育厅科研基金项目(Y201018524)

作者简介:倪晓慧(1979—),男,浙江嘉兴人,讲师。Tel:0575-88341503, E-mail:nixh2010@126.com

用下进行了超声波传播特性的试验研究。朱合华等<sup>[8]</sup>通过单轴压缩试验得到了经历高温后的熔结凝灰岩、花岗岩及流纹状凝灰角砾岩的力学特征。赵阳升、万志军等<sup>[9-10]</sup>采用高温高压三轴试验机等设备,系统地研究了大尺寸花岗岩试样在高温下的破坏特征及其热学和力学参数变化规律。左建平等<sup>[11-12]</sup>通过各类试验系统研究了不同温度对砂岩物理力学性质的影响。赵金昌等<sup>[13]</sup>研究了花岗岩在高温高压条件下的冲击凿岩规律。

本文基于单轴压缩试验和细观损伤特征量化试验,以经历不同温度循环作用后大理岩试样的单轴压缩细观微损伤特征为研究对象,通过对细观损伤信息量化处理,定量的分析了大理岩试样损伤破坏中的3类主要细观微裂纹统计特征,说明细观尺度微裂纹对试样宏观力学性质的影响,为进一步研究高温后岩石的物理力学性质奠定了基础。

## 1 试验简介

### 1.1 试样制备

岩样为四川雅砻江锦屏二级水电站工程现场的大理岩,呈白色、块状、粒状变晶结构,硬度为3.5~4.0,风干密度为2.79 g/cm<sup>3</sup>,泊松比为0.191,宏观均匀一致,矿物成分主要为方解石和少量镁橄榄石和磁铁矿,主要化学成分为Ca和Mg。试验前对加工好的岩样外观进行仔细观察,确定没有肉眼可见的节理及裂纹等薄弱面,以确保试验用岩样之间宏观上无明显差异。按照国际岩石力学学会(ISRM)的制样要求,加工成 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的标准圆柱形试样,端面平行度控制在 $\pm 0.05\text{ mm}$ 以内,表面平面度在 $\pm 0.02\text{ mm}$ 以内。试验先后共制备5组试样(3个试样/组),每组对应于不同温度循环的单轴压缩荷载试验。

### 1.2 不同温度循环作用下的单轴压缩试验

不同温度循环作用是在以标准温度为20℃,温度循环次数为1次的情况下,对不同组试样采用不同的循环温度:1组为20℃(未进行温度循环);2组为100℃;3组为300℃;4组为450℃;5组为600℃。加温设备采用SX2-4-10箱式电阻炉,炉内最高温度可达1000℃,炉温均匀度小于10℃。单轴压缩试验是采用河海大学岩土工程研究所RMT-150B多功能全自动刚性岩石伺服试验机完成的。该试验机通过液压缸由活塞控制加载,加载轴向输出力为100~1000 kN,活塞的行程为5~50 mm。

### 1.3 细观损伤特征量化试验

细观损伤量化试验采用JSM-5610LV扫描电镜(SEM)对试样切片进行观测。为保证统计大理岩试

样内细观尺度损伤特征,因此在制备试验用切片时须注意减少由于制作切片所产生二次损伤带来的统计误差。由于试验数据基于统计分析,所以切片分别从试样的X、Y、Z三个方向取样,并保证每个方向切片不少于20个。基于Matlab图像处理工具箱,针对岩石细观扫描电子显微镜图像的特点,编写岩石细观损伤图像识别程序,提取试样细观微裂纹的方位角、长度等数据<sup>[14]</sup>。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 不同温度循环作用下单轴压缩试验结果

由表1及图1可见,当温度达100℃时,大理岩试样的3类物理力学指标均出现最值,弹性模量、峰值应力分别达到最大值21.05 GPa、84.64 MPa,峰值应变出现最小值 $4.63\times 10^{-3}$ ;应力-应变曲线由压密阶段、弹性阶段和应变软化阶段构成,在形态上与温度20℃时类似,均明显呈现出单峰型特征。

表1 不同温度循环作用下大理岩单轴力学行为指标

Table 1 The mechanical indices of the marble on uniaxial compression tests under different temperatures

