

文章编号: 1001-4888(2009)06-0587-05

动静组合加载作用下花岗岩破碎的分形特征^{*}

王其胜¹, 李夕兵²

(1. 嘉应学院 土木工程系, 广东 梅州 514015; 2. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 在分离式霍普金森压杆实验装置上进行了花岗岩破坏的动静组合加载实验。通过对受载后岩样破碎块度进行筛分统计, 得到了该加载条件下岩石破碎的粒度分布。在此基础上, 通过理论计算公式, 进一步得到了相应的破碎分形维数, 分别探讨了静载荷和冲击载荷对分形维数的影响。结果表明, 动静组合加载作用下花岗岩破碎分形维数在 2.0~2.8 之间; 相同静载不同动载下, 花岗岩的破碎分形维数与试样的应变率有关, 随应变率增大而增大; 而在相同冲击动载下, 静载荷变化对分形维数的影响不大。

关键词: 动静组合加载; 花岗岩; 破碎块度; 分维

中图分类号: TU45

0 引言

岩石破碎的难易程度、能耗、块度分布等是凿岩、爆破、采矿、选矿中的重要参数和衡量指标, 这一课题已引起学界的广泛关注, 迄今为止诸多学者在此方面也进行了大量的研究工作^[1-4]。对岩石破碎的研究, 有人从微观机理如断裂入手进行分析^[5-8], 有人从细观损伤角度进行研究^[9,10], 也有人从宏观统计角度进行解释^[11-13]。这些研究成果对我们认识岩石的破碎机制都起到过重要作用, 但由于岩石破裂与破碎机理的复杂性, 至今仍缺乏普适的成果。近年来, 分形理论成功地解释了岩石力学中的许多现象, 被应用于表面描述、孔隙分析、裂纹扩展、块度统计等各个方面^[14,15]。纵观以往的研究基本限于纯动载和静载的情况, 以致动静组合加载作用下岩石破碎的分形研究显得相对不足。事实上, 在工程实践及自然界中, 如矿岩开挖、岩爆、滑坡, 有相当一部分岩石在承受动载荷作用之前, 已经处于一定的静应力或地应力状态之中, 这属于典型的动静组合加载问题。因此, 研究静应力与动载荷联合作用下的岩石破碎对实际岩体工程具有更大的现实意义。

那么, 在动静组合加载下, 岩石的破碎表现出什么样的特性? 符合什么样的规律? 是否有分形特性? 其分维值和轴向静载、冲击载荷有什么样的关系? 这就是本文要研究的问题。

1 分形理论

岩石破碎受外加载荷和内部结构因素的综合控制, 其过程极其复杂, 一般从破碎后的块度分布情况来评价岩石破碎效果。通过理论分析、实验室和现场实验研究, 人们提出了各种各样的破碎块度分布统计函数, 其中最有代表性的有 R-R (Rosin-Rammler) 分布和 G-G-S (Gate-Gaudin-Schuhmann) 分布^[16,17]。

^{*} 收稿日期: 2009-05-25; 修订日期: 2009-08-19

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(编号: 50490274); 梅州市自然科学研究项目(编号: 2009KJ23)

通讯作者: 王其胜(1970—), 男, 博士, 副教授。主要研究领域: 岩石动态试验技术、岩体灾害发生机理及防护。E-mail: wangqis1970@126.com

G-G-S 分布的表达式为:

$$y = (r/r_m)^b \quad (1)$$

其中 r_m 为分布参数,当 $r=r_m$ 时筛下量为 100%,即为岩块最大尺寸; b 为岩块分布参数,为 log-log 坐标下函数直线的斜率。

根据 Turcotte 等的研究结果,岩石破碎时,其分形维数 D 可以由碎块的线性特性尺寸 r 和大于该尺寸的碎块个数 N 表示:

$$N \propto r^{-D} \quad (2)$$

其中^[17]:

$$D = 3 - b \quad (3)$$

这样,从筛分试验结果中得到不同粒级的筛下累计量就可得到相应的破碎分形维数。

2 动静组合加载试验

如图 1 所示为霍普金森试验系统,在该系统上进行了花岗岩破坏的动静组合加载试验。加载方案分为两种:(1)固定动载荷,改变轴向静载荷;(2)固定轴向静载,改变动载荷。如图 2 所示为相同动载,不同静载下花岗岩的应力应变曲线。

