

# 动静组合加载下刀具破岩的力学模型

张化民<sup>1</sup>, 于好善<sup>2</sup>, 陈礼仪<sup>1</sup>, 宋刚<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**基于初始弹性和动静荷分工的假设,将动静复合加载下坚硬完整的脆性岩石的破碎过程分为弹性、损伤和断裂3阶段,综合运用弹性力学、岩石力学、损伤力学和断裂力学进行分析。由集中力作用下弹性半空间的应力场和单元体的剪切破坏,得出了岩石损伤的裂纹源和其曲线扩展路径;选定I型、II型裂纹作为动载冲击作用下压剪裂纹的扩展模式。提出了以冲击能(次数)来定义损伤度的方法。以相邻破碎坑的侧向裂纹扩展贯通作为岩石破碎的终点。本力学模型可以用于动静复合加载破碎岩石的系统仿真、数值模拟和机具设计。

**关键词:**动静载荷;岩石破碎;裂纹源;破岩刀具

**中图分类号:**P634.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2013)02-0015-04

**Mechanical Analysis on Rock Fragmentation under Combined Static and Dynamic Loading/ZHANG Hua-min<sup>1</sup>, YU Hao-shan<sup>2</sup>, CHEN Li-yi<sup>1</sup>, SONG Gang<sup>2</sup>** (1. Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** Based on the initial elastic and divisions of work by static and dynamic loads, the hard and intact brittle rock breaking process under static and dynamic loading is divided into 3 stages: elasticity, damage and fracture, which are analyzed by comprehensive use of elastic mechanics, rock mechanics, damage mechanics and fracture mechanics. By the elastic half space stress field and shear failure of the rock unit under the concentrated force, the damage of rock crack source and its curve extension path are found; type I and type II cracks are selected as press shear crack extension modes under dynamic load impact. Method to define the damage degree by impact energy (times) is put forward. The lateral crack propagation and coalescence of adjacent pit is defined as the end of rock breaking. This mechanical model can be applied in the system simulation, numerical simulation and machines design for rock breaking by combined static and dynamic loading.

**Key words:** static and dynamic loads; rock breaking; crack source; cutting tool

## 0 引言

岩石破碎工程广泛存在于矿山开采、油气井钻进、地质勘探、隧道掘进等工程领域之中。对岩石在复杂荷载下的力学性质和破坏特性进行研究,对岩土施工机具的设计、开发具有重要的指导意义。

岩石作为一种地质材料,内部存在大量的晶界、位错、孔洞、微裂隙等裂纹源,在外力作用下,这些裂纹源不断地贯通、聚集、成核最终导致岩石宏观破坏。岩石的这种逐渐破坏过程已经成为人们的共识,并可以用损伤来进行描述。岩石的破坏作为岩石内部众多微观裂纹相互作用的结果,其模式受岩石的受力状态控制。

目前在岩石力学领域中,对岩石在单独承受静载作用时破坏机理的研究已经比较深透。对单独承受动载作用时岩石破坏的研究也取得了一定进展。但对动静复合加载下的岩石破碎机理研究还处于起步阶段,中南大学赵伏军教授的团队在这方面做了大量研究,并提出了一些有意义的成果<sup>[3-6]</sup>。其成

果可以概括为:动静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。合理的加载方式应是冲击载荷使岩石产生足够大的开裂区,再与之匹配适当的静压和切削力将开裂区岩石切削下来<sup>[3]</sup>。

本文的分析基于以下2个假定:

(1)初始连续弹性假定:岩石初始状态为坚硬完整的脆性岩石,不考虑岩石天然状态的孔洞、裂隙等,可以按照连续弹性体对其进行分析。

(2)动静荷载分工假定:动静复合加载方式为,静压使岩石产生预损伤,冲击载荷(冲击能)使岩石产生足够的开裂,动静荷载耦合力使岩石断裂破碎。

本文将岩石的破碎过程分为3个阶段:弹性-损伤-断裂。分析过程见图1。

收稿日期:2013-01-04

作者简介:张化民(1981-),男(汉族),河北深州人,成都理工大学硕士研究生在读,建筑与土木工程专业,从事岩土工程、地质勘探技术研究工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,93756017@qq.com。

