

刀具动态作用下节理岩体破坏过程的数值模拟

廖志毅, 梁正召*, 杨岳峰, 王 岩, 唐春安

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 基于细观损伤力学和动力有限元方法, 模拟分析了节理岩体在刀具动态荷载作用下的损伤破裂过程, 探讨了节理间距和节理角度的影响。在动力分析模型中, 通过考虑黏弹性边界以排除边界应力波反射的影响, 提高了计算精度。数值模拟结果表明, 节理的存在改变了岩体中应力波的传播模式。一方面, 节理面反射的拉伸应力波加剧了节理与刀具间岩体的碎裂; 另一方面, 软弱节理面破坏吸收了应力波能量, 阻碍了应力波向下的传播, 减弱了下部岩体的破坏程度。模拟结果还表明, 节理间距越小, 岩体破坏程度更加明显。倾斜节理的存在使刀具下部的裂纹出现不对称性扩展特征, 影响了主裂纹向下扩展的能力, 限制了其伸展的空间。节理岩体在刀具动态作用下的破坏过程研究还很少见到, 研究结果对于节理岩体动态破坏的机理以及地下工程开挖等实际应用, 具有一定的参考价值。

关键词: 刀具破岩; 动态破坏过程; 节理岩体

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)06-1147-09

作者简介: 廖志毅(1989-), 男, 江西南昌人, 硕士研究生, 研究方向为岩石类准脆性材料动态荷载作用下破坏分析。

E-mail: liaozhiyi496@163.com。

Numerical simulation of fragmentation process of jointed rock mass induced by a drill bit under dynamic loading

LIAO Zhi-yi, LIANG Zheng-zhao, YANG Yue-feng, WANG Yan, TANG Chun-an

(Dalian University of Technology, State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the microscopic damage mechanics and the dynamic finite element method, the fragmentation process of jointed rock mass under dynamic loading is simulated. In the dynamic analysis model, the viscous boundary is considered to eliminate the influence of the reflected stress waves from the boundary. The numerical results show the joints change the stress wave propagation mode in the rock masses. On one side, the reflected tensile stress on the surface of the joints enhances the fracturing of the rock between the joint and the drill bit. On the other side, the fracturing toward the specimen bottom is restrained due to the fact that the dynamic wave propagation is absorbed by the weak joints. The fragmentation is also influenced by the joint spacing. The rock specimens are more obviously fractured with smaller joint spacing. The inclination of the joints leads to non-symmetric fragmentation at the two sides of the bit and affects the ability of the downward extension of the main crack. The simulation will be helpful for understanding the mechanism of dynamic failure of jointed rock mass and underground engineering.

Key words: rock fragmentation; dynamic failure process; jointed rock mass

0 引 言

刀具动态作用下岩体的破坏是一个非常复杂的过程, 这主要是由于岩石材料的非均匀性、非连续性以及内部存在许多的缺陷结构所造成的。随着各类挖掘机广泛应用于矿山开采、隧道开挖等实际工程中, 刀具动态破岩的机理以及如何高效破岩已然成为广大学者所关注的热点研究课题。

由于实际条件的限制, 通过大尺度的现场试验来研究刀具破岩的机理还存在很多困难。随着计算机硬件水平的不断提升, 及各类数值模拟方法和软件的不

断完善, 通过数值模拟研究刀具破岩成为可能。数值模拟可以充分考虑岩石非均匀的特性和复杂的受力条件, 具有实验室物理试验和现场试验不可比拟的优势。很多学者在此方面做出了研究。Liu 等^[1]分别对单刀头和双刀头两种情况的破坏方式、破裂过程、受力与位

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51079017 51274053); 国家自然科学基金重大国际合作项目 (50820125405); 全国优秀博士学位论文作者专项资金 (200960); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-09-0258)

收稿日期: 2012-08-06

*通讯作者

移关系进行了数值模拟研究。孙金山等^[2]对不同强度岩石在单滚刀作用下破坏模式进行了研究,并对双滚刀下能耗最小的最佳间距进行了模拟计算。张魁等^[3]通过离散单元法模拟了在不同围岩条件下以及不同刀间距下岩石裂纹生成、扩展和岩石破碎的全过程。然而,以上的研究均处于静力学领域,应力和应变均为位置函数,不随时间变化。在动态荷载作用下,模型中的应力和应变不仅仅为位置函数,同时也是时间函数^[4]。Wang 等^[5]模拟了双刀头动态荷载作用下,岩体破坏的全过程,并提出岩体在刀头动态荷载作用下的破坏过程,由初期的侧向裂纹的萌生,随后径向裂纹的发展,继而产生煤粉区和最终壳裂区的形成这几个阶段组成,阐述了在不同均质度与刀间距下岩体裂纹扩展模式的区别。Yang 等^[6]对冲击破岩下应力波传播过程中应力状态转变的原理进行了阐述,表示在加载超过峰值后,在应力波传播区域内,环向由压缩状态变为拉伸状态。在 Yang 的模型中,考虑到了黏弹性边界,模拟研究了高低均质度岩体的裂纹扩展模式以及粒状岩中颗粒和基质的宏观非均匀性对裂缝扩展的影响。然而,对于具有节理存在的岩体在动态荷载作用下的破坏过程研究还很少见。在实际情况下,由于构造应力、风化等各种的自然因素,节理等各种软弱面广泛存在于岩体内部。这一方面,Gong 等^[7-8]在静态荷载条件下对具有水平和倾斜节理存在的岩体在刀具作用下裂纹扩展的起始位置,方向以及应力场分布等方面做出了详细的研究。邹飞等^[9]通过试验研究了岩石节理倾角和间距对隧道掘进机破岩特性的影响。这些研究大多没有考虑刀具的动态效应。因此,讨论刀具动态作用下节理岩体的破坏特点,对于工程应用和理论研究都具有很大的意义。

