

Barre 花岗岩动态压缩破坏特性研究

陈 荣^{1,2}, 林玉亮¹, 卢芳云¹, 夏开文²

(1. 国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073; 2. 多伦多大学 土木工程系, 加拿大 多伦多 M5S 1A4)

摘要: 利用修正的分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)系统, 对 Barre 花岗岩(Barre granite, BG)圆柱形试样进行高应变率单轴压缩试验。根据各向异性 BG 试样 3 个主轴方向将试样分为 X 向(P 波速度中等), Y 向(P 波速度最低)和 Z 向(P 波速度最高)。试验过程中, 采用组合型整形器(黄铜+橡皮)保证加载中的应力平衡, 实现对试样的常应变率加载; 利用单脉冲加载技术确保试样在试验过程中只受到 1 次动态载荷。得到试样 3 种破坏状态形态: 未破坏、表面开裂以及完全破碎。对回收试样切片后的微观裂纹分布研究发现, 裂纹随着加载应变率的提高而增多。试验测得 BG 三个方向不同加载应变率(70, 100, 130 s⁻¹)下的应力-应变关系, 分析不同破坏状态下的应力-应变曲线形式。3 个方向的试样均表现出应变率相关, 最大承受应力随着应变率的增加。在较低和较高的加载应变率下, 试样的最大承受应力与初始裂纹方向无关, 呈现出各向同性。而在中间加载应变率下 Y 试样承受应力最大, 这是因为 BG 初始裂纹面平行与 XZ 平面, 在临界加载条件下裂纹扩张比较困难。

关键词: 岩石力学; 花岗岩; 分离式 Hopkinson 压杆; 整形器; 应变率效应

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2009)增 1-2743-06

ANALYSIS OF FAILURE FEATURE OF BARRE GRANITE UNDER DYNAMIC COMPRESSION

CHEN Rong^{1,2}, LIN Yuliang¹, LU Fangyun¹, XIA Kaiwen²

(1. College of Sciences, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

2. Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, M5S 1A4, Canada)

Abstract: High strain rate uniaxial compressive loading tests on disk Barre granite(BG) samples were conducted by modified split Hopkinson pressure bar(SHPB) system with pulse shaping and momentum-trap technique. The samples were tested under X(intermediate P-wave velocity), Y(lowest P-wave velocity), and Z (highest P-wave velocity) directions. The dynamic stress equilibrium on both ends of the sample and constant strain rate was achieved during loading with help of pulse shaper(copper + rubber) technique. The momentum-trap technique was adopted to protect the sample from multi-loading by the incident bar. Corresponding to three loading levels, three damage levels of the rock samples were identified according to the extents of damage, namely, quaso-elastic, cracked, and fragmented samples. The damage assessment of recovered sample was investigated after cut to thin sections, and the microcrack increased with the loading rate. The stress-strain curves of samples at different strain rates(70, 100, 130 s⁻¹) under three directions were obtained. The correlation between the failure modes and shape of the stress-strain curves was discussed. The maximum stress increased with the loading rate. The dynamic strength was isotropic at low and high strain rates, but Y-samples had the highest dynamic strength under middle

收稿日期: 2008-05-14; **修回日期:** 2008-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10672177); 国防科技大学校科研计划(JC-07-02-06); 2002 年高等学校博士学科点专项科研资助项目(20020183061)

作者简介: 陈 荣(1981-), 男, 2004 年毕业于国防科学技术大学应用物理系激波物理专业, 现为博士研究生, 主要从事材料动态力学试验方面的研究工作。E-mail: R_Chen@nudt.edu.cn

loading rate. The XZ plane was considered to be parallel to the rift plane, thus it was difficult to split the cracks with the critical loading level.

