动静组合载荷作用下岩石破碎数值模拟及试验研究

赵伏军[1]，谢世勇[1,2]，潘建忠[2]，黄寿元[1]

（1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院，湘潭 411201；2. 赣州有色冶金研究所，赣州 341000）

摘 要：运用ANSYS软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。结果表明：静载破岩时岩石中的裂纹扩展范围比冲击破岩时广，形成的破碎角大；冲击载荷破岩时岩石中的裂纹扩展速度比静载时快，形成的破碎角较小；动静组合载荷破岩时破碎深度和裂纹扩展面积比单一静载或动载时均大，破岩效果优于单一加载模式。在多功能岩石破碎试验装置上对花岗岩分别进行了单一静载、冲击载荷和动静组合载荷破岩试验，进一步表明动静组合载荷破岩在破碎深度、破碎体积和破岩比能方面比静力压入或单一冲击具有明显的优势，能大幅度提高破岩效果。不同的动静组合载荷存在不同的破岩比能，合理选取动静载荷的比值，可使破岩比能最小，破碎效果达到最优。

关键词：动静组合载荷；岩石破碎；数值模拟；裂纹扩展；破岩比能

中图分类号：TU457 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－4548(2011)08－1290－06

作者简介：赵伏军(1963－)，男，博士，教授，主要从事岩石破碎、矿山开采技术等方面的教学与研究工作。E-mail: zfjxxn@263.net。

Numerical simulation and experimental investigation on rock fragmentation under combined dynamic and static loading

ZHAO Fu-jun[1], XIE Shi-yong[1, 2], PAN Jian-zhong[2], HUANG Shou-yuan[1]

(1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China ;2 Ganzhou Nonferrous Metallurgy Research Institute, Ganzhou 341000, China)

Abstract: The numerical simulation method is applied to analysis the granite fragmentation process under static loading, impact loading and combined static and dynamic loading by ANSYS. The results show that the range of rock propagating cracks under static loading is wider and the angle of fragmentation bigger than that under impact loading; the crack growth rate in the rock under impact loading is faster than under static loading, which forms the smaller angle of fragmentation; the depth and area of rock fragmentation under combined loads are larger than static or dynamic loading and the crushing effect is better than the single loading model. By the multifunctional testing device for rock fragmentation, the breaking tests of granite under static loading, impact loading and combined static and dynamic loading are carried out. The test results further suggested that the breaking effects of rock are greatly improved under combined static and dynamic loading in the breaking depth, broken-volume and specific energy consumption compared with static loading and impact loading. The specific energy consumption of rock fragmentation is different for the different combined loading, reasonable ratio of dynamic loading to static loading can make the specific energy consumption least and breaking effect optimal.

Key words: combined dynamic and static loading; rock fragmentation; numerical simulation; cracks growth of rock; specific energy consumption

0 引 言

研究岩石在各种复杂载荷作用下的力学性质和破碎特性是为矿山开采、土木建筑、隧道和地下建筑等领域内岩石工程设计与开挖提供主要依据，同时也为各种岩体工程稳定性分析提供主要参数。目前，在岩石力学领域，对岩石在单一的静载或动载作用下的破碎机理、破碎特性等方面做了大量的研究工作，但对动静组合载荷作用下岩石破碎理论与试验研究则相对较少[1-6]。随着计算机技术的发展和采矿工程及岩土工程分析软件的开发，数值模拟技术被广泛用来研究岩

基金项目：国家自然科学基金项目（50974059,50934006）
收稿日期：2010－05－13

石细观结构（裂纹）特性变化对宏观力学行为的影响，并应用到岩石破碎过程的计算分析之中。但目前岩石破碎的数值模拟研究主要是针对单轴压缩、直接拉伸、动载荷和剪切等条件下进行的[7-12]，对动静组合载荷条件下的数值模拟研究相对缺乏，尤其是动静组合加载模式下岩石破碎特性的物理实验研究则更少[13-17]。因此，开展动静组合模式下的岩石破碎数值模拟及实验研究对于丰富岩石破碎学理论，开发研制新型钻采设备具有十分重要的理论意义和工程应用价值。

