

岩石爆破分形损伤模型研究^{*}

杨 军 王树仁

(中国矿业大学北京研究生部,北京 100083)

摘要 在 Kus 和 Thorne 等人研究基础上,利用分形理论及应用成果提出了一种新的岩石爆破损伤模型。新模型将岩体中各种结构弱面视为初始损伤,并将其分形维数作为岩石性质的主要参量,用损伤能量耗散率及与分形维数的关系表征爆破过程中的岩石损伤演化规律,从而弥补了现有模型未考虑初始损伤影响和将损伤演化归结为体积应变函数的不足。还通过模拟试验等手段验证了新模型的如上观点。

关键词 岩石爆破 损伤演化 分形维数 本构关系

中图法分类号 TD235.1

1 引言

岩石爆破破碎损伤模型研究是工程爆破理论研究的前沿课题,它对于实现爆破优化设计和爆破效果预测都具有非常重要的意义。尤其是在当前计算机应用日益普及的条件下,无论是爆破工程的计算机设计还是爆破过程模拟研究,都需要有一个核心部分——岩石爆破破碎数值计算模型来支持其工作。爆破破碎模型的发展经历了弹性阶段、断裂阶段和现有的损伤阶段等过程。美国 Sandia 国家实验室从80年代初就开展了爆破模型的研究工作,经过 Kipp、Grady、Taylor、Chen 和 Kus 等人十余年的努力,最后由 Thorne 进行进一步修正提高,发展成为能够模拟脆性岩石动态破碎过程的二维数值计算模型,在油页岩爆破实践中取得了良好的应用成果。然而,由于现有模型未将岩石的初始损伤作为岩性参数,对损伤演化的假设也存在一定的局限性,致使计算结果与实际有些出入,加上一些初始参数难以确定,影响了该模型的广泛应用。我们利用岩石损伤分形研究的新成果对现有爆破破碎损伤模型进行改进提高,以形成新的岩石爆破破碎分形损伤模型。

2 岩石爆破破碎损伤模型中存在的两个问题

现有岩石爆破破碎损伤模型主要由裂纹激活原理、损伤演化规律和有效模量表达的应力应变关系三部分组成^[2,3],以下着重分析前两部分中存在的理论缺陷。

2.1 关于岩石损伤的描述

有关岩石损伤参量的描述是损伤力学研究的一大难题,现有的爆破损伤模型采取了裂纹激活假设来解决损伤描述问题。Kipp 和 Grady^[4]认为原岩中含有大量随机分布的原生裂纹,在爆炸荷载作用下这些裂纹被激活且呈指数分布,激活裂纹的数目与体积应变有

* 国家教委博士点专项基金资助项目。

1995年4月24日收到原稿。

关,平均裂纹尺寸与岩石密度、波速和断裂韧性,以及最大应变率有关。这样就忽视了岩石中普遍存在的节理、裂隙、微孔洞等天然损伤的存在及其对爆破作用的直接影响,这显然与实际是不符的。

众所周知,岩石作为一种长期地质作用的产物,不可避免地含有许多宏观或细观的缺陷或称损伤。正是这种天然缺陷的存在才使得在有限个炮孔爆炸作用下产生符合一定分布规律的破碎块度,若在均匀材料中作用同样的荷载无论如何也不会得到如此分布的破碎块度。用素混凝土模拟岩石进行爆破试验的结果就是很好的证明。原因可归结为岩石中的损伤包含着许多张开型裂纹,在冲击荷载作用下这些裂纹得到了扩展贯通。由此可见,岩石的原始损伤参量在爆破初期不能取零,而应该根据现场裂纹统计结果赋予适当的值,作为损伤演化的基础。

裂纹激活假设隐含着当荷载达到一定程度时裂纹才能被激活,才能发挥作用,这种假设显然是不合理的。因为在声波测试中岩块和岩体的波速差主要取决于岩石中不连续界面多少,而与发射声波功率无关。此时岩石中损伤的作用不存在是否被“激活”问题。事实上,岩体中的天然损伤在很大程度上决定了爆破破碎块度,它规定着爆破后岩块的最大尺寸限度,据文献^[5]称爆破后形成的岩块表面的 75%是陈旧裂隙面。所以岩石天然损伤的作用必须在损伤模型中得到充分重视。