温度 $T/^\circ\text{C}$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	峰值应力 $\sigma_{\text{max}}/\text{MPa}$	峰值应变 $\varepsilon_{\text{max}}/10^{-3}$
20	20.60	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

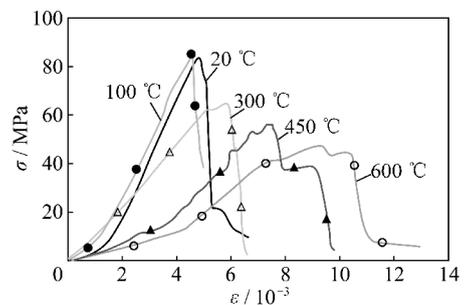


图1 不同温度循环作用下大理岩单轴压缩试验曲线

Fig. 1 The stress-strain curves of the marble obtained by uniaxial compressing test under different temperatures

随着温度的进一步升高,弹性模量和峰值应力则表现出明显的降低趋势,即300℃时,弹性模量降低为100℃时弹性模量的58.5%,峰值应力降为75.8%;当温度为450℃时,弹性模量降低为45.8%,峰值应力降为66.2%;当温度为600℃时,弹性模量降低为26.7%,峰值应力降为55.2%。而

峰值应变则随温度的升高而增加,即 300 °C 时,峰值应变增加为 100 °C 时峰值应变的 126.6%;当温度为 450 °C 时,峰值应变增加为 163.1%;当温度为 600 °C 时,峰值应变增加为 203.0%。同时,应力-应变曲线的形态随着温度的升高发生较大变化,曲线坡度趋于平缓且压密阶段明显增长,这是由于高温致使试样中不同组分产生不均匀膨胀,使得内部在冷却过程中产生的残余应力造成较多的微裂纹、微孔洞进而增加了压密过程;同时还表现出一定程度的应变软化现象,呈现出峰后多峰型的形态。

## 2.2 大理岩细观损伤特征量化试验结果

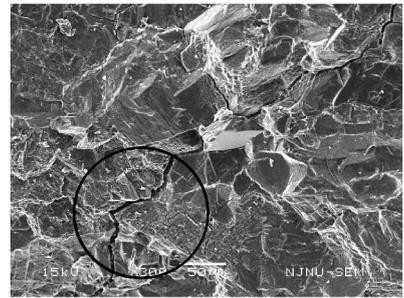
通过观察蕴含大理岩试样细观损伤特征信息的 SEM 图像,无论大理岩试样单轴压缩破坏试样是否经历过温度循环作用,其细观尺度矿物晶体间、矿物晶体内部主要存在 3 类微裂纹(图 2):沿晶裂纹、穿晶裂纹和晶内裂纹。根据文献[15],由于表征微裂纹基本几何信息的参数主要有方位角、长度、宽度和面积等,因此本文基于由 SEM 图像获取的大理岩试样细观尺度微裂纹信息,从微裂纹的方位角、长度、宽度和面积 4 个方面,统计晶内裂纹、沿晶裂纹和穿晶裂纹 3 类微裂纹的细观损伤特征。

### 2.2.1 方位角

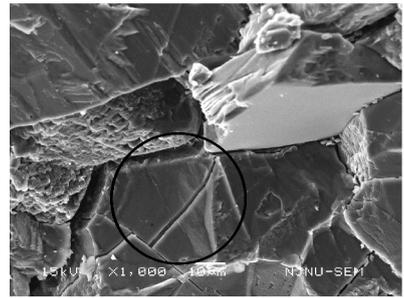
微裂纹的方向性可以通过其方位角来表征,由于微裂纹的方位角与加载方向的相关性,故文中将方位角定义为微裂纹走向与加载方向的夹角的绝对值。为得到经历不同温度循环后的单轴压缩破坏试样中 3 类微裂纹方位角的统计分布特征,基于微裂纹的方位角风玫瑰图(图 3),分别作微裂纹相应的方位角概率直方图(图 4)。然后,应用 Matlab 软件统计工具箱对上述细观结构数据进行数据分析,得到 3 类微裂纹方位角的统计分布概型,即 3 类微裂纹的方位角在 95% 保证率中基本符合不同参数的广义极限分布(Generalized extreme value,简称 GEV)。其相应密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{v} \exp \left[ - \left( 1 + k \frac{x - \mu}{v} \right)^{-\frac{1}{k}} \right] \left( 1 + k \frac{x - \mu}{v} \right)^{-1 - \frac{1}{k}}$$

