

文章编号: 1000-7598-(2009) 增 1-0001-04

爆炸作用下岩石破裂块度分布特点及其物理机理

戚承志^{1, 2}, 王明洋², 钱七虎², 罗 健¹

(1. 北京建筑工程学院 土木交通学院, 北京 100044; 2. 解放军理工大学 工程兵工程学院, 南京 210007)

摘 要: 就岩石在爆炸载作用下破坏块度分布的物理机理进行了分析。从分析可以看出, 岩石破坏块度的对数正态分布与材料的多重破坏有关。在封闭爆炸情况下这种分布描述爆心附近岩石破坏块度的分布, 此处材料处于静水压力状态, 应变率很高, 材料的破坏为多重破坏。而 Rosin-Rammler 分布主要描述离爆心较远处岩石破坏的块度分布, 此处岩石的破坏主要是由环向拉力引起的径向裂纹所致, 以单重破坏为主。

关 键 词: 块度分布; 单重破坏; 多重破坏

中图分类号: O 212.2; O 383

文献标识码: A

Features and physical mechanism of fragmentation distribution of rock under explosion

QI Cheng-zhi^{1, 2}, WANG Ming-yang², QIAN Qi-hu², LUO Jian¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Engineering Institute of Cops of Engineers, PLA University of Science and Technology, Nanjing, 210007, China)

Abstract: Physical mechanism of fragmentation distribution of rock mass under explosion is investigated. It is demonstrated that lognormal distribution is closely related to the multi-fold fracture of the material. In the case of contained explosion, lognormal distribution describes the fragmentation distribution of rock in the vicinity of explosion center where the material is under hydrostatic compression, the strain rate is high, and the fracture is multi-fold. While Rosin-Rammler distribution mainly describes the fragmentation distribution of rock mass beyond the vicinity of explosion center where the fracture is induced mainly by the tangential tensile stress, and the fracture is one-fold.

Key words: fragmentation distribution; onefold fracture; multi-fold fracture

1 引 言

在许多实际工程中, 例如采矿、磨矿等领域, 需要知道地质材料在动力破坏后的块体尺寸及其分布。在常见工程问题中固体动力破坏块体的尺寸分布范围很广, 从微米级到米级, 涉及的工程问题也非常广泛, 从粉尘程度的减少, 到大尺寸块体份额的降低等。除此之外, 研究固体的动力破坏块度也具有重要的理论意义, 因为固体动力破坏块度的研究是固体动力变形破坏研究的延伸, 固体的动力破碎块度及其分布不仅能反映固体动力破坏条件的影响, 而且也能反映固体的重要性质, 例如硬度、塑性性质、粘性性质等等。通过对于固体动力破坏块

度的分析能够加深我们对于固体中裂纹群体的非线性相互作用的了解, 帮助我们正确解释试验结果, 准确地评价固体的物理力学性质。

研究固体动力破碎过程的方法之一是建立数学模型^[1-2], 这样可以不用解出固体的应力应变状态而得到固体动力破碎块度分布的信息。这是目前变形体非线性力学最复杂的领域之一。要建立这种数学基础需要知道裂纹的扩展速度、缺陷连接的临界密度及连接条件。虽然在这一领域取得了很大的进展, 但是由于这一问题非常复杂, 因而现有的数学模型都采用一些简化假定。为了使模型能够描述实际需要解决的许多问题, 比如说在冲击载作用下裂纹结构演化的群体性及非线性的描述, 有许多问

收稿日期: 2008-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.50825403); 北京市教委及北京自然科学基金项目 (No.KZ200810016007)。

第一作者简介: 戚承志, 男, 1965 年生, 正博士 (俄), 教授, 主要从事工程抗震、岩土力学方面的教学与研究。E-mail: qczbicea@yahoo.com.cn

题, 比如说在裂纹群体相互作用条件下新的裂纹的产生及扩展条件、分岔的条件等等, 还研究的很不够。除此之外在材料构造层次水平上固体的动力破碎规律也研究的不够, 尤其破坏块度随应变率变化的物理机理方面。因此本文将对爆炸作用下岩石动力破坏成块的特点及其物理机理进行研究。

2 爆炸作用下岩石破坏成块的特点

在描述固体的动力破坏块度分布时常用的分布函数有泊淞分布、正态分布、伽马分布、Rosin-Rammler 分布及对数正态分布^[3-6]。在地下封闭爆炸情况下常用的分布函数有 Rosin-Rammler 分布及对数正态分布^[3]。