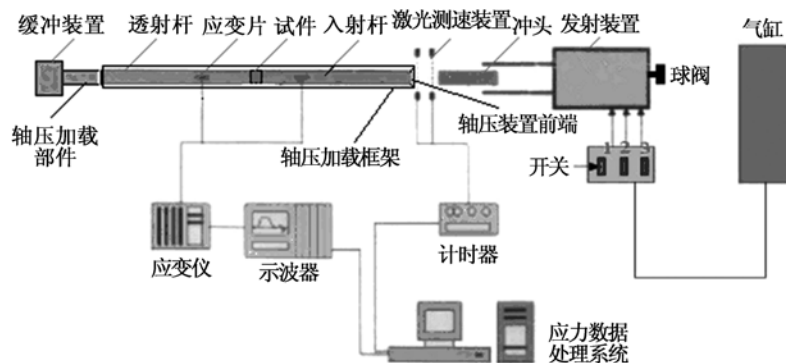


图 1 动静组合动载试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rock under coupled static-dynamic load

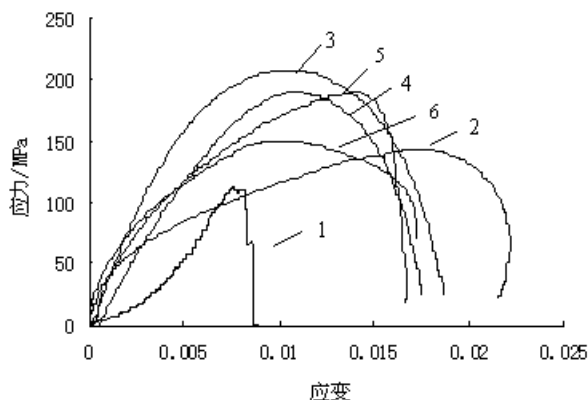


图 2 相同动载,不同静载下花岗岩的应力应变曲线

(轴向静载:①常规静态压缩实验曲线;②0 MPa;③27 MPa;④54 MPa;⑤72 MPa;⑥90 MPa)

Fig. 2 Stress and strain curves of granite under same dynamic and different static load

(Axial static loading:①Compression experimental curves under normal static state;

②0 MPa;③27 MPa;④54 MPa;⑤72 MPa;⑥90 MPa)

3 不同载荷下岩石破碎块度

不同加载条件下,岩石破碎块度如图 3 所示。对本文不同动静组合加载下岩石破碎的块度进行筛

分统计,图4(a)给出了纯动载下花岗岩破碎的粒度分布,图4(b)了相同动载不同静载下花岗岩破碎的粒度分布,图4(c)给出了相同静载不同动载下的花岗岩破碎的粒度分布。

