

DOI: 10.11779/CJGE201507002

热损伤花岗岩三轴卸围压力学特性试验研究

蔡燕燕^{1, 2}, 罗承浩¹, 俞 缙^{1, 2}, 张黎明³

(1. 华侨大学岩土工程研究所, 福建 厦门 361021; 2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008;
3. 青岛理工大学理学院, 山东 青岛 266033)

摘要: 利用岩石伺服试验系统, 对经历 25℃~900℃作用后的花岗岩试样进行三轴卸围压试验, 研究高温后花岗岩在卸荷路径下的变形特性、参数特征及破坏形态。结果表明: 经历 300℃后的岩样围压卸荷量最少, 最容易发生破坏。基于应变围压增量比, 定量揭示了卸荷破坏是由强烈的径向变形和体积扩容所致。随着温度上升, 各应变围压增量比均先增大后减小, 在 300℃时达到最大。卸荷过程中岩样的变形模量逐渐减小, 25℃~900℃之间, 减小 33.20%~59.11%, 且温度越高减小越多, 与体积应变均呈二次多项式相关; 泊松比逐渐增大, 25℃~900℃之间, 增大 164.96%~274.03%, 且温度越高增加越多, 与体积应变均呈线性相关。高温后的岩样在单轴压缩下均呈轴向劈裂破坏, 并存在多个贯通裂纹; 在三轴压缩下为宏观单一的贯通剪切破坏形态; 三轴卸围压下破坏形态则比较复杂, 常温时为高角度的局部剪切破坏, 随温度升高, 岩样变为贯通剪切破坏, 到 900℃时又变为局部剪切破坏。

关键词: 热损伤; 花岗岩; 三轴卸围压; 力学性能; 破坏形态

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)07-1173-08

作者简介: 蔡燕燕(1982-), 女, 福建晋江人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土力学与室内实验等方面的研究工作。E-mail: yycai@hqu.edu.cn。

Experimental study on mechanical properties of thermal-damage granite rock under triaxial unloading confining pressure

CAI Yan-yan^{1, 2}, LUO Cheng-hao¹, YU Jin^{1, 2}, ZHANG Li-ming³

(1. Geotechnical Engineering Institute, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3. College of Science, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

Abstract: The triaxial tests on post-high-temperature granite samples (25℃~900℃) under unloading confining pressure are performed to study the deformation characteristics, parameters and failure patterns by using the servo-controlled rock test system. The results show that the granite rocks undergoing a certain temperature (300℃) resist the lowest level of confining pressure and are the most prone to damage. Based on the ratios of strain increment to confining pressure decrement, it is quantitatively revealed that the unloading damage is caused by the intense radial deformation and volume expansion. The ratios of strain increment to confining pressure decrement all increase firstly and then decrease with the increase of temperature and reach the maximum value at 300℃. The deformation modulus gradually decreases during unloading by 33.20%~59.11% between 25℃~900℃, and the higher the temperature is, the more it decreases. The decreasing tendency is a quadratic polynomial relation with the volume strain. The Poisson's ratio increases gradually during unloading by 164.96%~274.03% between 25℃~900℃, and the higher the temperature is, the more it increases. The increasing tendency is linearly related to the volume strain. The post-high-temperature granite samples fail in the pattern of axial splitting under uniaxial compression with multiple transfixion cracks. And the rocks damage with cutting-through shear failure under triaxial compression. It is most complicated under triaxial unloading. The local shear failure with a large angle at the normal temperature turns into cutting-through with the increase of temperature, and returns to local shear failure again when the temperature reaches 900℃.

Key words: thermal damage; granite; triaxial unloading confining pressure; mechanical property; failure pattern

0 引言

21世纪以来, 地热利用、煤炭开采、油气钻探、

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374112, 41472270); 福建省自然科学基金项目(2014J01160); 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDUEK1304)

收稿日期: 2014-12-16

核废料处置等深部地下资源和空间开发频繁涉及岩石高地温环境^[1-3]。公路铁路隧道的火灾后修复、军事和人防工程的战后重建等，也需要加深对高温前后岩体力学性质变化的了解。Wong^[4]总结了岩石强度与温度的关系，认为多数岩石的强度随温度的升高而下降，下降趋势与岩石种类有关。吴刚等^[5]研究了砂岩高温后的单轴压缩力学特性。寇绍全^[6]、Chen 等^[7]、Liu 等^[8]研究了不同温度热处理后，花岗岩单轴压缩下的物理力学性质。杜守继等^[9]对经历不同温度后花岗岩的力学性能进行了单轴试验研究。尹光志等^[10]、徐小丽等^[11]对粗砂岩和花岗岩进行了高温后的常规三轴试验。可见前人的研究大多围绕热损伤岩石的单轴压缩和常规三轴压缩等加载条件下的力学特性展开的。