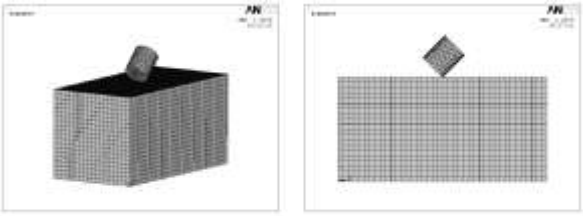
1　数值模拟分析

1.1　静载荷作用下岩石破碎的数值模拟分析

（1）岩石及PDC刀具模型

首先在 CAD 软件中建立岩石及 PDC 刀具的三维实体模型，然后导入 ANSYS 软件。由于岩石与混凝土具有很多相似的地方，所以岩石（花岗岩）材料采用 SOLID65 单元模拟，其单元破坏面采用改进的 William-Warnke 五参数破坏曲面，PDC 刀具材料采用 SOLID45 单元模拟。

本次动静组合破岩的试验花岗岩试件尺寸为1000 mm×500 mm×500 mm，PDC刀具的规格是Φ13.4 mm×15 mm。刀具的模型采用实际尺寸建模。由于岩石受刀具影响范围较小，所以取刀具与岩面接触正下方的100 mm×50 mm×50 mm范围建模。花岗岩的力学参数：重度为2.640 kN/m^3，抗压强度为167.5 MPa，抗拉强度为18.6 MPa，弹性模量为67 GPa，泊松比为0.21。刀具材料的物理力学性能：重度为3.52 kN/m^3，努普硬度为50～80 GPa，抗弯强度为0.6～1.1 GPa，抗压强度为7～8 GPa，断裂韧性为7～9了 MPa·m$^{\frac{1}{2}}$，弹性模量为560～800 GPa，泊松比为0.08。划分网格后的岩石及刀具模型见图1。



（a）三维网格图　　（b）二维网格图

图 1　岩石与 PDC 刀具模型网格图

Fig. 1 Meshes for rock PDC cutter model

（2）加载与求解

在试验中，刀具刀刃的锐边圆弧（即锋利的边缘）与岩面接触，模拟中为了简化运算，假设刀具与岩面接触是点面接触，且在加载过程中刀具只有垂直方向的位移，无水平移动，即不存在切削现象。在施加单轴静载荷之前，将岩石模型的底面施加位移约束（x，y，z 3个方向均约束），模型前后左右四个面为自由面。设定50个子步，最小子步为25，最大子步为50，为了便于收敛，打开自动调整时间积分步长。

（3）结果分析

为了分析在单轴静载荷作用下试件的裂纹分布随子载荷步变化的情况，选取具有代表性的子载荷步计算结果进行分析。图2为静载荷2100N作用下各子载荷步产生的裂纹分布图，图3为不同静载荷（1200，2100，3300 N）最终收敛时裂纹分布图。