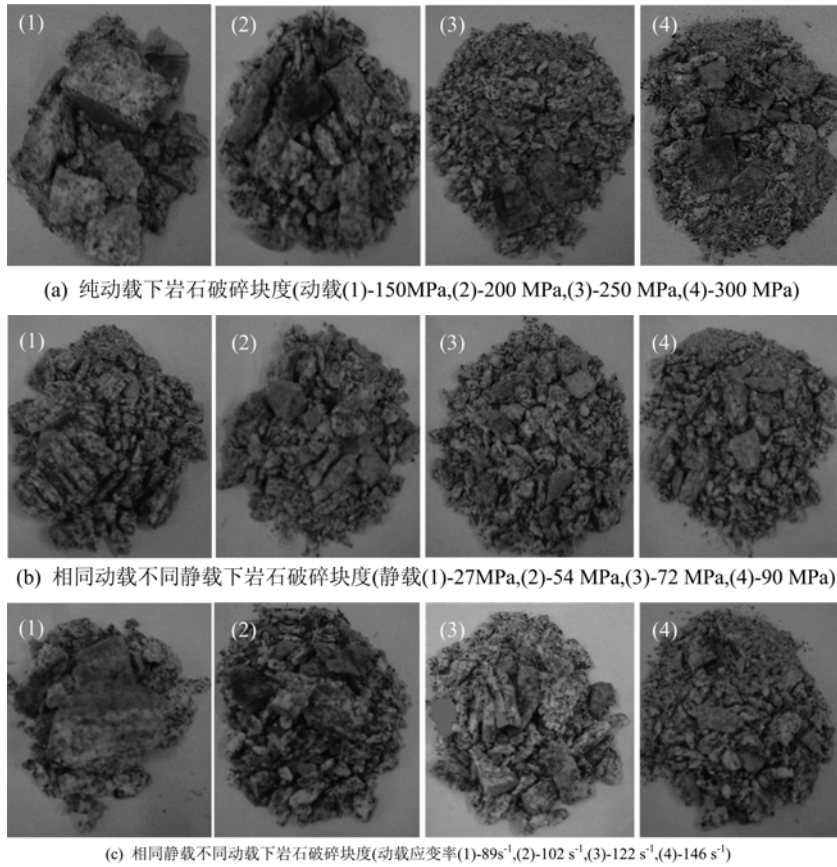


图3 不同荷载下岩石破碎图片

Fig. 3 Pictures of rock fragmentation under different load

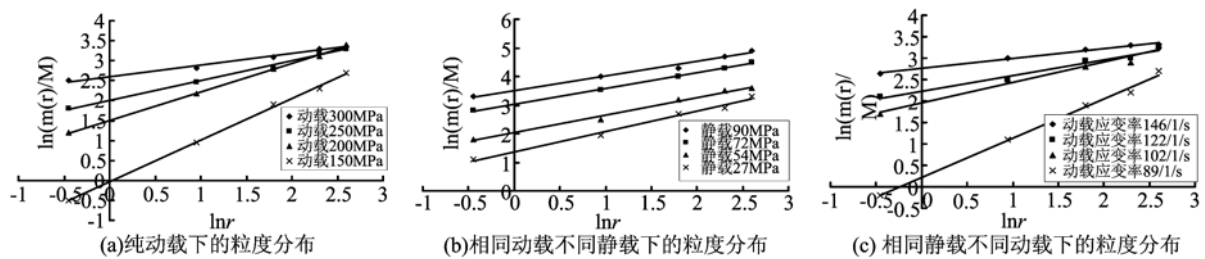


图4 花岗岩在不同荷载下的破碎块度分布

Fig. 4 Fragmentation distribution of granites under different load

4 不同荷载下岩石破碎的分维变化

由式(3)计算得到的不同荷载下破碎分维值及其变化规律如图5所示。

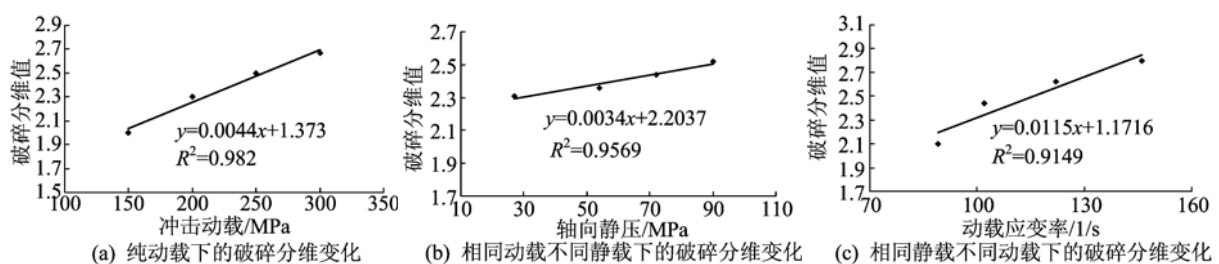


图5 花岗岩在不同荷载下的破碎分维特征

Fig. 5 Fractal dimension feature of granites under different load

从图中可以看出:不同载荷下花岗岩的破碎分维值一般在 2.0~2.8 之间,与大多实验室条件下得到的岩石破碎分维值比较一致^[15,16]。从图中还可以看出,岩石的破碎分维值与试样的应变率有关,而在同样冲击动载下,静载荷变化对分形维数的影响不大。

5 结 论

在霍普金森试验系统上进行了花岗岩破坏的力学试验,在对岩样的破碎块度进行统计分析的基础上,得到了不同加载条件下岩石破碎的分形维数值,并且讨论了轴向静载和冲击载荷对分维值的影响。

- (1) 纯动载下,岩石破碎分维值随冲击载荷增大而增大;
- (2) 相同静载不同动载下,花岗岩的破碎分维值与试样的应变率有关,随应变率增大而增大;
- (3) 相同冲击动载不同静载下,静载荷变化对分形维数的影响不大。

参考文献:

- [1] 谢和平,高峰,周宏伟等. 岩石断裂和破碎的分形研究[J]. 防灾减灾工程学报,2003,23(4):1-9 (XIE Heping, GAO Feng, ZHOU Hongwei, et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003,23(4):1-9 (in Chinese))
- [2] Zhao Yonghong. Crack pattern evolution and a fractal damage constitutive model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(3):349-366.
- [3] Xu Yongfu. Explanation of scaling phenomenon based on fractal fragmentation [J]. Mechanics Research Communications, 2005, 32(2): 209-220.
- [4] Bazant Z P. Is the cause of size effect on structural strength fractal or energetic-statistical? [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(1):1-31.
- [5] 张晓春,杨挺青,缪协兴. 岩石裂纹演化及其力学特性的研究进展[J]. 力学进展,1999,29(1):97-104 (ZHANG Xiaochun, YANG Tingqing, MIAO Xxiexing. The new advances of cracks development and mechanical properties of rock[J]. Advances in Mechanics, 1999,29(1):97-104 (in Chinese))
- [6] 黄明利,唐春安,朱万成. 岩石单轴压缩下破坏失稳的 SEM 即时研究[J]. 东北大学学报,1999,20(4):426-429 (HUANG Mingli, TANG Chunan, ZHU Wancheng. Real-Time SEM Study on Rock Failure Instability Under Uniaxial Compression [J]. Journal of Northeastern University Natural Science, 1999, 20(4): 426-429 (in Chinese))
- [7] 李世恩,尹祥础,李红等. 闭合裂纹面相互作用过程中的多点破裂现象及其分析[J]. 地球物理学报,1989,32(s1):174-180 (LI Shiyu, YIN Xiangchu, LI Hong, et al. Fractures phenomenon and analysis of closed crack surfaces during its interaction[J]. Acta Geophysica Sinica, 1989,32(s1):174-180 (in Chinese))
- [8] 孔圆波,华安增. 受压岩石裂隙相互作用导致破裂的机理[J]. 地球物理学报,1995,38(6):767-773 (KONG Yuanbo, HUA Anzeng. Mechanism of crack-interaction resulting in faulting in brittle rocks under compression[J]. Acta Geophysica Sinica, 1995,38(6):767-773 (in Chinese))
- [9] 凌建明,孙钧. 脆性岩石的细观裂纹损伤及其时效特征[J]. 岩石力学与工程学报,1993,12(4):304-312 (LING Jianming SUN Jun. On Mesocrack damage of brittle rocks and its time-dependent characteristics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993,12(4):304-312 (in Chinese))
- [10] 曹文贵,方祖烈,唐学军. 岩石损伤软化统计本构模型之研究[J]. 岩石力学与工程学报,1998,17(6):628-633 (CAO Wengui, FANG Zulie, TAN Xuejun. A study of statistical constitutive model for soft and damage rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998,17(6):628-633 (in Chinese))
- [11] 白以龙,柯孚久,夏蒙芬. 固体中微裂纹系统统计演化的基本描述[J]. 力学学报,1991,23(3):290-297 (BAI Yilong KE Fujia XIA Mengfen. Formulation of statistical evolution of microcracks in solids [J]. Acta Mechanica Sinica, 1991,23(3):290-297 (in Chinese))
- [12] Schicker J, Pfuff M. Statistical modelling of fracture in quasi-brittle materials [J]. Advanced Engineering Materials, 2006, 8(5):406-410.
- [13] Astrom J A. Statistical models of brittle fragmentation[J]. Advances in Physics, 2006, 55(3-4):247-278.
- [14] Hansen J P, Skjeltorp A T. Fractal pore space and rock permeability implications[J]. Physical Review B, 1988,

38(4):2635—2638.

- [15] Kulatilake P H, Balasingam P, Park Jinrong, et al. Natural rock joint roughness quantification through fractal techniques[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 24(5):1181—1202.
- [16] Grady D E, Kipp M E. Geometric statistics and dynamic fragmentation[J]. Journal of Applied Physics, 1985, 58(3): 1210—1222.
- [17] 杨军,金乾坤,黄凤雷. 岩石爆破理论模型和数值计算[M]. 北京:科学出版社,1999 (YANG Jun, JIN Qiankun, HUANG Fenglei. Rock explosion theory model and numerical calculation[M]. Beijing: Science Press, 1999(in Chinese))

Fractal Property of Granite Failure under Coupled Static-Dynamic Load

WANG Qi-sheng¹, LI Xi-bing²

(1. Department of civil engineering, Jiaying university, Meizhou 514015, Guangdong, China;

2. Resources and Safety Engineering School, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Granite failure experiments under coupled static-dynamic load were carried out on SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar) test equipment. Granularity distribution was obtained through screening and statistics of rock sample fragmentation. Furthermore, the fractal dimension value was derived based on theoretical formula and the effect of static load and impact load on fractal dimension value was investigated, respectively. Results show that the fractal dimension values of granite under coupled static-dynamic load range from 2.0 to 2.8; under fixed static load and different dynamic load, the fractal dimension values are related with strain rate of samples and increase along with strain rate; under fixed dynamic load, static load has a little effect on fractal dimension values.

Keywords: coupled static-dynamic load; granite; fragmentation; fractal dimension