

单双压头动静组合载荷破岩数值试验研究

王宏宇^{1,2}, 赵伏军³, 赵建光^{1,2}

(1. 湖南省地质科学研究所, 湖南长沙 410007;

2. 湖南省国土资源规划院 湖南长沙 410007; 3. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南湘潭 411201)

摘要:应用岩石破裂过程分析软件 RFPA^{2D}, 以脆性岩石花岗岩为研究对象, 进行了对单压头和双压头在不同加载模式下的破碎数值试验, 采用声发射活动作为衡量标准表征破岩效果. 结果表明: 所加静载较小或动载荷应力波幅值小于岩石强度时破岩效果差; 动静组合载荷加载条件下单压头和双压头均能大幅提高岩石破碎效果, 且单压头破岩声发射能量大于双压头; 双压头动静组合载荷破岩时压头间距对破岩效果有影响.

关键词:动静组合载荷; 双压头; 数值试验; 声发射; 破岩效果

中图分类号: TU459 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2014)04-0037-05

Numerical experiment of rock fragmentation under single and dual – cutter by combined dynamic and static loads

WANG Hongyu^{1,2}, ZHAO Fujun³, ZHAO Jianguang^{1,2}

(1. Hunan Institute of Geological Sciences, Changsha 410007, China;

2. Hunan Provincial Institute of Land and Resources Planning, Changsha 410007, China;

3. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Numerical crushing experiment of brittle rock (granite) by different load patterns under single – cutter head and dual – cutter head has been done with the rock failure process analysis software – RFPA^{2D}. Acoustic emission activities are used to measure the rock crushing effect. Results show that (1) If the static load is too small or the stress wave amplitude is smaller than rock strength, the rock crushing effect is very poor. (2) No matter it is single – cutter head or dual – cutter head, coupled static and dynamic loads can raise the rock crushing effect substantially. In addition, the acoustic emission energy under single cutter head is more than dual – cutter head. (3) The head space has an effect on the rock crushing effect of rock crushing by combined dynamic and static loads under dual – cutter head.

Key words: coupled static and dynamic loads; dual – cutter head; numerical experiment; acoustic emission (AE); rock crushing effect

机械破碎岩石较之爆破破岩具有连续性强、安全性好、效率高等优点. 因此该破岩方法广泛应用于矿山开采、隧道掘进、油气井钻探等岩土工程领域, 并日益发挥着重要作用. 单一静载荷或冲击载荷作用下的破岩机理、破岩效果及加载形式已经研究的比较深透^[1-4]. 近年来, 很多学者对动静组合载荷破碎岩石开展了大量研究, 取得了丰硕成果.

所谓动静组合载荷破岩即先施加一个静载荷, 静载施加完后再加冲击载荷, 冲击载荷应力波与先前静载荷产生的应力场叠加来破碎岩石. 赵伏军教授在自己研制的多功能动、静载荷破岩试验台上进行了动、静及动静耦合载荷破碎花岗岩的试验, 得出了组合载荷能大幅提高破岩效果^[5,6]. 左宇军在由 INSTRON 装置和水平静压加载装置组成的试验机

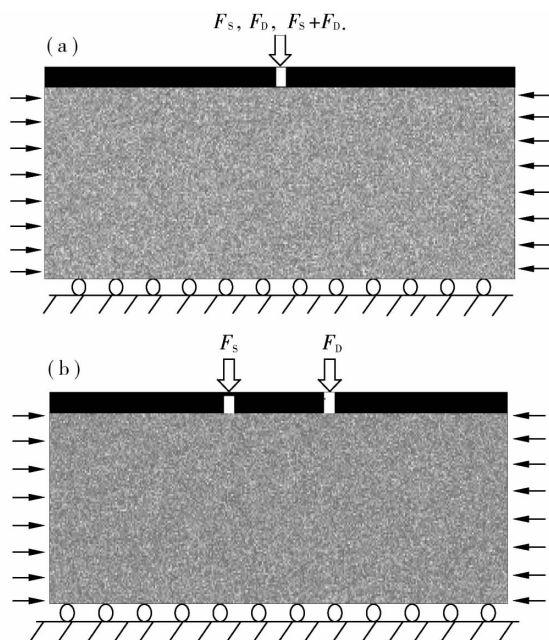
上进行了动静组合载荷破碎红砂岩的试验,得出了随静载荷的增加,岩石破碎程度一般会增大的结论^[7,8].然而,以往学者对动静组合载荷破碎的研究主要集中在岩石破碎特征、破碎程度和破岩比功等方面.对于动静组合加载破碎岩石过程中的一个重要现象——声发射特点的研究则较少^[9-13].因此,开展不同压头模式下动静组合载荷破岩过程中声发射特征的研究对于丰富岩石破碎理论以及开发研制新型矿岩破碎机械具有十分重要的理论意义及工程应用价值.本文以工程中常见的代表性硬岩花岗岩为对象,对静载、动载及动静组合载荷作用下单压头和双压头破岩分别进行数值试验研究.