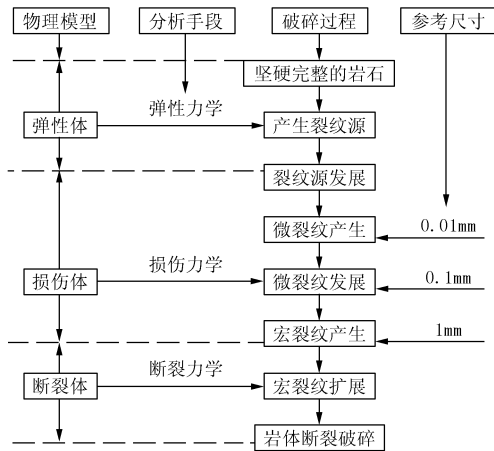


图1 岩石破碎过程分析图解

### 1 静载应力场与预损伤的力学模型

#### 1.1 静载产生的应力场

均匀完整的脆性岩石在初始静压力下的受力状态可以简化成弹性半无限空间上作用集中力问题(参见图2)。J.布辛奈斯克(Boussinesq, 1885)运用弹性理论推出了在弹性半无限空间表面上作用一个竖向集中力时,半空间内任意点 $M(x, y, z)$ 处的6个应力分量的弹性力学解答。

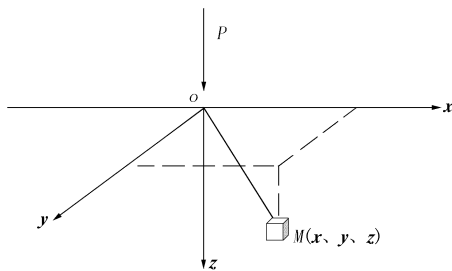


图2 集中力作用下弹性半空间问题

$$\sigma_x = \frac{3p}{2\pi} \left\{ \frac{x^2 z}{R^5} + \frac{1-2\mu}{3} \cdot \frac{R^2 - Rz - z^2}{R^3(R+z)} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right\}$$

$$\sigma_y = \frac{3p}{2\pi} \left\{ \frac{y^2 z}{R^5} + \frac{1-2\mu}{3} \cdot \frac{R^2 - Rz - z^2}{R^3(R+z)} - \frac{y^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right\}$$

$$\sigma_z = 3pz^3 / (2\pi R^5)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\frac{3p}{2\pi} \left\{ \frac{xyz}{R^5} - \frac{1-2\mu}{3} \cdot \frac{xy(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right\}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \frac{3p}{2\pi} \cdot \frac{xz^2}{R^5}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \frac{3p}{2\pi} \cdot \frac{yz^2}{R^5}$$

任一单元体 $M(x, y, z)$ 的应力状态为:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}$$

#### 1.2 集中力作用下弹性半空间应力场的特征

(1)主应力轨迹为一组同心圆和以 $O$ 为中心的放射线,见图3。(2)最大剪应力轨迹为一组与主应力轨迹成 $45^\circ$ 的2组曲线,最大剪应力轨迹为对数螺线,如图4所示。

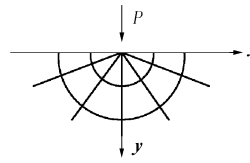


图3 主应力轨迹

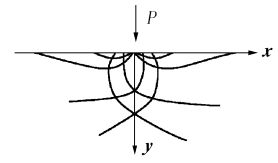


图4 最大剪应力轨迹

#### 1.3 单元体剪切破坏出现裂纹源

实践表明:岩石的抗剪强度和抗拉强度远低于抗压强度,在受压的情况下,岩体的破坏模式一般为剪切破坏。岩石破坏的摩尔库仑准则已被岩土工程界广泛接受,存在成熟的实验测试手段。本文考虑岩石的单元体破坏为剪切破坏。

