

文章编号: 1004- 0609(1999)03- 0666- 06

节理岩体爆破的损伤机理及其块度模型^①

张继春

(西南交通大学地下工程及岩土工程系, 成都 610031)

摘 要: 在分析现有岩体爆破机理与块度计算模型的基础上, 提出了考虑工程岩体的尺寸效应、将宏观结构弱面引入岩体爆破物理过程来建立块度模型的观点。为此, 按照损伤力学的处理方法, 应用连续介质损伤理论研究爆破过程中岩体弱面的破裂机制, 给出了岩体沿节理破裂的损伤发展方程。从爆破岩块具有分形特征的思想出发, 通过提出“岩体破裂比率”概念, 将爆破块度计算同节理岩体爆破机制相联系, 建立起岩体爆破块度的损伤力学模型(BDM), 该模型反映了岩体沿节理面破裂和岩石本身破裂的岩体爆破本质。

关键词: 节理岩体; 爆破; 损伤机理; 块度

中图分类号: TD235.1

文献标识码: A

自50年代初Obert等人利用模型实验研究节理裂隙等原生宏观弱面对爆破应力波传播的影响规律以来^[1, 2], 国内外学者先后从弹性力学、断裂力学和损伤力学角度分析岩体爆破机理, 通过室内模型与现场爆破试验探寻岩体弱面产状同爆破块度的相互关系, 建立起十多个块度计算模型^[3]。然而, 现有的岩体爆破机理未将岩体内的宏观弱面引入爆破过程, 使得建立的块度模型没有涉及岩体沿原生弱面破裂对爆破块度组成所作的有效贡献这一关键问题。为此, 本文拟充分考虑岩体尺寸效应, 在引入岩体弱面的破裂概率基础上, 提出一个新的爆破块度模型。

1 概述

澳大利亚工程师Harries率先进行岩体爆破机理与块度模型的耦合研究, 建立了可模拟爆破裂缝分布和块度组成的HARRIES模型^[4~6]。之后, 加拿大Favreau教授以爆破应力波理论为基础提出BLASPA爆破模型^[7],

马鞍山矿山研究院从应力波能量分布出发, 建立起露天矿台阶爆破模型(BMMC)^[8], 这些模型均未体现出节理裂隙等地质弱面对爆破块度形成的有效贡献。而美国Margolin等人应用Griffith强度理论和有效模量理论建立的BCM模型却仅限于层状微裂隙范围^[9]。

1978年Kipp等人先后从损伤力学和动能理论角度建立起岩石爆破损伤模型, 并利用二维动力有限元程序(DYNA2D)计算了油页岩爆破的破碎范围^[10~13], 中国矿业大学又在此基础上给出了岩石爆破分形损伤模型^[14], 这些研究成果都肯定了只有一部分原生节理裂隙对岩体爆破起控制作用的观点。

然而, 这些模型都将微(细)观裂纹视为岩石损伤(矿物粒晶尺寸级), 即使采用分形方法描述裂纹的几何形状, 也会由于各种断裂的分形特征只存在于一定的测度范围内而不可能在同一测度内用分维数将微裂纹和宏观断裂同时表示出来, 而且微裂纹的数量(约 10^4 个/ m^3)远大于宏观弱面数, 这极大地削弱了弱面对爆破碎块形成的控制作用。对现场爆破岩块的调

① 收稿日期: 1998- 08- 21; 修回日期: 1999- 04- 12

张继春(1963-), 男, 教授, 博士后

查发现, 80% 以上的爆破岩块表面是沿原生宏观地质弱面形成的^[15], 表明微裂纹在岩体爆破中所作的贡献十分有限。因此, 在岩体爆破机理研究中有必要考虑工程岩体的尺寸效应, 才能使理论研究符合工程实际。

由爆破碎块的分形构造过程可知^[16], 岩体爆破块度受破碎概率的控制。所以, 只有通过考虑宏观弱面的岩体爆破机理分析, 确定爆破作用下岩体产生各种破裂面的概率, 才可能建立起反映岩体爆破本质的块度计算模型。