Key words: rock mechanics; granite; split Hopkinson pressure bar(SHPB); pulse shaping; strain rate effect

1 引言

岩石冲击本构特性是认识岩石介质中应力波传播规律和岩石动载破坏机制的关键,同时也是岩石爆破等动载破碎数值计算的基础和抗震抗爆等工程设计的依据,是岩石动力学中最基本的问题之一。在长期地应力的作用下,由于微裂纹以及晶粒的定向排列,岩石的宏观力学性能表现出各向异性。许多学者针对花岗岩中微裂纹的分布对力学性能各向异性的影响,包括地震波速度,弹性模量,压缩以及拉伸性能等,进行了长期的研究探索^[1~4]。研究表明,岩石的力学性能各向异性与其解理面的取向相关^[5]。A. Schedl 等^[6]采用光学技术对 BG(Barre 花岗岩)的研究认为解理面和各向异性均是由微裂纹引起的。对花岗岩微结构和断裂韧度之间关系的研究证实,微裂纹密度、微裂纹长度和断裂韧度紧密相关,岩石中的微裂纹平均长度比晶粒尺寸更能影响断裂韧度。在岩石爆破、地震以及采矿工程中岩石要产生动态断裂,研究岩石的动态力学性能、分析动态力学响应和微裂纹导致的各向异性之间的关系有着重要的应用价值。

分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)是研究材料在 $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 应变率加载条件下通用试验方法^[7]。早在 1970 年,有人采用 SHPB 研究 BG 的应变率效应,以及微结构各向异性和动态响应之间的关系^[8]。BG 在准静态和动态条件下都是应变率相关而且各向异性的,由于常应变率控制以及其他试验设计的原因,并没有得到微结构对 BG 动态压缩性能的影响规律。随着 SHPB 试验技术的巨大进步,特别是入射波整形技术以及单脉冲加载技术的发展,使得对岩石的系统研究成为可能。整形器^[9, 10]可以将入射波的上升前沿变缓,使试样更容易达到应力平衡;改变整形器的材料及尺寸可以使试样达到常应变率加载,也可采用纺锤型子弹达到对试样的常应变率记载^[11]。单脉冲加载技术^[12~14]可以保证试样在整个试验过程中只受到 1 次加载。

本文选取 BG 作为研究对象,已有前期研究分析了其微裂纹的结构。结合超声波和光学方法探测

研究表明其微裂纹结构有 3 个主要方向^[15, 16]。另外, BG 也是美国矿业局(US Bureau of Mines)的标准岩石系列的一种。本文采用 SHPB 试验方法,结合整形器及单脉冲加载技术,研究 BG 三个方向的动态压缩力学性能,并结合微观分析方法,考察在不同加载应变率下各组分的裂纹特征。

2 试验简介

2.1 试验装置

本次试验在国防科学技术大学自行研制的多杆径通用 Hopkinson 杆试验平台上进行的,试验装置如图 1 所示。试验过程中所用压杆材料为 60SiMnV 合金钢,直径为 40 mm,子弹长度为 100 mm;入射杆长为 2 000 mm,入射杆上应变片距离试样 892 mm;透射杆长为 1000 mm,透射杆上应变片距试样 502 mm。子弹速度测试采用红外测速器,应变测试采用自行研制的 KD205 - A 超动态应变仪,试验信号利用泰克 TDS3054B 数字存储示波器采集。



图 1 多杆径通用 Hopkinson 试验平台
Fig.1 Set up of multi-diameter Hopkinson bar

2.2 试样制备

BG 样本采自美国佛蒙特州 Burlington 地区西南部。样品中石英体积比为 25%,平均粒度为 0.90 mm;长石体积比为 65%,平均粒度为 0.83 mm;黑云母体积比为 6%,平均粒度为 0.43 mm。首先根据各向异性 BG 试样 3 个主轴方向将试样分为 X(P 波速度中等), Y(P 波速度最低)和 Z(P 波速度最高,从待测岩石上分别沿 X, Y, Z 向钻取直径为 32 mm 的

岩芯。然后将岩芯加工成厚为 16 mm 的样品, 分别根据其取样岩芯的方向记为“X-样品”、“Y-样品”和“Z-样品”。试验前将样品两端磨平, 端面光洁度优于 0.08 mm, 小于样品厚度的 0.5%。试样周围用一层黏有胶带纸的铜箔箍住, 便于回收破裂试样。同时由于试样与外面的铜皮之间留有缝隙, 以及试样和胶带之间的力学性能差异很大, 胶带不会造成对试样的围压效应。试验时, 试样与试验杆之间涂有二硫化钼润滑剂以减小端面摩擦效应。

3 试验结果

本次试验中, 每个方向的试样均得到了 3 种应变率(70, 100 和 130 s⁻¹)条件下的应力-应变曲线, 且每种状态有至少 2 个重复的试验以确保试验的准确性。