由单元体应力状态可以求出该点的主应力,并假定单元体的破坏为压剪破坏且符合摩尔-库仑准则,建立单元体破坏判据,单元体受力图见图5。

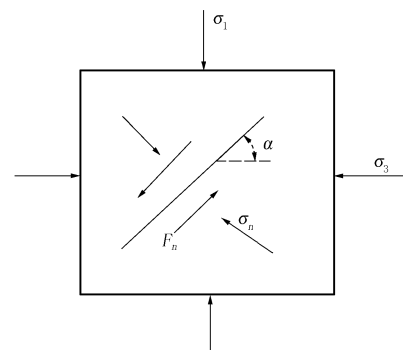


图5 单元体剪切破坏示意

岩石单元体剪切破坏判据:

$$F_n = |(\sigma_1 - \sigma_3) \sin\alpha \cos\alpha| - fH(\sigma_n)\sigma_n - c$$

$$H(\sigma_n) = \begin{cases} 1 & \sigma_n > 0 \\ 0 & \sigma_n \leq 0 \end{cases}$$

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha$$

$$\alpha = \pi/4 + \varphi/2$$

式中: $f$ ——岩石内摩擦系数; $c$ ——岩石的粘聚力; $\varphi$ ——岩石的摩擦角。

当 $F_n > 0$ 时,岩石发生剪切破坏,出现裂纹源。

由于岩石实际上是非均质材料,宏观试样测得的 $c, \varphi$ 值在微观层面上存在着大小波动,在 $c, \varphi$ 值较小处单元体产生开裂,在 $c, \varphi$ 值较大处单元体仍处于完整状态。所以在 $F_n > 0$ 时,岩石并非完全沿理论剪切面断开,而是处于局部化破坏阶段。

裂纹源的空间分布大体上符合图8的最大剪应

力轨迹图,稍有变形并处于不连续的点画线状态,同时开裂点也在压力下紧密的咬合在一起。从此图中可以看处岩石破碎状态的关键因素(密实核、径向裂纹、侧向裂纹和中间裂纹)的锥形。该裂纹源将在动载的冲击作用下扩展。

分析表明动静复合加载破碎岩石的静载存在一个下限值。只有静载压力高于此下限值,才能对岩石产生预损伤,使岩石在动载冲击作用下产生体积破碎。否则岩石仍将处于弹性状态,岩石破碎效率很低。该下限值可以通过本力学模型和岩石剪切试验的 $c$ 、 $\varphi$ 值计算得出。

## 2 动载冲击作用与岩石损伤演化

产生预损伤后的岩体不再是连续体,弹性力学不再适用,应该用损伤力学对其进行分析。

### 2.1 岩体损伤模式

选取 I 型和 II 型裂纹作为动载冲击作用下压剪裂纹的扩展模式(图 6、图 7)。裂纹扩展路径可以取图 5 所示的最大剪应力轨迹。

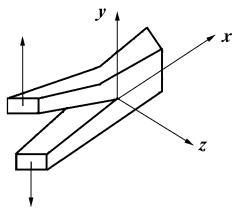


图 6 I 型裂纹示意

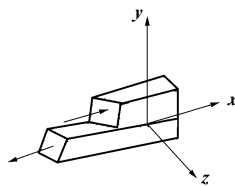


图 7 II 型裂纹示意

I 型裂纹尖端应力场:

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

II 型裂纹尖端应力场:

$$\sigma_x = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\right)$$

$$\sigma_y = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right)$$

裂纹扩展的判据为:

$$\left(K_I/K_{Ic}\right)^2 + \left(K_{II}/K_{IIc}\right)^2 = 1$$

式中: $K_I$ 、 $K_{II}$ ——分别是 I 型和 II 型裂纹应力强度因子; $K_{Ic}$ 、 $K_{IIc}$ ——分别是 I 型和 II 型裂纹的临界

应力强度因子。

### 2.2 以输入能量定义的损伤度

由于岩石的细观裂纹扩展与岩体材料表观损伤之间的关系很复杂,并且各型裂纹动态应力强度因子没有确定的计算方法,所以着眼于动静复合加载破碎岩石的工程实际,可以采用试验的方法,用输入能量的大小定义损伤度。以定值的冲击能不断冲击岩石,并每次观测其损伤度,即可建立冲击能量(次数)与损伤度之间的关系。

