

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.06.023

温度与冲击荷载耦合下花岗岩动力性质

卢志堂¹, 王志亮^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 200092 上海; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 230009 合肥)

摘要: 为考察岩石的热动力学特性, 利用改进的分离式霍普金森压杆, 对不同实时温度下的花岗岩试样进行了 50~250 s⁻¹ 应变率的冲击压缩试验。基于测试数据, 研究发现不同温度下应变率敏感性有所差别, 700 °C 时花岗岩抗压强度的应变率效应最弱, 而峰值应变的率效应非常明显, 弹性模量的应变率效应无明显规律, 如 20 °C 和 700 °C 时, 弹性模量表现出随应变率升高而增大的趋势, 但 300 °C 和 500 °C 时, 其随应变率的增大而降低; 较常温状态, 300 °C 时花岗岩的抗压强度变化不大, 当温度升高到 500 °C 时, 花岗岩热损伤效应明显, 其动态抗压强度与弹性模量均大幅降低, 而峰值应变呈增大趋势。700 °C 时热损伤现象突出, 抗压强度与弹性模量迅速降低; 此外, 还发现当温度升高时, 不但岩石的破碎程度加重, 而且岩样的颜色也发生改变。

关键词: 花岗岩; 实时温度; 冲击加载; 应变率; 热损伤

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)06-0143-07

Dynamic properties of granite subjected to coupling action of impact loading with actual temperature

LU Zhitang¹, WANG Zhiliang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, 200092 Shanghai, China;

2. School of Civil & Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, 230009 Hefei, China)

Abstract: To investigate the thermodynamic property of rock, the impact compression tests of granite within different temperatures were performed under different strain rates (50~250 s⁻¹). Results show that the strain-rate sensitivities subjected to different temperatures are quite different. When the temperature rises to 700 °C, the effect of strain rate on compressive strength is the weakest, while that on peak strain is obvious. The effect of strain rate on elastic modulus tends to have no regularity. The elastic modulus increases with the increase of strain rate at 20 °C and 700 °C, but it takes on a downward trend at 300 °C and 500 °C. There is little change in the dynamic compressive strength at 300 °C compared to the room temperature. When the temperature reaches 500 °C, the thermal damage becomes obvious, the dynamic compressive strength and elastic modulus significantly reduce, but the peak strain increases. At 700 °C, the thermal damage phenomenon is serious, and the compression strength and elastic modulus sharply decrease. In addition, with increasing the actual temperature, the color of the tested rock changes and its breakage degree also deepens.

Keywords: granite; actual temperature; impact loading; strain rate; thermal damage

在深部岩体工程中, 如地热资源开发和利用、高放射性核废料的地下贮存处置等, 都涉及高温下岩

石的力学特性^[1]。国内外学者对于岩石在高温条件下的物理力学参数变化、变形与损伤机制、破坏准则和本构行为等方面做了有意义的探索, 取得一系列成果。Araújo 等^[2]分析了 24、80 和 150 °C 的砂岩弹性模量、泊松比、抗压强度等参数的变化趋势, 发现温度变化对岩石有不可忽视的影响; Inada 等^[3]研究了岩石在高温 (15 到 100 °C) 和低温 (15 到 -160 °C) 循环作用下的强度和变形特性; Shmonov

收稿日期: 2015-08-13.

基金项目: 国家自然科学基金 (51379147, 51579062, 51174145);

教育部博士点专项资金 (20120072110024)。

作者简介: 卢志堂 (1985—), 男, 博士研究生;

王志亮 (1969—), 男, 教授, 博士生导师。

通信作者: 王志亮, cvewzL@tongji.edu.cn.