3.1 试样破坏状态

试验回收的试样主要有 3 种破坏状态: 未破坏, 表面开裂, 完全破坏, 如图 2 所示。为便于显微观察, 将回收试样用稀释后的环氧树脂浸泡, 然后在 60 °C 条件下真空固化 24 h, 使试样中的裂纹在切片

时保持完好, 切片后用光学显微镜观测裂纹分布。图 2 分别给出了试验前后试样中石英和长石的裂纹分布情况。可以看出, 在原始试样中, 石英和长石中就有裂纹。在较低加载应变率下试样的石英内的裂纹只是略有扩张, 随着加载应变率的增加裂纹不断增多。当应变率达到 130 s⁻¹ 时, 试样完全破裂, 相应的裂纹分布也最为密集。

3.2 应力平衡和常应变率加载

为了获取有效的试验数据, 试验过程中合理采用入射波整形技术, 实现了试样两端的应力平衡及常应变率加载。图 3 为 3 种不同应变率下试样两端的应力平衡曲线。入射杆与试样界面的应力时间曲线(图中“入射+反射”), 由入射信号加上反射信号后计算得到; 透射杆与试样界面的应力时间曲线(图中“透射”), 由透射信号计算得到。从图中可以看到, 不同加载条件下, 在整个加载过程中试样均达到了很好的应力平衡。

反射信号反映了试样的加载应变率。对于较低的加载应变率(见图 3(a)), 当回收试样完好时, 反射信号为一个平台, 平台的高度反映了加载应变率; 而对于中等和较高的加载应变率(图 3(b), 3(c)), 试