2 节理岩体爆破的损伤过程分析

2.1 岩体爆破的损伤观点

工程岩体的特点是: 岩体内存在大量的宏观节理裂隙等弱面, 它们往往是成组分布, 其间距和迹长多在 0.1~ 10m 之间。虽然这些弱面的规模不大, 却使岩体强度极大降低, 且呈各向异性。对爆破岩块表面特征的统计发现, 除在爆源附近产生少量的新鲜岩石破裂面外, 大部分是岩体的原生弱面, 并且这些岩块内部仍存在着可见的节理裂隙^[15]。由此可知, 在爆炸荷载短暂的作用阶段, 岩体中一部分弱面同时开裂、扩展, 最终导致岩体破碎。

就整个爆区岩体而言, 弱面的空间分布符合一定的统计规律, 但其尺寸相对于岩体尺寸却很小, 所占体积十分有限, 不影响岩体的连续性。而且弱面强度远小于岩石强度, 可将其视为岩体的“缺陷”。介质内的缺陷在外力作用下破裂的全过程及其力学机制正是损伤力学所研究和描述的内容。因此, 可借助损伤力学方法分析岩体爆破机制。

2.2 岩体损伤变量定义

鉴于岩体多沿弱面形成, 可暂不考虑岩石破裂, 并以含节理、裂隙这两种弱面的岩体为研究对象。根据损伤定义, 将不能承载的裂隙视为初始损伤, 节理视为潜在的损伤发展源, 且将岩体损伤理想化: 节理裂隙为一平面, 损伤沿节理面发展。

当爆区岩体内共有 m 组弱面, 且设 N_i ,

\bar{a}_i 分别为第 i 组弱面的数目和平均面积, 那么弱面的总表面积 $A_m = \sum_{i=1}^m N_i \bar{a}_i$ 。若爆破过程中各组弱面的节理破裂数为 N'_i , 初始裂隙数为 N_i^0 , 则破裂面的总面积为 $A = \sum_{i=1}^m (N'_i + N_i^0) \bar{a}_i$ 。

按照 Chaboche 等人给出的损伤面积比定义^[17], 并利用弱面空间分布的统计关系式^[18]: $\bar{a}_i = \bar{l}_i^2 \pi / 4$ 和 $N_i = V \lambda_i = V \lambda_i^{3/2}$, 岩体损伤变量可定义为

$$\omega = \omega_0 + [\sum_{i=1}^m N'_i \bar{l}_i^2 / [V \sum_{i=1}^m \lambda_i^{3/2} \bar{l}_i^2]] \quad (1)$$

式中 ω_0 为岩体初始损伤量, 可由下式表达:

$$\omega_0 = \sum_{i=1}^m N_i^0 \bar{l}_i^2 / V \sum_{i=1}^m \lambda_i^{3/2} \bar{l}_i^2 ;$$

λ_i, \bar{l}_i 分别为第 i 组弱面的面密度和平均迹线长度; V 为单元岩体体积。

2.3 爆破过程的损伤力学分析

爆破荷载作用下岩体弱面的破裂过程可用连续损伤理论的统计模型描述。如图 1 示, 用一组平行杆模拟一个完全脆性的单元体在拉伸作用下的破裂问题^[19]。每条杆在拉力达到其极限强度 $f_i = f_{Ri}$ 之前都保持其完全弹性, 当外荷载增加而引起一部分杆破裂时, 外力在未破裂杆上将重新分布。作理论简化, 可近似认为岩体各弱面的力学性质基本相同, 因其在空间呈随机分布, 即使岩体受载条件一定, 各弱