1 数值试验模型

1.1 模型

应用岩石破裂与失稳分析系统 RFPA^{2D}数值分析软件进行不同载荷破碎花岗岩的数值试验.单压头动静组合载荷破岩即只分析一个压头先施加一定静载荷,静载荷施加完后再施加一定冲击载荷破碎岩石.双压头组合载荷破岩是先在一个压头施加一定静载荷,静载施加完后再通过另一个压头施加一定冲击载荷破碎岩石.

以花岗岩为研究对象,探讨单压头以及双压头间距 15 mm 时动静组合加载条件下破碎的声发射特征.试样的几何尺寸及加载边界条件如图 1 所示.岩石几何尺寸为 300 mm × 100 mm,共划分为 300 × 100 = 30 000 个等面积单元, F_s 代表静载荷, F_D 代表动载荷.压头材料参数按硬质合金刀具参数取值.



(a)单压头加载模型; (b)双压头加载模型
图 1 加载模型

1.2 材料力学参数

RFPA^{2D}数值分析软件中岩石单元的力学性质(包括弹性模量、强度等)按照韦布尔(Weibull)统计分布来赋值.分布函数为

$$\varphi(\alpha) = \frac{m}{\alpha_0} \left(\frac{\alpha}{\alpha_0} \right)^{m-1} e^{-\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^m}$$

式中, m :分布函数的形状参数,其物理意义反应了岩石介质的均质性,取值范围为 1 ~ 100. m 值越大,表明岩石越均匀.本模型中岩石力学参数如下:均值度 $m = 3$,弹性模量 $E = 67$ GPa,强度 $R_c = 180$ MPa,泊松比 $\mu = 0.3$,拉压强度比 $T/C = 1/10$.压头按硬质合金刀具参数力学参数:均值度 $m = 100$,弹性模量 $E = 800$ GPa,强度 $R_c = 8$ GPa,泊松比 $\mu = 0.08$.

1.3 加载条件

本文研究花岗岩在单压头和双压头施加不同载荷条件下的破碎效果.加载条件选择 RFPA^{2D}动态版内置的动静组合加载条件.静载荷通过位移加载的方式每步 0.005 mm,共加载 100 步.从第 101 步开始施加一个动载荷应力波,为简化计算,应力波被假设成如图 2 所示的梯形脉冲应力,应力波幅值为 150 MPa,小于岩石强度 180 MPa.

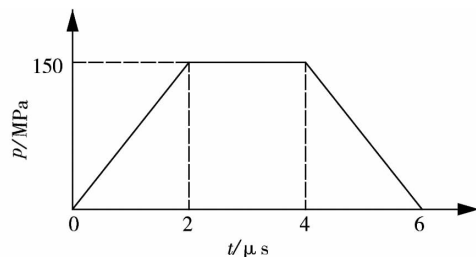


图 2 动态加载应力波

2 结果分析

选取单、双压头不同组合加载试验中具有代表性的应力图和声发射图进行分析.应力图中各单元应力大小用不同亮度表示,亮度越高代表单元所受应力越大,黑色部分为已破碎单元.声发射图中圆圈大小表示单元破坏时声发射能量的大小,其大小与该单元的强度成正比.圆圈的多少表示声发射事件数量的多少,黑色区域代表累计声发射情况.选取模拟最终结束(第 800 步)的应力图和声发射图进行分析.并从试验结果调出各种加载条件下声发射数据并绘制成图,以累积声发射能量为衡量指标分析破岩效果,如图 3 ~ 图 7 所示.