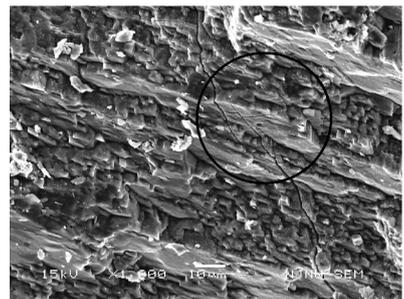
式中, $x$  为对应于微裂纹的方位角; $\mu$  为位置参数; $v$  为比例参数; $k$  为形状参数,当  $k > 0$  时,广义极限分布退化为 Gumbel 分布,当  $k = 0$  时,退化为 Frechet 分布,当  $k < 0$  时,退化为 Weibull 分布(具体参数如图 4 所示)。



(a) 沿晶裂纹



(b) 穿晶裂纹



(c) 晶内裂纹

图 2 大理岩破坏试样内主要微裂纹形式  
Fig. 2 The main microcracks in marble specimens

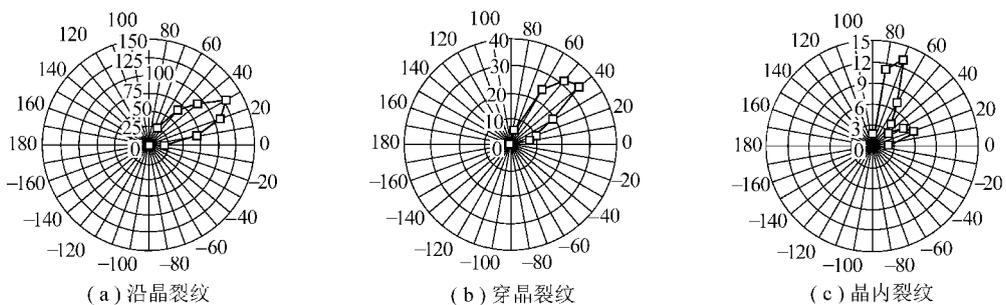


图 3 微裂纹方位角风玫瑰图(20 °C)

Fig. 3 Wind rose of the microcracks(20 °C)

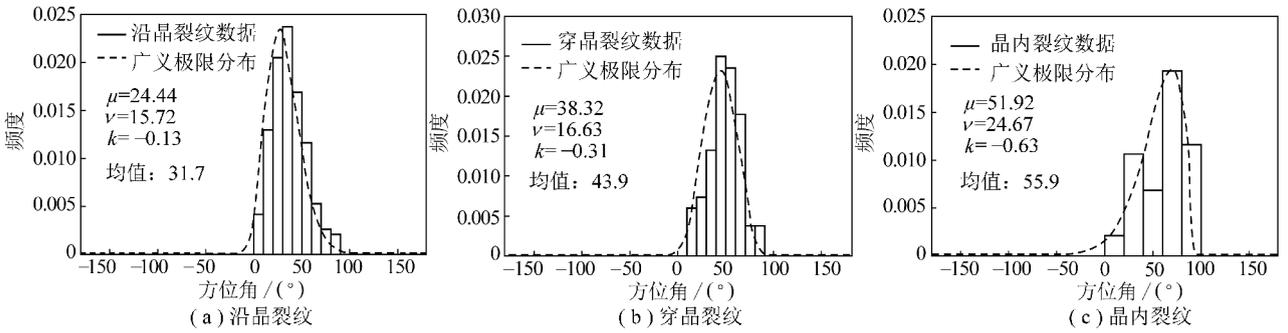


图 4 微裂纹方位角直方图(20 °C)

Fig. 4 The azimuth histogram of the microcracks(20 °C)

为了从整体趋势角度来定量描述细观损伤特征, 本文由平均值及相应方差 2 个统计特征来描述 3 类微裂纹的方位角特征, 具体见表 2 和图 5。

表 2 不同温度循环作用下微裂纹方位角的方差

Table 2 The statistics variance of the microcracks azimuth under different temperatures