本文采用 RFPA^{2D} 岩石动态破裂分析软件,对具有水平以及倾斜节理的岩体施加矩形应力波,进行刀具动态破岩数值模拟,讨论了具有水平节理、倾斜节理与无节理岩体破裂过程的区别,并分析了不同水平节理间距、不同节理倾角等因素对其破裂特征的影响。

1 RFPA 原理简介

在动力有限元分析求解过程中,根据 Hamilton 变分原理,利用有限元法进行空间离散处理之后,动力方程具有以下形式:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = Q \quad (1)$$

式中 \ddot{u} , \dot{u} , u 分别代表 t 时刻的位移、速度和加速度向量; K , M , C 分别为系统的刚度矩阵、质量矩阵、阻尼矩阵。并利用 Newmark 方法引入不同时刻速度 $\dot{a}_{t+\Delta t}$ 和位移 $a_{t+\Delta t}$ 关系,最后可得到微分方程:

$$\hat{K}a_{t+\Delta t} = \hat{Q}_{t+\Delta t} \quad (2)$$

其中,

$$\hat{K} = K + \frac{1}{\beta\Delta t^2}M + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}C \quad (3)$$

$$\hat{Q}_{t+\Delta t} = Q_{t+\Delta t} +$$

$$M \left[\frac{1}{\beta\Delta t^2}(a_{t+\Delta t} - a_t) - \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{a}_t - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{a}_t \right] +$$

$$C \left[\frac{\gamma}{\beta\Delta t}(a_{t+\Delta t} - a_t) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta} \right) \dot{a}_t + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \Delta t \ddot{a}_t \right] \quad (4)$$

式中, β 和 γ 为 Newmark 方法的积分系数。当 $\gamma \geq 0.5$, $\beta \geq 0.25(\gamma + 0.5)^2$ 时, Newmark 方法无条件稳定。

一般认为,岩石应力-应变曲线的非线性是由于其受力后的不断损伤引起微裂纹萌生和扩展而造成的,而不是由于塑性形变。尤其是在拉伸应力下更加明显,因此,用弹性损伤力学的本构关系来描述岩石的细观力学性质是合适的^[10]。基于该思想的 RFPA 软件是一个以弹性力学为应力分析工具、以弹性损伤理论及最大拉应力(应变)破坏准则和莫尔库仑准则为介质变形和破坏分析模块的岩石破裂过程分析系统。首先,在初始状态下,RFPA 假定细观单元为弹性体。随着细观单元应力的不断增加,当其满足某一所给的强度阈值时,细观单元开始发生损伤。RFPA 系统通过最大拉应力(应变)准则来判断单元是否发生拉伸损伤;通过莫尔库仑准则判断单元是否发生压缩或者剪切损伤。图 1 给出了单元在单轴应力状态下的弹性损伤本构关系。图中 f_c , f_t 分别表示单元的单轴抗压、抗拉强度; f_{cr} , f_{tr} 表示单元相变后的残余强度。

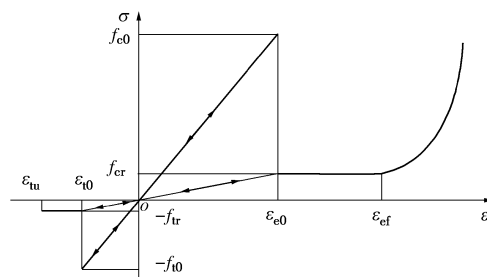


图 1 单元在单轴应力状态下的弹性损伤本构关系

Fig. 1 Elastic damage constitutive law of an element under uniaxial stress state

对于节理来说,其本构关系表达式与岩石相同。在模型中可以改变节理材料的拉伸强度与压缩强度之比,体现节理的抗压不抗拉的性质。节理的极限拉伸应变很低,一旦发生拉伸破坏即发生开裂;通过减小最大压应变系数,实现在持续压应力作用节理面破坏后容易发生破坏压密接触这一现象。

根据图 1 所示的单元本构关系,从细观损伤角度入手,当细观单元承受的应力达到给定的抗拉极限值时,单元发生拉伸损伤,此时损伤参量满足如下公式:

$$D = \begin{cases} 0 & (\varepsilon \leq \varepsilon_{i0}) \\ 1 - \frac{\lambda \varepsilon_{i0}}{\varepsilon} & (\varepsilon_{i0} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tu}) \\ 1 & (\varepsilon \geq \varepsilon_{tu}) \end{cases}, \quad (5)$$

式中, λ 表示单元残余强度系数, ε_{i0} , ε_{tu} 分别表示弹性极限所对应的拉伸应变和单元的极限拉伸应变。当拉伸应变达到极限拉伸应变时, 认为材料已经完全损伤。

三维情况下, 则用等效应变来代替式 (5) 中的拉伸应变 ε :

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\langle -\varepsilon_1 \rangle^2 + \langle -\varepsilon_2 \rangle^2 + \langle -\varepsilon_3 \rangle^2}, \quad (6)$$

其中将 $\langle \cdot \rangle$ 定义为

$$\langle x \rangle = \begin{cases} x & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases}.$$
 (7)

当细观单元承受的应力达到压缩或剪切准则时, 即

$$F = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_1 - \sigma_3 \geq f_c, \quad (8)$$

判定单元发生压缩或剪切损伤。此时单元损伤参量满足

$$D = \begin{cases} 0 & (\varepsilon_1 < \varepsilon_{c0}) \\ 1 - \frac{\lambda \varepsilon_{c0}}{\varepsilon} & (\varepsilon_1 \geq \varepsilon_{c0}) \end{cases}.$$
 (9)