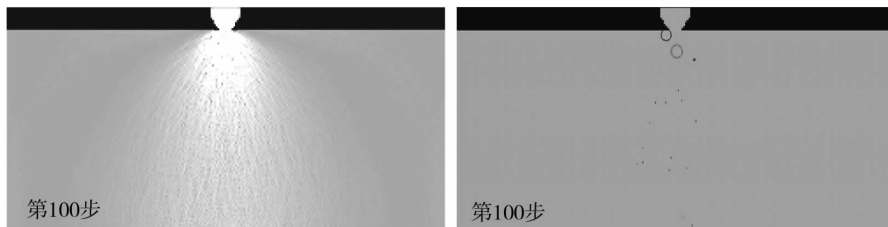
图 3 单一静载破岩应力图和声发射图



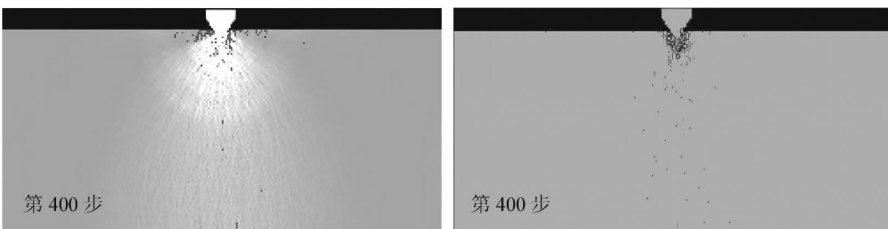
图 4 单一动载破岩应力图和声发射图

1) 由图 3 和图 4 单压头施加静载荷或动载荷破碎花岗岩结果表明当静载荷较小或动载荷应力波幅值小于岩石强度时,所加载荷不足以使压头侵入而大范围破碎岩石,只能使压头下方一定区域岩石内产生高应力区(应力图中高

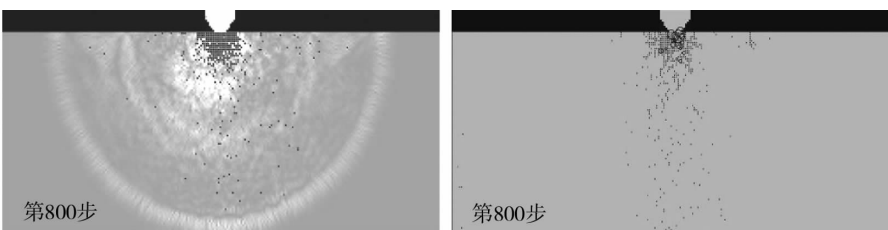
亮部分). 而由于岩石非均质体,岩石模型内单元的力学性质按照韦布尔统计分布,存在力学性质较弱单元,因此,所加载荷破坏岩石个别内力学性质较弱的单元,发生少量声发射事件(声发射图中圆圈).



(a) 静载施加完毕(第 100 步)时应力图和声发射图



(b) 动静组合载荷施加中(第 400 步)应力图和声发射图



(c) 动静组合载荷施加完毕时(第 800 步)应力图和声发射图

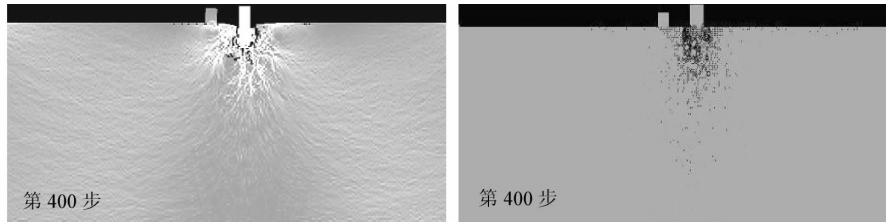
图 5 单压头动静组合载荷破岩应力图和声发射图

2) 由图 5 单压头动静组合加载破岩结果可以看出:与单一静载相同,如静载荷较小,则当静载荷

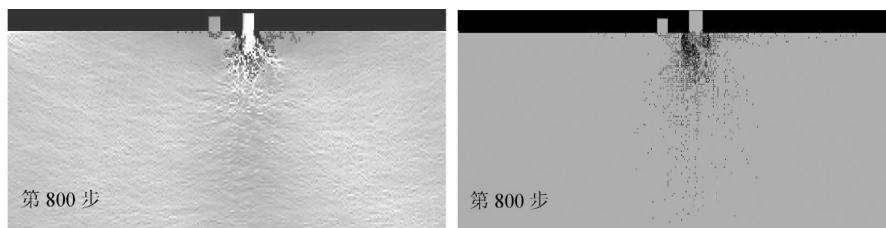
施加完毕(第 100 步)时,只在压头下方一定范围内形成高应力区,且发生少量声发射事件. 而当动

载荷继续施加后,应力波由压头传递到岩石内波阵面以近似半圆形状在岩石内传播(第400步)并破碎岩石单元.最终(第800步)在压头下方形成大量的破碎单元(应力图中黑点),对应声发射图中压头下方也出现大量声发射事件(声发射图中黑

点).对比图3和图4结果显示,动静组合载荷加载条件下虽然静载或动载都不足以使压头侵入而形成破碎坑,但动载荷在静载荷使岩石内形成高应力区的基础上与其共同作用使得压头下方产生明显的破碎坑.