实际上，岩体在地下开挖和支护结构失效过程中主要经历的是卸荷应力路径，其力学行为与常规加载差异巨大^[12-14]。陶履彬等^[15]通过花岗岩卸荷试验获得了由卸荷导致的经验强度准则。黄润秋等^[16]讨论了两种卸荷路径下花岗岩的变形参数及破裂特征。陈卫忠等^[17]进行花岗岩常规三轴、不同卸载速率条件下峰前、峰后三轴卸围压试验，分析花岗岩卸荷破坏全过程。吕颖慧等^[18]描述了花岗岩卸荷过程的力学参数劣化规律。张黎明等^[19]研究了加卸荷两种应力路径下大理岩破坏过程中的声发射特性差异。邱士利等^[20]开展不同初始损伤度和卸围压路径的大理岩三轴卸荷试验，提出了新的卸荷力学参量。俞缙等^[21]探讨了红砂岩峰前和峰后卸围压路径下变形破坏过程的渗透率演化规律。Li 等^[22]研究了应力路径对开挖卸荷响应的影响。上述卸荷力学特性研究均未考虑岩石受高温损伤的影响。近期，李建林等^[23]意识到该问题的重要性，开展了砂岩这类典型沉积岩高温后的卸荷力学特性试验，得到了颇有价值的研究成果。然而火成岩热损伤后具有怎样的卸荷力学行为，尚未见研究报道。

鉴此，本文对经历 25℃~900℃ 温度作用后的花岗岩试样分别进行单轴压缩、常规三轴压缩以及三轴卸围压力学试验，深入研究热损伤花岗岩在不同应力路径下，特别是卸荷应力路径下的力学特性，获得了一些有益的结论。

1 岩样制备及试验方案

1.1 岩样制备

岩样取自福建晋江花岗岩完整大样。经取芯、切割并打磨加工成直径 25 mm、高度 50 mm 的圆柱体。高温处理前平均密度 2.92 g/cm³。为确保均匀性和一致性，岩样取自同一岩块的相邻部位，剔除明显含有节理或裂纹等缺陷的岩样，再利用声波波速测试进一步筛选差异较大的后，挑选端面不平整度小于 0.05

mm 的作为试验岩样。试样加温设备为 SX-A-10 型高温箱式电阻炉，额定功率 2.5 kW，额定电压 220 V，额定温度 1200℃，采用电炉丝加热。以每 1 min 升温 10℃ 的速率升温到相应温度后保持恒温 4 h，以使岩样均匀受热，然后在炉膛中自然冷却至室温后取出。

1.2 试验设备

本试验采用 TAW-1000 型深水孔隙压力伺服试验系统，该系统最大轴向加载载荷为 1000 kN。全数字计算机控制、试验数据自动采集，可以完成岩石在复杂应力路径下的变形破坏试验。

1.3 试验方案

为了研究高温后花岗岩在卸荷路径下的力学性质，设定 4 种温度条件：25℃（常温），300℃，600℃，900℃。采用先位移后载荷控制的卸荷试验方法，首先按静水压力条件施加 $\sigma_1 = \sigma_3$ 至初始围压设定值 30 MPa，然后保持围压不变，以轴向位移加载速率 0.04 mm/min 连续施加轴向荷载至峰前某值（应力峰值的 80%左右），而后保持主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 不变，以 0.05 MPa/min 的速率慢慢卸掉围压，直至岩样破坏。

为确定卸围压试验的应力水平，并为结果对比提供基础数据，首先进行单轴压缩和常规三轴试验，得到花岗岩在加载条件下的强度、变形和破坏特征，再进行峰前卸围压试验，研究高温损伤后的试样在卸荷应力路径下的力学性质。岩样试验概况如表 1 所示。

表 1 试验概况

Table 1 Test conditions

岩样 编号	直径 /mm	高度 /mm	密度 /(g·cm ⁻³)	温度 /℃	加载 方式
A-25	24.90	49.90	2.91	25	三轴卸荷
B-25	24.92	49.88	2.93	25	常规三轴
C-25	24.92	49.88	2.92	25	单轴压缩
A-300	25.00	47.40	2.91	300	三轴卸荷
B-300	24.81	48.22	2.91	300	常规三轴
C-300	25.02	47.86	2.93	300	单轴压缩
A-600	24.96	47.40	2.91	600	三轴卸荷
B-600	24.90	49.74	2.92	600	常规三轴
C-600	24.80	47.92	2.91	600	单轴压缩
A-900	25.01	48.02	2.91	900	三轴卸荷
B-900	25.00	48.24	2.93	900	常规三轴
C-900	24.94	49.12	2.91	900	单轴压缩

2 试验结果及分析

2.1 应力 - 应变特征

图 1 为经历不同热损伤后的花岗岩岩样在单轴压缩、常规三轴、三轴卸围压下典型的应力 - 应变全过过程曲线。从图 1 (a) 可看出，岩样单轴压缩下的曲线变化规律大致经历压密、弹性和应变软化 3 个阶段，且经历不同高温作用后岩样的 3 个阶段基本类似，但曲线形态随着温度升高而发生较大变化，主要表现在：