等^[4]研究了温度对地震作用下岩石渗透性的影响; Shibata 等^[5]开展了 24 到 95 °C 时凝灰岩的蠕变试验; Dwivedi 等^[6]对 30~160 °C 范围内印度花岗岩的弹性模量、单轴压缩强度等进行了研究; 许锡昌等^[7]开展了 20~600 °C 范围内花岗岩单轴压缩试验, 指出在 20~500 °C, 单轴抗压强度受温度的影响不大; 刘泉声等^[8]通过 20~300 °C 下的单轴和三轴蠕变试验, 发现随着温度升高, 蠕变速率变化越来越快, 岩石粘性逐渐增强; 杜守继等^[9]发现 400 °C 以内, 温度对花岗岩力学性能的影响不明显, 超过 400 °C 后, 花岗岩力学性能迅速劣化; 朱合华等^[10]对 20~800 °C 温度后的熔结凝灰岩、花岗岩及流纹状凝灰角砾岩的力学性质进行了研究; 刘石等^[11]分析了 25~1 000 °C 下大理岩在冲击破坏过程中的能量耗散特征; 孙强等^[12]发现岩石的抗压/抗拉强度、渗透率、波速等在 400~600 °C 温度范围内会有显著变化; 张志镇等^[13]发现在实时高温加载作用下, 单轴抗压强度和弹性模量随着温度升高而连续劣化; 邱一平等^[14]发现经历 20~800 °C 温度后, 岩石抗压强度、弹性模量及超声波波速等指标有明显下降; 支乐鹏等^[15]发现在 25~1 000 °C 温度范围内, 随温度增高花岗岩的热损伤总体上逐渐增大, 抗压强度在减小, 峰值应变总体增大; 李明等^[16]对 800 °C 加热后的砂岩进行冲击压缩试验, 发现随应变率提高, 弹性模量、峰值应力随应变率的提高基本呈对数形式逐渐增加; 张连英等^[17]对 200 °C 下不同加载速率石灰岩力学特性进行了研究; 尹士兵等^[18]发现砂岩由 25 °C 增大到 800 °C 后, 密度、纵波波速与抗压强度均逐渐减小, 200 °C 后纵波波速降低的幅度增大, 400~600 °C 之间抗压强度降低幅度较小, 800 °C 后抗压强度急剧下降。

以上工作大多集中在岩石经受高温冷却后力学特性变化规律方面, 而实时温度与动载耦合下的力学性质研究相对较少。本文研究的黑云母花岗岩属于上地壳变质岩重熔, 经过迁移在浅部形成的, 在地热开发、核废料处理、地下洞室与人防工程建设中广泛涉及。上述工程花岗岩会承受高温作用, 如高温地热可达 200 °C, 核废料可达 300 °C, 而利用火钻加热岩石使之软化达到热破碎温度, 也大约 1 000 °C^[19]。为考察岩石的热动力学特性, 本文开展了 20 (常温)、300、500 和 700 °C 下动态冲压缩试验, 探讨了温度与动载耦合下其应力-应变曲线、弹性模量、峰值应力及峰值应变等的变化规律, 并细究了其热力损伤特性与应变率效应, 相关结论可为地热资源开发和深部岩体工程安全评估等提供参考。

1 试验介绍

1.1 试样制备

试验所用花岗岩呈灰白色, 具有块状构造, 其矿物成分有微斜长石 (40%)、斜长石 (25%)、石英 (20%) 和黑云母 (8%) 等, 为黑云母花岗岩。将花岗岩试样加工成直径 50 mm、长径比为 0.5 的圆柱体。并对试件的两端及侧面进行仔细研磨, 保证不平行度和不垂直度均小于 0.02 mm, 试样基本尺寸和加工精度均符合岩石力学试验标准。常温下, 试样密度 ρ 、吸水率 w_s 、静态抗压强度 σ_c 分别为 2 616 kg·m⁻³、0.57% 和 138 MPa。本试验分 20、300、500 和 700 °C 共 4 个温度等级, 每个温度为一组, 每组安排 8 块试样。

1.2 试验设备

试验在带有加温装置的分离式霍普金森压杆 (SHPB) 系统上完成。SHPB 由冲头、入射杆、透射杆和吸收杆组成, 均由高强度镍合金钢制成, 高温下仍具有良好工作性能, 其极限强度达 800 MPa, 钢杆波速为 5 480 m/s, 密度为 7 810 kg·m⁻³; 入射杆、透射杆和吸收杆长度分别为 2 000、1 500 和 500 mm, 直径为 50 mm。SHPB 试验系统见图 1。试验中, 试样的应力 $\sigma(t)$, 应变 $\varepsilon(t)$ 和应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$ 可由贴在压杆上的应变片测得的电信号计算得出, “三波法”^[20] 计算式为