2.2 爆破过程的损伤演化假设

岩石中含有裂纹及其它缺陷对于爆炸应力波作用可产生两种效应:一是降低了材料等效模量,使材料抵抗破坏的能力降低;二是增加了材料损伤能量耗散率,削弱了应力波的作用。这实质上反映了损伤的存在和发展既有促进岩石破坏(提供了裂纹源)又有阻碍破坏(耗散能量起屏障作用)的二重性^[6]。而现有的损伤模型只考虑了前者,忽略了后者,这就使得其破碎范围与实际有出入,从而影响了可靠程度。在现有模型^[7]中,损伤演化被假设为是体积应变的函数,其弊端在于强调了损伤劣化效应却忽视了损伤严重区域耗散能量大且进一步破坏困难的特点。

3 应用分形理论构造的新岩石爆破破碎损伤模型

鉴于以上分析,我们提出如下以初始裂纹(损伤)的分形为主要参数,损伤过程能量耗散率为演化依据的新模型。岩石中的天然裂纹的分布是很复杂的,而损伤参量 D 的定义和测量在损伤力学研究中也是没有定论的。分形几何在地球物理和岩石力学研究中的成功应用使人得到新的启示:即不妨先抛去岩石爆破物理过程中的诸多因素,单从损伤岩石的裂纹分形维数及其演化规律角度来构造爆破破碎模型。这无疑是一项大胆而新颖的探索。

3.1 损伤岩石的分形特征

岩石损伤演化过程所表现出的统计自相似性具有分形特征^[8],分形维数可以作为反映岩石损伤程度的统计特征量。分形统计自相似性还表现为在一定尺度范围内,分形维数作为岩体裂纹分布的指标具有误差小、把握全局能力强的优点^[9]。根据分形理论,岩石中的损伤可看成是实体岩石维数的降低,而维数降低的力学效应正如损伤引起的等效模量变化。

计盒维数是一个能够反映岩石中裂纹分形充满程度的稳定指数,其算法如下:

$$D_f = \dim_{\mu} F = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N_{\delta}(F)}{-\log \delta} \quad (1)$$

式中: D_f 为计盒维数, $N_{\delta}(F)$ 为覆盖 F 的边长为 δ 的最少立方体数, δ 为计盒尺寸。

实际计算中可对岩石裂纹图进行不同测度 δ 的统计, 计下含有裂纹的计盒数 N_{δ} , 在双对数坐标下求出两组参数的线性回归, 其直线斜率即分形维数 D_f 。以上工作可由微机及扫描图象处理系统自动完成。

由分形维数可得岩石中平均尺寸为 a 的裂纹影响范围: $N = \beta a^{-D_f}$, 代入文献[3]中的裂纹密度表达式有:

$$C_i = \beta a^{3-D_f} \quad (2)$$

式中: a 取岩石矿物粒晶尺寸平均值, β 为粒晶形状修正系数, 取其最小尺寸与最大尺寸之比。

根据损伤参量 D 与裂纹密度的关系, 有:

$$D = \frac{16}{9} \frac{1 - \nu_e^2}{1 - 2\nu_e} \beta a^{3-D_f} \quad (3)$$

式中: ν_e 为等效泊松比, $\nu_e = \nu[1 - (16C_i/9)]$, ν 为泊松比。

这样, 损伤参量就被表示成了分形 D_f 的函数, 因此可以通过研究分形演化过程来了解损伤演化规律。

3.2 岩石爆破破碎的分形演化过程

根据文献[7]等研究可得, 岩石损伤破坏过程是一个分形演化过程, 其分形维数与损伤耗散能量释放率 Y 有线性关系:

$$D_f = D_0 + \alpha Y \quad (4)$$

式中: D_0 为初始损伤, α 为实验确定系数。

对于各向同性热弹性损伤力学问题, 有 $Y = \rho(\partial\psi/\partial D)$, ψ 为热力学自由能势, ρ 为材料密度。在常温下, 即线弹性状态有:

$$Y = \frac{1}{2} [\lambda \epsilon_{ii}^e \epsilon_{jj}^e + 2\mu \epsilon_{ij}^e \epsilon_{ij}^e] \quad (5)$$

式中: ϵ_{ij}^e 为弹性应变张量, λ, μ 为拉梅常数。将(5)式代入(4)式有:

$$D_f = D_0 - \frac{1}{2} \alpha [\lambda \epsilon_{ii}^e \epsilon_{jj}^e + 2\mu \epsilon_{ij}^e \epsilon_{ij}^e] \quad (6)$$