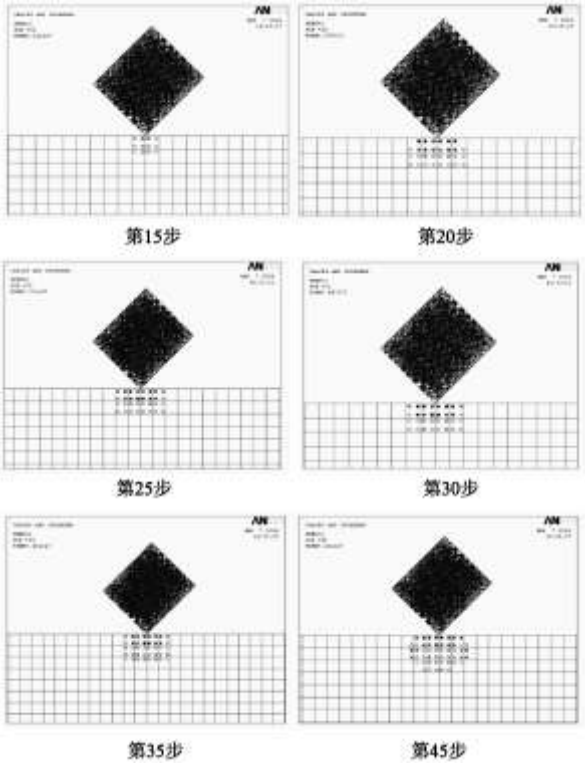


图 2　各子载荷步产生的裂纹分布图

Fig. 2 Crack distribution under load generated by each sub-step

a）从图 2 可以看出：在第 15 步之前，岩石处于弹性和塑性变形期，没有裂纹出现；从第 15 步开始，裂纹首先产生在刀具与岩面接触点上，然后中间裂纹与侧向裂纹扩展较快，再由侧向裂纹与径向裂纹贯通从岩石表面破碎；到第 45 步时，裂纹扩展缓慢直至稳定，形成一个稳定的类似梯形的裂纹面，形成的破碎角较大，这与文献[4]中分析基本一致。

b）从图 3 可以看出：随着静载的增加，裂纹分布的深度随之增加，在 2100 N 时增加最快，而在 3300 N 时增加缓慢。说明单纯提高静压，破碎深度稍有增加，但破岩效果并不好。

1.2　动载荷作用下岩石破碎的数值模拟分析

冲击载荷作用下岩石破碎数值模拟的建模、网格划分等前处理与静载的一样，只是加载的方式和过程有所不同。由于只考虑施加单轴冲击载荷（48 J，63 J，78 J），所以分析类型选择瞬态求解（Transient），加载

时间为 0.0002 s（中等应变速率），约束条件与静载一样。为了分析在单轴冲击载荷作用下试件的裂纹分布随子载荷步变化的情况，选取具有代表性的子载荷步计算结果进行分析。图 4 为冲击能 48 J 时各子载荷步产生的裂纹分布图，图 5 为不同冲击能（48 J，63 J 和 78 J）收敛时裂纹分布图。

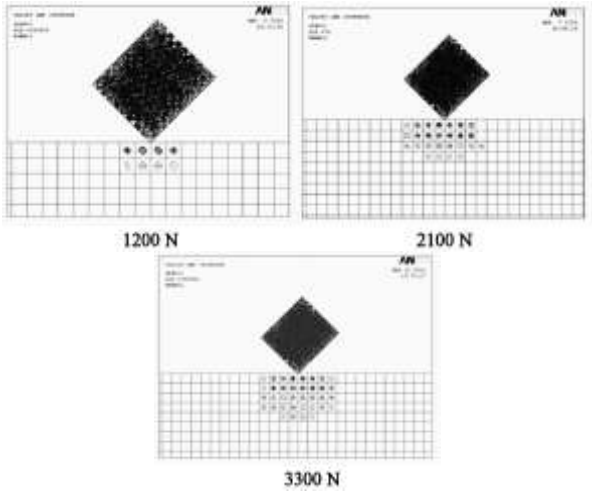
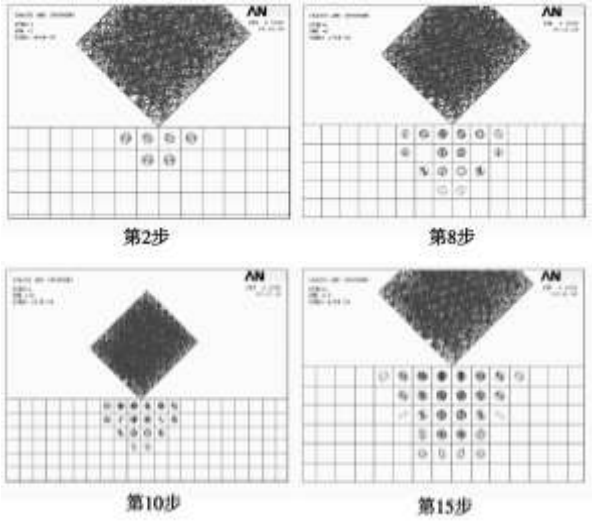