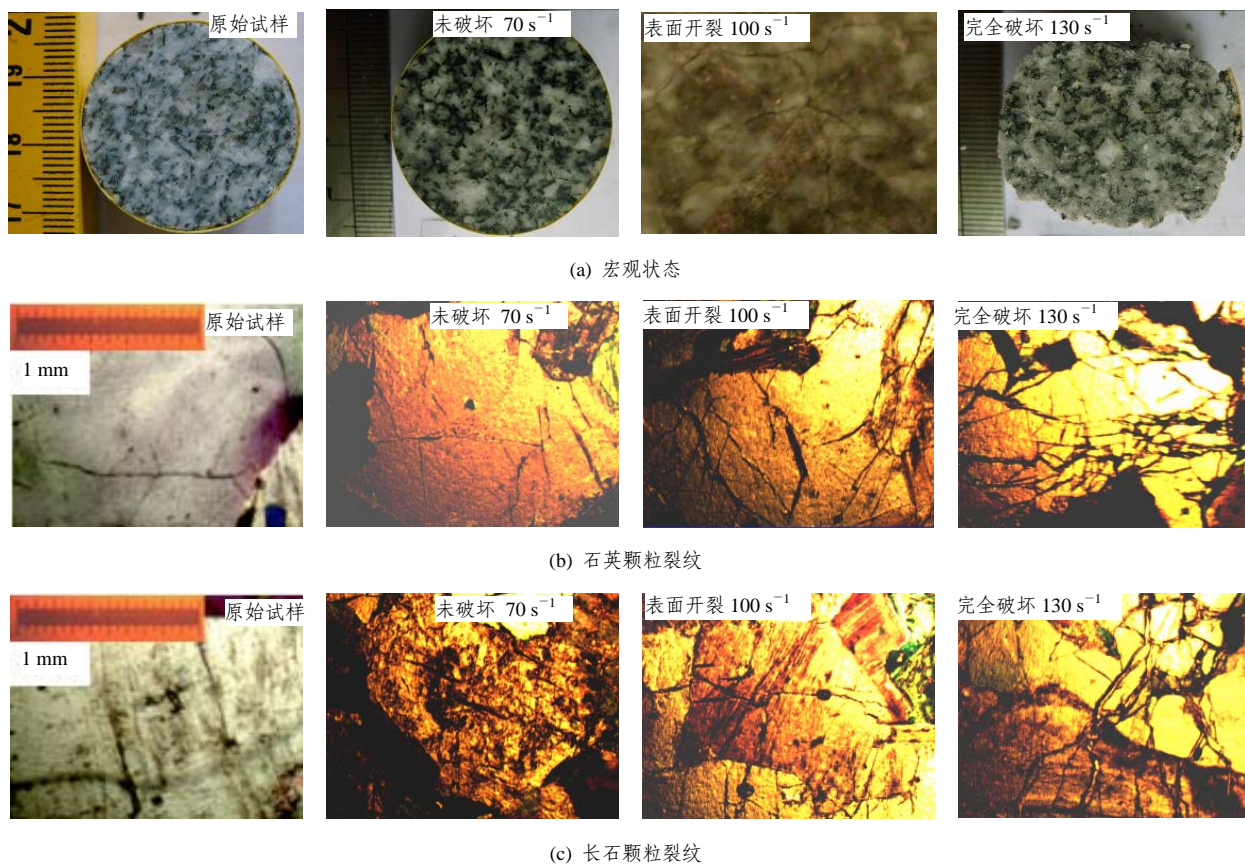


图 2 BG 试样的 3 种破坏状态

Fig.2 Photograph of recovered samples of three damage modes

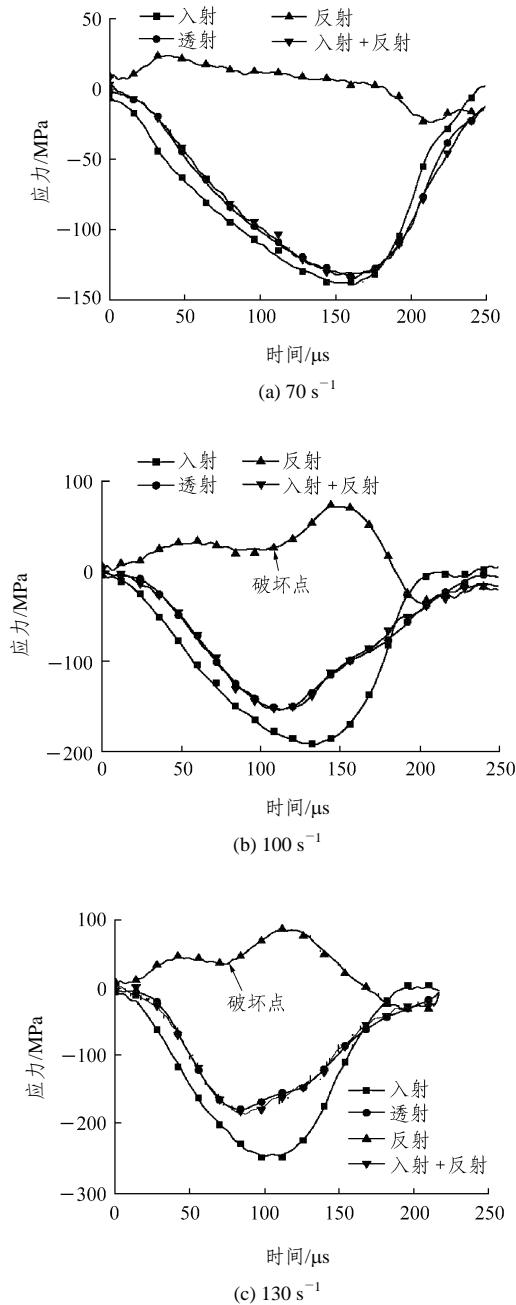


图3 3种加载应变率下应力平衡曲线
Fig.3 Stress equilibrium curves under three strain rates

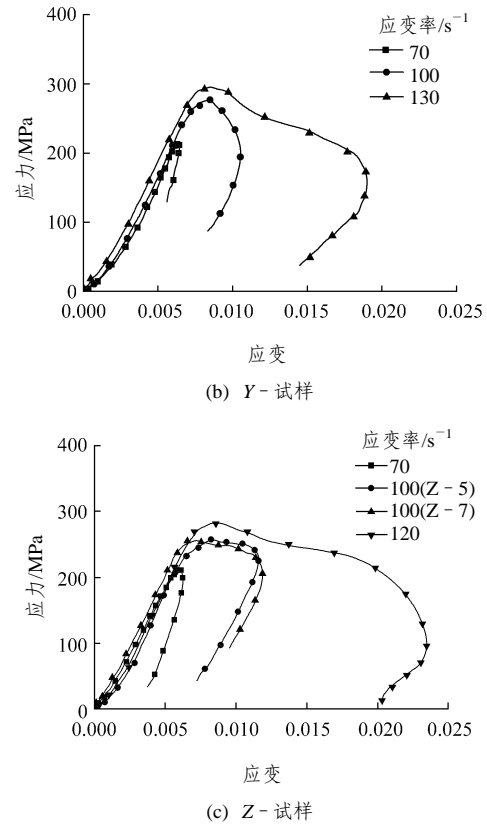
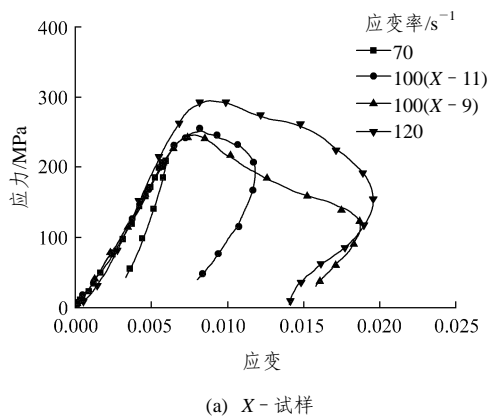