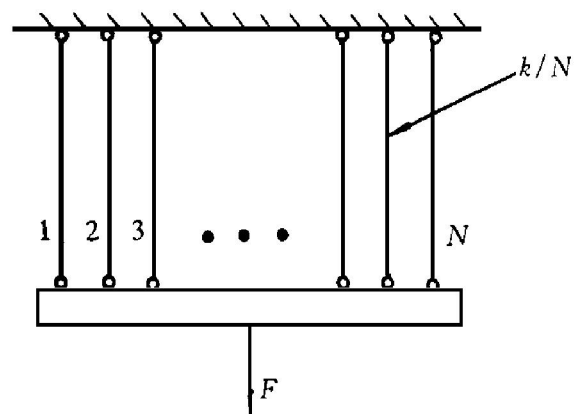


图 1 弱面的平行杆破裂模型

Fig. 1 The parallel bar model of weakness planes

面表现出的破裂强度也不会都相等。因此，在分析爆破机理时，可将所有弱面等价地视为图1中的一组平行杆。

假定每条杆的刚度(k/N_i)相等，破裂强度 f_{Ri}/N_i 不同。力与变形的关系为

$$f_i = \begin{cases} kx/N_i & 0 \leq kx \leq f_{Ri} \text{ 且 } \dot{x} \geq 0 \\ 0 & kx \geq f_{Ri} \text{ 且 } \dot{x} \geq 0 \end{cases}$$

式中 N_i 为杆的总数， x 为杆系统的轴向位移。若已破裂杆数为 n ，则可得力的平衡方程

$$F = \sum_{n+1}^{N_i} kx/N_i = kx(1 - \omega) \quad (2)$$

上式将损伤变量 ω 的定义简化为已破裂杆数与杆的总数之比，即 $\omega = n/N_i$ (等价于视单元岩体内各条弱面的面积相等)。

实际的损伤变量是单元中各条杆破裂强度的函数，对于有大量杆的单元(N_i 很大)，式(2)的前半部分可改写为

$$F = kx \int_{kx}^{F_R} p(f_R) df_R \quad (3)$$

式中 $p(f_R)$ 为杆件破裂强度的概率密度函数， $p(f_R)df_R$ 为破裂强度区间 $[f_R, f_R + df_R]$ 内的杆的数量比例， f_R 为单元中杆的最大破裂强度。

$$\text{由于 } \int_0^{F_R} p(f_R) df_R = \int_0^{kx} p(f_R) df_R + \int_{kx}^{F_R} p(f_R) df_R = 1,$$

则式(3)可变换为

$$F = kx [1 - \int_0^{kx} p(f_R) df_R] \quad (4)$$

对比式(2)和式(4)可得

$$\omega = \int_0^{kx} p(f_R) df_R = P(kx) \quad (5)$$

式中 $P(kx)$ 为给定应力水平 kx 和破裂强度概率密度函数 $p(f_R)$ 下的强度分布函数。

结构破坏强度通常服从 Weibull 分布，式(5)进一步表示为

$$\omega = 1 - \exp[-B(\sigma/\sigma_0)^y] \quad (6)$$

式中 σ 为作用在单元上的最大应力， σ_0 为节

理面的最小破裂应力， y 为强度分布参数， B 为与单元尺寸及变形特征有关的参数。

式(1)与式(6)构成了岩体沿节理面破裂的损伤发展方程。

3 节理岩体爆破块度的损伤力学模型(BDM)

3.1 BDM 模型的基本观点

如爆破岩块的随机分形构造模型所述^[16]，若按某种方式将爆区岩体划分成单元，那么，任一单元块体因其结构弱面的分布已经确定，在受力状态不产生较大变化的条件下，该单元的各天然块度级的破碎概率可以视为相等。因此，爆后的各单元岩体都形成与其受力状态相对应的具有一定块度分布的碎块集合。

另一方面，由于破碎概率的大小直接同爆破断裂面的生成数量有关，破裂面多，相应的破碎概率就大，并且鉴于岩体中存在非爆破产生的原生宏观裂隙，因此，本文将破碎概率的物理意义扩展，提出“岩体破裂比率”这个新概念，它包括两方面内容，即

$$K = K_w + K_r \quad (7)$$

式中 K 为岩体破裂比率； K_w 为弱面破裂比率， $K_w = N_w/N$ ， N_w 为岩体沿弱面破裂数， N 为统计的弱面总数； K_r 为岩石破裂比率， $K_r = N_r/N$ ， N_r 为岩石破裂面数。