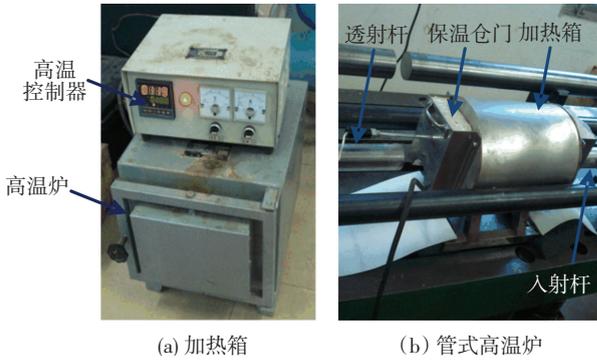
$$\begin{cases} \sigma(t) = \frac{AE_b}{2A_s}(\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_T(t)), \\ \varepsilon(t) = \frac{C}{l_s} \int_0^t (\varepsilon_T(t) - \varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)) dt, \\ \dot{\varepsilon}(t) = \frac{C}{l_s}(\varepsilon_T(t) - \varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)). \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_s 、 A_b 和 l_s 分别表示压杆和试样的横截面积与试样长度; E_b 表示压杆弹性模量; C 表示杆波波速; $\varepsilon_i(t)$ 、 $\varepsilon_r(t)$ 和 $\varepsilon_T(t)$ 分别为入射、反射和透射波应变信号。

试验中所用的加温装置为长沙长城电炉厂制造的 SX-4-10 型加热箱 (图 2(a)), 由高温炉和温度控制器组成, 额定功率为 4 kW, 最高加热温度可达 1 050 °C。该加温设备可自动控温, 且能够保证试样加温的稳定性与均匀性。为确保冲击压缩过程中岩石温度不变, 采用管式高温炉 (图 2(b)) 保温, 管式高温炉固定于入射杆和透射杆之间。该装置采用碳纤维增强合金筒作为加热腔的内壁, 可有效防止加热腔的击坏与击穿, 并通过在试样加热装置的支架上安装找平螺栓, 保证试样与入射杆、透射杆的精确对齐和完好接触, 在加热腔两端安装的可调保温仓门, 避免了入射杆、透射杆在出入加热腔时热量的大量散失, 有效地保证了试样的恒温状态^[21]。

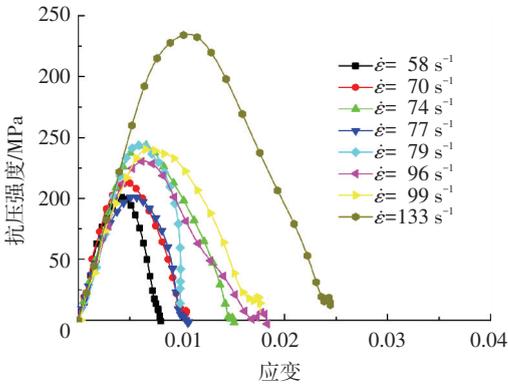


图1 SHPB 试验系统

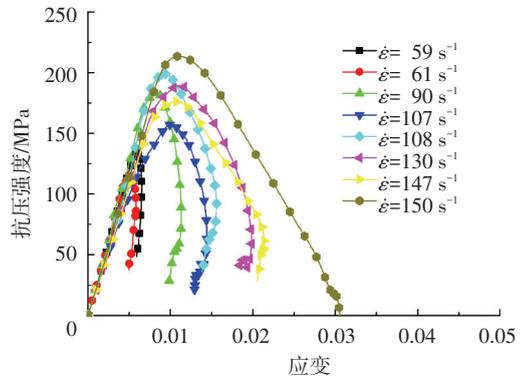


(a) 加热箱 (b) 管式高温炉

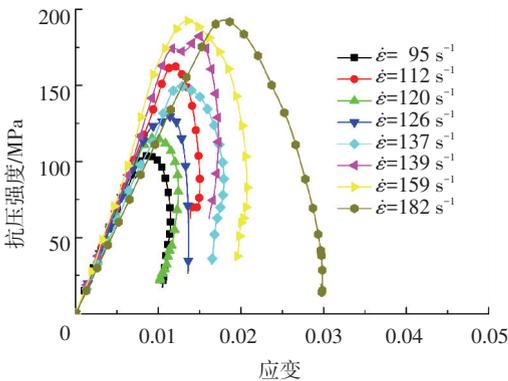
图2 温控加热炉



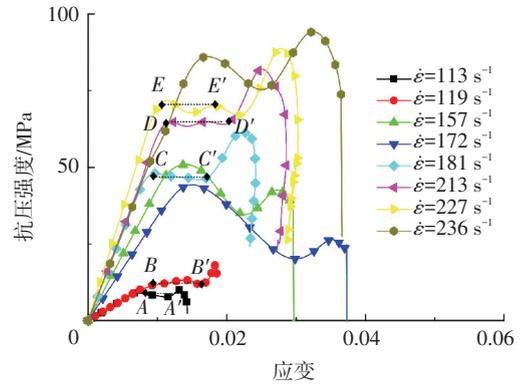
(a) $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b) $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$