同样, 在三维条件下需要用等效应变式 (6) 来代替式 (9) 中的压缩应变 ε 。

2 数值模型

本文考虑二维条件下的数值模型, 对刀具施加动态荷载模拟其受到的冲击作用, 分别讨论无节理、水平节理间距 d 为 30, 45, 60 mm 以及节理倾角 α 为 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° 六种情况下岩体的破坏过程。模型尺寸为 $180\text{ mm} \times 400\text{ mm}$, 网格划分为 180×400 。在刀头处施加一个周期为 $0.2\text{ }\mu\text{s}$, 波峰应力值为 80 MPa 的应力波, 波形采用物理实验常见的矩形波, 波形图如图 2 所示。无节理及有节理情况模型分别如图 3 (a)、(b)、(c) 所示, 其中 d 值表示节理的垂直距离, α 为节理倾角。假设模拟岩体是一个无限大的块体, 岩体中包含一组等间距的节理, 引入黏弹性边界条件, 排除了应力波传播到边界时的反射对模拟结果准确性的影响。数值模型采用平面应变模型, 运用莫尔库仑破坏准则和最大拉应力准则, 有关岩石破坏过程分析 RFPA 的原理详细见文献[11]。岩石和节理的物理力学模拟参数见表 1。

3 数值模拟结果

3.1 节理对应力波的削弱作用

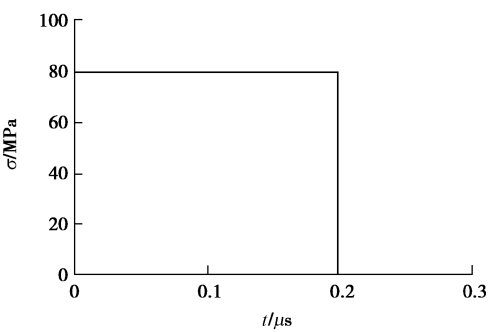


图 2 应力波示意图

Fig. 2 Compressive stress waves acting on top of indenter

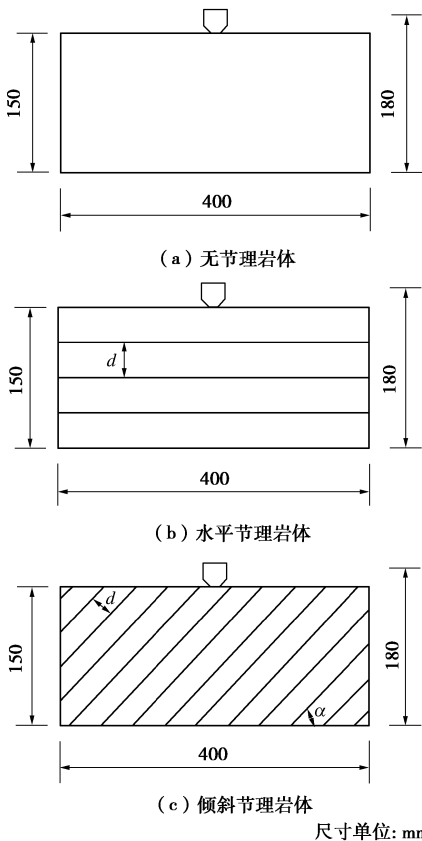


图 3 数值模型

Fig. 3 Numerical model

表 1 模型参数

Table 1 Mechanical parameters

项目	弹性模量 /GPa	密度 /(kg·m ⁻³)	泊松比	内摩擦角 /(°)	单轴抗压强度 /MPa	单轴抗拉强度 /MPa
岩石	80	2600	0.25	30	233	23.3
节理	3	1500	0.30	25	1	0.1

当应力波由一种介质传递到另一种介质界面时, 由于两种介质性质的差异, 将产生反射与透射现象。本节考虑均质条件下, 不同节理参数情况下对应力波的削弱作用。选取一组水平节理间距为 30 mm 岩体作为研究对象, 分别考虑节理弹性模量 E_j 为 3, 30, 300, 3000 MPa 四种情况时节理面对应力波的削弱作用, 模

型如图 4 所示, 关键点 A , C 位于刀头正下方节理面上下各 1 mm 处, 关键点 B 位于节理面上, 模型其他参数见表 1。为了便于观察应力波传递至节理面后的反射以及透射现象, 本节只考虑弹性解情况, 不考虑材料的破坏对应力波传递的影响。

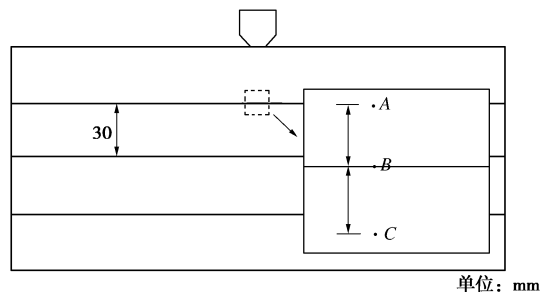


图 4 模型图

Fig. 4 Numerical model

图 5, 6 分别给出了 4 种情况关键点 A , B , C 的最小主应力与时间曲线以及加载至 24 μs 时的剪应力图。由图 5 (a) 看出, 由于节理面对应力波反射作用的影响, A 处岩体受到拉应力作用, 而且节理弹性模量越小的岩体受到的拉应力越大。不同的节理参数同时也导致了节理对应力波削弱程度的区别。图 5 (b) 为节理面处 B 点最小主应力与时间曲线, 相比 A 处岩体的应力水平, 节理面的存在很大程度上削弱了应力波的能量, 尤其是节理弹性模量为 3, 30 MPa 的岩体, 透射波的能量微乎其微。当应力波由节理再次进入岩石介质中时, 其能量进一步被削弱, 节理弹性模量较高的岩体依然保持着相对较高的应力波能量值 (图 5 (c)), 但相比 A 处和 B 处的能量值, 则衰减了很多。总而言之, 在节理岩体当中, 当应力波传至节理面时, 将发生反射与透射现象。节理弹性模量越小的岩体, 其透射能力越弱, 但反射现象越明显。