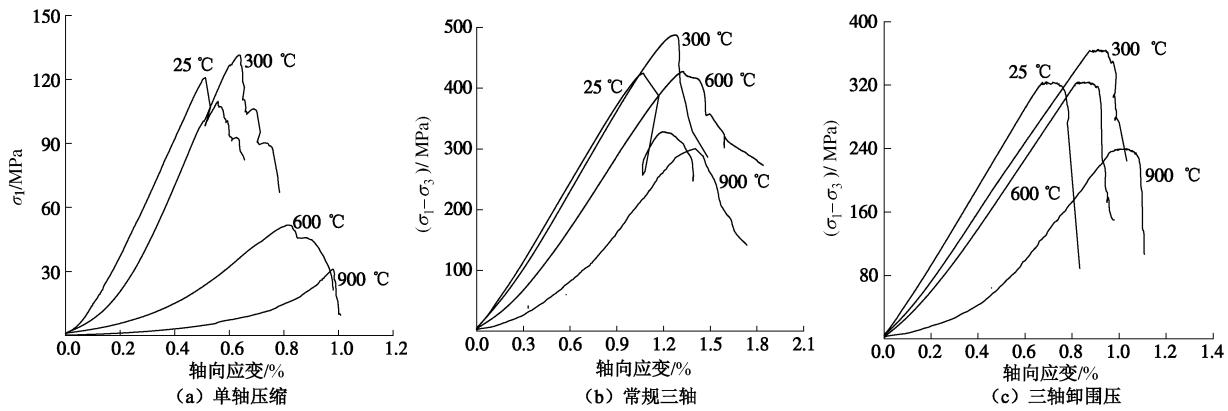


图1 高温后花岗岩在不同应力路径下的应力-应变曲线

Fig. 1 Complete stress-strain curves of post-high-temperature samples under different stress paths

①压密阶段迅速增长；②从图2可看出，岩样峰值强度和弹性模量先增大后减小，总体呈下降趋势。试验结果显示，岩样峰值强度和弹性模量分别由常温时的120.78 MPa, 27.81 GPa提高到300℃时的131.46 MPa, 28.25 GPa，上升幅度分别为8.84%，1.58%，这是由于岩石内部水分蒸发，空气发生膨胀，使得一些裂隙闭合，裂纹数量减少，导致岩石更加密实，内部矿物颗粒胶结程度改善，岩石力学性能增强；300℃~900℃，峰值强度和弹性模量分别下降到31.11 MPa, 5.02 GPa，与常温时相比损失分别达74.24%，81.95%。这是因为超过300℃后，花岗岩内部各种矿物成分的热膨胀系数差别较大而产生的热应力增大，达到或超过材料的极限强度时，导致内部产生更多微裂隙或原生裂隙扩展、贯通，热损伤程度高，在宏观上就表现为岩石力学性质的劣化。在应变软化阶段，应力迅速减小而轴向应变变化不大，表现为脆性破坏特征。

从图1(b)可看出，与图1(a)相比，对于同一温度，三轴压缩下的峰值强度均远远大于单轴压缩下的峰值强度，表现出围压对提高岩石承载能力的作用，且随温度的升高，围压对于提高强度的效果越明显，由试验结果得出：常温时围压对强度提高了3.5倍，300℃时提高了3.7倍，600℃时提高了8.25倍，900℃时提高了9.65倍。由图2还可看出，随温度升高，三轴峰值强度和弹性模量均亦先提高后降低，总体呈下降趋势。常温~300℃，峰值强度和平均模量分别由424.75 MPa, 43.12 GPa提高到487.91 MPa, 43.92 GPa，分别提高了14.87%，1.86%，提高幅度大于单轴情况，这是由于除了岩石内部水分蒸发，空气膨胀外，再加上围压的存在使得岩石内部裂隙压密或减小，从而使密实程度进一步提高，力学性能进一步增强。300℃~900℃，峰值强度和平均模量分别下降到300.46 MPa, 31.30 GPa，与常温时相比，分别下降了29.26%，27.41%，下降幅度小于单轴压缩情况。此时虽然围压的存在可以改善花岗岩的力学性能，但由于热应力对岩石的损伤更大，其宏观力学特性总体劣化。峰后应

力跌落迅速，岩样表现为脆性破坏特征。

从图1(c)不同温度损伤岩样在卸围压路径下的全应力-应变曲线可看出，与图1(b)相比，在达到峰值前变形特征大致相同，但在峰值区域变形则存在显著差异。在保持主应力差恒定，逐步降低围压的过程中，没有明显的峰值点，出现了较明显的屈服平台，曲线斜率变缓，应变增加速度很快。曲线接近于水平，在此过程中，体积膨胀，围压减小到一定程度后变形急剧增大直至破坏。而且，与图1(b)和1(a)相比，在应变软化阶段，卸围压下峰后应力跌落更为迅速，脆性破坏更为剧烈。图中还可看出，不同高温作用后的岩样在卸围压路径下的变形破坏规律大致相同。

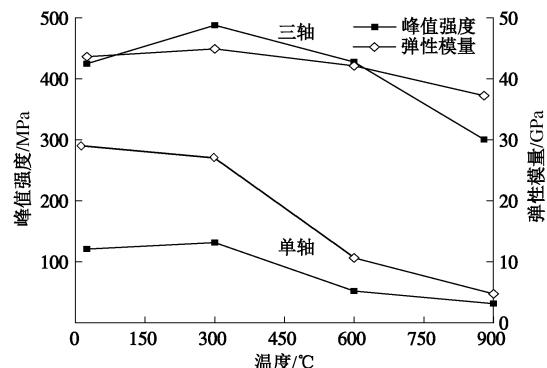


图2 加载条件下峰值强度和弹性模量随温度变化关系

Fig. 2 Relation among peak strength, elastic modulus and temperature under loading condition

2.2 高温后花岗岩在卸荷下的变形特性

(1) 围压与径向应变关系

由图3可看出，在卸围压的初始阶段，径向变形增长不大，岩样处于线弹性阶段，随着围压的进一步降低，径向变形迅速增长，和围压不再是线性关系，表明岩样出现了不可恢复的塑性变形，此时岩样内部裂纹逐渐产生、扩展、贯通，最终导致岩样破坏。图3中可定性看出，不同温度损伤岩石的这种变形规律相似，但300℃的曲线位于最上方，围压降低量最少。