为准确计算爆破块度，可采用非均匀划分法将爆区岩体划分成单元，以保证各单元岩体内的应力状态不出现明显差异，使其岩体破裂比率近似为常数。如图2所示，在与炮孔轴线垂直的平面内，可按某一相同的压力降低值将岩体以爆源为中心分成若干不同宽度的环状区域；在环向则按等圆心角将环状区域再划分成平面单元，在炮孔轴线也按相同的压力降低值将岩体划分成不同厚度的层状带。

3.2 岩体爆破比率的计算

3.2.1 弱面破裂比率

由于采用非均匀划分方法能保证单元岩体内各点的应力状态基本相同，可近似认为同一

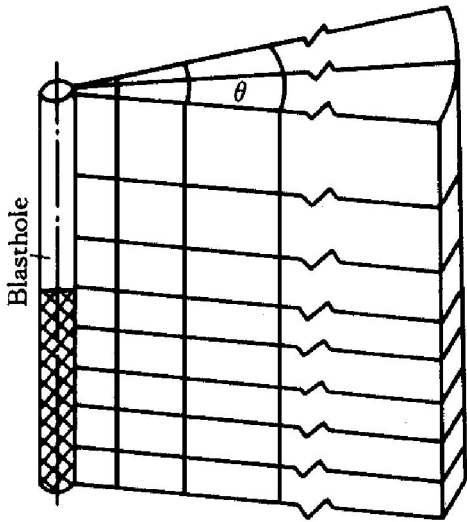


图2 爆区岩体非均匀划分示意

Fig. 2 Illustration of dividing rock masses into elements

单元内岩体沿节理面破裂的概率为常数, 且各组弱面的节理破裂概率也相等。则单元岩体在应力水平 σ 作用下第 i 组弱面的节理破裂数 N_i^j 为

$$N_i^j = (N_i - N_i^0) K_i^j \quad (8)$$

式中 K_i^j 为第 i 组弱面的节理破裂概率。

由式(1), 式(6)和式(8)推导, 并令 $F(\sigma) = 1 - \exp[-B(\sigma/\sigma_0)^v]$ 整理后得

$$K_i^j = [F(\sigma) - \omega_0]/(1 - \omega_0) \quad (9)$$

式(9)给出了单元岩体在应力 σ 作用下沿节理面破裂的概率。考虑到弱面的总破裂数为

$$N_w = \sum_{i=1}^m [(N_i - N_i^0) K_i^j + N_i^0]$$

其中并按 $K_w = N_w/N = N_w/\sum_{i=1}^m N_i$ 计算弱面破裂比率, 经推导整理得

$$K_w = [F(\sigma) - \omega_0]/(1 - \omega_0) - \{[1 - F(\sigma)]/(1 - \omega_0)\} \cdot \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m N_i^0}{\sum_{i=1}^m N_i} \right\} \quad (10)$$

式中 $\sum_{i=1}^m N_i$ 可按弱面的面密度计算, $\sum_{i=1}^m N_i^0$ 可根据爆前统计出的各组弱面的裂隙数占其总数的比例求得。

对式(9)两端的 ω_0 求一阶导数知, $dK_i^j/d\omega_0 < 0$, 表明节理破裂概率 K_i^j 是初始

损伤 ω_0 的严格单调递减函数。这意味着在爆破参数一定的条件下, 节理破裂概率随岩体中裂隙含量的增加而减小, 这就是为什么在裂隙发育岩体中爆破时块度过大的根本原因。

3.2.2 岩石破裂比率

爆破过程中岩体沿炮孔径向和水平方向产生新鲜破裂面的数量可分别按 Harries 和 Gama 提出的计算方法确定。若按图2方式在炮孔的环向以相同的角度 θ 将岩体划分成 $M_0 = 2\pi/\theta$ 个扇形单元, 则单元岩体的径向岩石破裂面数 N_r^1 可表示为^[4~6] $N_r^1 = \text{INT}[\varepsilon/\varepsilon_f]/M_0$, 而岩体中产生的水平向岩石破裂面数目 N_r^2 可按下式计算^[20] $N_r^2 = \text{INT}[\sigma_v/\sigma_c]h/H_c$, 因而单元岩体的岩石破裂比率 $K_r = (N_r^1 + N_r^2)/N$ 即为

$$K_r = \{ \text{INT}[\varepsilon/\varepsilon_f]/M_0 + \text{INT}[\sigma_v/\sigma_c]h/H_c \} / \sum_{i=1}^m N_i \quad (11)$$