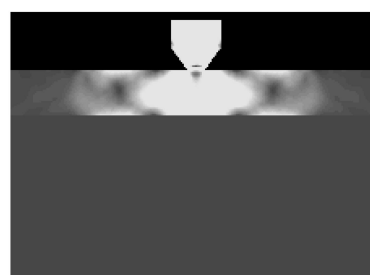
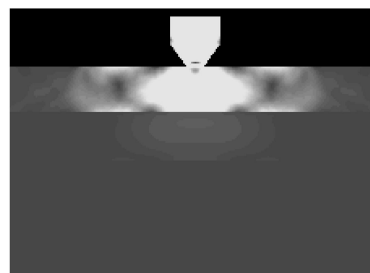
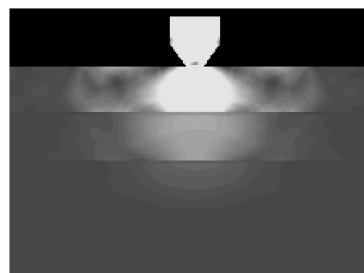
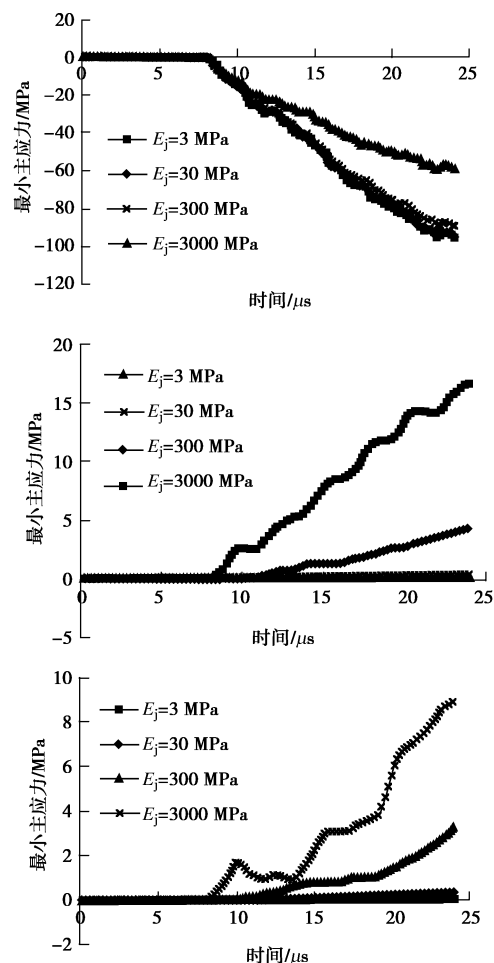
(a) $t=24 \mu\text{s}$ ($E=3 \text{ MPa}$)(b) $t=24 \mu\text{s}$ ($E=30 \text{ MPa}$)(c) $t=24 \mu\text{s}$ ($E=300 \text{ MPa}$)(d) $t=24 \mu\text{s}$ ($E=3000 \text{ MPa}$)

图 6 不同节理参数对应力波削弱作用对比图

Fig. 6 Comparison of erosion of stress waves by different joint parameters

图 5 不同节理参数关键点 A , B 和 C 最小主应力与时间曲线图Fig. 5 Curves of minor principal stresses at key points A , B and C

3.2 无节理岩体的破坏过程

图 7 给出了无节理岩体在刀具动态作用下破坏过程的数值模拟结果。观察图 7 (a) 发现, 在刀头与岩体接触两侧 (α , β 处) 的亮度明显高于岩体中其他

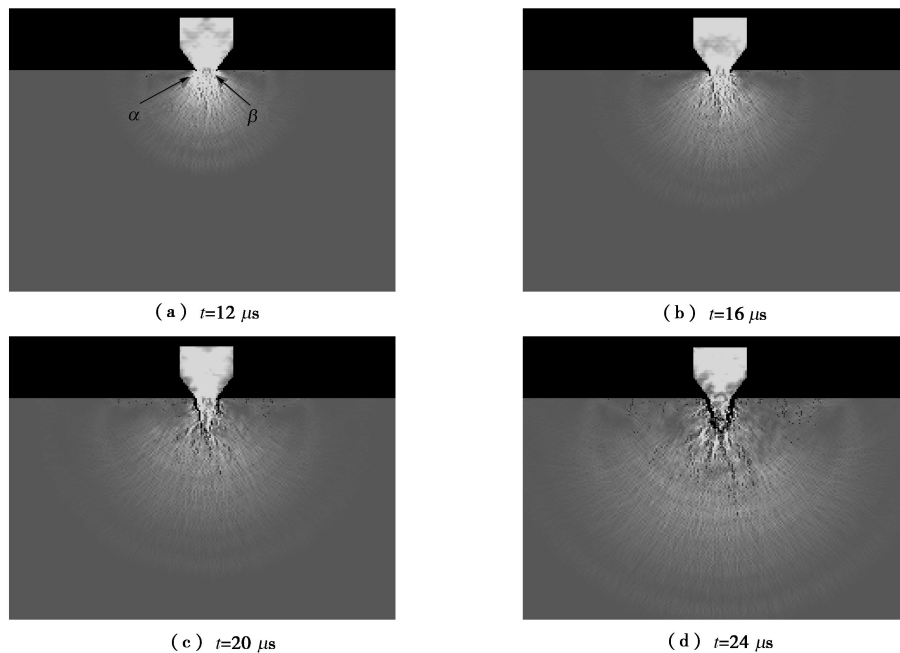
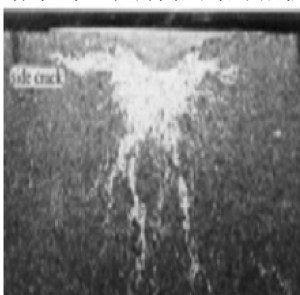


图7 无节理岩体刀具动态作用破坏过程示意图

Fig. 7 Crack initiation and propagation in rock specimen without joints under impact loading