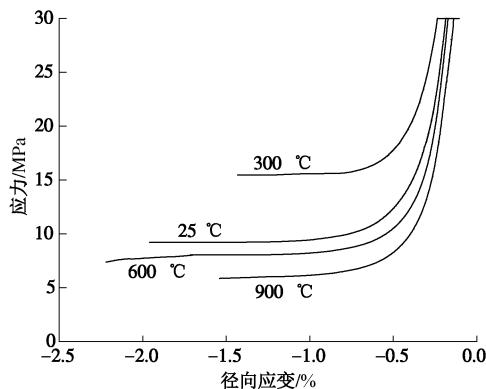


图3 高温后花岗岩在卸荷过程中围压与径向应变关系

Fig. 3 Relation between confining pressure and radial strain of post-high-temperature samples during unloading

经历不同的温度作用，花岗岩卸荷破坏的难易程度也不相同，为此，定义卸荷破坏围压降低率 $\Delta\dot{\sigma}_3$ 以反应卸荷破坏的难易程度，其值越小，表明岩石越容易破坏。

$$\Delta\dot{\sigma}_3 = (\sigma_0 - \sigma_3) / \sigma_0 \quad , \quad (1)$$

式中， σ_0 为卸荷初始围压， σ_3 为卸荷破坏围压。

从表 2 卸荷试验岩样破坏时最大与最小主应力值可定量得出，300℃后的岩样围压降低水平最低，为 37.03%，小于 25℃时的 55.23%，600℃时的 60.70% 和 900℃时的 67.93%，表明在卸围压路径下，经历 300℃作用后的岩样最容易发生破坏，这是由于经历 300℃作用后的花岗岩更为密实，卸荷诱发新裂纹生成、扩展和贯通的过程要多于其它温度，而新裂纹的形成伴随着体积的迅速增长，这意味着经历 300℃后的花岗岩的体积扩容过程最为剧烈，达到破坏所需的围压卸荷量最少，其它温度下扩容则相对较为平稳，围压卸荷量大。需要说明的是，上述量化结论是在试验设定的温度间距条件下获得的，一定程度上受到试验组数和总工作量限制，更为精细的温度间距下的规律有待通过大量试验作进一步研究。

从表 2 可看出：25℃~900℃，围压卸到约为初始围压的 32.07%~62.97% 之间（平均值约为 45%）时，轴向应力急剧跌落，岩样突然失去承载力，破坏几乎瞬时发生且伴随有清脆的破裂响声。这些特征说明高

温后岩样三轴卸围压破坏均是非常强烈的脆性破坏。

表 2 卸荷破坏时最大与最小主应力值

Table 2 Maximum and minimum principal stresses at failure of samples during unloading

初围压 σ_0 / MPa	温度 / °C	破坏时 σ_3 / MPa	破坏时 σ_1 / MPa	(σ_3 / σ_0) /%	$\Delta\dot{\sigma}_3$ /%
30	25	13.43	323.95	44.77	55.23
30	300	18.89	364.97	62.97	37.03
30	600	11.79	323.81	39.30	60.70
30	900	9.62	239.91	32.07	67.93

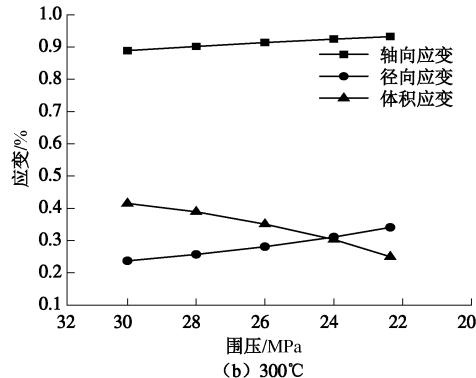
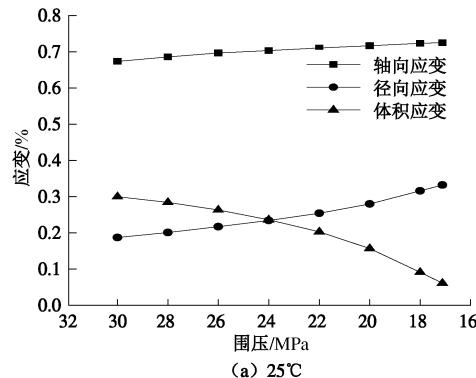
(2) 应变围压增量比

为了进一步分析岩样在卸荷过程中的变形特性，引用邱士利等^[24]关于应变围压增量比 $\Delta\dot{\varepsilon}$ 的论述。应变围压增量比 $\Delta\dot{\varepsilon}$ 指的是在卸荷起始点和应力跌落点之间由卸荷而引起的应变增量与围压降低量之比，

$$\Delta\dot{\varepsilon} = \Delta\varepsilon_i / \Delta\sigma_3 \quad , \quad (2)$$

式中， $\Delta\varepsilon_i$ ($i=1, 3$ 和 v) 分别代表轴向应变增量、径向应变增量和体积应变增量。 $\Delta\dot{\varepsilon}$ 表示各变形增量随卸荷单位围压时的变化快慢，它更好地反映了卸荷过程中围压变化对变形的影响效应，也说明了岩石内部结构对应力状态的变化过程的响应速度。 $\Delta\dot{\varepsilon}$ 越大，就表明某方向的变形对围压降低越敏感。

