

DOI: 10.11779/CJGE201412012

# 高温后围压对花岗岩变形和强度特性的影响

徐小丽<sup>1, 2</sup>, 高峰<sup>2</sup>, 张志镇<sup>2</sup>

(1. 南通大学建筑工程学院, 江苏 南通 226019; 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)

**摘 要:** 利用 MTS815.02 电液伺服材料试验系统完成了不同温度作用后 (25℃~1000℃), 不同围压下的 30 块花岗岩岩样的三轴压缩试验, 分析了温度、围压对岩样的变形以及强度特性的影响。试验结果表明: ①岩样质量随着温度的升高小幅下降, 1000℃时仅比 25℃时下降了 0.364%; 温度低于 600℃时, 岩样体积、密度变化不明显, 温度高于 600℃时, 体积加速膨胀, 密度减小幅度增大, 1000℃时体积比 25℃时膨胀了 5.027%, 密度降低了 5.132%。②高温作用后, 岩样三轴压缩应力-应变曲线大致经历了压密、弹性、屈服、破坏、软化、残余等几个阶段, 岩样的刚度、峰值强度、抗剪强度、残余强度、塑性变形均随着围压的增大而增大。③岩样黏聚力随着温度的升高呈线性下降, 内摩擦角随着温度的升高先增大后减小, 抗剪强度随着温度的升高呈二次多项式减小关系, 围压的增大削弱了温度对抗剪强度的影响。

**关键词:** 花岗岩; 温度; 围压; 变形; 强度

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)12-2246-07

**作者简介:** 徐小丽 (1981-), 女, 博士, 副教授, 主要从事岩石力学方面的教学与科研。E-mail: xuxiaoli2002\_ren@163.com。

## Influence of confining pressure on deformation and strength properties of granite after high temperatures

XU Xiao-li<sup>1, 2</sup>, GAO Feng<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-zhen<sup>2</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** Based on the triaxial compression tests of thirty granite samples under different confining pressures and temperatures of 25~1000℃ by MTS815.02 servo-controlled testing machine, the influence of temperature and pressure on the deformation and strength characteristics is analyzed. The test results show that: (1) The quality of rock samples decreases slightly with the increasing temperature, which decreases by only 0.364% at 1000℃ compared to that at 25℃. When the temperature is below 600℃, the volume and density have no significant change, then as the temperature rises, the volume expands with acceleration and the density decreases rapidly, and the volume expands by 5.027% and the density decreases by 5.132% at 1000℃ compared to those at 25℃. (2) After high temperature, the triaxial compression stress-strain curves of rock samples have gone through the stages of compaction, elasticity, yield, destruction, softening and residual stresses. The stiffness, peak strength, shear strength, residual strength and plastic deformation of rock samples increase with the confining pressure. (3) The cohesion decreases linearly and the internal friction angle first increases and then decreases with the increasing temperature. The shear strength shows a quadratic polynomial reduced relationship as the temperature increases. The confining pressure weakens the influence of temperature on the shear strength. This work may provide the guidance for the selection of mechanical parameters of rock in the underground geotechnical engineering.

**Key words:** granite; temperature; confining pressure; deformation; strength

## 0 引 言

温度和围压是影响岩石力学性能的重要因素。建立地下仓库用以贮藏核废料、天然气、石油等, 岩石仓库的围岩要承受几百度温度的变化。如核废料可达 100℃~300℃的变化; 利用火钻加热使岩石软化从而达到热破碎, 温度可达到大约 1000℃。而在地下采矿、

地下能源储备等工程中, 岩石总是处于一定的地温场和地应力场环境中, 因此有必要研究温度、压力共同

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (11202108); 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 (SKLGDUEK1204); 南通大学前期预研科研项目 (11ZY006)

**收稿日期:** 2014-04-17

作用下岩石的力学行为。国内外学者对此进行了大量的研究<sup>[1-6]</sup>。杜守继等<sup>[7]</sup>对经历不同高温后花岗岩的力学性能进行了试验研究；秦本东等<sup>[8]</sup>研究了石灰岩和砂岩试件在300℃~700℃高温过程中的膨胀特性；杨圣奇等<sup>[9]</sup>通过伺服试验机对中、粗颗粒大理岩进行常规三轴试验，研究了两种颗粒大理岩的强度和变形特性；孟召平等<sup>[10]</sup>采用三轴岩石力学测试系统分析了不同侧压条件下砂岩岩石的孔渗性和力学特性及变形破坏机制，建立了砂岩岩石物理力学性质与侧压之间的相关关系；周永胜等<sup>[11]</sup>对不同温压条件下居庸关花岗岩脆塑性转化与失稳型式进行了试验研究；吴刚等<sup>[12]</sup>研究了高温后砂岩的力学性质；朱珍德等<sup>[13]</sup>探讨了高温周期变化与高围压下大理岩力学特性；徐小丽等<sup>[14-15]</sup>对高温后花岗岩力学性质及微孔隙结构特征进行了研究。