区域,表明这两处的应力水平高于岩体中的其他部位。随着加载的不断持续, α , β 两处岩体开始出现损伤破坏, 并不断增多, 相互汇聚, 形成了两道主裂纹在应力波的作用下向岩体深处延伸(图7(b)、7(c))。由于模型边界尺寸远大于刀头与岩体的接触面积, 应力波在岩体中以半球状不断地扩散传播, 在这期间其能量不断损耗, 导致主裂纹在岩体中伸展速度逐渐减慢, 两道裂纹尖端相互汇拢。最后当应力波所携带的应力值削减到小于岩体强度阈值时, 主裂纹终止向下扩展(图7(d))。由于应力波的不断作用, 主裂纹宏观愈发明显。另外, 观察图7(d)发现, 在刀具外围也形成了一系列离散的破坏点, 通常称为壳裂区。壳裂区的形成是由于岩石材料的非均匀性使得岩体内部存在许多软弱的缺陷造成的。这些区域的力学性质远弱于其他区域, 当应力波传播到该处时, 纵然此时应力波能量减弱了很多, 但是也足以使该区域岩体发生破坏。

Lindqvist 等^[12]对单刀头入侵辉长岩进行了物理试验研究, 试验结果如图8所示。对比其试验结果, 本文数值模拟结果与之具有很高的相似度。

图8 单刀头入侵辉长石^[12]Fig. 8 Fracture process of specimen under impact loading^[12]

3.3 水平节理对岩体破坏过程的影响

节理是岩体中广泛存在的一种断裂构造, 节理的存在将对岩体受力破坏后裂纹的延伸模式产生很大的影响。图9给出了节理间距为30 mm岩体在刀具动态荷载作用下破坏过程的模拟结果。在加载的初期($t \leq 12 \mu s$), 岩体的破坏形式与无节理情况大致相同, 岩体刀头两侧处承受较高的应力值, 由于岩石非均匀的特性, 刀头下部同时呈现少量破坏点(图9(a))。继续加载, 裂纹在应力波作用下向岩体深处扩展。当应力波传播到节理面时, 节理面迅速发生破坏, 当后续应力波到达破坏的节理面时, 由于破坏面的存在, 将会发生明显的反射现象。此时, 应力波由压缩波转变为拉伸波, 导致节理面附近岩体在该拉应力波作用发生拉破坏, 继而贯通产生宏观裂纹。这个现象在无节理情况下是不会发生的(图9(b))。图10为应力波初次到达节理面之后的一段时间内岩体的声发射图。图中箭头标记区域表示当前步发生拉破坏的单元, 白色点表示当前步发生压破坏的单元, 其余的黑色点表示历史发生破坏的单元。从图10(b)、10(c)可以看出当节理面发生破坏之后, 其上方迅速产生了大量的拉破坏区域, 这些点均是由于应力波反射所造成的。图11给出了加载到12, 16, 20, 24 μs 时节理岩体与无节理岩体破坏形式的对比图, 其中右下角为无节理时的破坏形式。图11中可以看出, 节理的存在改变了应力波在岩体中的传播模式, 反射拉应力波的出现加剧了节理面上部岩体的破坏程度。另一方面, 节理面的破坏也吸收了大量的应力波能量, 阻碍了应力波向下传播, 从而极大程度上减弱了节理下部岩体的破坏程度。

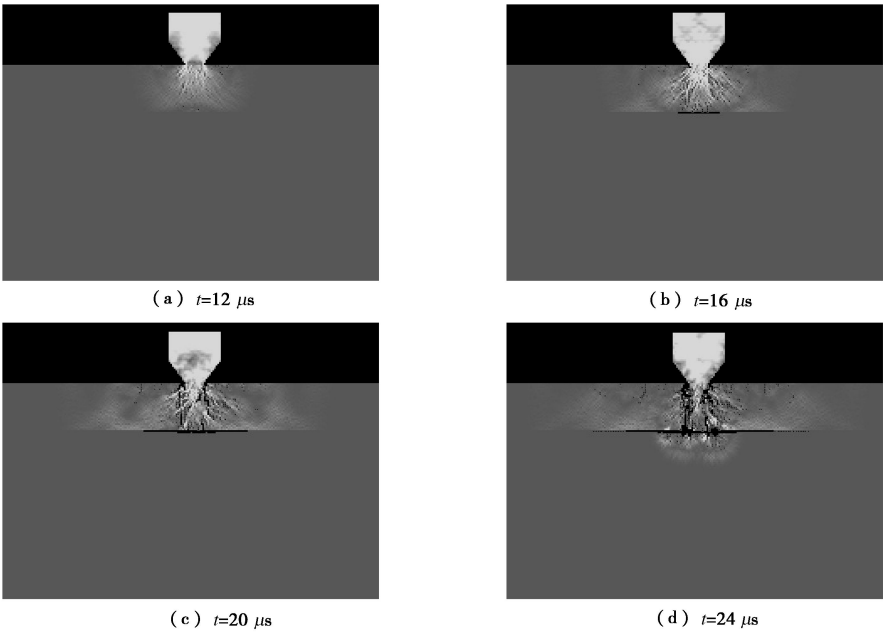


图 9 节理间距 40 mm 岩体刀具动态作用破坏过程示意图

Fig. 9 Crack initiation and propagation in rocks containing joints with 40 mm-spacing under impact loading