微裂纹	温度/°C				
	20	100	300	450	600
沿晶裂纹	307.78	319.96	361.12	378.91	409.44
穿晶裂纹	268.55	298.11	309.97	326.38	377.25
晶内裂纹	512.83	517.34	532.31	556.52	589.74

由图 5(a) 和表 2 可见, 对于未经历温度循环作用的试样(温度为 20 °C), 3 类裂纹中沿晶裂纹方位角明显趋向于轴向荷载方向(31.7°), 而穿晶裂纹方位角趋向于轴向荷载作用方向的特征比沿晶裂纹略差(43.9°); 与沿晶裂纹和穿晶裂纹相比, 晶内裂纹方位角偏移轴向荷载方向角度值较大(55.9°), 相应方差值也较大(512.83), 这说明晶内裂纹角度分布范围较广, 且无明显趋向性。

随着经历循环的温度逐渐增高, 沿晶裂纹方位角的均值波动范围较小(约 10°以内), 这表明其趋向性随着温度的升高仍基本保持, 而方差值由 307.78 增高到 409.44, 说明循环温度的升高会致使试样内部细观结构出现方向随机性比较大的微损伤, 从而导致单轴压缩破坏后产生较多偏离轴向荷载方向较大角度的沿晶裂纹, 但处于主导地位沿晶裂纹的方位角趋向性仍是明显的; 穿晶裂纹方位角均值在温度变化过程中波动较大, 结合方差值变化特点, 说明不同温度循环产生的微损伤对破坏后试样内穿晶裂纹形成的影响较大, 穿晶裂纹方位角的趋向性相对并不明显; 结合晶内裂纹方位角的均值和方差值分析, 晶内裂纹方位角则表现出明显的随机性和无规律性。

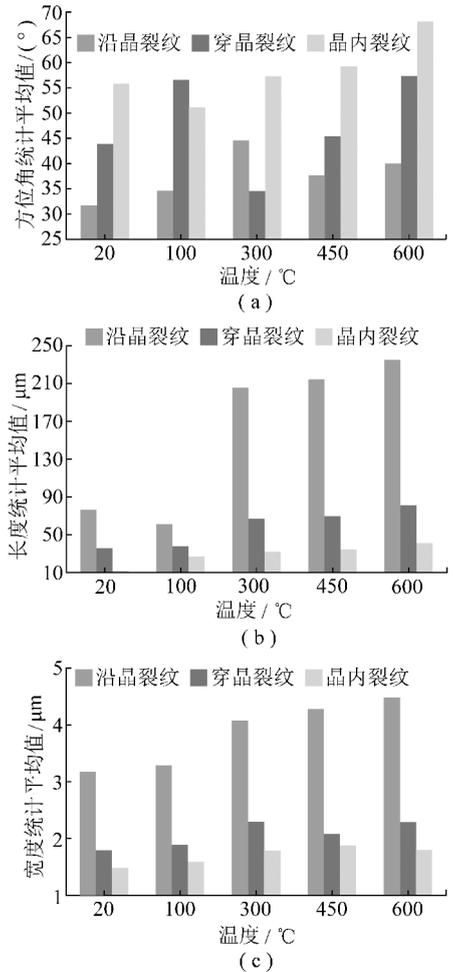


图 5 不同温度循环作用下微裂纹方位角、长度和宽度统计均值

Fig. 5 The statistics mean value of the microcracks azimuth, length and width under different temperatures

2.2.2 长度与宽度

运用描述微裂纹方位角统计特征的方法对 3 类微裂纹的长度和宽度进行分析, 可得 3 类微裂纹的长度及宽度也符合不同参数的 GEV 统计分布模型, 且也由平均值及方差值两个值来描述 3 类微裂纹的长度和宽度统计特征。