但这些成果绝大多数局限于高温单轴压缩试验、常温三轴压缩试验，或是低温低围压试验，同时考虑高温和围压的试验还较少开展。而井下煤与瓦斯爆炸、岩石地下工程火灾后重建等都不可避免地涉及到高温后岩石的变形和强度特征，其相关力学参数是地下工程火灾后围岩稳定性分析、修复加固支护设计等方面不可或缺的基本依据。因此，本文对花岗岩在经历 25℃~1000℃的高温后，进行不同围压下的三轴压缩试验，分析花岗岩物理性能、应力-应变曲线、峰值应变、黏聚力、内摩擦角、抗剪强度等随温度、围压的关系。

# 1 试验概况

## 1.1 试件加工

本次岩样取自山东潍坊某矿大块花岗岩，按照国际岩石力学学会（ISRM）的标准，加工成直径为 50 mm，长度为 100 mm 的标准圆柱岩样，误差为±0.5 mm。常温下，岩样的平均密度为 2.612 g/cm<sup>3</sup>，单轴抗压强度为 120.37 MPa。岩样主要成分为长石、石英、云母等，其中长石以钠长石为主，云母主要为针叶云母。

## 1.2 试验过程

首先对岩样进行加温，温度点为 25℃，200℃，400℃，600℃，800℃，1000℃六个等级，为确保岩样内部受热均匀，加温后每块岩样恒温 2 h 后打开炉膛进行自然冷却至常温，每个温度点 5 块岩样，共计 30 块。然后采用中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室的美国 MTS815.02 电液伺服材料试验系统对加温后的岩样进行常规三轴压缩试验，围压设置为 0，10，20，30，40 MPa 五个等级。试验过程中，首先对岩样施加预定的围压，使岩样处于静水压力状态，然后以 0.003 mm/s 位移速率沿轴向加载，直至岩样破坏，达到岩样的峰值强度后，MTS815.02 电液伺服材料试验系统继续对岩样施加压力，并且记录岩样峰后应力和变形，从而获得岩样三轴压缩全应力-应变曲线。

# 2 试验结果及分析

## 2.1 温度对岩样物理性能的影响

岩样经过高温加热后会引起一系列的物理变化。随着岩样内水分蒸发，质量、密度减小，体积膨胀。在试验过程中，利用天平分别测量岩样加温前后的质量，利用游标卡尺测量高度和直径，计算得到岩样在加温前后的质量、体积、密度的变化如表 1 所示。表 1 中各物理量均为各个温度点 5 块岩样加热后的平均值。

同时绘制岩样质量变化百分比、体积变化百分比、密度变化百分比如图 1~3 所示。

由图 1 可知，200℃之前，质量下降较快，质量在 200℃时相比于 25℃时下降了 0.178%；此后随着温度的升高下降幅度变缓，温度升高到 1000℃，岩样质量为 527.43 g，相比于加温前的 529.36 g 仅下降了 0.364%。温度低于 600℃，岩样体积随着温度升高小幅度增大，600℃的体积为 199.39 cm<sup>3</sup>，相比加温前的 198.54 cm<sup>3</sup>增大了 0.430%，此后随着温度升高，体积

表 1 岩样物理参数随温度的变化

Table 1 Variation of physical parameters of rock with temperature

温度 /℃	加温前 质量/g	加温后 质量/g	质量变化 百分比/%	加温前体 积/cm <sup>3</sup>	加温后 体积/cm <sup>3</sup>	体积变化 百分比/%	加温前密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	加温后密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	密度变化 百分比/%
25	514.80	514.80	0	197.14	197.14	0	2.611	2.611	0
200	514.99	514.07	-0.178	197.47	197.06	-0.204	2.608	2.609	0.027
400	521.34	520.16	-0.226	199.51	200.13	0.312	2.613	2.599	-0.536
600	519.71	518.28	-0.275	198.54	199.39	0.430	2.618	2.599	-0.702
800	524.55	522.95	-0.305	200.32	207.22	3.446	2.619	2.524	-3.625
1000	529.36	527.43	-0.364	202.34	212.51	5.027	2.616	2.482	-5.132