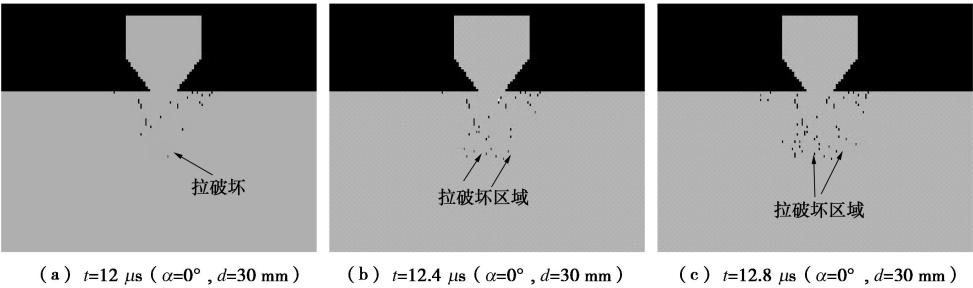


图 10 节理间距 30 mm 岩体 12 μs、12.4 μs 和 12.8 μs 时刻声发射图

Fig. 10 AE pictures of rock with joint spacing of 30 mm at time of 12, 12.4 and 12.8 μs

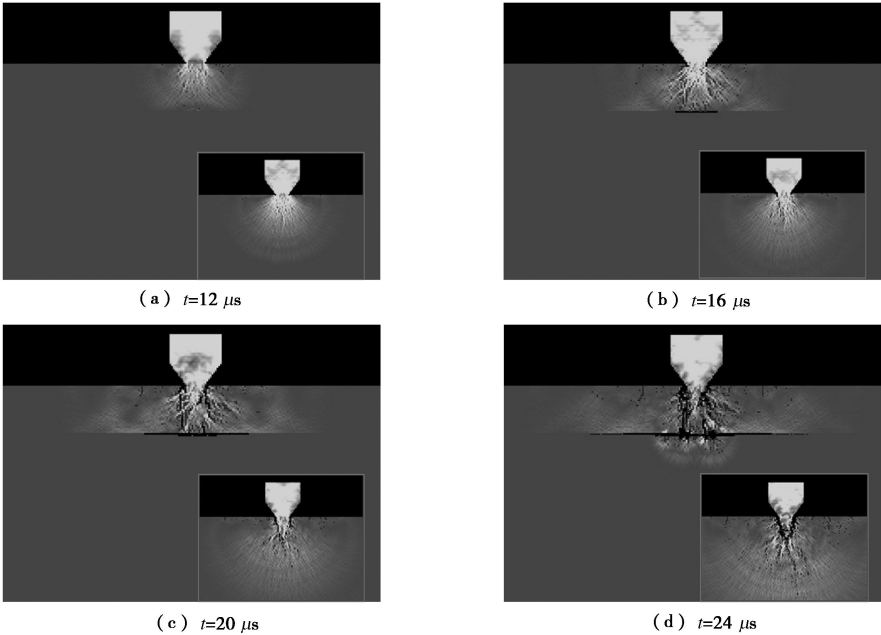


图 11 节理岩体与无节理岩体破坏形式对比图

Fig. 11 Comparison of failure patterns between rocks with and without joints

3.4 不同的节理间距对岩体破坏过程的影响

本节分别考虑 30, 45 和 60 mm 三种节理间距的

岩体在刀具动态荷载作用下的破坏过程。图 12 列出了 3 种情况分别加载到 20 μs 和 24 μs 的模拟结果, 图 12

(a)、12 (b) 为节理间距 30 mm 岩体; 图 12 (c)、12 (d) 为节理间距 45 mm 岩体; 图 12 (e)、12 (f) 为节理间距 60 mm 岩体。明显看出, 同一时刻的 3 种岩体裂纹扩展模式有很大的不同。节理间距越小的岩体对岩体的破坏影响越大。随着节理间距的不断增大, 应力波传递到节理面的过程中消耗的能量增多, 导致节理面破坏后反射的拉应力波能量值降低, 节理面上方的拉破坏区域减小, 上部岩体的破坏程度相对降低。同时, 节理间距越小的岩体, 刀头两侧主裂纹的宏观发育越明显。当节理间距不断增大, 节理面对岩体破坏形式的影响逐渐减弱, 最后可视为无节理情况。

3.5 倾斜节理对岩体破坏过程的影响

图 13 列出了在节理垂直间距 $d=30\text{ mm}$ 不变的条件下, 节理倾角为 15° , 30° , 45° , 60° , 75° 和 90° 六种情况下岩体在动态荷载作用下的破坏过程。总体来说, 倾斜节理的存在改变了裂纹扩展的模式, 使裂纹出现不对称性伸展, 节理面反射造成的拉破坏区域依然存在。节理倾角越小的岩体, 刀头正下方距节理的距离越短, 留给主裂纹向下扩展的空间也越少。当应力波传递到节理面时, 破坏的节理面释放了大量的能量, 同时也减弱了应力波向下传递的能力, 导致

主裂纹过早地终止于节理面处。观察图 13 中给出的模拟结果, 刀头两侧萌生的主裂纹在向岩体深处扩展的过程中, 受到破坏节理面的阻碍而过早终止, 这一现象在节理倾角越小的岩体中愈发明显。随着节理倾角逐渐的增大, 该现象得到了一定的缓解, 如图 13 (j) 所示, 当节理倾角为 75° 时, 节理对刀头左侧主裂纹扩展空间的限制得到了明显的改善。当节理倾角为 90° 时, 节理的存在限制了裂纹朝两侧扩展的趋势, 主裂纹毫无阻碍地向岩体深处延伸。

表 2 给出了加载至 $24\text{ }\mu\text{s}$ 时不同倾角岩体的声发射总次数以及声发射能量总值。从表 2 中可以看出节理倾角从 0° 到 45° 岩体的破坏量不断上升, 并在 45° 表 2 不同节理倾角岩体加载至 $24\text{ }\mu\text{s}$ 时刻声发射次数与声发射能量值对比

Table 2 Comparison of AE counts and AE energy values between rocks with different joint angles at time of $24\text{ }\mu\text{s}$		
节理倾角/ $(^\circ)$	声发射次数	声发射能量值/ (10^{-5} J)
15	479	513
30	547	556
45	720	741
60	690	527
75	641	557
90	645	533

