

黑云母花岗岩对冲击荷载的动态力学响应

许金余, 刘石, 吴菲, 白二雷, 高志刚

(空军工程大学机场建筑工程系, 陕西西安, 710038)

摘要 为了研究黑云母花岗岩对冲击荷载作用时的动态力学响应, 采用大直径分离式 Hopkinson 压杆装置对黑云母花岗岩进行了动态压缩及动态劈裂抗拉试验, 分析了黑云母花岗岩的动态压缩应力-应变曲线、动态压缩破坏形态以及动态劈裂抗拉强度等动态力学参数随着冲击荷载的变化规律。结果表明: 黑云母花岗岩的动态抗压强度随着子弹冲击加载速度的增加而明显提高, 在 15.0 m/s 左右时, 动态抗压强度达到 347.1 MPa; 随着子弹冲击加载速度的增加, 黑云母花岗岩破坏的形式是从块状到粉状; 与静态劈裂抗拉强度相比, 动态劈裂抗拉强度也有较大幅度的提高。

关键词 黑云母花岗岩; SHPB 试验装置; 冲击荷载; 动态响应

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.06.018

中图分类号 TU 452 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)06-0077-04

Dynamic Mechanical Response of Biotite Granite under Shock Loading

XU Jin-yu, LIU Shi, WU Fei, BAI Er-lei, GAO Zhi-gang

(Department of Airfield and Building Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In order to study the dynamic mechanical response of biotite granite, the dynamic compression and tensile tests to biotite granite sample are implemented by the SHPB experimental device system. The dynamic compression and tensile mechanical properties are investigated. Experimental results indicate that the dynamic compressive strength increases with impact speed increasing, and reaches to 347.1 MPa when impact speed arrives at 15.0 m/s. The dynamic compressive fracture form changes from mass to powder failure when the impact speed increases. Compared with static tensile strength, the dynamic tensile strength increases significantly.

Key words: biotite granite; SHPB apparatus; shock loading; dynamic response

近年来, 地下工程、国防工程等重点基础设施的建设需要, 大大推动了岩石类材料动态力学性能的研究。CHO S H 等^[1]对花岗岩和凝灰岩动态抗拉强度应变率效应进行研究, 结果表明 2 类岩石的动态抗拉强度随应变率急速增加。Demirdag S 等^[2]运用液压伺服压力试验机和 Hopkinson 压杆装置研究了孔隙率、密度和硬度对岩石静态和动态力学

性能的影响。Zhang Y 等^[3]结合连续损伤的概念, 研究了应变率和时间对岩石的力学行为的影响。席军等^[4]利用 Hopkinson 压杆装置对干燥和水饱和大理岩进行多次冲击波在长杆岩石试件中传播的实验研究。李海波等^[5]运用 Hopkinson 压杆装置对花岗岩进行了动态压缩性试验, 研究了岩石在单轴及三轴下的破坏模式。赵伏军等^[6]运用 ANSYS 软

收稿日期: 2013-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378497, 51078350)

基金项目: 许金余(1963-), 男, 吉林靖宇人, 教授, 博士生导师, 主要从事结构工程和防护工程研究。

E-mail: jyx369@yeah.net

件对花岗岩在单一静载、动载和动静组合载荷作用下的破坏过程进行了数值模拟分析。本课题组^[7-8]利用传统大直径分离式 Hopkinson 压杆装置及高温 SHPB 系统对岩石进行了不同条件下的冲击加载试验,研究了岩石在常温及高温下的动态力学性能及动态破碎块度的分形特征。

上述研究重点集中在冲击荷载作用下岩石的动态压缩或者动态劈裂抗拉力学性能等单方面,为了系统地研究岩石对冲击荷载作用的动态力学响应,本文采用大直径分离式 Hopkinson 压杆装置系统,研究了黑云母花岗岩在冲击荷载作用下的动态压缩及动态劈裂抗拉力学性能,研究成果可为其他类型的脆性材料动态力学性能的研究提供参考。

1 黑云母花岗岩的冲击试验

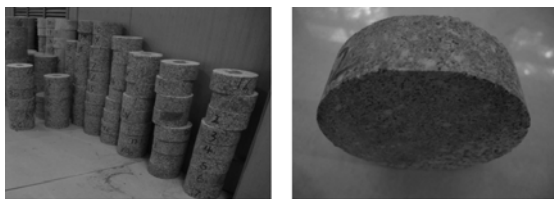
1.1 试验材料

试验用的黑云母花岗岩取自秦岭山区某重点工程,经检验鉴定,其成分见表 1,主要成分为长石、黑云母、石英和角闪石。利用实验室的试件加工设备,经过钻芯、切割、打磨 3 道工序,分别加工成 $\Phi 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的标准静压用圆柱体试件, $\Phi 100 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 、中心角为 20° 的平台巴西圆盘试件。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,见图 1。