膨胀速度加快，这是由于组成花岗岩的矿物石英在 573℃ 发生了由  $\alpha$  相向  $\beta$  相的转变，此过程造成裂隙开裂，体积增大<sup>[16]</sup>。800℃ 时体积膨胀了 3.446%，1000℃ 时体积膨胀了 5.027%。

温度低于 600℃，温度对密度的影响不明显，600℃ 的密度为 2.599 g/cm<sup>3</sup>，相比加温前的 2.618 g/cm<sup>3</sup> 仅仅降低了 0.702%，这就导致了岩样在这一阶段的抗压能力不太可能下降；温度超过 600℃，高温引起岩样发生热开裂，岩样变得松动，密度下降幅度增大，800℃ 下降了 3.625%，1000℃ 下降了 5.132%。

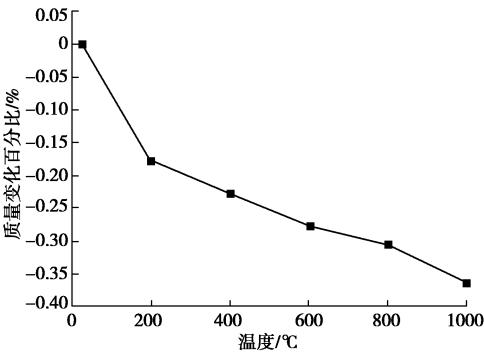


图 1 岩样质量随温度的变化

Fig. 1 Variation of mass of rock with temperature

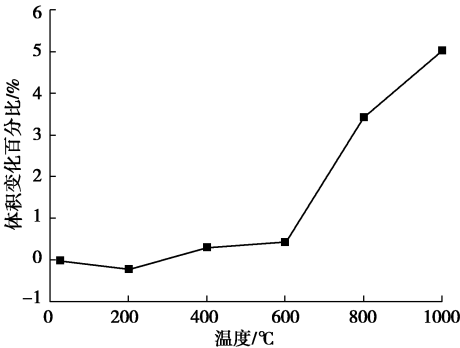


图 2 岩样体积随温度的变化

Fig. 2 Variation of volume of rock with temperature

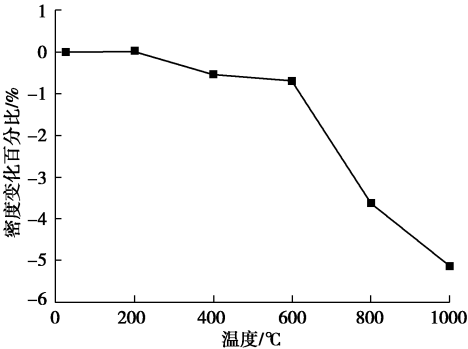
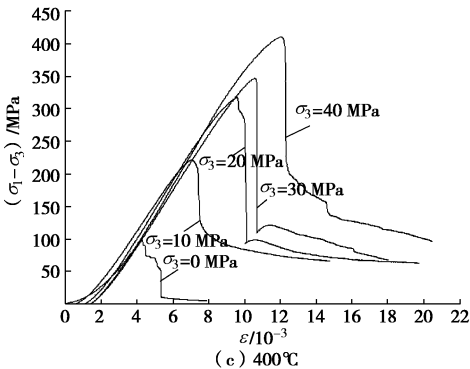
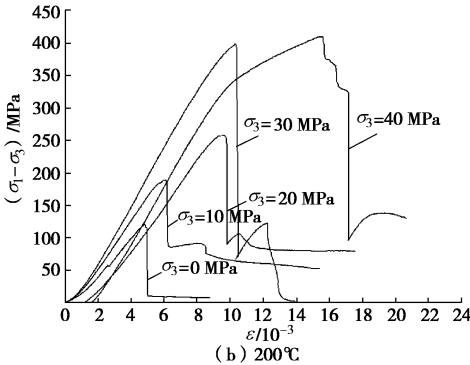
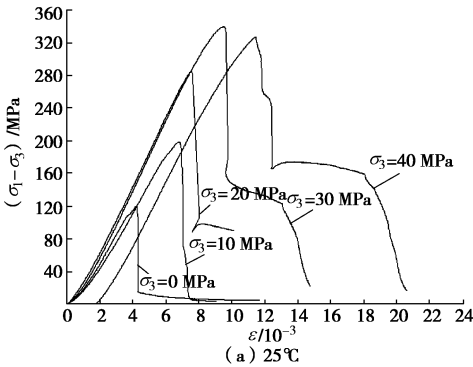