(c) $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$



(d) $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$

图3 花岗岩高温下动态应力-应变曲线

从图3可见20~500 °C区间各应力-应变曲线变化特征基本一致.由于SHPB试验应变率较高,看不出压密阶段^[1],这些应力-应变曲线直接进入线弹性段,然后经裂纹扩展发展阶段进入破坏阶

1.3 试验方法

把加热箱温度分别设定为300、500和700 °C 3个等级,每次将8块试样放入内壁尺寸为500 mm×200 mm×120 mm的电加热炉膛内,以电炉的最大功率升温,其升温速率为10 °C/min.加热到相应的温度等级并保持恒温3 h,以保证试样受热均匀.之后,迅速将试样转移至架设在SHPB装置上的管式高温炉中,加热10 min,以补偿试样在转移及放置过程中的热量散失,期间启动SHPB系统.其中,管式高温炉应在装入试样前升至试验所需温度.以上工序完成后,打开保温仓,将入射杆和透射杆同时缓慢推入炉内,夹紧试样,立即按照常规SHPB冲击试验步骤进行试验.通过改变冲击气压的大小,控制试验的应变率范围.

2 结果分析

将应变片记录的人射波、反射波与透射波信号代入式(1),可得出应力-应变曲线及对应的应变率.图3给出不同温度(T)与应变率($\dot{\epsilon}$)下花岗岩的应力-应变曲线.

段,最后进入应变软化阶段.当700 °C时, $\dot{\epsilon}$ 为113、119、181、213和227 s⁻¹的应力-应变曲线会出现一个应力平台段(见图3(d)标注),这表明700 °C的高温使得花岗岩塑性增强;从整体曲线形态来

看,该温度下的应力-应变曲线具有“双峰”的特点,曲线呈现为“M”形,其中 $\dot{\epsilon}$ 为 157、172、236 s^{-1} 对应的曲线最明显;同时 700 $^{\circ}C$ 时,岩石抗压强度大幅降低,峰值应变大幅增大,应力-应变曲线会出现一定的震荡,出现双峰,表明此时花岗岩的变形性质相对其他温度时发生了变化,反映了此时岩石因热损伤而严重劣化,强度变小,更易于变形。

表 1 不同温度下的试验结果

编号	$T/^{\circ}C$	$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	σ_c/MPa	$\epsilon_p/10^{-3}$	E/GPa	编号	$T/^{\circ}C$	$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	σ_c/MPa	$\epsilon_p/10^{-3}$	E/GPa
1-1	20	58	101	4.3	28.3	3-1	500	95	104	8.7	13.1
1-2	20	70	113	4.7	28.5	3-2	500	112	163	11.8	14.2
1-3	20	74	144	6.3	29.4	3-3	500	120	116	9.5	13.6
1-4	20	77	101	5.4	28.0	3-4	500	126	130	11.5	13.8
1-5	20	79	144	6.2	29.8	3-5	500	137	150	12.6	12.6
1-6	20	96	131	6.4	27.2	3-6	500	139	183	14.9	14.9
1-7	20	99	141	6.8	28.3	3-7	500	159	192	13.6	15.4
1-8	20	133	235	10.7	30.6	3-8	500	182	193	18.0	11.7
2-1	300	59	134	6.1	24.2	4-1	700	113	10	13.2	1.4
2-2	300	61	117	5.1	24.9	4-2	700	119	13	13.9	1.3
2-3	300	90	184	8.3	25.1	4-3	700	157	51	14.2	4.3
2-4	300	108	157	10.0	20.0	4-4	700	172	44	14.9	3.4
2-5	300	108	199	9.1	24.3	4-5	700	181	61	22.3	5.7
2-6	300	130	189	11.2	21.4	4-6	700	213	82	25.2	6.0
2-7	300	147	176	10.7	21.0	4-7	700	227	89	27.8	7.2
2-8	300	150	214	11.0	23.0	4-8	700	236	94	32.4	5.8