图 4 为不同高温作用试样在卸荷起始点到应力跌落点之间的卸荷过程中，应变随围压变化的关系曲线。从图中曲线斜率可看出，对任一温度，径向应变与体积应变随围压卸荷均变化较大，而轴向应变随围压卸荷均变化较小，定性揭示了径向变形比轴向变形对围压的降低更敏感，岩石卸荷破坏是沿卸荷方向的扩容所致。从图 5 中更可看出，同一温度下（如 300℃），径向应变围压增量比 1.36×10^{-4} 和体积轴向应变围压增量比 2.16×10^{-4} ，为轴向应变围压增量比 5.67×10^{-5} 的 2.4 倍和 3.8 倍，25℃~900℃下，平均分别为轴向的 2.625 倍和 4.25 倍，可见从定量上也揭示了径向变形导致体积扩容才是引起岩石卸荷破坏的主要原因。各应变围压增量比随温度的变化规律相同，均是先提高后降低，300℃时达到最大，表明经历 300℃后的岩样在卸荷过程中变形对围压的降低最敏感。这与前面经历 300℃作用后的岩样最易发生破坏的结论相呼应。



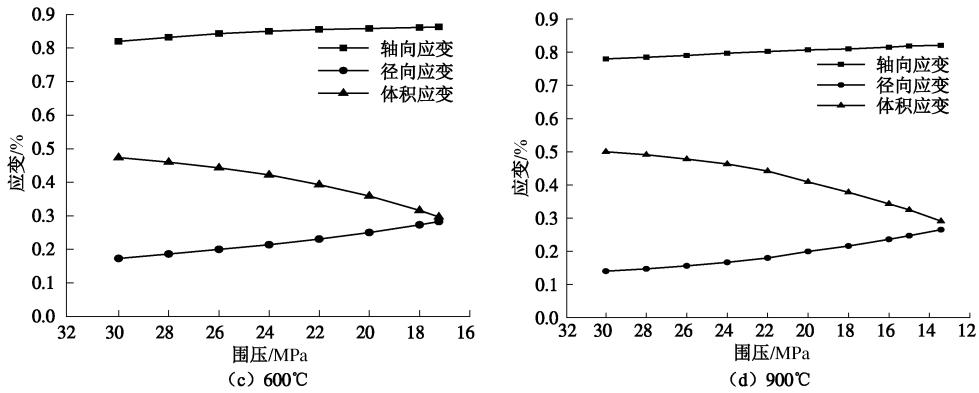


图 4 卸荷起始点到应力跌落点间应变与围压关系

Fig. 4 Relation between confining pressure and strain from unloading start point to stress drop point

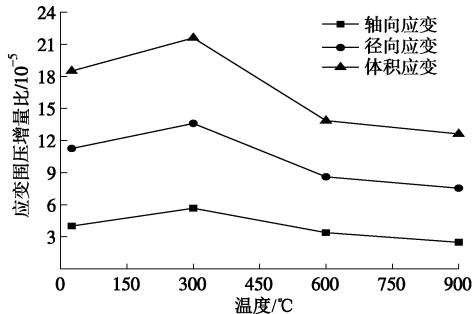


图 5 应变围压增量比随温度变化的关系

Fig. 5 Relation between ratio of strain increment to confining pressure decrement and temperature

2.3 高温后岩样在卸荷下的变形参数分析

卸荷变形参数如变形模量和泊松比计算公式^[25]:

$$\left. \begin{aligned} E &= (\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)/\varepsilon_1, \\ \mu &= (B\sigma_1 - \sigma_3)/[\sigma_3(2B-1) - \sigma_1], \\ B &= \varepsilon_3/\varepsilon_1. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

图 6 为岩样在卸荷过程中变形模量随围压卸载的变化曲线。从图中可看出, 温度越高, 岩样的初始变形模量越低。卸荷开始一段时间, 岩样的变形模量变化缓慢, 呈略微减小趋势, 在卸荷破坏点处则出现陡降。经历不同高温作用后的花岗岩变形模量的变化规律相同, 但变化的程度不同, 从表 3 可看出, 温度越高, 变形模量的减小量就越大。

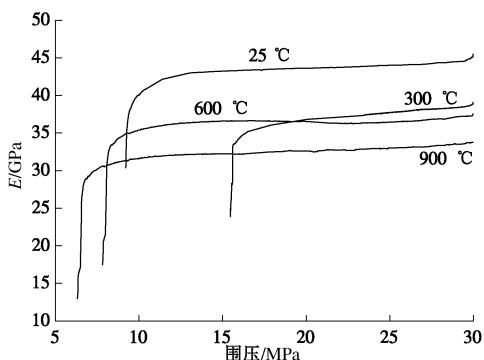


图 6 高温后花岗岩在卸荷过程中变形模量的变化特征

Fig. 6 Changing characteristics of deformation modulus of post-high-

temperature samples during unloading

高温后的花岗岩岩样在卸荷路径下的破坏是强烈

扩容所致, 卸荷变形模量随扩容而降低, 故可以建立一个在卸荷过程中岩样的变形模量与体积应变之间的关系式, 如图 7 所示高温作用后的岩样在卸荷下变形模量与体积应变的关系, 并按多项式关系进行拟合得:

$$E = \begin{cases} -0.0134\varepsilon_v^2 + 0.3433\varepsilon_v + 42.7299 & (T = 25^{\circ}\text{C}) \\ -0.0269\varepsilon_v^2 + 0.4222\varepsilon_v + 36.6399 & (T = 300^{\circ}\text{C}) \\ -0.0136\varepsilon_v^2 + 0.1888\varepsilon_v + 36.0976 & (T = 600^{\circ}\text{C}) \\ -0.0183\varepsilon_v^2 + 0.1492\varepsilon_v + 32.6879 & (T = 900^{\circ}\text{C}) \end{cases} \quad (4)$$