图4 3个方向试样不同应变率下的应力 - 应变曲线
Fig.4 Stress-strain curves under different strain rates of three directions

样完全破坏时，反射信号的平台后有一个迅速上升的过程，迅速上升的起点称为破坏点，表示此时试样开始破坏。反射信号(应变率信号)迅速升高是因为试样失去承载能力，应变急速增加。在这种情况下，试样的加载应变率以反射信号中初始平台的高度计算。

同时，分析入射应力与透射应力的最大值可以发现，在较低加载应变率下(见图 3(a))，透射应力与入射应力同时达到最大值。这是由于试样没有破坏，透射应力随着加载应力达到峰值。而加载应力的下降时，试样反弹，应变减小，所以反射信号不断下降，甚至出现负值。而在中性和较高加载应变率下(见图 3(b), (c))，试样完全破坏时，透射应力到达峰值的时间比入射应力早，就是加载仍然存在的情况下，试样开始破坏，透射应力降低的原因是试样失去承载能力，同时此时反射信号迅速升高。

3.3 应力 - 应变曲线

图 4 为试样 3 个方向试样不同加载应变率下的应力 - 应变曲线。从未破坏试样的应力 - 应变曲线(70 s⁻¹ 曲线)可以看出，试样残余应变较小，加载段

与卸载段基本平行, 随着入射波的卸载, 试样弹性卸载。从临界破坏试样的应力 - 应变曲线(100 s^{-1} 曲线)可以看出, 试样有一定的残余应变, 加载段与卸载段基本平行, 试样产生裂纹后仍有部分承载能力, 随着入射波的卸载, 试样弹性卸载。从完全破坏试样的应力 - 应变曲线(120 s^{-1} 曲线)可以看出, 试样残余应变较大, 加载段与卸载段不平行, 试样失去承载能力。从应力 - 应变曲线对应的积分面积可以看到, 当试样完全破坏时所吸收的非弹性功远大于试样未破坏时。对于破坏的试样, 非弹性功部分用于使试样产生破裂的断裂能, 部分转化为试样破坏后碎片的动能。

图 4(a)中试样编号分别为 X-9 和 X-11 的是相似的加载情况(应变率均为 100 s^{-1}), 但试样破坏情况完全不同。这是因为加载接近于试样的临界破坏点, 试样之间的微小差异都可能会导致最终破坏状态的完全不同。从图 4(a)也可以看出虽然最终破坏结果大相径庭, 但试样能承受的最大应力值却完全相同。从能量守恒的角度来看, 如果试样保持完整, 消耗的能量用来产生新的微裂纹; 若试样破坏, 消耗的能量用来产生裂纹外, 剩余部分转变为碎片的动能。这就解释了 X-9 与 X-11 试验的加载相似, 但消耗的能量却不同。可以认为, 消耗能量的差值主要体现在 X-9 试样碎片的动能上。

图 5(c)中应变率为 100 s^{-1} 的 2 条曲线(试验编

号分别为 Z-5 和 Z-7)对应的加载情况相似, 两者的应力应变也非常相似, 但回收的 Z-5 试样保持完好, Z-7 试样有微小的裂纹。这也是因为加载接近 Z 向试样能承受的临界点, 试样中的微小差异导致了破坏结果的不同。但由于 Z-7 试样碎片的动能很小, 以至于在应力 - 应变曲线上都看不出 Z-5 和 Z-7 两者的区别。再进一步分析其中的原因可能是, 岩石试样上产生穿透性裂纹才能导致试样完全破坏, 若没有穿透性裂纹, 即使岩石试样中有许多长裂纹也不能导致试样的破坏。而试样 Z-7 虽然产生了穿透裂纹, 试样破坏, 但剩余的能量不足以使试样的碎片分裂, 所以在加载结束时试样都保持完好, 但在回收试样过程中, 外力使试样破坏。