2.1 抗压强度变化特征

图 4 给出 20~700 $^{\circ}C$ 下,应变率范围 50~250 s^{-1} 的抗压强度散点图.首先可看出温度 300 $^{\circ}C$ 时,与 20 $^{\circ}C$ 时相比,花岗岩抗压强度分布范围基本相同,可认为该温度区间内,岩石强度没有明显改变;而 500 $^{\circ}C$ 对应的抗压强度比 20 $^{\circ}C$ 时有所降低,这表明 500 $^{\circ}C$ 时,花岗岩力学性质有明显的劣化现象;700 $^{\circ}C$ 时花岗岩抗压强度较 20 $^{\circ}C$ 时大幅降低,均在 100 MPa 以内.其次,还可看出,高温花岗岩抗压强度同常温下一样,会随应变率的增大而增大,这反映了高温时花岗岩抗压强度仍然具有较强的应变率效应。

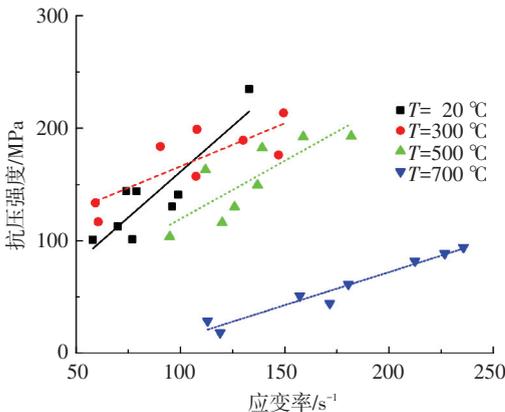


图 4 不同温度下动态抗压强度-应变率关系

从以上应力-应变曲线分析可看出,20~500 $^{\circ}C$ 区间内,花岗岩的力学性质变化不明显,而 500~700 $^{\circ}C$ 之间出现一个强度剧烈降低的阈值,超过这一阈值后,花岗岩力学性质迅速变差.下文将根据应力-应变曲线,得出抗压强度 σ_c 、峰值应变 ϵ_p 与弹性模量 E ,进行全面来分析花岗岩经受高温时的力学性质,具体结果列于表 1。

图 5 给出了动态强度敏感系数(即图 4 中直线的斜率),可看出不同温度时,抗压强度的增大幅度有所差别,即不同温度下其敏感系数有所差别.当温度为 20 $^{\circ}C$ 时,抗压强度敏感系数最大,而温度为 700 $^{\circ}C$ 时,应变率敏感系数最小,意味着该组岩石强度的应变率效应最弱。

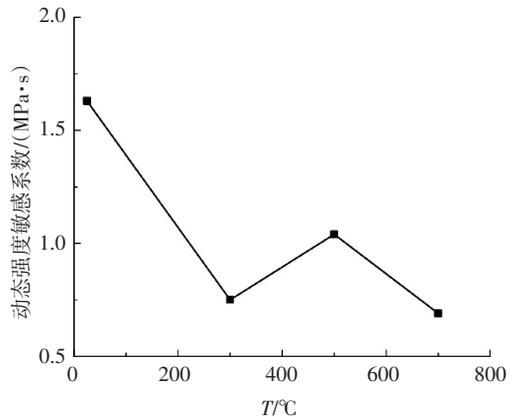


图 5 不同温度下动态强度敏感系数

2.2 峰值应变变化特征

图 6 给出了温度为 20~700 $^{\circ}C$ 下峰值应变与应变率的关系,从整体上看,在 20 $^{\circ}C$ 与 300 $^{\circ}C$ 时花岗岩峰值应变分布范围接近,而 500 $^{\circ}C$ 时峰值应变有明显增大,而当温度升高到 700 $^{\circ}C$ 时,峰值应变大幅

提高.各级温度下峰值应变也与应变率相关,均随应变率增大而增大.图7给出了其应变率敏感系数的变化情况,可见从20℃到300℃,敏感系数减小,由0.08 ms减小到0.06 ms;而当温度由300℃升到700℃时,敏感系数由0.08 ms增大到0.15 ms.