这样就得到了用弹性应变张量表示的分形演化方程。

3.3 岩石破碎本构关系

由文献[2]得如下本构关系:

$$p = K_e \epsilon \quad (7)$$

$$S = 2\mu_e e \quad (8)$$

等效体积模量和等效畸变模量可表为:

$$K_e = (1 - D)K \quad (9)$$

$$2\mu_e = \frac{3K_e(1 - 2\nu_e)}{1 + \nu_e} \quad (10)$$

式中 K 为体积模量。将(9)、(10)式代入(7)、(8)式,并与(2)、(3)、(5)式联立构成用分形演化规律表示的岩石爆破破碎损伤模型。该模型不仅适用于岩石爆破过程的数值模拟,而且还可以简便准确地预报爆破块度分布。

4 新模型的验证

为了进一步证明岩石初始损伤不同对爆破效果的重要影响,特设计如下一组模拟试验。在混凝土模拟材料中加入 5%、10% 等不同比例的松香颗粒(粒径 1~2.5 mm)由于松香本身的强度较低且呈脆性,致使模拟材料内部形成许多均匀分布的人为弱面(损伤)。用这种不同弱面含量的材料浇灌成 $\phi 400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的试件进行单孔漏斗爆破试验,其爆破结果则反映出不同损伤条件对爆破效果的影响。模拟材料特性及爆破漏斗参数列于表 1, 爆破破碎块度筛分及回归结果如图 1、图 2 所示。

表 1 模拟材料特性及爆破漏斗试验结果

Table 1 The characteristics of simulated materials & the results of crater blasting tests

试件编号	模拟材料特性			爆破漏斗		
	抗压强度 $\sigma_c / (\text{MPa})$	松香含量 $i (\%)$	分形维数 D_f	漏斗半径 R / cm	漏斗深度 H / cm	漏斗体积 V / cm^3
1	19.62	0	1.3737	4.8	4.2	101.3
2	11.77	5	1.6519	5.6	4.5	147.8
3	10.79	10	1.7731	7.0	3.8	195.0

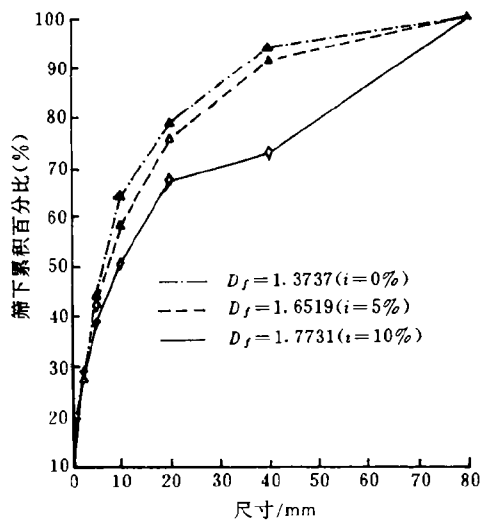


图 1 损伤岩石爆破模拟试验块度筛分结果

Fig. 1 The cumulative distribution curves for simulated tests

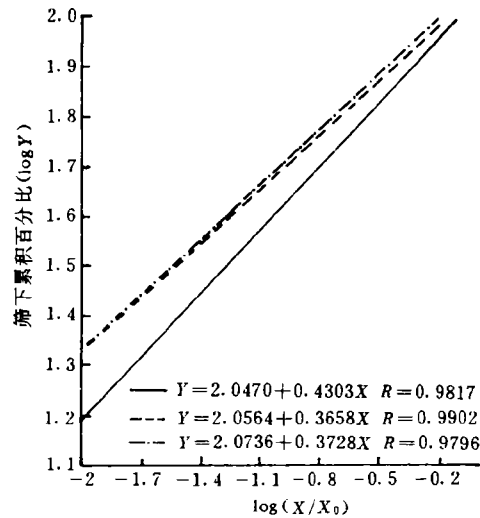


图 2 爆破块度的 G-G-S 分布回归

Fig. 2 G-G-S function regression results for Fig. 1

由以上图表可得,随着材料原始损伤状态的加剧,其爆破效果发生明显变化。如表1所示,随着模拟材料松香含量的增加,抗压强度呈下降趋势,而分形维数则随之增大,也就是材料的损伤参量也增大了。随着损伤参量的增加,爆破漏斗尺寸也由小变大,且增长趋势很显著。从图1所示的三次试验的块度筛分结果可以发现随着损伤(分维数 D_f)增加,小块部分增加,大块部分减少。未加松香的试件在40 mm至80 mm范围内块度较多,这正是用一般素混凝土模拟岩石爆破所表现出的与实际不符之处,产生这种大块多、中小块少的原因就在于相似模拟中没有考虑岩石的初始损伤。图中还可看出随着初始损伤的增加,爆破大块减少。图2是将上述筛分结果用G-G-S方程回归的情况,由此还可得出爆破块度的回归指数 n 与损伤分形维数 D_f 具有线性关系,这就是很多文献证明的 $n=3-D_f$ 。 D_f 的确定可通过(4)式解决。