表 1 岩石试样的矿物组成

Tab. 1 Components of rocks

矿物成分	斜长石	黑云母	石英	角闪石	钾长石	透辉石	磁铁矿	其他
含量/%	37	18	17	12	8	4	3	1



(a) 动态压缩试件 (b) 动态劈裂抗拉试件

图 1 黑云母花岗岩动态试验试件

Fig. 1 Biotite granite specimens in shock test

1.2 冲击加载试验系统

本文中所采用的 $\Phi 100 \text{ mm}$ SHPB 试验装置,主要由主体设备能源系统、测试系统 3 大部分组成,具体设备参数见文献^[7-8]。试验的基本原理是细长杆中弹性应力波传播理论,建立在 2 个基本假设的基础上^[9-10]:①平面假设,即应力波在细长杆中传播过程中,弹性杆的每个横截面始终保持平面状态;②应力均匀假设,即应力波在试件中传播 2 个来回以

上,试件中的应力处处相等。得到材料的动态应力-应变关系为:

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}(t) = \frac{c}{l_s}(\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) \\ \epsilon(t) = \frac{c}{l_s} \int_0^t (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) dt \\ \sigma(t) = \frac{A}{2A_s} E(\epsilon_i + \epsilon_r + \epsilon_t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: E , c , A 分别为压杆的弹性模量、弹性波波速和横截面积; A_s , l_s 分别为试件的初始横截面积和初始长度; ϵ_i , ϵ_r , ϵ_t 分别为杆中的入射应变、反射应变、透射应变。

2 试验结果及分析

2.1 冲击压缩试验

冲击压缩试验中,通过调节系统气压来控制子弹冲击加载速度为 5 个等级:弹速 I (11 m/s)、弹速 II (12 m/s)、弹速 III (13 m/s)、弹速 IV (14 m/s)、弹速 V (15 m/s),每个等级 3 块试样。得到黑云母花岗岩的冲击压缩应力-应变曲线如图 2 所示。

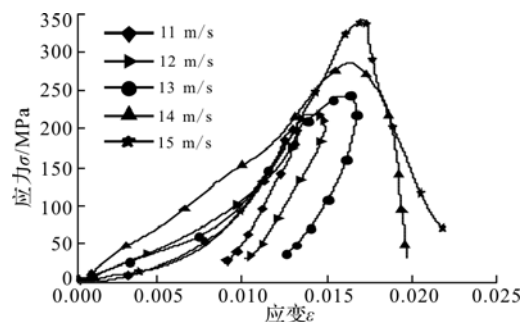


图 2 黑云母花岗岩的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of biotite granite

可以看出,在达到峰值之前,曲线大多近似为上升的直线,斜率偏离不大,能够较好地重合,说明在这一阶段试验材料具有较好的线弹性。在峰值之后,应力-应变曲线与冲击速度密切相关,曲线随着应力的不断降低变形有部分回弹现象。这一试验现象在其它岩石的研究^[11]中也有出现。从图中可看出,黑云母花岗岩的动态抗压强度随着子弹加载速度的增加有明显提高,在 15.0 m/s 左右时,动态抗压强度达到 347.1 MPa,与静态抗压强度 90.42 MPa 相比,提高了 3.2 倍。

黑云母花岗岩的冲击压缩的动态破坏形态见图 3(从左至右,冲击加载速度逐渐增加)。从破碎程度来看,随着子弹冲击加载速度的增加,试件的破碎也更加严重,岩石破碎的颗粒尺寸越来越小,块数越来越多;从破碎形式来看,当荷载增加到超过破坏阈值时,试件的内部裂纹扩展程度加剧,呈现脆性断裂破