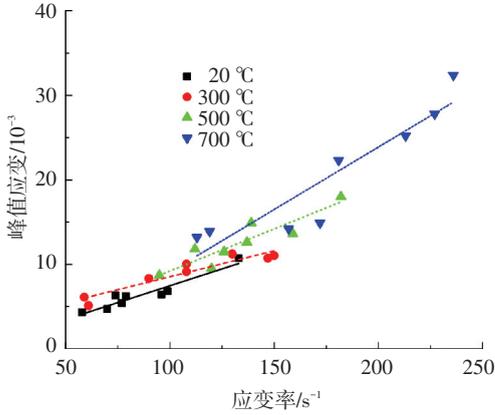


图6 不同温度下峰值应变与应变率关系

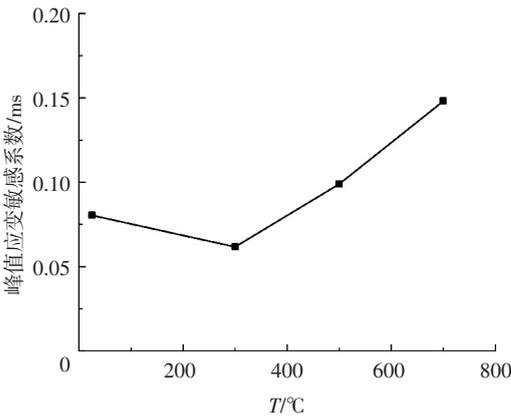


图7 不同温度下峰值应变敏感系数

2.3 弹性模量变化特征

同岩石静态抗压试验一样,从图3中的应力-应变曲线上找出近似直线段,将其平均斜率作为弹性模量(也称为平均模量)^[22].图8给出了温度为20~700℃下弹性模量随应变率的变化趋势,同样采用线性拟合来分析.随着温度不断升高,花岗岩的弹性模量不断减小.20℃时,弹性模量随应变率增大有增大趋势,但都在27~31 GPa之间,变化幅度较小.而300和500℃时弹性模量随应变率增大却有减小趋势,但变化幅度也较小.当温度升高到700℃时,弹性模量大幅度减小,均不足10 GPa,远低于20℃的弹性模量.这也反映了700℃高温时,岩石出现了严重的热损伤.由图9给出了各级温度下弹性模量随应变率增大的变化情况.可见温度为20和700℃时,花岗岩弹性模量随应变率增大而增大,而温度为300和500℃时,敏感系数为负值,弹性模量随应变率增大而有所降低.整体上看,岩石的弹性模量与应变率之间没有明确的关系.

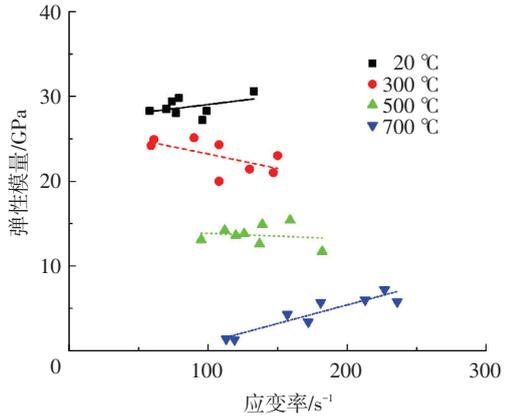


图8 不同温度下弹性模量-应变率关系

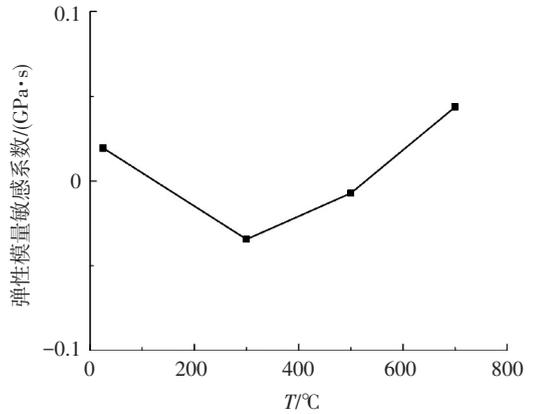


图9 不同温度下弹性模量敏感系数

3 热损伤机理及破坏模式

通过对实时高温的花岗岩进行冲击压缩试验,探讨高温与荷载耦合作用下岩石的破坏模式,可加深对温度与应力波作用后岩石破碎、失稳机制及其发展过程的认识.

3.1 热损伤机理

首先观察高温对岩石外观的影响,将加热后的试样取出并迅速拍照.由图10可以看出,当温度升高到300℃之后,花岗岩的颜色开始加深,但从抗压强度、峰值应变和弹性模量的变化来看,未见明显劣化.当温度升高到500℃时,试样表面有肉眼可见的小裂缝.花岗岩是由石英、长石与云母等矿物组成,各矿物间热膨胀性质存在差异,500℃高温下,矿物晶粒界面展开,同时内部原有的微裂隙也会长大,因此500℃时岩样强度明显降低;700℃时,试样发生了较强的热破裂作用,边缘出现了一定蹦落豁口(见图10(d)).由肉眼观察,500℃时花岗岩试样表面有裂缝产生,出现明显热损伤,700℃时高温使得试样发生了强烈的热破裂,微裂缝扩展较大,花岗岩遭受了严重损伤.席道瑛^[19]曾研究指出石英在573℃附近由α相转变为β相.对于花岗岩受热严重劣化的机理,可以理解为高温下石英相变导致体积膨胀,故花岗岩内部微裂隙萌生扩展,岩石力学性质从而出

现劣化.因此,可认为在 500~700 °C 区间内,石英相变使得花岗岩发生了热破裂,造成了严重的热损伤,导致抗压强度大幅降低.