表 3 卸荷过程中变形模量变化量

Table 3 Variation of deformation modulus of post-high-

temperature samples during unloading

岩样 编号	初始变形模 量 E_0/GPa	破坏变形模 量 E_1/GPa	减小量 $((E_0 - E_1)/E_0)\%$
B-25	45.466	30.372	33.20
B-300	39.094	23.870	38.94
B-600	37.545	17.482	53.44
B-900	33.183	13.567	59.11

图 8 为岩样在卸荷过程中泊松比随围压卸载的变化曲线。从图中可看出, 温度越高, 岩样的初始泊松比越低, 这与 Heueck 等^[26]的研究结论一致, 由于岩石是在加温冷却后再进行加载, 这从微观上就可解释为: 随温度升高, 岩石内部微裂纹扩容, 且扩容后的空隙体积在冷却过程中保持不变, 加载后, 扩容的空隙在一定程度上吸收了轴向荷载作用下产生的径向变形, 故在宏观上表现为泊松比减小。卸荷开始一段时间, 岩样的泊松比变化较为平缓, 呈上升趋势, 但临近卸荷破坏时, 则急剧增加, 呈指数增长。当卸荷到一定程度时, 泊松比都甚至超过了 0.8, 并呈继续增加的趋势, 这是因为岩样内部本身存在着许多微小裂隙, 随着围压不断减小, 这些微小裂隙不断扩大变形, 直至贯通破坏, 从而导致侧向变形剧增, 泊松比增大超过弹性材料极限泊松比 (0.5), 此时的泊松比已不再是一般意义上的材料特性, 它包括了裂隙的扩展变形。经历不同高温作用后的花岗岩的泊松比变化规律相同, 但变化的程度不同, 从表 4 可看出, 温度越高, 泊松比的增加量就越大。

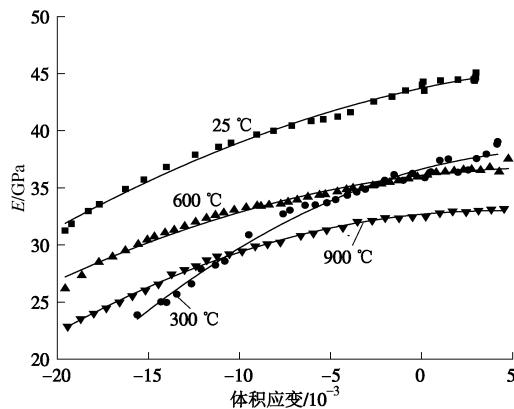
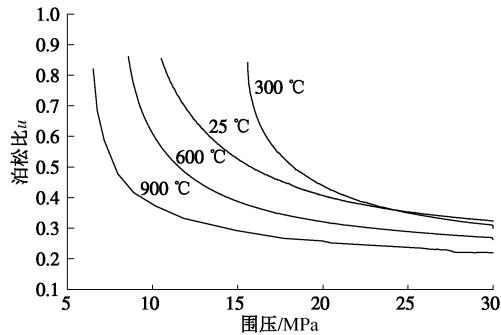
图 7 卸荷中变形模量 E 与体积应变 ε_v 的拟合曲线Fig. 7 Fitting curves of E and ε_v during unloading

图 8 高温后花岗岩在卸荷过程中泊松比的变化特征

Fig. 8 Changing characteristics of Poisson's ratio of post-high-temperature samples during unloading

表 4 卸荷过程中泊松比变化量

Table 4 Variation of Poisson ratio of post-high-temperature samples during unloading

岩样 编号	初始泊松比 μ_0	破坏泊松比 μ_1	增加量 (($\mu_1 - \mu_0$)/ μ_0)%
B-25	0.3225	0.8545	164.96
B-300	0.2993	0.8416	181.19
B-600	0.2627	0.8608	227.67
B-900	0.2195	0.8210	274.03

如变形模量，也可建立泊松比与体积应变的关系式，如图 9 岩石卸荷过程中泊松比与体积应变之间的关系，并进行线性拟合得表达式：

$$\mu = \begin{cases} -0.0594\varepsilon_v + 0.5012 & (T = 25^\circ\text{C}) \\ -0.0439\varepsilon_v + 0.4985 & (T = 300^\circ\text{C}) \\ -0.0504\varepsilon_v + 0.5015 & (T = 600^\circ\text{C}) \\ -0.0550\varepsilon_v + 0.4944 & (T = 900^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (5)$$

2.4 破坏形态及机理

图 10 为高温后的花岗岩岩样在单轴压缩、常规三轴和三轴卸围压下的破坏形态。由温度作用引起的初始热损伤和由荷载作用引起的机械损伤两方面综合导致了岩石的破坏。从图中可看出，经历不同温度作用后的花岗岩在单轴压缩下都为轴向劈裂破坏，且存在多个贯通裂纹，这从分析位错的力学特性来看^[27]，位错繁殖源在裂纹端部起显著作用，这些位错源在岩样