由图5(b)和表3可见,当温度为100℃时,沿晶裂纹长度平均值出现最低值(61.39 μm),相应的方差也出现最小值(262.19),这说明试样内部初始状态就含有大量微裂纹,由于试样内部矿物颗粒之间受热膨胀的差异性,致使在加温到100℃前矿物颗粒受热产生不均匀膨胀,在试样内部某些区域中出现挤密现象,即减小了岩石原生微裂纹的长度,甚至使某些初始微裂纹闭合,因而此时沿晶裂纹的长度均值达到最小值。随着温度的进一步升高(温度高于100℃),沿晶裂纹长度均值出现较大幅度增长(温度为600℃时,达到最大值234.32 μm),说明随着温度的进一步升高,由于高温产生的微损伤大幅度增加,远超过其产生的挤密作用,因此温度100℃是沿晶裂纹长度均值的一个阈值温度;方差值的增高说明循环温度升高后试样破坏时内部沿晶裂纹长度发展是不均匀的,出现了较大的离散性。

表3 不同温度循环作用下微裂纹长度的方差

Table 3 The statistics variance of the microcracks length under different temperatures

微裂纹	温度/℃				
	20	100	300	450	600
沿晶裂纹	276.77	262.19	301.74	331.87	383.61
穿晶裂纹	421.39	441.97	483.44	532.14	578.99
晶内裂纹	333.17	327.56	413.19	432.26	478.32

与沿晶裂纹相比,随着循环温度的升高,穿晶裂纹和晶内裂纹的长度均值发展则始终处于缓慢发展过程中,尤其晶内裂纹发展最为缓慢(温度为600℃时,长度均值为41.96 μm),同时两类裂纹长度的方

表5 不同温度循环作用下微裂纹数量与面积

Table 5 The number and area of the microcracks under different temperatures

参 数	温度/℃					
	20	100	300	450	600	
沿晶裂纹	数量/条	531	527	646	702	717
	面积/μm <sup>2</sup>	124 712	97 469	529 651	631 284	758 219
	百分比/%	92.69	90.31	94.17	94.42	94.73
穿晶裂纹	数量/条	136	125	197	232	212
	面积/μm <sup>2</sup>	8 917	8 659	29 703	33 116	37 074
	百分比/%	6.63	8.02	5.28	4.95	4.63
晶内裂纹	数量/条	52	48	54	62	68
	面积/μm <sup>2</sup>	913	1 804	3 078	4 212	5 086
	百分比/%	0.68	1.67	0.55	0.63	0.64

注:百分比是指某一类微裂纹面积占3类微裂纹总面积的百分比。

差值均有一定的增加,这说明循环温度的升高促进了穿晶裂纹和晶内裂纹长度的发展,与沿晶裂纹长度发展相比,这两类裂纹长度发展速度较为迟缓,且未出现类似于沿晶裂纹长度发展的阈值温度。沿晶裂纹的阈值温度出现可能是由于沿晶裂纹产生于矿物周边,其附近材质的不均匀性更突出所导致的;与沿晶裂纹相比,穿晶裂纹和晶内裂纹出现位置附近的材料均匀性则相对较好。

与长度发展特征相比,随循环温度的增加,3类微裂纹宽度均值基本没有发展(图5(c)),沿晶裂纹宽度均值为3~4 μm,穿晶裂纹宽度为2 μm左右,晶内裂纹宽度最细(低于2 μm),这说明循环温度的变化对3类微裂纹宽度均值基本没有影响;而方差的小幅波动变化(表4)说明虽然各类微裂纹数量发生变化,但是其在微裂纹宽度均值的分布特征变化不大。可见,3类微裂纹一旦形成,均在裂纹尖端有较快发展,而在其宽度方向发展较慢。

表4 不同温度循环作用下微裂纹宽度的方差

Table 4 The statistics variance of the microcracks width under different temperatures

微裂纹	温度/℃				
	20	100	300	450	600
沿晶裂纹	226.11	259.93	210.68	237.29	243.79
穿晶裂纹	311.43	308.31	322.73	351.11	379.34
晶内裂纹	343.78	311.17	401.89	435.66	413.55

### 2.2.3 面 积

三类微裂纹随循环温度增加数量及面积变化各有特点(表5)。

沿晶裂纹在数量和面积的发展上具有明显的温

度阈值特征,即当循环温度低于100℃时,随着温度

增加,其数量和面积呈现降低趋势,面积百分比也由20℃的92.96%降至100℃时的90.31%,这是由于试样内部矿物热膨胀性存在差异导致的,当温度高于100℃时,随着温度的升高,沿晶裂纹的数量及面积均有较大的发展,当温度为600℃时,面积百分比达到最大值94.73%,可见,沿晶裂纹面积占全部微裂纹总面积的比重最大,保持在90%以上。