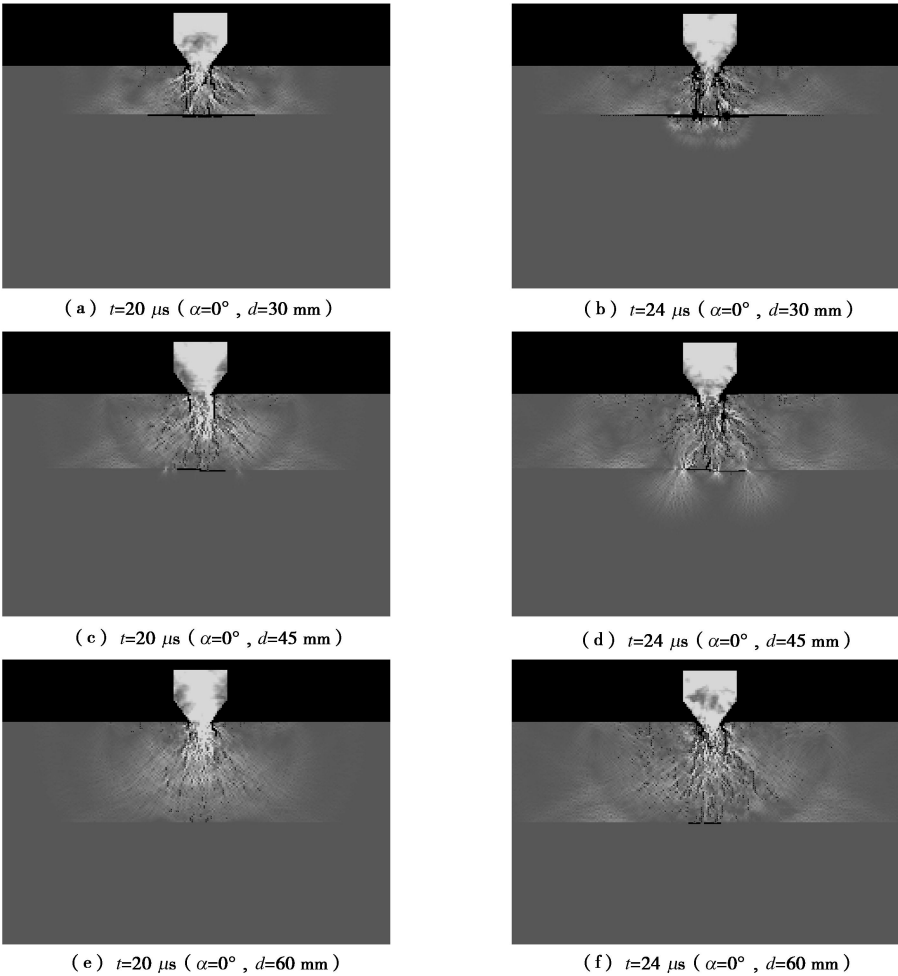


图 12 30 mm、45 mm 和 60 mm 三种节理间距岩体在刀具动态荷载作用下破坏对比图

Fig. 12 Comparison of failure patterns between rocks with joint spacing of 30, 45 and 60 mm