式中 ε 为单元岩体环向拉应变, ε_f 为岩石的动态抗拉应变值, σ_v 为单元岩体的垂直拉应力分量, σ_c 为岩石动态抗拉强度, h 为单元岩体在铅垂方向的高度, H_c 为炮孔装药高度, $\text{INT}[x]$ 为小于或等于 x 的最大整数。

3.3 BDM 模型的统计基础

爆破前岩体已被节理裂隙面切割成具有某一块度分布的天然岩块, 爆破作用使岩体沿部分节理面破裂和岩石破裂形成爆破岩块。对爆破前后块度分布的统计分析发现^[21], 爆前含量较高的块度级, 其爆后的岩块含量也较高, 但块度尺寸有所降低, 说明爆破块度由天然块度和岩体破裂比率决定。

通常, 一个岩石试件在外力作用下破裂后, 其碎块具有一定的块度分布, 因而可认为各单元岩体的爆破岩块也具有一定的块度组成。若将爆后块度分为 t 个等级, 即 $x_1 < x_2 \dots < x_t$, 爆后块度小于 x_j 的体积比率 Y_j 为

$$Y_j = \sum_{i=1}^M [V(i)y_j(i)] / \sum_{i=1}^M V(i) \quad (12)$$

式中 $V(i)$ 为第 i 个单元岩体体积, $i = 1 \sim M$, M 为爆区划分的单元数; $y_j(i)$ 为第 i 个

单元岩体爆破后块度小于 x_j 的岩块含量, $j = 1 \sim t$ 。

爆破过程中每条节理破裂面和岩石破裂面的形成并相互贯通都对各级爆破岩块的产生作出贡献。正如爆破岩块的分形构造模型一样, 可以视单元岩体中各块度级内的天然岩块被破裂成次一级岩块的概率相等。这样, 爆破前后单元岩体在各块度级内的含量保持不变, 其块度则由该单元的岩体破裂比率决定。考虑到岩体中同级序结构面存在等距分布特征, 可假定爆破产生的各种岩体破裂面也符合等距规律, 从统计角度可认为爆破岩块的块度变为其天然块度的 $1/K$ 。

设天然块度分布函数为 F_0 , 经函数变换后得到第 i 单元岩体爆破后块度小于 x_j 的含量

$$y_j(i) = F_0[K(i)x_j(i)] \quad (13)$$

式中 $K(i)$, $x_j(i)$ 分别为第 i 单元的岩体破裂比率和块度。

式(12), 式(13)两式即为BDM模型的块度计算公式。由此可知, 各单元的岩体破裂比率对爆破块度起决定作用, 即使天然块度小, 也会因多数单元的岩体破裂比率小而产生大块度的爆破岩块。因此, BDM模型体现了爆破岩块具有分形特征的思想, 并通过岩体破裂比率将爆破机理同块度计算联系起来, 突出反映了岩体沿节理面破裂和岩石本身破裂的岩体爆破本质。

4 结语

尽管影响爆破块度的因素多达数十个, 然而起决定性作用的是岩体内的原生宏观弱面分布, 以及爆破过程中这些弱面的破裂概率和岩石破裂面的数目。本文正是在爆破碎块的随机分形构造模型基础上, 应用损伤力学的处理方法分析岩体爆破的节理破裂机制, 通过“岩体破裂比率”这个新概念将节理岩体爆破机理同爆破块度相联系, 建立起岩体爆破块度的损伤力学模型(BDM), 从而体现了工程岩体具有尺