图 3 不同静载收敛时裂纹分布图

Fig. 3 Crack distribution under different static loading

（1）从图 4 可以看出：在第 2 步时，裂纹最先在刀具与岩面接触点下方开始产生，但裂纹分布面较小；从第 8 步开始，裂纹扩展迅速，形成较大面积的破碎，并且中间裂纹比侧向裂纹和径向裂纹扩展要快，裂纹面进一步扩大；到第 30 步时，裂纹扩展形成一个较稳定的“三角形”裂纹面，与静载相比裂纹分布的深度较深，但广度要小。



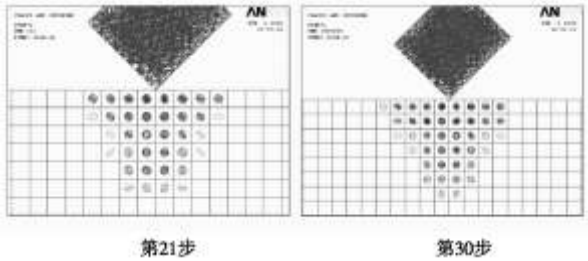


图 4 各子载荷步产生的裂纹分布图

Fig. 4 Crack distribution under load generated by each sub-step

（2）从图 5 中可以看出：随着冲击能的增加，裂纹分布的深度增加较快，裂纹分布的面积也随即增加，但往两侧的扩展则较缓慢。

1.3 动静组合载荷作用下岩石破碎的数值模拟

动静组合载荷作用下岩石破碎数值模拟的建模、网格划分等前处理与静载的一样，只是加载方式和过程有所不同。先施加一个静载作用在模型上，然后再施加一个冲击载荷来达到动静组合载荷作用的效果。为了分析在动静组合载荷（1200 N＋63 J）作用下试件的裂纹分布随子载荷步变化的情况，选取具有代表性的子载荷步计算结果来分析。图 6 为（1200 N＋63 J）各子载荷步产生的裂纹分布图，图 7 为不同组合载荷作用下岩石裂纹分布图。

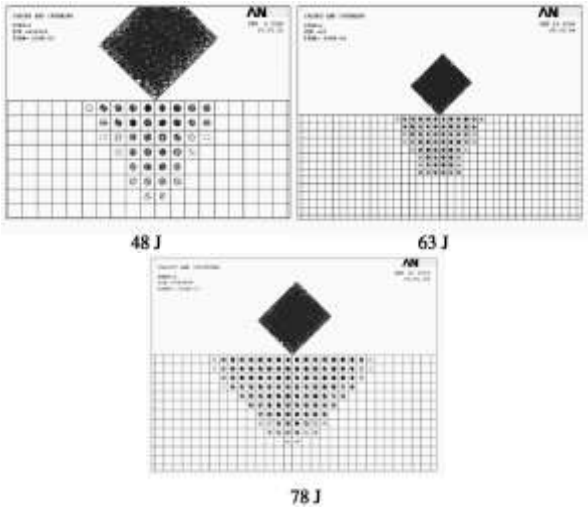


图 5 不同冲击能收敛时裂纹分布图

Fig. 5 Crack distribution under different impact loading

（1）从图 6 可以看出：在第 2 步时，裂纹最先在刀具与岩面接触点下方开始产生，但裂纹分布面较小，形状与单一静载相似；从第 5 步开始，裂纹扩展迅速，形成较大面积的破碎，明显优于单一静载或动载所形成的裂纹面，开始时径向裂纹和侧向裂纹扩展较为迅速，当冲击载荷逐渐增大后，中间裂纹比径向和侧向裂纹扩展快；到第 35 步时，裂纹扩展趋于稳定，裂纹面上部类似于长方形，下部为三角形状，分布较为规整。

（2）从图 7 可以看出：不同组合载荷产生裂纹面

的形状不尽相同，但有一个共同点是上部均为类似于长方形，且较为规整，下部则大致呈三角形状，但有部分组合载荷形成的是“Π”形，说明此时侧向裂纹比中间裂纹扩展的要快；当静载固定时，随着冲击载荷的增加，裂纹分布的面积及深度随之增加，说明预先施加一定的静载有利于裂纹的扩展，但当冲击能增加到一定程度时，裂纹分布深度增加较为缓慢，因此存在一个最佳组合值。模拟结果表明：上述 3 种不同载荷组合方式中，静载为 2100 N 时，冲击载荷为 63 J 时破岩效果最好。