图 3 岩样密度随温度的变化

Fig. 3 Variation of density of rock with temperature

2.2 花岗岩力学性质与围压的关系

岩样经历各个温度作用后，在不同围压下常规三轴压缩应力 - 应变曲线如图 4 所示。可以看出，高温作用后，岩样三轴压缩应力 - 应变曲线大致经历了压密、弹性、屈服、破坏、软化、残余等几个阶段。由于实验采用的花岗岩属于硬岩，因而应力 - 应变曲线弹性阶段较长，屈服阶段较短，岩样经弹性变形后很快达到峰值强度并发生破坏，破坏前无明显征兆。单轴压缩状态下，岩样的应力 - 应变曲线在达到峰值强度后迅速减小，岩样发生应变软化，整体失去承载能力，岩石发生脆性破坏，随着围压的增大，应力 - 应变曲线在达到峰值强度后，应力随着应变的增长减小速度变慢，岩样的塑性变形逐渐增大，岩样从脆性破坏逐渐向塑性变形过渡；随着塑性变形的持续发展，强度不再降低，此时的强度称为残余强度，残余强度随着围压的增大而提高，说明在围压作用下，岩石中的孔隙裂纹再次被压密闭合，裂纹面上的法向应力增加，而使岩石的残余强度加大。



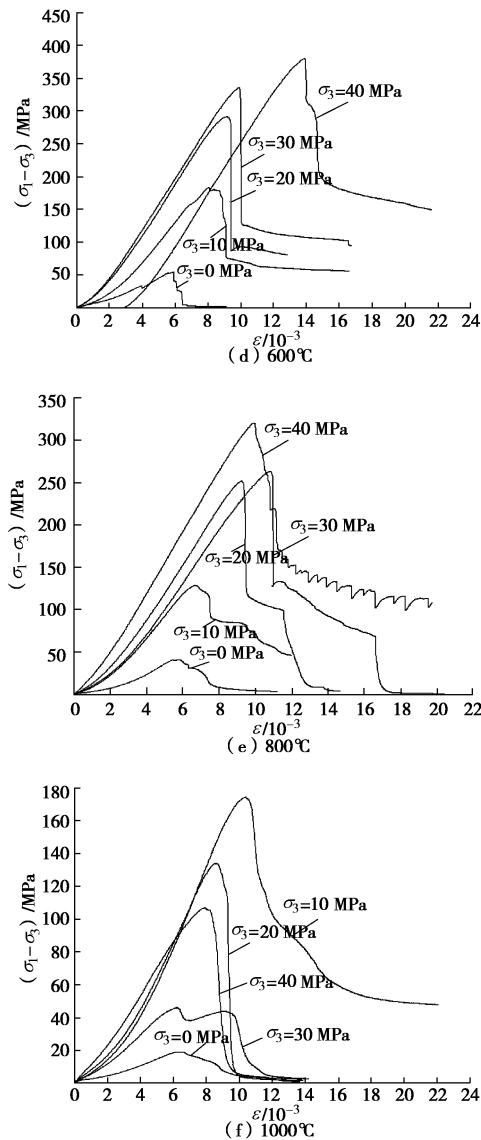


图 4 温度一定时不同围压下岩样三轴压缩应力 - 应变曲线  
Fig. 4 Stress-strain curves of granite under triaxial compression fixed temperatures and under different confining pressures

在 25℃, 200℃, 400℃, 600℃, 800℃ 五个温度点, 花岗岩峰值强度、残余强度、峰值应变均随着围压的增大而逐渐增大, 而在 1000℃ 时, 岩样峰值强度急剧降低, 单轴压缩状态下, 抗压强度仅为 19.30 MPa。这是由于温度产生的热损伤较大, 虽然围压可以改善花岗岩的力学性能, 但此时温度的影响占了主要因素, 导致岩样力学性能与围压无规律可循。

由常规三轴压缩试验结果分析得到高温后花岗岩岩样抗剪强度与围压的关系见图 5。

抗剪强度平均值随围压的增大呈线性增长, 拟合方程为  $\tau = 1.24472\sigma_3 + 19.4796$  ( $R^2 = 0.99957$ )。究其本质原因, 围压的存在使得岩样内部的孔隙和裂隙得到压密并减小, 增加了裂纹抗变形的能力, 特别是抑制次生拉裂纹的产生和扩展, 颗粒间的摩擦特性得到增强, 岩样的承载能力得到提高。