基于冲击能量的损伤度定义:

$$D = 1 - (n/N)^\beta$$

式中: $N$ ——岩石完全损伤时的总冲击次数; $n$ ——当前冲击次数; $\beta$ ——待定系数。

岩体的损伤本构:

$$\sigma = E(1 - D)\varepsilon$$

式中: $D$ ——岩体损伤度,取值在 0 ~ 1 之间。

### 2.3 应力波的强度与损伤演化

动载的冲击作用是通过应力波的形式将能量作用于岩石体使其产生损伤的。

应力波通过岩石时的能量作用密度存在上、下限值,即当能量作用密度小于下限时,应力波通过岩石时仅以弹性波的形式耗散在岩石中;而当能量作用密度大于上限时,岩石在应力波的作用下发生宏观断裂。只有应力波的能量作用密度处于上下限之间时,应力波的通过才使岩石发生损伤,并可能通过反复加载产生的疲劳损伤导致岩石破坏。施加的能量作用密度越大,损伤速率也越大。损伤度由  $D_0$  发展到  $D_f$ ,不是一个瞬态过程,而是一个准连续的没有间断的累积过程<sup>[3]</sup>。

应力波作用下疲劳损伤的迭代式为:

$$\frac{D_n - D_{n-1}}{D_f - D_{n-1}} = \left(\frac{A - A_0}{A_1 - A_0}\right)^\beta \quad (A_0 < A < A_1)$$

式中: $A$ ——与能量密度有关的系数。

在动载的冲击能连续的数次输入后,岩石损伤体的损伤值达到最大,岩体强度达到屈服强度,微细裂纹扩展成宏裂纹,岩体进入断裂阶段。

## 3 岩石冲击凿入力与断裂破碎

岩体内部大量开裂后,岩体的力学性质与岩体材料本身关系不大,而是受裂纹的形态和长度控制,应该用断裂力学对其进行分析。

### 3.1 弹脆性断裂形态

脆性岩石断裂体一般产生径向、中间和侧向裂纹(图 8),除产生上述 3 种基本裂纹外,在压头下方

一般还要形成一个密实核,形成的密实核近似于半球形,其主要特征是发生了剪切变形。侧向裂纹一般在卸载过程产生并扩展,中间裂纹产生于加载过程,并在卸载过程有部分弹性恢复;径向裂纹既可产生于加载过程,又可出现在卸载期间,但不论何时产生都在卸载过程继续发展。

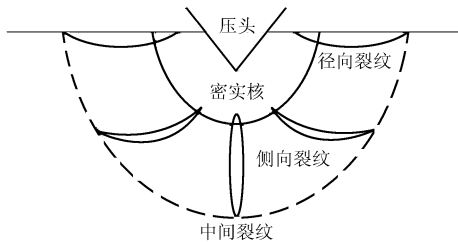


图8 压头下裂纹扩展示意

### 3.2 动静复合凿入力和裂纹关系

文献[3]通过分析得出了动静载耦合凿入力与凿入力和各种裂纹的长度的关系。

动静复合加载的最大凿入力:

$$P_m = 2mV_1 \gamma^{1-\gamma} \left[ 1 - \frac{(1-\gamma)P_0}{2mV_1} \right]^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}$$

式中: $m$ ——钻头的平均波阻力; $\gamma$ ——撞击凿入指数, $\gamma = m^2 / (MK)$ ,为无量纲量; $M$ ——冲锤质量; $P_0$ ——静压力。

中间、径向裂纹长度与荷载关系:

$$C = [P(x_e + x_r) / K_c]^{2/3} \text{ (加载)}$$

$$C = [(x_e P + x_r P_m) / K_c]^{2/3} \text{ (卸载)}$$

$$x_e = \xi_e(\varphi) \ln(2c/b)$$

$$x_r = \xi_r(\varphi) (E/H)^{1/2} (\alpha_1 \cot \theta)^{2/3} / \alpha_0$$

侧向裂纹长度与冲击荷载的关系:

$$C = \left[ \frac{\xi_L}{A^{1/2}} (\cot \theta)^{5/8} \frac{(E/H)^{3/4}}{K_c H^{1/4}} \right]^{1/2} P_m^{5/8}$$