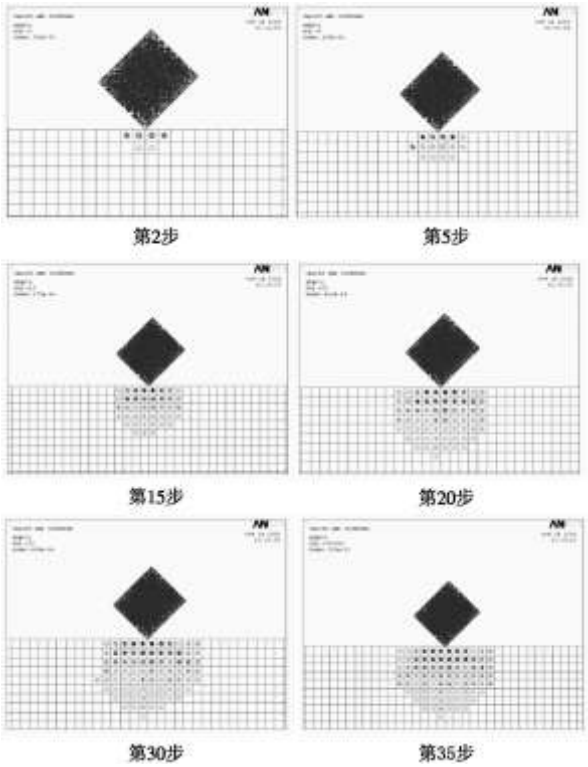
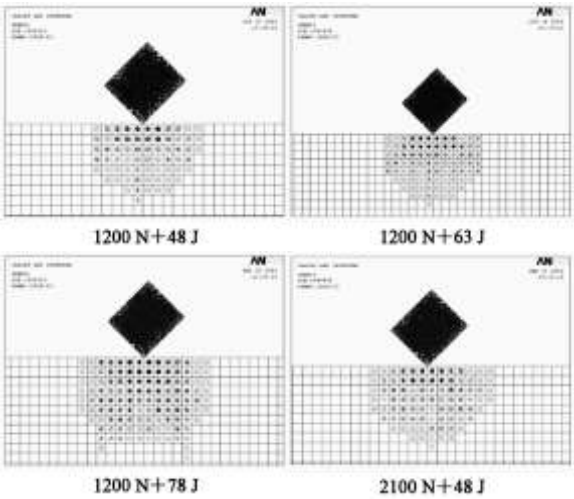