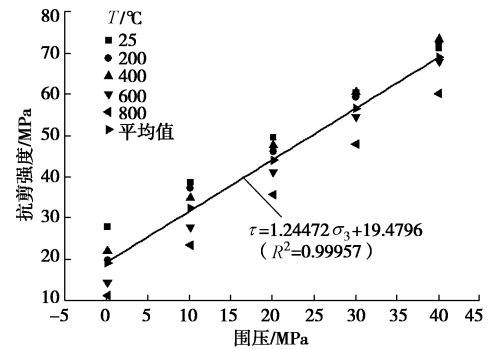


图 5 高温后花岗岩岩样抗剪强度与围压的关系

Fig. 5 Relationship between shear strength of granite and confining pressure after high temperatures

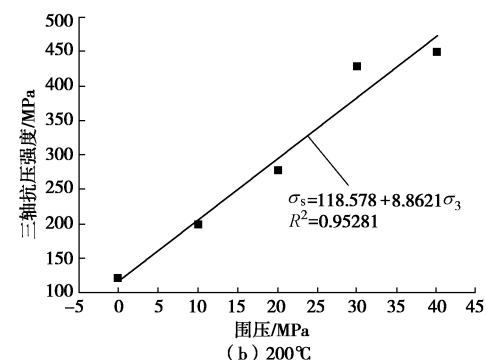
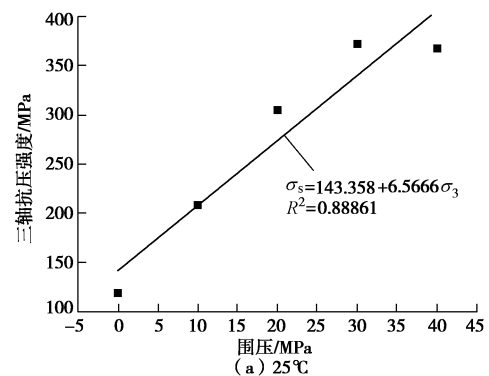
### 2.3 花岗岩力学性质与温度的关系

岩石的黏聚力和内摩擦角是岩土工程设计中两个重要的力学参数。Coulomb-Mohr 准则, 即黏聚力和内摩擦系数可用来解释岩石强度特性。该准则在以最大主应力  $\sigma_s$ , 围压  $\sigma_3$  表示时, 可以写成  $\sigma_s = M + N\sigma_3$ , 简称为  $Q(M, N)$ , 该公式表征一个给定岩样能够承载的最大轴向应力  $\sigma_s$  与围压  $\sigma_3$  成线性关系, 式中  $M$  和  $N$  均是强度准则参数, 与内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$  的关系为<sup>[9]</sup>

$$M = 2c \cos \varphi / (1 - \sin \varphi) \quad (1)$$

$$N = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi) = \tan^2 (45^\circ + \varphi / 2) \quad (2)$$

通过对不同温度作用后的峰值强度与围压进行线性回归分析可知, 两者间呈较好的正线性关系, 得到  $Q(M, N)$ , 如图 6 所示。1000℃ 时三轴抗压强度与围压无明显关系, 因而没有进行曲线拟合。