穿晶裂纹在数量和面积方面也表现出一定的温度阈值特征,其温度阈值也是100℃,与沿晶裂纹不同的是,穿晶裂纹面积百分比在温度为100℃时达到最大值8.02%,随着温度的继续增加,其面积百分比开始下降,这是由于两类裂纹产生位置及产生机理不同造成的,即穿晶裂纹是矿物微观结构中原子键的断裂产生的,且往往出现在矿物晶粒较薄弱边界处,沿结晶裂纹则是相同矿物或不同矿物之间存在一定程度的层状结构,形成直接拉开的裂纹。

晶内裂纹仅在数量方面表现出比较弱的温度阈值特征,在面积方面随着温度的增加发展较为迅速,与穿晶裂纹类似,其面积百分比在循环温度为100℃时达到最大值1.67%,晶内裂纹对微裂纹总面积基本没有贡献,保持在1%左右,这是由于矿物细观结构内部相比于矿物周边相对材质均匀许多,高温冷却产生的微损伤相对则较少。

结合宏细观试验结果,当循环温度在20~100℃区段时,大理岩试样细观尺度中随着温度的升高,作为主要微损伤形式的沿晶裂纹在数量及尺度(包括长度、面积)两方面均出现下降,致使3类微裂纹总面积相比20℃时出现一定程度的下降,因此宏观尺度中试样在温度为100℃时的峰值应力、弹性模量均较20℃时有所提高。

穿晶裂纹虽然在数量及尺度方面也出现下降,与沿晶裂纹相比,穿晶裂纹面积在3类微裂纹总面积中所占比例则相比20℃时有所增高(温度为100℃时达8.02%),同时由于穿晶裂纹是原子键的简单破裂而沿结晶面直接拉开的裂纹,其破坏过程并没有明显的塑性变形阶段,因而在宏观尺度中100℃单轴压缩曲线较20℃曲线表现出更显著的脆性破坏特征。

当循环温度大于100℃时,随着温度的升高沿晶裂纹发展速度较快,其面积占微裂纹总面积的94%以上,因此由于微裂纹总面积的迅速增加,致使宏观尺度试样的峰值应力、弹性模量均有明显下降;穿晶裂纹也发展较快,但其面积在微裂纹总面积中所占比重有所下降,即由100℃时的8.02%降至600℃的4.63%,同时由于面积比重最大的沿晶裂纹表现为延性破坏特征,因此在宏观尺度上,大理岩试样单轴

压缩曲线随温度的升高表现出越来越明显的延性破坏特征。

与沿晶裂纹和穿晶裂纹相比,在温度变化过程中,晶内裂纹则始终保持缓慢发展特征,但其面积在微裂纹总面积中所占比例仅1%左右,因此晶内裂纹在损伤破坏过程中并未发挥显著作用。

### 3 结 论

(1)通过对经历不同温度循环的大理岩单轴压缩破坏试样的SEM试验研究,基于统计学理论,对试样细观尺度微损伤进行统计分析,得到了沿晶裂纹、穿晶裂纹及晶内裂纹3类主要微裂纹的基本几何信息在不同温度下的统计特征。

(2)由于试样细观尺度微裂纹中沿晶裂纹和穿晶裂纹的温度阈值特征,致使宏观尺度的试样在温度为100℃时的峰值应力和弹性模量均达到最大值,且表现出脆性破坏特征。

(3)当温度高于100℃时,随着温度的升高,试样中细观尺度微裂纹总面积迅速增加,其中沿晶裂纹所占面积比重不断增加,穿晶裂纹比重相对减少,因此试样宏观尺度的峰值应力和弹性模量均有所下降,且逐渐表现出应变软化的特征。