图 6 各子载荷步产生的裂纹分布图

Fig. 6 Crack distribution under load generated by each sub-step



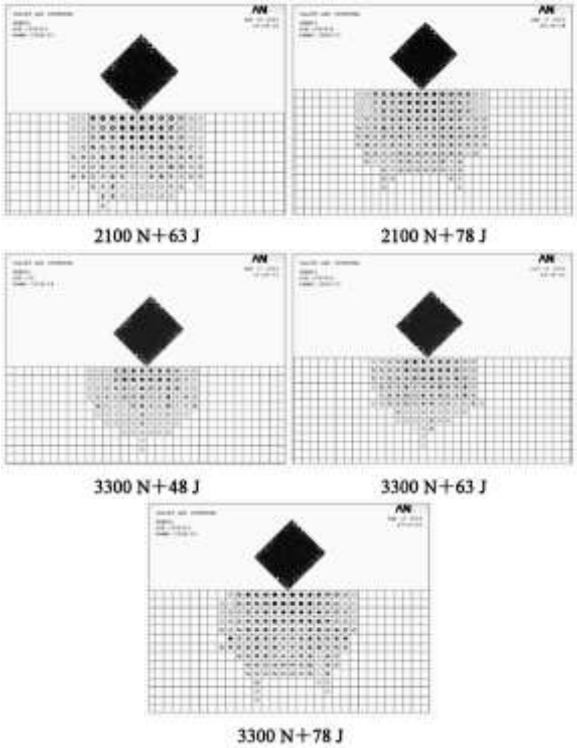


图 7 不同组合载荷收敛时裂纹分布图

Fig. 7 Crack distribution under different combined loadings

2　试验研究

在如图 8 所示的动静载荷破碎岩石多功能实验装置[18]上进行单一静载、单一动载和组合加载模式破岩实验。试验试件为花岗岩。刀具选用湖南飞蝶硬质合金材料厂生产的圆柱形聚晶金刚石复合片（PDC）。试验中静压分别取 1200 N，2100 N 和 3300 N，冲击高度为 300 mm，冲击能分别为 48 J，63 J 和 78 J。先进行单一的静压破岩试验，然后再进行单一冲击破岩试验，最后进行不同静压、不同冲击能的组合破岩试验。试验结果见表 1。岩石的破碎效果以破碎体积和破碎比能[3]来度量。动静组合载荷破碎花岗岩的体积和比能随刀具上的静载和冲击能的变化曲线见图 9。

表 1 静压破岩、冲击破岩和组合破岩试验结果

Table 1 Results of rock fragmentation under static loading, impact loading and combined loadings

（2）随着冲击能增加，破岩深度和破岩体积相应增加，破岩比能随之下降。但当冲击能增加到一定程度时，其破岩比能并不降低；反之，如果冲击能小到一定的值，则破岩比能上升，破碎效果变差，动静组合载荷破碎花岗岩最佳冲击能为63 J。

（3）动静态组合加载模式能大幅度提高破岩效果，在破碎深度、破碎体积以及破岩比能等方面比单一冲击或静力压入具有明显的优势，不同的动静组合载荷存在不同的破岩比能，合理选取动静载荷的比值，可使破岩比能最小，破碎效果达到最优，岩石存在一个最优静载和冲击能的组合（本试验中为2100 N＋63 J），与数值模拟分析的结论相吻合。

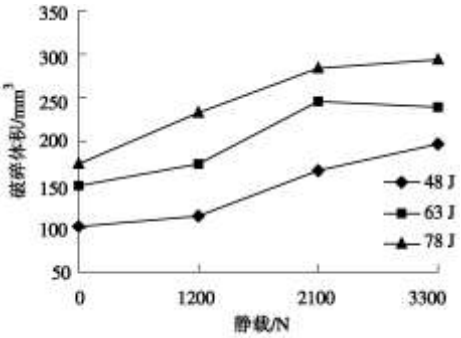
1–轴向加压油缸；2–起吊岩石电葫芦；3–升降横梁；5–机架；6–冲击调速电机；7–冲击杆传动装置；8–冲击杆；9–刀具及刀具夹；10–岩石试样；11–水平/垂直加载泵压系统；12– 动静载荷测试系统

图 8 动静载荷破碎岩石多功能试验台

Fig. 8 Multifunctional testing device for rock fragmentation under combined dynamic and static loadings