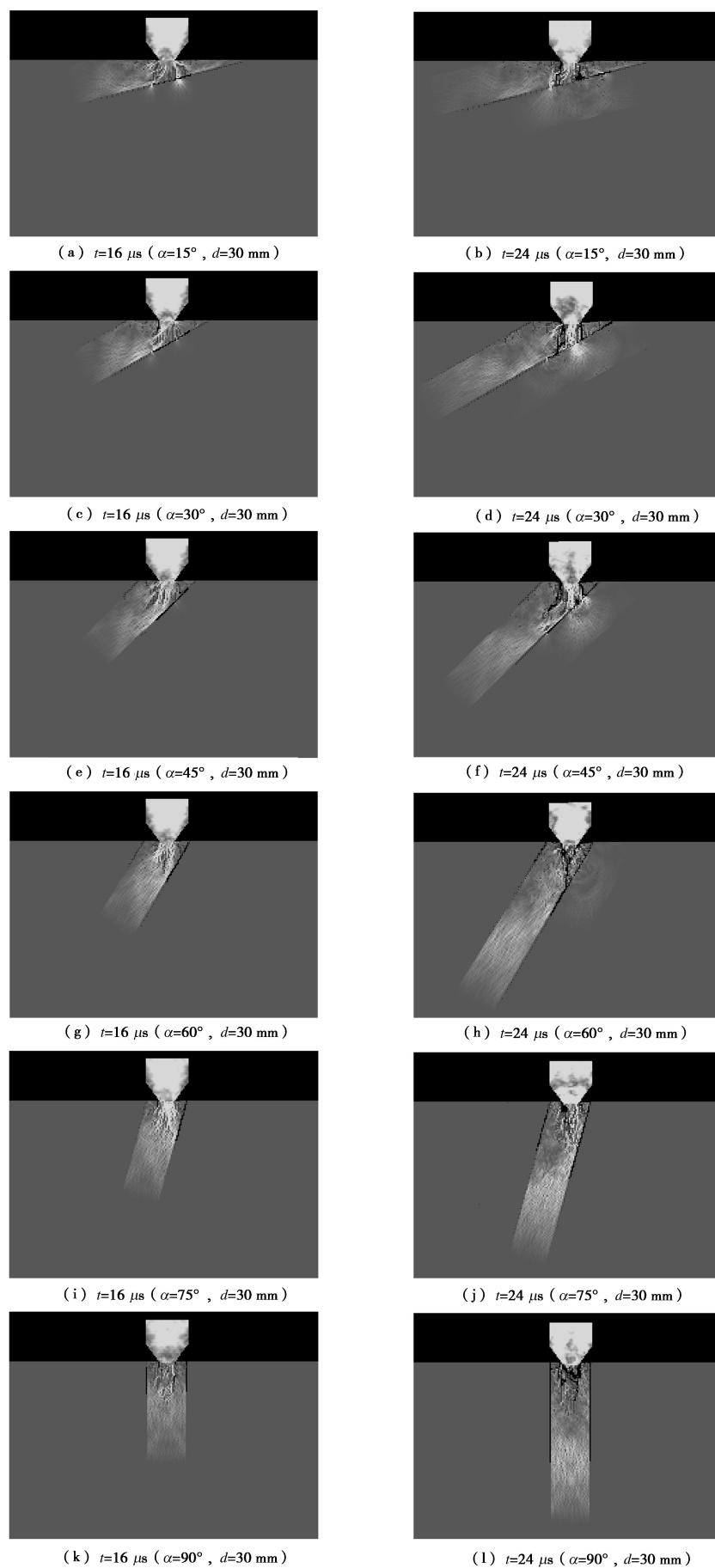


图 13 不同节理倾角岩体在刀具动态荷载作用下破坏对比图

Fig. 13 Comparison of failure patterns between rocks with different joints angles

时达到最大。随着倾角的继续增大, 岩体的声发射总次数和能量值均有减小的趋势。由此看出, 相比不同倾角下的岩体, 当节理倾角为 45° 时破岩效果相对最佳。

4 结 论

节理岩体在刀具动态作用下的破坏过程的研究还很少见。本文通过运用 RFPA^{2D} 动态软件, 通过考虑黏弹性边界以排除了边界应力波反射对破岩模拟结果的影响, 探讨了在岩体中节理间距以及节理倾角对刀具破岩模式的影响, 得到以下 4 点结论。

(1) 在无节理岩体中, 高应力区集中在岩体与刀头接触的两侧, 该处在荷载作用下逐步损伤形成两道向下延伸的主裂纹。随着应力波在传递过程中能量时不断耗散, 主裂纹扩展速度减慢, 裂纹尖端相互汇合, 最终停止向下部扩展。

(2) 水平节理的存在改变了应力波的传播模式。一方面, 节理面反射的应力波加剧了节理面上部岩体的破坏程度; 另一方面, 节理面的破坏吸收了应力波能量, 阻碍了应力波的向下传播, 减弱了下部岩体的破坏。

(3) 不同的节理间距对破岩效果具有很大的影响。节理间距越大的岩体, 应力波传递到节理面的过程中消耗的能量越多, 导致节理面破坏后反射的拉应力波能量值降低, 节理面处岩体的拉破坏区域减小。同时, 节理间距越小的岩体形成的主裂纹宏观更加明显。当节理间距不断增大, 节理面对岩体破坏形式的影响逐渐减弱, 最后可视无节理情况。

(4) 倾斜节理的存在改变了裂纹扩展的规律, 裂纹呈现不对称性扩展, 节理面反射造成拉破坏现象依然存在。节理存在限制了主裂纹向下扩展的空间, 节理倾角越小, 对主裂纹的萌生与扩展起到的阻碍作用越明显。节理倾角为 45° 情况下, 岩体声发射总次数与能量值达到最高, 破岩效果最佳。

参考文献:

- [1] LIU H Y, KOU S Q, LINDQVIST P A. Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by indenters[J]. International Journal of Rock Mechanics, 2002, **39**(4): 419 - 505.
- [2] 孙金山, 陈 明, 陈保国, 等. TBM 滚刀破岩过程影响因素数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(6): 1891 - 1897. (SUN Jin-shan, CHEN Ming, CHEN Bao-guo, et al. Numerical simulation of influence factors for rock fragmentation by TBM cutter[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(6): 1891 - 1897. (in Chinese))
- [3] 张 魁, 夏毅敏, 徐夜军. 不同围压及切削顺序对 TBM 刀具破岩机理的影响[J]. 土木工程学报, 2011, **44**(9): 100 - 106. (ZHANG Kui, XIA Yi-ming, Xu Zi-jun. Effects of confining pressure and cutting sequence on the rock-breaking mechanism by TBM cutter[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, **44**(9): 100 - 106. (in Chinese))
- [4] 刘喜武. 弹性波场论基础[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2008. (LIU Xi-wu. Fundamentals of elastic wave field-theory[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2008. (in Chinese))
- [5] WANG S Y, SLOAN W S, LIU Y H, et al. Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by two drill bits subjected to static and dynamic (impact) loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, **44**(3): 317 - 332.
- [6] 杨岳峰, 唐春安, 梁正召. 冲击作用下的刀具破岩机理研究[J]. 岩土力学, 2012. (YANG Yue-feng, TANG Chun-an, LIANG Zheng-zhao. Rock fragmentation mechanism induced by a drill bit subjected to dynamic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012. (in Chinese))
- [7] GONG Q M, ZHAO J, JIAO Y Y. Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, **20**(2): 183 - 191.
- [8] GONG Q M, ZHAO J, JIAO Y Y. Numerical modeling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, **21**(1): 46 - 55.
- [9] 邹 飞, 李海波, 周青春, 等. 岩石节理倾角和间距对隧道掘进机破岩特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(6): 1640 - 1646. (ZHOU Fei, LI Hai-bo, ZHOU Qing-chun, et al. Experimental study of influence of joint space and joint angle on rock fragmentation by TBM disc cutter[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(6): 1640 - 1646. (in Chinese))
- [10] 朱万成, 唐春安, 杨天鸿, 等. 岩石破裂过程分析用 (RFPA^{2D}) 系统的细观单元本构关系及验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(1): 24 - 29. (ZHU Wan-cheng, TANG Chun-an, YANG Tian-hong, et al. Constitutive relationship of mesoscopic elements used in RFPA^{2D} and its validations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(1): 24 - 29. (in Chinese))
- [11] 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (TANG Chun-an, WANG Shu-hong, FU Yu-fang. Numerical text of rock failure[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))
- [12] LINDQVIST P A, SUAREZ L M, MONTOTO M. Rock indentation database-testing procedures, result and main conclusions[R]. SKB Project Report, 1994.