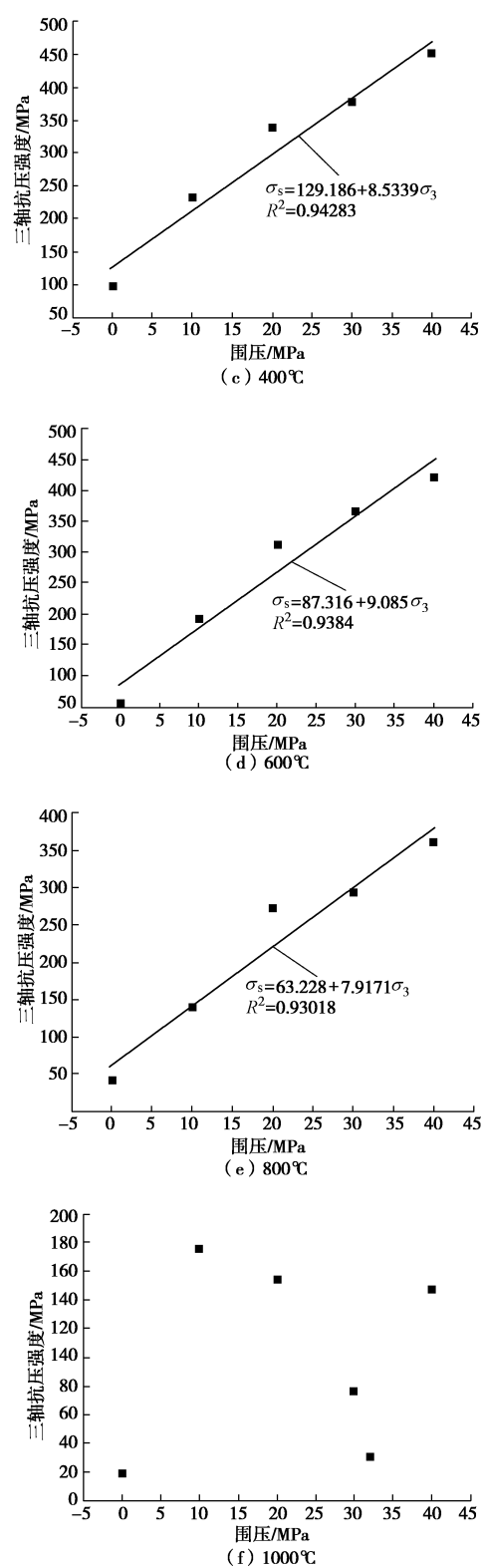


图6 高温后花岗岩岩样三轴抗压强度与围压的关系

Fig. 6 Relationship between triaxial compressive strength of granite and confining pressure after high temperatures

主要原因为：组成花岗岩的各矿物颗粒热膨胀系数不同，变形也不同，因而在岩样内部产生热应力。当加热温度低于 800℃，虽然由于温度的热应力作用会使花岗岩内部产生一部分微裂纹，但产生热应力不足以引起花岗岩结构整体性的破坏，而此时围压的存

在有助于完整岩样内部裂隙、空隙的闭合，颗粒间的接触关系得到改善，因而在温度低于 800℃，岩样三轴抗压强度随围压线性增大。而温度增加到 1000℃时，花岗岩内部各矿物颗粒间和颗粒内部的热应力进一步增大，裂隙贯通，结构整体破坏，导致岩样力学性质恶化。虽然此时围压的存在可以改善花岗岩的力学性能，但由于温度应力对花岗岩力学性质的损伤更大，因而岩样三轴抗压强度与围压无明显关系，说明此时温度的影响占据了主要因素。根据式 (1)、(2) 计算得到不同温度作用后的内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$  如表 2 所示。

表2 高温后常规三轴压缩下花岗岩的强度参数

Table 2 Strength parameters of granite under conventional triaxial compression after high temperatures

$T/^\circ\text{C}$	$M/\text{MPa}$	$N$	$R^2$	$\varphi/(^\circ)$	$c/\text{MPa}$
25	143.358	6.5666	0.88861	47.36	27.97
200	118.578	8.8621	0.95281	52.86	19.91
400	129.186	8.5339	0.94283	52.20	22.11
600	87.316	9.0850	0.93840	53.29	14.48
800	63.228	7.9171	0.93018	50.87	11.24

绘制黏聚力与温度的关系如图 7 所示。

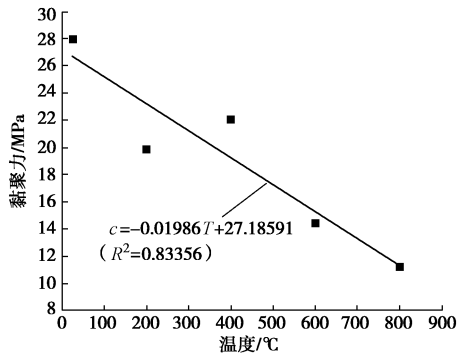


图7 常规三轴压缩下花岗岩岩样黏聚力与温度关系

Fig. 7 Relationship between cohesion of granite and temperature under conventional triaxial compression

内摩擦角和黏聚力都是表示岩体抗剪强度的指标。黏聚力反映岩体内部的黏结程度，与岩体内部矿物颗粒的粒径、胶结成分和胶结度有关。由图 7 可以看出，黏聚力随着温度的升高呈线性下降，拟合方程为  $c = -0.01986T + 27.18591$  ( $R^2 = 0.83356$ )，温度升高，矿物颗粒膨胀，分子间间距增大，导致黏聚力随温度升高而减小。