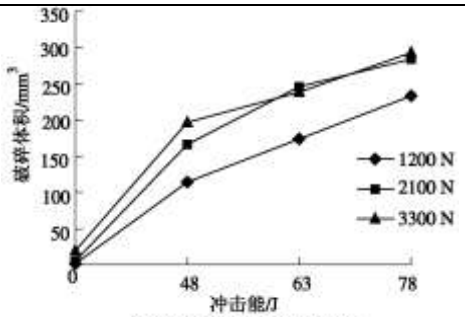
从表1及图9（a）～（d）可以得出：

（1）随着静载的增加，破碎深度和破碎体积均逐步增加，破岩比能逐渐降低。当静载增加到一定范围

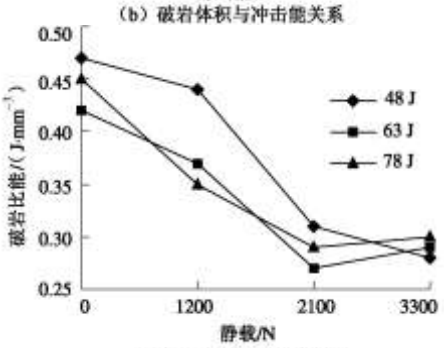


（a）破岩体积与静载关系

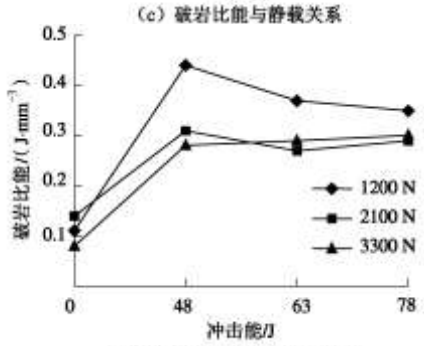
静载 WOB/N	冲击能量 /J	深度 /mm	体积 /mm³	比能 /(J mm⁻³)	备 注
1200	0	0.23	1.25	0.11	静压破岩
2100	0	0.65	5	0.14	
3300	0	0.88	19	0.08	
0	48	1.46	102	0.47	冲击破岩
0	63	1.56	149	0.42	
0	78	1.9	174	0.45	
1200	48	1.54	114	0.44	组合破岩
1200	63	1.90	174	0.37	
1200	78	2.20	233	0.35	
2100	48	1.86	166	0.31	
2100	63	2.18	246	0.27	
2100	78	2.43	284	0.29	
3300	48	2.06	197	0.28	
3300	63	2.23	239	0.29	
3300	78	2.65	293	0.30	



（b）破岩体积与冲击能关系



（c）破岩比能与静载关系



（d）破岩比能与冲击能的关系

图 9 动静组合载荷破碎花岗岩的体积和比能随刀具上的静载和冲击能的变化曲线

Fig. 9 Curves of crushing volume, special energy and static load, impact energy for granite fragmention

时，其破岩比能变化不大；当花岗岩的静载低于2100N时，破岩比能又逐渐上升。这说明静载太大，破岩效果将不会有很大的提高；静载太小，破岩效果也差。因此，组合载荷破岩在一定的加载范围内存在一个最佳静载值。

3 结　　论

（1）通过应用ANSYS软件模拟受载岩石内部的裂纹扩展可以发现：静载破岩时刀具对岩石的损伤范围比冲击载荷时广，形成的破碎角较大，冲击载荷破岩时的裂纹扩展比静载快，中间裂纹扩展的速度比侧向裂纹和径向裂纹都要快，形成的破碎角较小；不同载荷下产生的裂纹面形状不同，冲击载荷破岩时裂纹面形状是一个三角形面，而静载是一个类似梯形面，组合载荷则是上部呈长方形，下部为三角形面；组合载荷破岩时裂纹扩展面积比单一的静载或动载都要大，破岩效果比单一的静载或动载好。

（2）各种不同加载模式的破岩试验结果表明:动静态组合加载模式能大幅度提高破岩效果，在破碎深度、破碎体积和破岩比能上较单一冲击或静力压入具有明显的优势，不同的动静组合载荷存在不同的破岩比能，合理选取动静载荷的比值，可使破岩比能最小，破碎效果达到最优。

（3）单一静载、动载和动静组合加载破碎岩石试验验证了数值模拟分析的结果，两者得到的结论相吻合。表明数值模拟技术可以较好地模拟岩石宏观破坏过程的复杂现象，再现岩石破碎过程及其裂纹分布的变化规律。

参考文献：

[1] 左宇军，李夕兵，张义平. 动静组合加载下岩石的破坏特性[M]. 北京：冶金工业出版社，2008. 7. (ZUO Yu-jun, LI Xi-bing, ZHANG Yi-ping. Failure and fragmentation characteristics of rock under static-dynamic coupling loading[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.7. (in Chinese))

[2] 左宇军，李夕兵，唐春安，等. 受静载荷的岩石在周期载荷作用下破坏的试验研究[J]. 岩土力学，2007，**28**(5)：927－932. (ZUO Yu-jun, LI Xi-bing, TANG Chun-an, et al. Experimental investigation on failure of statically loaded rock subjected to periodic load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(5): 927－932. (in Chinese))

[3] 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，1991：1－15. (LAI Hai-hui, ZHU Cheng-zhong, LI Xi-bing, et al. Mechanical rock crushing[M]. Changsha: Central south University Press, 1991: 1－15. (in Chinese))

[4] 徐小荷，余　静. 岩石破碎学[M]. 北京：煤炭工业出版社. 1984: 115－127. (XU Xiao-he, YU Jing. Rock Crushing[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984: 115－127. (in Chinese))

[5] LI Xi-bing, SUMMERS D A, RUPERT G. Experimental investigation on the breakage of hard rock by the PDC cutters with combined action modes[J]. Tunneling and Underground Space Technology 2001, **16**:107-114.