3.4 最大压应力

表 1 给出了试验条件及相关结果参数, σ_m 对应应力 - 应变曲线中的最大应力值。从表 1 中可以看出最大应力 σ_m 随着加载应变率的提高而提高。注意, 在中低应变率加载情况下最大应力 σ_m 并不是岩石试样的屈服应力或者动态强度。同时, 所有动态加载应变率下, σ_m 的值均大于 BG 的准静态强度 (180 MPa)。

在较低应变率(70 s^{-1})下, 试样的残余变形较小, 在较高应变率(130 s^{-1})下, 试样失去承载能力, 试样能承受的最大应力对初始微裂纹不敏感。在较低加载应变率下, 动态压缩使初始微裂纹扩张, 卸

表 1 BG 动态压缩试验结果
Table 1 BG experimental results under dynamic compression

试样编号	加载速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	加载应变率/ s^{-1}	最大应力 σ_m /MPa	平均最大应力/MPa	破坏状态
X-7	16.22	60	213.7	213.9	未破坏
X-8	16.13	70	214.0		未破坏
X-9	19.61	100	250.8	257.6	完全破坏
X-10	19.61	100	266.6		表面开裂
X-11	19.48	100	255.3		表面开裂
X-12	21.58	120	297.6	294.7	完全破坏
X-13	21.28	130	291.8		完全破坏
Y-8	16.31	70	213.1	214.1	未破坏
Y-11	16.31	70	215.1		未破坏
Y-12	19.61	100	279.3	275.7	表面开裂
Y-13	19.17	100	272.0		表面开裂
Y-9	21.28	130	298.6	296.9	完全破坏
Y-10	21.28	140	295.1		完全破坏
Z-3	16.58	60	217.1	215.9	未破坏
Z-4	16.58	70	214.7		未破坏
Z-5	19.87	100	259.0	258.7	表面开裂
Z-7	19.61	100	258.4		完全破坏
Z-9	21.28	140	287.0	291.2	完全破坏
Z-10	21.13	120	295.4		完全破坏

载后裂纹收缩,但不能收缩到原来的状态,所以还有残余应变。从波的频谱分析可以得出裂纹的扩张情况:加载波的频率约为 10 kHz,对毫米量级的裂纹不敏感,在较高加载应变率下,岩石试样从两端面开始开裂。回收试样以及试样碎片证实了这一点。此时,微裂纹不会影响试样的力学响应,因为在破裂过程中,微裂纹之间没有相互作用。而对于中间应变率(100 s^{-1})的情况,回收试样表面有新产生的裂纹,或者试样正好处于临界破坏状态(如 Z-7 试样),试样最终的破坏状态由加载条件和试样本身的初始裂纹共同决定。本研究中样品的 XZ 平面平行与解理面^[15],对于 Y-试样,加载方向垂直与初始微裂纹,裂纹难以扩张。这导致了在中间加载应变率情况下,Y-试样的最大加载应力大于 X-和 Z-试样。

4 结 论

(1) 采用单脉冲加载的 SHPB 试验技术,实现了对 BG 的常应变率加载,得到了 BG 不同加载应变率下的破坏特性及应力-应变曲线。

(2) 将回收试样用树脂包埋固定,切片后的微观分析表明,随着加载应变率的提高,回收试样中的裂纹不断增多。

(3) 不同加载条件下岩石体现出不同的破坏状态,加载应变率为 70 s^{-1} 时,BG 试样未破坏,但微观上有细微的裂纹产生;当加载应变率为 100 s^{-1} 时,BG 试样达到临界破坏状态,微观裂纹较大部分穿透晶粒;当加载应变率为 130 s^{-1} 时,BG 试样完全破坏,产生大量微观裂纹,并完全穿透晶粒。

(4) BG 各个方向最大应力 σ_m 均是应变率相关的,并且均大于 BG 的准静态强度;同时,BG 的动态压缩性能表现出一定的各项异性。在较低(70 s^{-1})与较高(130 s^{-1})应变率下试样的最大应力对初始裂纹方向不敏感,在临界加载应变率(100 s^{-1})下 Y-试样的最大应力最高。

今后,仍需进一步将对 BG 的动态拉伸及断裂性能进行研究,并分析不同花岗岩内矿物组成对破坏形态的影响。

致谢 感谢多伦多大学 Lassonde 研究中心 M. H. B. Nasser 博士为试样制备以及微观分析提供的帮助!