由表 (2) 可知，内摩擦角由 25℃时的 47.36° 增加到 600℃时的 53.29°，增加幅度为 12.52%。究其原因：600℃之前，由于矿物的热膨胀系数不同，引起很不规则的变形，岩样颗粒之间相互摩擦和相互咬合作用加强<sup>[17]</sup>，导致内摩擦角随着温度的升高而增加。当加热温度达到 800℃时，由于温度应力的损伤，内摩擦角减小到 50.87°，相对 600℃时减少 4.54%。

主要因为: 影响内摩擦角的主要因素有岩石的密度、矿物成分、含水率及孔隙度等。当温度超过 600℃ 之后, 由前面物理分析可知, 岩样密度快速下降; 同时由于温度的升高, 岩样内部产生了水分蒸发、矿物脱水等现象, 使得其内部的孔隙度增大; 当温度增加到 800℃ 时, 岩样内部各矿物颗粒间和颗粒内部的热应力进一步增大, 微裂纹不断汇合、贯通, 产生较大宏观裂纹, 导致岩样颗粒间的摩擦减小, 因而温度超过 600℃ 时, 内摩擦角有所减小。

由以上分析可知, 黏聚力和内摩擦角随温度的变化大致呈相反趋势, 而岩石的抗剪强度由黏聚力和内摩擦角共同决定, 单独分析黏聚力和内摩擦角的变化不能反映温度对抗剪强度的影响, 因此, 采用 Coulomb-Mohr 准则分别计算各个温度点在 0, 10, 20, 30, 40 MPa 时的抗剪强度, 其随温度的变化规律如图 8 所示。

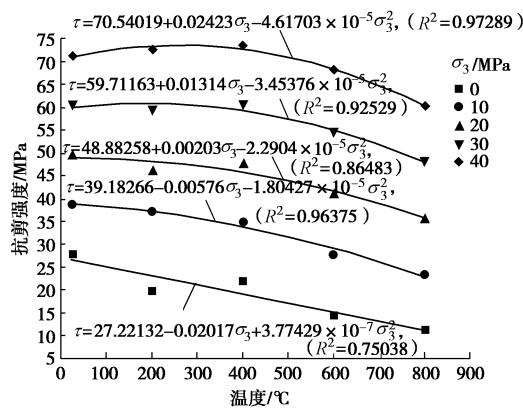


图 8 围压一定时花岗岩岩样抗剪强度与温度关系

Fig. 8 Relationship between shear strength of granite and temperature under constant confining pressure

由图8中可以看出, 在各级围压作用下, 岩样的抗剪强度随着温度的升高大致呈二次多项式关系减小。在0, 10, 20, 30, 40 MPa各级围压作用下, 25℃时的抗剪强度分别为27.97, 38.83, 49.69, 60.55, 71.41 MPa, 温度升高到800℃, 岩样的抗剪强度分别为11.24, 23.53, 35.28, 48.12, 60.41 MPa, 相对于25℃时降幅分别为59.81%, 39.40%, 27.91%, 20.53%, 15.40%, 可见随着围压的增大, 抗剪强度随温度升高的降幅逐渐减小, 围压的增大削弱了温度对抗剪强度的影响。需要说明的是, 抗剪强度与温度的关系是间接估算, 在试验样本较小的情况下, 可能产生较大误差, 后面的研究将补充试验对该结论进行进一步的论证。

### 3 结 论

(1) 岩样质量随着温度的升高小幅下降, 温度低

于 600℃ 时, 岩样体积、密度变化不明显, 此后随着温度升高, 体积加速膨胀, 密度减小幅度加大, 1000℃ 时体积比 25℃ 膨胀了 5.027%, 密度降低了 5.132%。

(2) 高温作用后, 岩样三轴压缩应力 - 应变曲线大致经历了压密、弹性、屈服、破坏、软化、残余等几个阶段。岩样的刚度、峰值强度、抗剪强度、残余强度、塑性变形均随着围压的增大而增大。

(3) 岩样黏聚力随着温度的升高呈线性下降, 内摩擦角随着温度的升高先增大后减小, 抗剪强度随着温度的升高呈二次多项式关系减小, 围压的增大削弱了温度对抗剪强度的影响。