坏形态,破坏的形式是从块状到粉状。这是因为子弹的冲击速度越高,入射波携带的能量也就越多,相

应的黑云母花岗岩试件破碎吸收的能量也就越多,破碎的也就越剧烈。

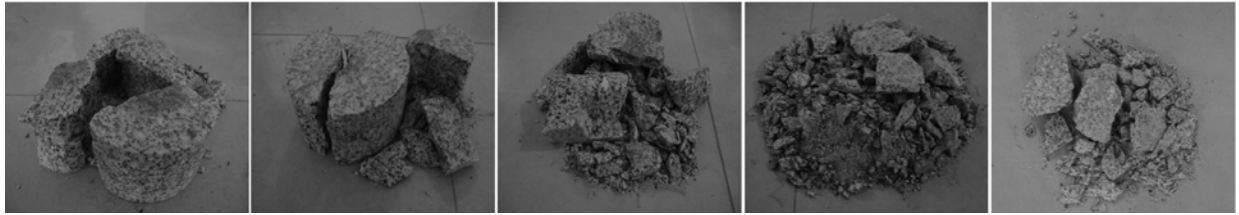


图3 黑云母花岗岩的动态压缩破坏形态

Fig. 3 Failure forms of biotite granite

2.2 动态劈裂抗拉试验

动态劈裂抗拉试验中,通过调节系统气压来控制子弹冲击加载速度为3个等级:弹速I(3 m/s),弹速II(5 m/s),弹速III(7 m/s),每个等级3块试样,取不同试样的平均值作为黑云母花岗岩的动态劈裂抗拉强度。黑云母花岗岩的动态劈裂抗拉强度随子弹冲击加载速度的变化关系见图4。

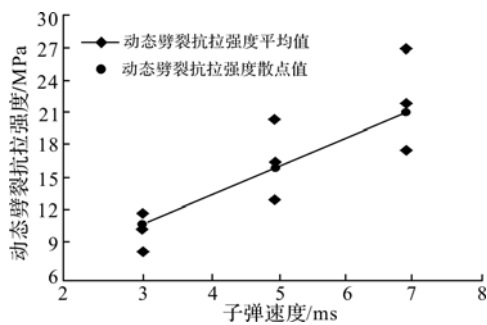


图4 黑云母花岗岩的动态劈裂抗拉强度的变化

Fig. 4 Dynamic tensile strength of biotite granite under shock split loading

可以看出,随着子弹冲击加载速度的增加,黑云母花岗岩的动态劈裂抗拉强度分别为10.82 MPa、17.01 MPa、22.36 MPa,与黑云母花岗岩的静态劈裂抗拉强度8.89 MPa相比,分别增加了22%、91%、151%。动态劈裂抗拉强度表现出明显的冲击加载速度相关性,随着加载速度的提高而迅速增加。冲击荷载不仅对黑云母花岗岩的压缩强度有一定的强化效应,对劈裂抗拉强度也有明显的增强作用。

3 结语

为了全面研究黑云母花岗岩对冲击荷载作用时的动态力学响应,本文采用大直径分离式Hopkinson压杆装置对黑云母花岗岩进行了动态压缩及动态劈裂抗拉试验,研究了其动态压缩及动态劈裂抗拉性能,得到如下结论:

1) 黑云母花岗岩的动态抗压强度随着子弹加载速度的增加而明显提高,在15.0 m/s左右时,动态抗压强度达到347.1 MPa,与静态抗压强度

90.42 MPa相比,提高了3.2倍。

2) 在冲击荷载作用下,随着子弹冲击加载速度的增加,黑云母花岗岩内部的裂纹扩展程度加剧,呈现脆性断裂破坏形态,破坏的形式是从块状到粉状。

3) 随着子弹冲击加载速度的增加,黑云母花岗岩的动态劈裂抗拉强度表现出明显的冲击加载速度相关性,分别为10.82 MPa、17.01 MPa、22.36 MPa,与静态劈裂抗拉强度相比,分别增加了22%、91%、151%。

参考文献(References):

- [1] CHO S H, OGATA Y J, KANEKO K. Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2003, 40(5): 763-777.
- [2] Demirdag S, Tufekci K, Kayacan R, et al. Dynamic mechanical behavior of some carbonate rocks [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2010, 47(2): 307-312.
- [3] Zhang Y, Karrech A, Schaub P M, et al. Modeling of deformation around magmatic intrusions with application to gold-related structures in the Yilgarn Craton, Western Australia [J]. Tectonophysics, 2012, 526-529: 133-146.
- [4] 席军, 余勇, 席道瑛. 大理岩对多次冲击波的非线性动态响应 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 2850-2857.
XI Jun, YU Yong, XI Daoying. Nonlinear dynamic response of marble to repeated shock wave [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2011, 30(S1): 2850-2857. (in Chinese)
- [5] 李海波, 赵坚, 李俊如, 等. 花岗岩动态压缩力学特性的试验以及理论研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2001, 20(4): 474-477.
LI Haibo, ZHAO Jian, LI Junru, et al. Experimental and theoretical study on dynamic compressive mechanical properties of granite [J]. Journal of Liaoning technical university: natural science, 2001, 20(4): 474-477. (in Chinese)