参考文献(References):

- [1] SANO O, KUDO Y, MIZUTA Y. Experimental-determination of elastic-constants of Oshima granite, Barre granite, and Chelmsford granite[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1992, 97(B3): 3 367 - 3 379.
- [2] TAKEMURA T, GOLSHANI A, ODA M, et al. Preferred orientations of open microcracks in granite and their relation with anisotropic elasticity[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(4): 443 - 454.
- [3] 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.(LI Xibing, GU Desheng. *Rock impact dynamics*[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994.(in Chinese))
- [4] 翟越, 马国伟, 赵均海, 等. 花岗岩在单轴冲击压缩荷载下的动态断裂分析[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(3): 385 - 390.(ZHAI Yue, MA Guowei, ZHAO Junhai, et al. Dynamic failure analysis on granite under uniaxial impact compressive load[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(3): 385 - 390.(in Chinese))
- [5] CHEN Y, NISHIYAMA T, KUSUDA H, et al. Correlation between microcrack distribution patterns and granitic rock splitting planes[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1999, 36(4): 535 - 541.
- [6] SCHEDL A, KRONENBERG A K, TULLIS J. Deformation microstructures of barre granite—an optical, sem and tem study[J]. *Tectonophysics*, 1986, 122(1 - 2): 149 - 164.
- [7] SUBHASH G, RAVICHANDRAN G, GRAY G T. Split-Hopkinson pressure bar testing of ceramics[C]// *Mechanical Testing and Evaluation*. Ohio: ASM Int. Materials Park, 2000: 1 114 - 1 134.
- [8] GOLDSMITH W, SACKMAN J L, EWERT C. Static and dynamic fracture strength of Barre granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract*, 1976, 13(11): 303 - 309.
- [9] FREW D J, FORRESTAL M J, CHEN W. A split Hopkinson pressure bar technique to determine compressive stress-strain data for rock materials[J]. *Experimental Mechanics*, 2001, 41(1): 40 - 46.
- [10] FREW D J, FORRESTAL M J, CHEN W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar[J]. *Experimental Mechanics*, 2002, 42(1): 93 - 106.
- [11] 李夕兵, 周子龙, 王卫华. 运用有限元和神经网络为 SHPB 装置构造理想冲头[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(23): 4 215 - 4 218.(LI Xibing, ZHOU Zilong, WANG Weihua. Construction of ideal striker for SHPB device based on FEM and neural network[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(23): 4 215 - 4 218.(in Chinese))
- [12] NEMAT-NASSER S, ISAACS J B. Direct measurement of Isothermal flow stress of metals at elevated temperatures and high strain rates with application to Ta and Ta-W alloys[J]. *Acta Materialia*, 1997, 45(3): 907 - 919.
- [13] NEMAT-NASSER S, ISAACS J B, STARRETT J E. Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments[C]// *Proceedings of the Royal Society of London Series A—Mathematical Physical and Engineering Sciences*. London: Royal Society, 1991: 371 - 391.
- [14] 陈荣, 卢芳云, 林玉亮, 等. 单脉冲加载的 Hopkinson 压杆实验中预留缝隙确定方法的研究[J]. *高压物理学报*, 2008, 22(2): 187 - 191.(CHEN Rong, LU Fangyun, LIN Yuliang, et al. Investigation of the pre-fixed gap in single-pulse loading technique of Hopkinson pressure bars[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2008, 22(2): 187 - 191.(in Chinese))
- [15] NASSERI M H B, MOHANTY B, YOUNG R P. Fracture toughness measurements and acoustic emission activity in brittle rocks[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2006, 163(5 - 6): 917 - 945.
- [16] NASSERI M H B, MOHANTY B, ROBIN P Y F. Characterization of microstructures and fracture toughness in five granitic rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2005, 42(3): 450 - 460.