### 参考文献:

- [1] WAI R, LO K Y, ROWE R K. Thermal stress analysis in rock with nonlinear properties[J]. International Journals of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanics Abstract, 1982, 15(19): 211 - 220.
- [2] SIMPSON C. Deformation of granitic rock across the brittle-ductile transition[J]. Journal of Structural Geology, 1985, 18(7): 503 - 511.
- [3] KAREL S, BEDEIICH M. High-temperature microstructures and rheology of deformed granite, erzgebirge, bohemian massif[J]. Journal of Structural Geology, 1996, 18(6): 719 - 733.
- [4] ALSHA Y N A, KHAN K, ABDULJAUWARD S N. Effects of confining pressure and temperature on mixed-mode(I-II) fracture toughness of a lime-stone rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(4): 629 - 643.
- [5] 王绳祖. 高温高压岩石力学——历史、现状、展望[J]. 地球物理学进展, 1995, 10(4): 1 - 31. (WANG Sheng-zu. High-temperature/high-pressure rock mechanics: history, state-of-art and prospect[J]. Progress in Geophysics, 1995, 10(4): 1 - 31. (in Chinese))
- [6] 刘泉声, 许锡昌. 温度作用下脆性岩石的损伤分析[J]. 岩石力学工程学报, 2000, 19(4): 408 - 411. (LIU Quan-sheng, XU Xi-chang. Damage analysis of brittle rock at high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 408 - 411. (in Chinese))
- [7] 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))

- [8] 秦本东, 罗运军, 门玉明, 等. 高温下石灰岩和砂岩膨胀特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(2): 417 - 422, 473. (QIN Ben-dong, LUO Yun-jun, MEN Yu-ming, et al. Experimental research on swelling properties of limestone and sandstone at high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(2): 417 - 422, 473. (in Chinese))
- [9] 杨圣奇, 苏承东, 徐卫亚. 大理岩常规三轴压缩下强度和变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(3): 475 - 478. (YANG Sheng-qi, SU Cheng-dong, XU Wei-ya. Experimental investigation on strength and deformation properties of marble under conventional triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(3): 475 - 478. (in Chinese))
- [10] 孟召平, 彭苏萍, 张慎河. 不同成岩作用程度砂岩物理力学性质三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(2): 140 - 143. (MENG Zhao-ping, PENG Su-ping, ZHANG Shen-he. Triaxial experiment study on physical and mechanical properties of sandstone for different diagenesis degrees[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(2): 140 - 143. (in Chinese))
- [11] 周永胜, 蒋海昆, 何昌荣. 不同温压条件下居庸关花岗岩脆塑性转化与失稳型式的实验研究[J]. 中国地震, 2002, **18**(4): 389 - 400. (ZHOU Yong-sheng, JIANG Hai-kun, HE Chang-rong. Experiments of brittle-plastic transition, modes of instability of juyongguan granite at different T-P condition[J]. Earthquake Research in China, 2002, **18**(4): 389 - 400. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] 朱珍德, 方荣, 朱明礼, 等. 高温周期变化与高围压作用下大理岩力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(11): 2279 - 2283, 2290. (ZHU Zhen-de, FANG Rong, ZHU Ming-li, et al. Study of mechanical performance of marble under high pressure and cyclic temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(11): 2279 - 2283, 2290. (in Chinese))
- [14] 徐小丽, 高峰, 沈晓明, 等. 高温后花岗岩力学性质及微孔隙结构特征研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(6): 1752 - 1758. (XU Xiao-li, GAO Feng, SHEN Xiao-ming, et al. Research on mechanical characteristics and micropore structure of granite under high-temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(6): 1752 - 1758. (in Chinese))
- [15] 徐小丽. 温度载荷作用下花岗岩力学性质演化及其微观机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008. (XU Xiao-li. Research on the mechanical characteristics and micromechanism of granite under temperature loads[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008. (in Chinese))
- [16] 孙强, 张志镇, 薛雷, 等. 岩石高温相变与物理力学性质变化[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(5): 935 - 942. (SUN Qiang, ZHANG Zhi-zhen, XUE Lei, et al. Physico-mechanical properties variation of rock with phase transformation under high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(5): 935-942. (in Chinese))
- [17] 杨昊天, 徐进, 王璐, 等. 花岗岩力学特性温度效应的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, **9**(1): 96 - 101. (YANG Hao-tian, XU Jin, WANG Lu, et al. Experimental study on temperature effect of the mechanical properties of granite[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, **9**(1): 96 - 101. (in Chinese))