破岩体积:

$$V \propto \left[ \frac{\xi_L}{A^{1/2}} (\cot \theta)^{6/7} \frac{(E/H)^{5/4}}{K_c H^{3/4}} \right]^{1/2} P_m^{7/4}$$

式中: $\xi_e$ 、 $\xi_r$ ——均为与材料性质和压头形状无关的无量纲函数,只与计算角度 $\varphi$ 有关; $E$ 、 $H$ ——分别为岩石的弹模和硬度, $H = P / (\alpha_0 \alpha^2)$ ;  $a$ ——接触半径; $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$ ——压头几何常数; $b$ ——密实核区半径; $\theta$ ——压头特征角。

由以上公式可以得出结论:岩石断裂破碎过程中形成的中间、径向和侧向裂纹长度与压入载荷、冲击能量成正比例增加。大冲击能、高冲击频率和小冲击间距对破碎脆性硬岩有较好效果。当相邻刀具之间的裂纹贯通后岩石被破碎下来,至此岩石的整

个破碎过程完成(见图9)。

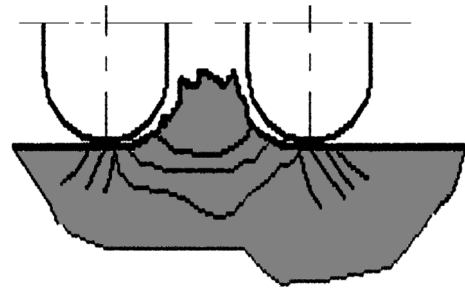


图9 相邻刀具产生的破碎区裂纹相互贯通

## 4 结论

(1)基于物理现象和工程要求,将动静复合加载下岩石的破碎过程分为弹性-损伤-断裂3阶段。在初始弹性和动静荷载分工的2个假设的基础上,利用弹性力学、岩石力学、损伤力学和断裂力学对各阶段进行了详细分析。建立了动静复合加载下刀具破岩的力学模型。

(2)理论上做出岩石损伤分析:集中力作用下弹性半空间的最大剪应力轨迹(两组对数螺旋线),可以作为岩石损伤的演化路径,张开型裂纹和滑开型裂纹作为动载冲击作用下压剪裂纹的扩展模式,裂纹的最终扩展结果是形成宏观的密实核与中间、径向和侧向裂纹。如果能在数学和力学将这一过程做严密的表达,将是岩体损伤力学的一大可喜成果。

(3)本力学模型可以用来进行碎岩钻进工具的轴压、冲击力、布齿间距的计算,可以用于钻进系统仿真、岩石破碎数值模拟等,对工程实践具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 谢和平. 岩石和混凝土损伤力学[M]. 江苏徐州:中国矿业大学出版社,1990.
- [2] 杨桂通. 弹塑性力学引论[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- [3] 赵伏军. 动静载耦合作用下岩石破碎理论及试验研究[D]. 湖南长沙:中南大学,2004.
- [4] 李夕兵,左宇军,马春德. 动静组合加载下岩石破坏的应变能密度准则及突变理论分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2814-2824.
- [5] 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.
- [6] 赵伏军,李夕兵,冯涛. 动静载组合破碎脆性岩石试验研究[J]. 岩土力学,2005,26(7):1038-1042.
- [7] 李国华,陶兴华. 动、静载岩石破碎比功试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(14):2448-2454.
- [8] 张志呈,蒲传金,史瑾瑾. 岩石动态损伤断裂机理与损伤变量[J]. 矿业研究与开发,2006,26(4):75-78,100.
- [9] 黎中银,夏柏如,吴方晓. 旋挖钻机高效入岩机理及其工程应用[J]. 中国公路学报,2009,22(3):121-126.
- [10] MCLAMORE R, GRAY K E. The Mechanical Behavior of Anisotropic Sedimentary Rocks[J]. Journal of Engineering For Industry,1967,89:62-76.