[6] LI Xi-bing, SUMMERS D A, RUPERT G. Investigation into the penetration and impact resistance of PDC cutters inclined at different attack angles[J]. Transation of Nonferrous Metals Society of China. 2001, **10**(2): 342－346.

[7] SCHALAGEN E, VAN MIER J G M. Simple lattice model for numerical simulation of fracture of concrete materials and structures[J]. Materials and Structures. 1992, **25**: 534－542.

[8] 梁正召，唐春安，张娟霞，等. 岩石三维破坏数值模型及形状效应的模拟研究[J]. 岩土力学，2007，**28**(4)：99－704. (LIANG Zheng-zhao, TANG Chun-an, ZHANG Juan-xia, et al. Three-dimensional damage model for failure process of rocks and associated numerical simulation of geometry effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(4): 699－704. (in Chinese))

[9] 梁正召，唐春安，张永彬，等. 岩石直接拉伸破坏过程及其分形特征的三维数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报，2008，**27**(7)：1402－1410. (LIANG Zheng-zhao, TANG Chun-an, ZHANG Yong-bin, et al. Three-dimensional numerical study of direct tensile fracture of rock and associated fractal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(7): 1402－1410. (in Chinese))

[10] 黄志平，唐春安，朱万成，等. 动载荷条件下波长对岩石试件破坏模式影响的数值模拟[J]. 岩土工程学报，2007，**29**(7)：1048－1053. (HUANG Zhi-ping, TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng, et al. Numerical simulation on failure modes of rock bars under different wave lengths [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(7): 1048－1053. (in Chinese))

[11] 芮勇勤，唐春安. 岩石剪切破坏过程的 RFPA2D 数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报，2002，**21**(3)：364－368. (RUI Yong-qin, TANG Chun-an. Numerical simulation on failure process of rock sample with $RFPA^{2D}$ code under direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(3): 364－368. (in Chinese))

[12] FRANTZISKONIS G, RENAUDIN P, BREYSSE D. Heterogeneous solids－Part Ⅰ: Analytical and numerical 1-D results on boundary effects[J]. Eur J Mech, A/Solids, 1997, **16**(3): 409 －423

[13] LILLIU G, VAN Mier J G M. 3D lattice type fracture model for concrete[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, **70**: 927－941

[14] BLAIR S C, COOK N G. Analysis of compressive fracture in rock suing statistical techniques–Part Ⅰ:A non-linear rule-based model[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1998, **35**(7): 837－848.

[15] 左宇军, 李夕兵, 赵国彦. 受静载荷作用的岩石动态断裂的突变模型[J]. 煤炭学报, 2004, **29**(6): 654－658. (ZUO Yu-jun, LI Xi-bing, ZHAO Guo-yan. A catastrophe model for dynamic fracture of static loaded rock[J]. Journal of China Coal Society, 2004, **29**(6): 654－658. (in Chinese))

[16] 胡柳青. 冲击载荷作用下岩石动态断裂过程机理研究[D]. 中南大学, 2005. (HU Liu-Qing. On the mechanism of the dynamic fracture processes of rock under impulse loading[D]. Central South University, 2005. (in Chinese))

[17] 赵伏军. 动静载荷耦合作用下岩石破碎理论及试验研究[D]. 中南大学, 2004(ZHAO Fu-jun. Theoretical and experiment research on rock fragmentation under coupling dynamic and static loads[D]. Central South University, 2004. (in Chinese))

[18] 赵伏军, 李夕兵, 冯 涛, 等. 新型多功能岩石破碎试验装置 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, **35**(4): 651－656. (ZHAO Fu-jun, LI Xi-bing, FENG Tao, et al. A new multifunctional testing device for rock fragmentation[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2004, **35**(4): 651－656. (in Chinese))