Rosin-Rammler 分布的数学表达式为

$$m_+(d) = m_0 \exp[-(d/d_{\text{ORR}})^n] \quad (1)$$

式中: m_0 为破坏材料的总的重量; d 为块体的特征尺寸; $m_+(d)$ 为尺寸大于 d 的所有块体的重量; d_{ORR} 、 n 为常数。通常 d 为相应块体的等效球体的直径。

在 $\ln \ln(m_0/m_+)$ 及 $\ln d$ 坐标里 Rosin-Rammler 分布为一条直线。但是试验证明不是所有的试验点都位于直线上^[3-4]。这种偏差发生在爆炸近区, 这时可以用对数正态分布函数来描述破坏块度分布

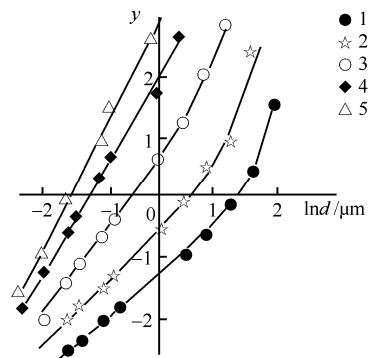
$$\Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y \exp(-t^2/2) dt \quad (2)$$

式中: $y = (\ln d - \ln d_{\text{LN}})/\sigma_{\text{LN}}$, 其中 d_{LN} 为分布的中数, σ_{LN} 为块体尺寸的对数对于其平均值的均平方偏差; $\Phi(y)$ 为尺寸小于 d 的所有块体的重量份额。

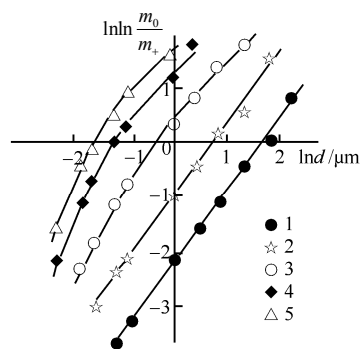
图 1 为在松脂中所做的爆炸试验的结果^[3]。从图中可以看出, 随着离爆心距离的增加, 破坏块度的分布律逐渐由对数正态分布律转换为 Rosin-Rammler 分布律, 这种转换是逐渐进行的。为了描述这种分布, 文献[7]建议了如下的破坏块尺度分布公式:

$$\Omega(d, R) = \frac{\alpha(R)}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y \exp(-t^2/2) dt + [1 - \alpha(R)] f_{\text{RR}}(d, R) \quad (3)$$

式中: d 为块体的特征尺寸; Ω 为尺寸小于 d 的所有块体的重量; $\alpha(R)$ 为服从对数正态分布的块体的份额; $y = (\ln d - \ln d_{\text{LN}}(R))/\sigma_{\text{LN}}(R)$, 其中 $d_{\text{LN}}(R)$ 为对数分布的块体尺寸中数; $\sigma_{\text{LN}}(R)$ 为块体尺寸的对数对于其平均值的均平方偏差; $f_{\text{RR}}(d, R)$ 为具有平移的 Rosin-Rammler 分布函数, 具有如下形式:



(a)



(b)

图 1 在不同的距爆心距离上破碎块度分布的变化情况 (符号标示 1: $r = 22R_0$; 2: $r = 15R_0$; 3: $r = 10.5R_0$; 4: $r = 7.5R_0$; 5: $r = 6.5R_0$ 。其中 R_0 为装药半径)

Fig.1 Particle size distribution with the distance to explosion center (1: $r = 22R_0$, 2: $r = 15R_0$; 3: $r = 10.5R_0$; 4: $r = 7.5R_0$; 5: $r = 6.5R_0$. Where R_0 - radius of charge)

$$f_{\text{RR}}(d, R) = \begin{cases} 0, & d \leq d_k \\ 1 - \exp\{-[(d - d_k)/d_{\text{ORR}}]^n\} \end{cases} \quad (4)$$

式中: n 为确定分布形状的指数, 表征破裂的均匀程度, 它的值越大, 材料的破裂均匀度越高; d_k 为块度平移大小, 物理意义为细观及微观水平之间的分界线; d_{ORR} 为某一特征尺度, 它与平均块体尺寸 d_{RR} 之间具有如下关系:

$$d_{\text{ORR}} = \frac{d_{\text{RR}} - d_k}{\Gamma(1 + 1/n)} \quad (5)$$

式中: Γ 为伽马函数。

形成这种双模态分布的物理机理是什么呢? 下面就分析双模态分布的物理意义。

2 爆炸作用下岩石破坏成块分布的物理机理

在动载作用下材料强度对于应变率的依赖关系的一般规律见图 2。首先材料强度随应变率的增加

而缓慢地增加（此处称为 I 区），当应变率继续增加，超过某一值时，材料强度随应变率的增加急剧增加（此区称为 II 区），当应变率进一步增加到冲击爆炸应变率时（III 区），材料强度随应变率的增加而增加的速率又变缓，与 I 区情况相当。