关于用损伤能量耗散率计算损伤演化取代体积应变假设的合理性可作如下分析。典型的单轴抗压、三轴抗压和三点弯曲^[9]试验均已证明损伤演化与能量耗散率线性关系(式(4))的存在。用这种关系确定损伤演化过程与原有模型中用体积应变法的区别在于采取能量法作为爆破破碎的判据,它不仅克服了用单一应变指标作判据的局限性,而且还具有方便易行、需要试验确定的参数少的优点。从霍布金森杆光弹试验^[10]的照片中可以发现,在入射压力波作用阶段杆内已产生与轴线平行的裂纹,尽管这些裂纹滞后了波前20 μ s但其产生的原因是单轴压缩,这些裂纹的产生和发展是用以体积应变法确定损伤演化的方法无法解释的,由此可证采用能量耗散理论决定损伤演化能更全面、更合理地反映岩石爆破破碎规律。

5 结 论

1. 将分形理论应用于岩体初始损伤描述和爆破破碎过程中的损伤演化计算,强调了岩体中天然裂纹在爆破过程中的作用,在岩石爆破破碎理论模型研究中是一项有益的探索。

2. 用损伤能量耗散率取代Kus模型中体积应变来构造损伤演化方程,使新模型比Kus模型更加全面合理。

3. 模拟试验证实了新模型中的两个主要观点。但是,还需将新模型用于计算程序中以进一步验证(数值计算验证工作将在另一论文中介绍)。

参 考 文 献

- 1 Grady D E, Kipp M E. Mechanisms of Dynamic Fragmentation; Fractors Governing Fragment Size. SAND-84-2304c, 1985
- 2 Kuszmaal, J S. A New Constitutive Model for Fragmentation of Rock under Dynamic Loading. In: Second International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Colorado U. S. A 1987; 412~424
- 3 Thorne B J. A Damage Model for Fragmentation and Comparison of Calculations with Blasting Experiments in Granite. SAND 90-1389, 1990
- 4 Kipp M E, Grady D E. Numerical Studies of Rock Fragmentation. SAND-79-1582, 1980.
- 5 赵兵. 矿岩爆破块度分布的预测:[硕士论文],沈阳:东北大学,1985
- 6 凌建明. 压缩荷载作用下岩石细观损伤特征的研究. 同济大学学报, 1993, 21(2): 219~226
- 7 谢和平, 高峰. 岩石类材料损伤演化的分形特征. 岩石力学与工程学报, 1991 10(1): 74~82

- 8 丁多文. 岩石结构分形及应用研究. 岩土力学, 1993, 14(3)
- 9 谢和平, 岩石混凝土损伤力学. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.
- 10 Katsuyama K, et al. Dynamic Photoelastic Experiment and 3-D Dynamic Stress Analysis of the Fracture Caused by Blasting. Rock Fragmentation by Blasting, Rossmannith(ed) Balkema, Rotterdam, 1993. 55~61

STUDY ON FRACTAL DAMAGE MODEL OF ROCK FRAGMENTATION BY BLASTING

Yang Jun, Wang Shuren

(Beijing Graduate School, China University of Mining & Technology, Beijing 100083)

ABSTRACT Based on the current damage model studied by Kuszmaul, Thorne et al, a new model for rock fragmentation by blasting has been presented applying fractal theory and its achievements used in rock mechanics. In the new model named FDM, the original damage in rock is determined by the fractal dimension of fracture or flaw in it which is the basis of rock fragmentation, and the damage evolution during blasting is connected with the fractal dimension and damage energy dissipation rate. Thus two defects in current model have been remedied which the direct effect of original damage is disregarded and the damage evolution is reduced to the function of bulk strain. The postulates of the new model have been verified by the results of simulated test and other methods.

KEY WORDS rock blasting, damage evolution, fractal dimension, constructive equations