(4)3类细观尺度微裂纹中,沿晶裂纹是在经历温度循环后大理岩试样单轴压缩破坏中的起主导作用的微裂纹,相应面积百分比一般在90%~95%之间;穿晶裂纹对试样损伤破坏过程具有一定贡献,相应面积百分比则在4%~9%之间;与沿晶裂纹和穿晶裂纹相比,面积百分比仅1%左右的晶内裂纹在试样损伤破坏过程中并未发挥显著作用。

### 参考文献:

- [1] 周宏伟,谢和平,左建平.深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J].力学进展,2005,35(1):91-99.  
Zhou Hongwei, Xie Heping, Zuo Jianping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the confining of high ground pressure in the depths[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1):91-99.
- [2] 赵阳升,万志军,康建荣.高温岩体地热开发导论[M].北京:科学出版社,2004.  
Zhao Yangsheng, Wan Zhijun, Kang Jianrong. Introduction to geothermal extraction in hot dry rock[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [3] Inada Y, Kinoshita N, Ebisawa A, et al. Strength and deformation characteristics of rocks after undergoing thermal hysteresis of high and low temperatures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3):688-701.
- [4] 张晶瑶,马万昌,张风鹏,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.

- Zhang Jingyao, Ma Wanchang, Zhang Fengpeng, et al. On rock structure character under high temperature [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 1996, 17(1): 5-9.
- [5] 许锡昌, 刘泉声. 高温下花岗岩基本力学性能初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 22(3): 332-335.
- Xu Xichang, Liu Quansheng. A preliminary study on basic mechanical properties for granite at high temperature [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 332-335.
- [6] 刘泉声, 许锡昌, 山口勉, 等. 三峡花岗岩与温度及时间相关的力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 715-719.
- Liu Quansheng, Xu Xichang, Yamaguchi, et al. Testing study on mechanical properties of the three gorges granite concerning temperature and time [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5): 715-719.
- [7] 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): 1 225-1 228.
- Xia Xiaohe, Lu Yaping, Huang Xingchun, et al. Experimental research on ultrasonic characteristic of marble under the action of high temperature [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(7): 1 225-1 228.
- [8] 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): 1 945-1 950.
- Zhu Hehua, Yan Zhiguo, 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): 1 945-1 950.
- [9] 赵阳升, 万志军, 张 渊, 等. 20MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 1-8.
- Zhao Yangsheng, Wan Zhijun, Zhang Yuan, et al. Research and development of 20MN servo-controlled rock triaxial testing system with high temperature and high pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 1-8.
- [10] 万志军, 赵阳升, 董付科, 等. 高温及三轴应力下花岗岩体力学特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 72-77.
- Wan Zhijun, Zhao Yangsheng, Dong Fuke, et al. Experimental study on mechanical characteristics of granite under high temperatures and triaxial stresses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 72-77.
- [11] 左建平, 周宏伟, 谢和平, 等. 温度和应力耦合作用下砂岩破坏的细观实验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1 477-1 482.
- Zuo Jianping, Zhou Hongwei, Xie Heping, et al. Mesoexperimental research on the sandstone failure behavior under thermal-mechanical coupling effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1 477-1 482.
- [12] 左建平, 谢和平, 刘瑜杰, 等. 不同温度热处理后砂岩三点弯曲的断裂特性[J]. 固体力学学报, 2010, 31(2): 119-126.
- Zuo Jianping, Xie Heping, Liu Yujie, et al. Investigation on fracture characteristics of sandstone after thermal effects through three-bending point experiments [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010, 31(2): 119-126.
- [13] 赵金昌, 李 义, 赵阳升, 等. 花岗岩高温高压条件下冲击凿岩规律试验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 904-909.
- Zhao Jinchang, Li Yi, Zhao Yangsheng. Study on impact grinding law of granite under the conditions of high temperature and high pressure [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 904-909.
- [14] 朱珍德, 渠文平, 蒋志坚. 岩石细观结构量化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1 313-1 324.
- Zhu Zhende, Qu Wenping, Jiang Zhijian. Quantitative test study on mesostructure of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1 313-1 324.
- [15] 倪晓慧, 朱珍德, 赵 杰, 等. 岩石破裂全程数字化细观损伤力学试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3 283-3 290.
- Ni Xiaohui, Zhu Zhende, Zhao Jie, et al. Meso-damage mechanical digitalization test of complete process of rock failure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3 283-3 290.