内部裂纹的尖端处产生高密度滑移带，进而在主裂纹的前缘产生较多的次生裂纹，经过发育，扩展，并与主裂纹汇合贯通，最终导致岩样破坏时沿轴向产生多个贯通裂纹；三轴压缩试验岩样为宏观单一的贯通剪切破坏形式；三轴卸围压下岩样破坏形态则比较复杂，常温时为高角度局部剪切破坏，主破裂面从端面向侧面发展，随温度的提高，岩样变为贯通剪切破坏，在 900°C 时又变为局部剪切破坏，岩样破碎，脆性破裂特征明显。

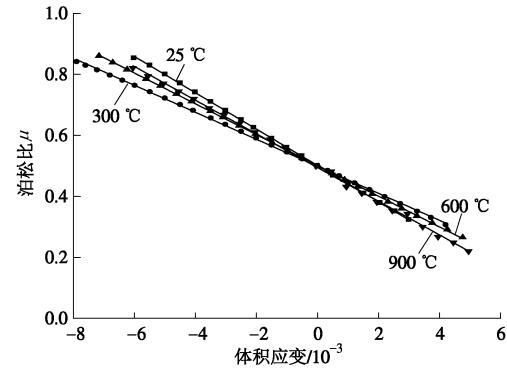
图 9 卸荷过程中泊松比 μ 与体积应变 ε_v 的拟合曲线Fig. 9 Fitting curves of μ and ε_v during unloading

图 10 高温后花岗岩在不同应力路径下的破坏形态对比（从左到右依次为 25°C, 300°C, 600°C, 900°C）

Fig. 10 Comparison of failure modes of post-high-temperature samples under different stress paths (from left to right in turn is 25°C, 300°C, 600°C, 900°C)

从图中还可以发现，对于同一种应力路径下的岩样，随着温度的升高，破坏出现更多的小碎块（如图

中画圈内所示), 岩石破碎程度越大, 这是由于高温对岩石产生热损伤的作用。花岗岩内部所含多种矿物颗粒因不同膨胀系数以及各向异性, 引起跨颗粒边界的热膨胀不协调而产生热应力, 致使岩石内部产生微小裂纹或原生裂纹扩展、加宽或贯通^[9], 温度越高, 岩石内部裂纹越多, 热损伤程度越大, 破坏就越破碎。

3 结 论

(1) 不同应力路径下温度对花岗岩力学性能的影响规律有所差异, 峰值强度和弹性模量在单轴压缩下均随温度升高而持续减小, 而在三轴压缩下, 随温度上升, 均先增大后减小。

(2) 温度不同, 花岗岩卸荷发生破坏的难易程度也不相同, 经历 300℃后的花岗岩在卸荷过程中围压降低水平最低, 最容易发生破坏。25℃~900℃范围内, 当围压卸到约为初始围压值的 32.07%~62.97% (均值约为 45%), 岩样发生破坏。

(3) 卸荷下, 25℃~900℃, 花岗岩径向应变围压增量比平均为轴向的 2.625 倍, 体积应变围压增量比平均为轴向的 4.25 倍, 可见, 径向变形比轴向变形对围压的降低更敏感, 定量揭示了强烈的径向变形导致体积扩容才是岩石卸荷破坏的主要原因。各应变围压增量比随温度升高, 均是先提高后降低, 在 300℃达到最大, 表明经历 300℃后的岩样在卸荷过程中变形对围压的降低最为敏感。

(4) 卸荷过程中花岗岩岩样的变形模量逐渐减小, 25℃~900℃, 减小了 33.2%~59.11%, 温度越高, 减小越多, 与体积应变均呈二次多项式相关; 泊松比逐渐增大, 25℃~900℃, 增大了 164.96%~274.03%, 温度越高, 增加越多, 与体积应变均呈线性相关。

(5) 经历高温作用后的花岗岩岩样在单轴压缩下均呈轴向劈裂破坏, 并存在多个贯通裂纹; 在三轴压缩下为宏观单一的贯通剪切破坏形态; 三轴卸围压下破坏形态则比较复杂, 常温时为高角度的局部剪切破坏, 随温度升高, 岩样变为贯通剪切破坏, 到 900℃时又变为局部剪切破坏。随着温度的升高, 岩石的破碎程度更大, 这是由于高温对岩石产生热损伤的作用。研究成果对地下硐室和隧道工程等火灾后的修复重建、深部地下空间和资源的开发利用等具有一定的指导意义和参考价值。

参 考 文 献:

- [1] 何满潮, 钱七虎. 深部岩体力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (HE Man-chao, QIAN Qi-hu. The basis of deep rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [2] ZHAO Y S, WAN Z J, KANG J R. Introduction of geothermal extraction of hot dry rock[J]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [3] FENG Zi-jun, ZHAO Yang-sheng, ZHOU An-chao, et al. Development program of hot dry rock geothermal resource in the Yangbajing Basin of China[J]. Renewable Energy, 2012(39): 490~495.
- [4] WONG T E. Effects of temperature and pressure on failure and post-failure behavior of westerley grinate[J]. Mechanics of Materials, 1982(1): 3~17.
- [5] 吴刚, 邢爱国, 张磊. 砂岩高温后的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2110~2116. (WU Gang, XING Ai-guo, ZHANG Lei. Mechanical characteristics of sandstone after high temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2110~2116. (in Chinese))
- [6] 寇绍全. 热开裂损伤对花岗岩变形及破坏特性的影响[J]. 力学学报, 1987, 19(6): 550~555. (KOU Shao-quan. Effect of thermal cracking damage on the deformation and failure of granite[J]. Acta Mechanics Sinica, 1987, 19(6): 550~555. (in Chinese))
- [7] CHEN You-liang, NI Jing, SHAO Wei, et al. Experimental study on the influence of temperature on the mechanical properties of granite under uni-axial compression and fatigue loading[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2012(56): 62~66.
- [8] LIU Shi, XU Jin-yu. Mechanical properties of Qinling biotite granite after high temperature treatment[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2014(71): 188~193.
- [9] 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. (DU Shou-ji, LIU Hua, ZHI Hong-tao, et al. Testing study on mechanical properties of post-high-temperature granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2359~2364. (in Chinese))
- [10] 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): 598~603. (YIN Guang-zhi, LI Xiao-shuang, ZHAO Hong-bao. Experimental investigation on mechanical properties of coarse sandstone after high temperature under conventional triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 598~603. (in Chinese))
- [11] 徐小丽, 高峰, 张志镇. 高温作用后花岗岩三轴压缩试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3177~3183. (XU Xiao-li, GAO Feng, ZHANG Zhi-zhen. Research on triaxial compression test of granite after high temperatures[J]. Rock

- and Soil Mechanics, 2014, **35**(11): 3177 – 3183. (in Chinese))
- [12] 哈秋龄. 加载岩体力学与卸荷岩体力学[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(1): 114. (HA Qiu-ling. Loading and unloading rock masses mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(1): 114. (in Chinese))
- [13] WU G, ZHANG L. Studying unloading failure characteristics of a rock mass using disturbed state concept[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**(S1): 181 – 187.
- [14] XIE H Q, HE C H. Study of the unloading characteristics of a rock mass using the triaxial test and damage mechanics[J]. Imitational Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2004: 13 – 18.
- [15] 陶履彬, 夏才初, 陆益鸣. 三峡工程花岗岩卸荷全过程特性的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1998, **26**(3): 330 – 334. (TAO Lu-bin, XIA Cai-chu, LU Yi-ming. Experimental studies on complete course behavior of unloading of granite on Three Gorges Project of the Yangtze River[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1998, **26**(3): 330 – 334. (in Chinese))
- [16] 黄润秋, 黄 达. 卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(11): 2205 – 2213. (HUANG Run-qiu, HUANG Da. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(11): 2205 – 2213. (in Chinese))
- [17] 陈卫忠, 吕森鹏, 郭小红, 等. 脆性岩石卸围压试验与岩爆机理研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(6): 963 – 969. (CHEN Wei-zhong, LU Sen-peng, GUO Xiao-hong, et al. Unloading confining pressure for brittle rock and mechanism of rock burst[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(6): 963 – 969. (in Chinese))
- [18] 吕颖慧, 刘泉声, 胡云华. 基于花岗岩卸荷试验的损伤变形特征及其强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(10): 2096 – 2103. (LU Ying-hui, LIU Quan-sheng, HU Yun-hua. Damage deformation characteristics and its strength criterion based on unloading experiments of granites[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(10): 2096 – 2103. (in Chinese))
- [19] 张黎明, 王在泉, 石 磊, 等. 不同应力路径下大理岩破坏过程中的声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(6): 1230 – 1236. (ZHANG Li-ming, WANG Zai-quan, SHI Lei, et al. Acoustic emission characteristics of marble during failure process under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(6): 1230 – 1236. (in Chinese))
- [20] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同初始损伤和卸荷路径下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(8): 1686 – 1697. (QIU Shi-li, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, et al. Experimental research on mechanical properties of deep marble under different initial damage levels and unloading paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(8): 1686 – 1697. (in Chinese))
- [21] 俞 缙, 李 宏, 陈 旭, 等. 砂岩卸围压变形过程中渗透特性与声发射试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(1): 69 – 79. (YU Jin, LI Hong, CHEN Xu, et al. Experimental study of permeability and acoustic emission characteristics of sandstone during processes of unloading confining pressure and deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(1): 69 – 79. (in Chinese))
- [22] LI Xi-bing, CAO Wen-zhuo, ZHOU Zi-long, et al. Influence of stress path on excavation unloading response[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, **42**: 237 – 246.
- [23] 李建林, 陈 星, 党 莉, 等. 高温后砂岩三轴卸荷试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(8): 1587 – 1595. (LI Jian-lin, CHEN Xing, DANG Li, et al. Triaxial unloading test of sandstone after high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(8): 1587 – 1595. (in Chinese))
- [24] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(5): 1807 – 1817. (QIU Shi-li, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, et al. Experimental research on unloading mechanical properties of deep marble under pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(5): 1807 – 1817. (in Chinese))
- [25] 高春玉, 徐 进, 何 鹏, 等. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(3): 456 – 460. (GAO Chun-yu, XU Jin, HE Peng, et al. Study on mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(3): 456 – 460. (in Chinese))
- [26] HEUECK T, PEANO A, PELLEGRINT R. A constitutive law for thermo plastic behavior of rocks: an analogy with clays[J]. Surveys in Geophys, 1994, **15**: 643 – 671.
- [27] 谢卫红, 高 峰, 李顺才, 等. 石灰岩热损伤破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(5): 1021 – 1026. (XIE Wei-hong, GAO Feng, LI Shun-cai. Study on mechanism of thermal damage fracture for limestone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(5): 1021 – 1026. (in Chinese))