(a) 动静组合载荷施加中(第400步)应力图和声发射图



(b) 动静组合载荷施加完毕时(第800步)应力图和声发射图

图6 双压头动静组合载荷破岩应力图和声发射图

3)由图6可以看出,与图5结果相同.在双压头动静组合载荷破岩时,虽然所加静载或动载均不足以使岩石形成明显破碎坑.但同样地,在一个压头施加静载荷使岩石内形成高应力区后,在其旁通过另一个压头施加动载荷最终(第800步)也可使得压头下方形成明显的破碎坑(应力图中黑色部分),同时发生大量声发射事件(声发射图中黑点).

4)由上述数值试验结果表明,无论是单压头还是双压头,动静组合载荷较之单一静载或动载能大幅提高破岩石效果.

5)由累积声发射能量图可以看出,所施加的静载荷较小(100步内)时,压头下方岩石仅发生弹性变形,极少单元会破碎,声发射能量几乎为0;施加动载荷应力波幅值小于岩石强度时,虽然不足以破碎大量岩石单元,但随着应力波在岩石内传播,也可使岩石内少量力学性质较弱单元破碎并释放出声发射能量,累积声发射能量缓慢增加,到后期随着应力波的衰减不再有岩石单元破碎,累积声发射能量不再增加;无论是单压头还是双压头动静组合载荷作用下当静载荷施加完毕(第100步)声发射能量几乎为0,从第101步开始施加冲击载荷后,大量岩石单元破碎,声发射能量迅速增加,最后随着应力波衰减,岩石单元不再大量破碎,声发射活动趋于平缓.

值得注意的是,动静组合加载模式下单压头较之双压头破碎岩石释放出的声发射能量要大,这可能是由于单压头加载时冲击载荷直接作用于静载荷施加所形成的高应力区,而双压头则在冲击载荷通过压头传递到岩石时直接作用区域距静载荷压头下高应力区有一定距离,削弱了冲击载荷直接破

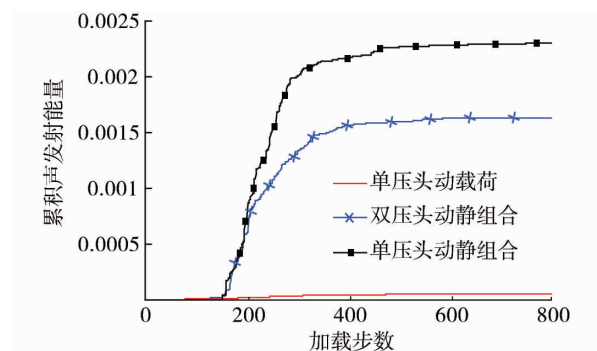


图7 累积声发射能量图

岩能力,说明双压头动静组合载荷破岩时压头间距会影响破岩效果。

3 结论

1)在单一载荷破碎硬岩时,如果所施加静载较小或动载应力波幅值小于岩石强度时,压头下方无明显的破碎坑,破岩效果差。

2)无论是单个压头还是双压头,较小的静载和动载组合作用较之纯静载或纯动载能大幅提高岩石破碎效果。故在破碎坚硬岩石时可以先给岩石提供一个预应力(静载),再施加冲击载荷以提高破岩效率。

3)声发射活动始终伴随岩石破裂全过程。声发射活动包含着岩石内部变化的大量信息,以声发射变化情况来分析、判断不同加载模式下岩石破碎特点是可行的。

参考文献:

- [1] 徐小荷,余静. 岩石破碎学[M]. 北京:煤炭工业出版社,1984.
- [2] 赖海辉,朱成忠,李夕兵,等. 机械岩石破碎学[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1991.
- [3] 屠厚泽,高森. 岩石破碎学[M]. 北京:地质出版社,1990.
- [4] 李夕兵,冯涛. 岩石地下建筑工程[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1999.
- [5] 赵伏军. 动静载荷耦合作用下岩石破碎理论及试验研究[D]. 长沙:中南大学,2004.
- [6] 赵伏军,李夕兵,冯涛. 动静载荷耦合作用下岩石破碎理论分析及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005,24(8):1315-1320.
- [7] 左宇军. 动静组合加载下的岩石破坏特征研究[D]. 长沙:中南大学,2005.
- [8] Zhao F J, Wang H Y, Shen P W, et al. Numerical experiment rock fragmentation by combined dynamic and static loads under Dual - cutter head [J]. Engineering Sciences, 2012,10(2):56-60.
- [9] 袁振明,马羽宽,何泽云,声发射技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1985.
- [10] 赵伏军,王宏宇,彭云,等. 动静组合载荷破岩声发射能量与破岩效果试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(7):1363-1368.
- [11] 万志军,李学华,刘长友. 加载速率对岩石声发射活动的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2001,20(4):469-471.
- [12] Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture [J]. Int J RockMech Min sci, 1993, 30(7):883-899.
- [13] 梁正召,唐春安,黄明利,等. 岩石破坏过程中声发射模式的数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2002,23(10):1005-1011.