根据裂纹演化理论认为,岩石材料内部存在的裂纹扩展和聚合是岩石材料破坏的根本原因,所谓的动

力强度,只不过是断裂传播速度的有限性,试样来不及松弛而加上去的荷载,即超载.700 °C 高温时,岩石内部裂缝已经广泛扩展与贯通,使得承受冲击荷载时无需再次经历裂缝扩展与贯通的过程迅速发生破坏,因此该级温度下,花岗岩的应变率效应最弱.

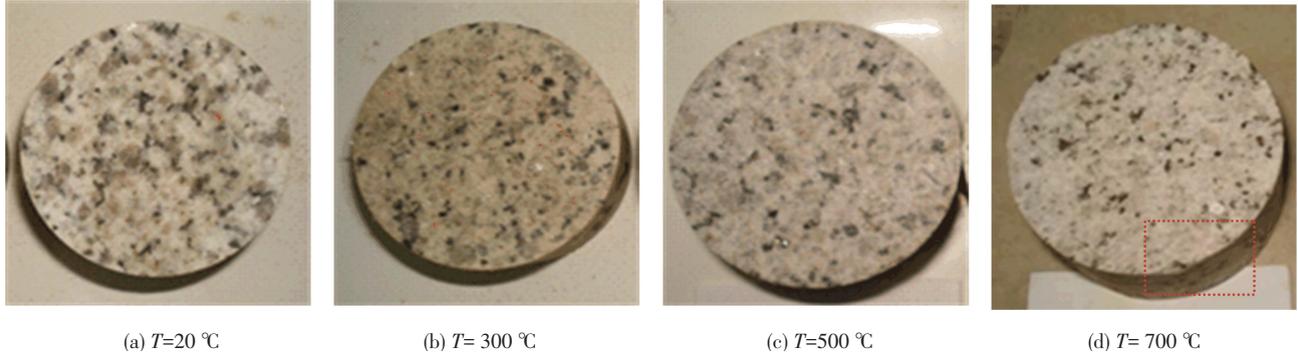


图 10 经受高温后试样照片

假设未加热时,试样弹性模量相同,那么根据损伤理论,热损伤参数 D 可由下式计算:

$$D = 1 - \frac{E_T}{E_{20}}, \quad (2)$$

式中: E_{20} 表示 20 °C 时花岗岩弹性模量, E_T 表示不同温度下花岗岩弹模.

对于 500 °C 和 700 °C 高温下岩石损伤,提取编号 1-4、3-1 和 4-1 试样的弹性模量(冲击气压均为 0.4 MPa)代入式(2),得出损伤量 D 分别为 0.44 和 0.94,这表明当环境温度高于 500 °C 时,花岗岩的损

伤严重,700 °C 时损伤已接近 1.0.

3.2 冲击破坏模式

图 11 为冲击气压为 0.4 MPa 时,不同温度条件下试样冲击破坏形态照片.可以看出,温度为 20 °C 时,试样沿轴向存在劈裂面,试样破裂成几块;300 °C 时,试样主要破坏仍为轴向劈裂,但四周破裂成多块;500 °C 时,试样外围破裂严重,轴向破裂面不明显;700 °C 时试样破碎严重,几乎为粉末状.从破坏模式来说,300 °C 时岩石破碎程度比常温下稍有增强,但 500 °C 以上高温岩石破碎严重,岩石劣化明显.