寸效应的特点, 反映出节理岩体爆破本质。

致谢

本文的研究工作得到了东北大学徐小荷教授、钮强教授的悉心指导, 在此致以衷心的感谢。

REFERENCES

- 1 Obert L and Duvall W I. In: RI4583. U S Bureau of Mines, 1950: 31.
- 2 Koleky H. Stress Waves in Solid. New York: Dover Publication, 1953: 213.
- 3 Zhang Jichun(张继春) *et al.* Blasting(爆破), 1992, 9(4): 63~ 69.
- 4 Harries G. In: National Symposium on Rock Fragmentation. Adelaide, 1973: 41~ 54.
- 5 Harries G. In: 15th APCOM symposium. Brisbane, 1977: 325~ 334.
- 6 Harries G and Henst B. In: 15th APCOM Symposium. Brisbane, 1977: 317~ 324.
- 7 Favreau R F. In: Proceedings of 1st Int Symp on Rock Frag by Blasting, 1985: 408~ 417.
- 8 Zou Dingxiang(邹定祥). Explosion and Shock Waves(爆炸与冲击), 1984, 4(3): 48~ 59.
- 9 Margolin L G *et al.* In: Proceedings of 1st Int Symp on Rock Frag by Blasting, 1985: 203~ 210.
- 10 Kipp M E and Grady D E. In: SAND79- 1582. Sandia National Laboratories, 1978.
- 11 Grady D E. In: Z P Bazant ed, Preprints of Geomaterials: Rock, concretes and soils. Evanston, 1983.
- 12 Taylor L M *et al.* Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1986, (55): 301 ~ 320.
- 13 Kuszmaul J S. In: Proceedings of 2nd Int Symp on Rock Frag by Blasting, 1990: 282~ 291.
- 14 Yang Jun(杨军) and Wang Shuren(王树仁). Explosion and Shock Waves(爆炸与冲击), 1996, 16(1): 5~ 10.
- 15 Shanxi Mechanical Institute(陕西机械学院). Rock Dynamics(岩体动力学). Xi'an: Shanxi Mechanical Institute Press, 1983.
- 16 Zhang Jichun(张继春) *et al.* Metal Mine(金属矿

- 山), 1994, (11): 9~ 12.
- 17 Chaboche J L. Nuclear Engineering and Design, 1981, (64): 233~ 247.
- 18 Zhou Weiyuan(周维垣) *et al.* Sun Jun(孙均) *et al.* ed. New Development in Rock Mechanics(岩石力学新进展). Shenyang: Northeast University of Technology Press, 1989: 37~ 54.
- 19 Krajcinovic D and Silva M A G. Int J Solids Structures, 1982, 18(7): 551~ 562.
- 20 Tu Tongchun(屠同春) *et al.* Quarter of Changsha Insititute of Mine and Research(长沙矿山研究院学报), 1989, 9(4): 73~ 78.
- 21 Wang Weixing(王卫星) *et al.* Metal Mine(金属矿山), 1986, (3): 15~ 19.

Damage mechanism of blasting in jointed rock masses and its fragment-size model

Zhang Jichun

*Department of Underground Engineering and Geotechnical Engineering,
Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China*

Abstract: Based on the analysis and discussion of both the mechanism of blasting in rock masses and the model of fragment-size calculation in existence, the viewpoint that the fragment-size model for blasting should take the dimension effect of engineering rock into consideration and introduce the macro weakness planes in rock masses into the physical process of blasting was advanced. According to damage mechanics, therefore, the original cracks in a rock mass can be treated as initial damage and the joints as a latent source of damage developing. The breaking mechanism of weakness planes in blasting process was studied by using the continuum damage theory and the developing equation of rock masses breaking along joints was deduced. Proceeding from the thought of blasted fragments having the fractal characteristics, the calculation of blasted fragment sizes was related to the mechanism of blasting in jointed rock masses by the new concept of "rock mass fracture ratio" presented and, thus, the model of damage mechanics for blasting in rock masses(BDM) was established, which reflects the blasting essence of both rock masses breaking along joint planes and rock breaking.

Key words: joint rock mass; blasting; damage mechanism; particle size

(编辑 何学锋)