- [6] 赵伏军,谢世勇,潘建忠,等. 动静组合载荷作用下岩石破碎数值模拟及试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011,33(8):1290-1295.
ZHAO Fujun, XIE Shiyong, PAN Jianzhong, et al. Numerical simulation and experimental investigation on rock fragmentation under combined dynamic and static loading[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2011,33(8):1290-1295. (in Chinese)
- [7] 许金余,刘石. 大理岩冲击加载试验碎块的分形特征分析[J]. 岩土力学, 2012,33(11):3225-3229.
XU Jinyu, LIU Shi. Research on fractal characteristics of marble fragments subjected to impact loading [J]. Rock and soil mechanics, 2012, 33(11): 3225-3229. (in Chinese)
- [8] Liu Shi, Xu Jinyu. Study on dynamic characteristics of marble under impact loading and high temperature [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2013,62:51-58.
- [9] Ravichandran G, Subhash G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing ceramics in a split Hopkinson pressure bar [J]. Journal American ceramic society, 1994,77(1):263-267.
- [10] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社, 2005:52-60.
WANG Lili. Foundation of stress waves [M]. Beijing: National defense industry press, 2005:52-60. (in Chinese)
- [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(2):273-280.
LIU Shi, XU Jinyu, ZHI Lepeng, et al. Experimental research on mechanical behaviors of marble after high temperatures subjected to impact loading [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32(2):273-280. (in Chinese)

本刊相关链接文献:

- [1]张仲林,许金余,朱笃美,等. 爆炸荷载作用下钢纤维混凝土梁的动力响应分析[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2004,5(5):92-94.
- [2]李秀地,徐干成,郑颖人. 爆炸荷载作用下地下结构抗层裂钢板机理分析[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2005,6(5):76-78.
- [3]许金余,罗鑫,吴菲,白二雷,高志刚. 地质聚合物混凝土动态劈裂拉伸破坏的吸能特性[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2013,14(5):85-88.
- [4]敦晓,王硕太,黄灿华,等. 机场道面新型混凝土抗裂性试验[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2006,7(6):29-31.

(编辑:徐敏)

(上接第76页)

的复合导引律。仿真表明,与比例导引律相比,复合导引律更能快速、精确地命中目标,且能更逼真地描述真实的导引弹道。但是模拟非标准气象要素随空间位置变化时精确度不高,因此,还需要在今后的研究工作中进一步完善。

参考文献(References):

- [1] 赵蕴杰,曹迎春,张庆斌,等. 基于 Matlab 的三维动态弹道仿真研究[J]. 计算机仿真, 2007,24(6):57-61.
ZHOU Yunjie, CAO Yingchun, ZHANG Qingbin, et al. Three-dimensional trajectory simulation of air defense missile based on matlab [J]. Computer simulation, 2007,24(6):57-61. (in Chinese)
- [2] 胡正东,曹渊,蔡洪. 一种打击地面固定目标的自适应比例导引率[J]. 系统仿真学报, 2009,21(13):4084-4087.
HU Zhengdong, CAO Yuan, CAI Hong. Adaptive proportional guidance law for ground stationary target [J]. Journal of system simulation, 2009,21(13):4084-4087. (in Chinese)
- [3] 沈桐立,田永祥,葛孝贞,等. 数值天气预报[M]. 北京:气象出版社, 2003.
SHEN Tongli, TIAN Yongxiang, GE Xiaozhen, et al. Numerical weather prediction [M]. Beijing: China meteorological, 2003. (in Chinese)
- [4] 沈明辉,罗继勋,于雷. 空地导弹的一种复合导引法[J]. 系统工程与电子技术, 2003,25(4):469-471.
SHEN Minghui, LUO Jixun, YU Lei. A combined guidance method for the air-to-ground missile [J]. Systems engineering and electronics, 2003, 25(4): 469-471. (in Chinese)
- [5] 朱永文,娄寿春,周林. 对抗仿真系统中的防空导弹比例导引法仿真弹道设计[J]. 系统仿真学报, 2005,17(12):3095-3097.
ZHU Yongwen, LOU Shouchun, ZHOU Lin. Proportional navigation trajectory simulation in air defence system [J]. Journal of system simulation, 2005, 17(12):3095-3097. (in Chinese)

(编辑:田新华)