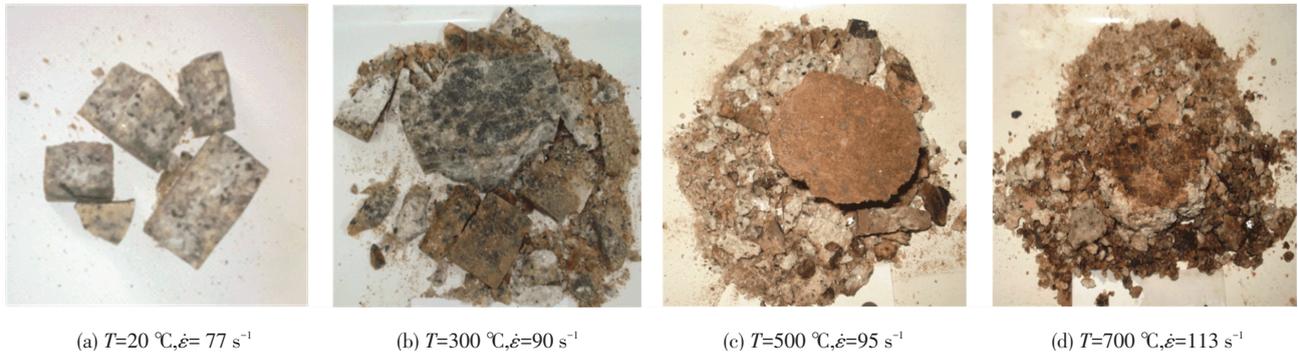


图 11 试样破坏后的照片

4 结 论

1) 高温时花岗岩的动态抗压强度、峰值应变仍具有应变率效应,但不同温度下应变率敏感性有所差别.其中 700 °C 时,花岗岩抗压强度应变率效应最弱,而峰值应变的率效应最明显.弹性模量与应变率没有明确关系,20 °C 和 700 °C 时,弹性模量表现出随应变率升高呈增大趋势,300 °C 和 500 °C 时,弹性模量随应变率的增大则减小.

2) 300 °C 时花岗岩的抗压强度、峰值应变和弹性模量相对常温而言变化不大,当温度增大到 500 °C 时,热损伤效应明显,花岗岩动态抗压强度与弹性模量显著降低.温度超过 500 °C 时花岗岩组份中石英由 α 相转变为 β 相,使得花岗岩性质急剧劣化,故 700 °C 下热损伤剧烈增大,抗压强度与弹性模量大幅降低,分别在 100 MPa 和 10 GPa 以下.

3) 花岗岩颜色 300 °C 开始变深,到 500 °C 时,肉眼可见岩样中萌生的裂纹,700 °C 时岩样边缘因热

破裂出现剥落.相同冲击作用下,300℃时试样破坏模式与常温比较相近,主要为轴向劈裂破坏;而500~700℃时加载,试样破碎程度加重,几乎呈粉碎状态.

参考文献

- [1] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M].北京:科学出版社,2014.
- [2] ARAÚJO R G S, SOUSA J L A, BLOCH M. Experimental investigation on the influence of temperature on the mechanical properties of reservoir rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3):459-466.
- [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 and Geomechanics Abstracts*, 1997, 34(3):688-694.
- [4] SHMONOV V M, VITOVTOVA V M, ZHARIKOV A V. Experimental study of seismic oscillation effect on rock permeability under high temperature and pressure[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1999, 36(3):405-412.
- [5] SHIBATA K, TANI K, OKADA T. Creep behavior of tuffaceous rock at high temperature observed in unconfined compression test[J]. *Soil & Foundation*, 2007, 47(1):1-10.
- [6] DWIVEDI R D, GOEL R K, PRASAD V V R, et al. Thermo-mechanical properties of Indian and other granites[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2008, 45(3):303-315.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [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.
- [10] 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):1945-1950.
- [11] 刘石,许金余,支乐鹏,等.高温后大理岩的冲击力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(3):273-280.
- [12] 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.
- [13] 张志镇,高峰,徐小丽.花岗岩力学特性的温度效应试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(8):2346-2352.
- [14] 邱一平,林卓英.花岗岩样品高温后损伤的试验研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(6):1005-1010.
- [15] 支乐鹏,许金余,刘志群,等.高温后花岗岩冲击破坏行为及波动特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(1):135-142.
- [16] 李明,茅献彪,曹丽丽,等.高温后砂岩动力特性应变率效应的试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(12):3479-3488.
- [17] 张连英,茅献彪.高温状态下加载速率对石灰岩力学效应研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(11):3511-3515.
- [18] 尹士兵,李夕兵,王斌,等.高温后砂岩动态压缩条件下力学特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(5):777-784.
- [19] 席道瑛.花岗岩中矿物相变的物性特征[J]. *矿物学报*, 1994, 14(3):223-227.
- [20] 李夕兵,古德生.岩石冲击动力学[M].长沙:中南工业大学出版社,1994:12.
- [21] 尹士兵.考虑温度效应的岩石动力学行为研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [22] BRADY B H G, BROWN E T. *Rock mechanics for underground mining, third edition* [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006: 89.

(编辑 赵丽莹)