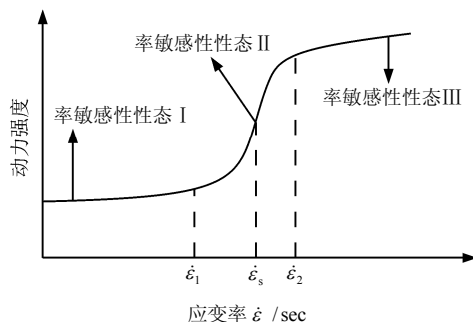


图 2 材料动力强度对于应变率的依赖规律
($\dot{\epsilon}_1 \approx 10^0 - 10^2 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon}_s \approx 10^3 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon}_2 \approx 10^4 \text{ sec}^{-1}$)

Fig.2 Dependence of dynamical strength on strain rates of brittle materials
($\dot{\epsilon}_1 \approx 10^0 - 10^2 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon}_s \approx 10^3 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon}_2 \approx 10^4 \text{ sec}^{-1}$)

作者的分析表明^[8-9]，在小的应变率范围内（I 区），材料的变形及破坏受热活化机制控制，这时材料的变形与破坏主要集中于材料单元之间的界面上，材料变形类似蠕变，具有塑性特性。由于界面破坏后产生应力释放，材料的其它地方难以发生破坏，即这时的破坏具有局部特性及单重特性；当应变率进一步增加时，材料的宏观粘性阻尼机制逐渐加入到材料强度的应变率依赖性中来，并逐渐占据主导地位，材料的破坏靠裂纹的产生、扩展及连接来实现，材料的变形与破坏具有脆性性质，材料变形与破坏的区域逐渐由材料单元的界面向材料内部扩展，也即材料变形破坏逐渐失去局部特性；当应变率继续增加而进入到高应变率区（III 区）时，不同尺寸的缺陷的增长将同时启动，在没有缺陷的区域，材料的热活化启动，并产生原子键的断裂，形成裂纹产生的源泉，这时的破坏丧失了局部性，破坏变的均匀，破坏源独立发展，受其它破坏源的影响小，变形与破坏具有塑性性质，破坏具有多重破坏的特征。

Колмогоров А.Н. (Kolmogorov A.N.) 证明^[2]，如果每个粒子的破裂概率不依赖于其绝对尺寸及其先前的破裂，不依赖于其它粒子，那么在所有粒子的多重破裂时，无论它们的初始尺寸分布如何，最终破裂块体的分布函数逐渐趋向于对数正态分布函数。也就是说在多重破坏区，材料的破坏块度服从对数正态分布。

那么封闭爆炸的试验结果怎样哪？试验表

明^[10]，对于每一种材料都存在着某一个临界应力值 σ^* ，当爆炸引起的应力大于该值时就会发生自发的破坏，即材料丧失力学稳定性而快速释放能量。应力值 σ^* 通常高于材料的强度极限。在材料破坏时表征动载对于材料动力作用的一个重要参数为应变率。试验表明^[10]当岩石中的应变率达到 $(0.1 \sim 3) \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ 时会发生自相持破坏。在松脂材料中所做的封闭爆炸试验表明，应变率随着距爆心的相对距离 r/R_0 （其中 R_0 为装药半径， r 为实际距离爆心距离）的增加而减小，具体数据见下表 1。

表 1 球形装药情况下松脂中应变率随距离的变化数据
Table 1 Dependence of strain rate on the distance from spherical charge in rosin

应变率 $\dot{\epsilon}$	$5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$	$8 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$	$2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$	$6 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$
相对距离 r/R_0	2.50	5.00	8.75	13.75

文献[3]对于地下封闭爆炸时岩石破坏块度的研究表明（见图 3），当距爆心相对距离 $r/R_0 < 7.7$ 时，破坏块尺寸对于距离的依赖关系偏离直线，破坏块变小。在剔除了多重破坏因素后，平均块度的分布规律接近于远区的线性依赖关系，见图中虚线所示。这说明 $r/R_0 < 7.7$ 的范围内多重破坏的影响是造成平均块度偏离较远处直线关系的原因。 $r/R_0 = 7.7$ 这一数据与图 2 及表 1 所示数据符合。

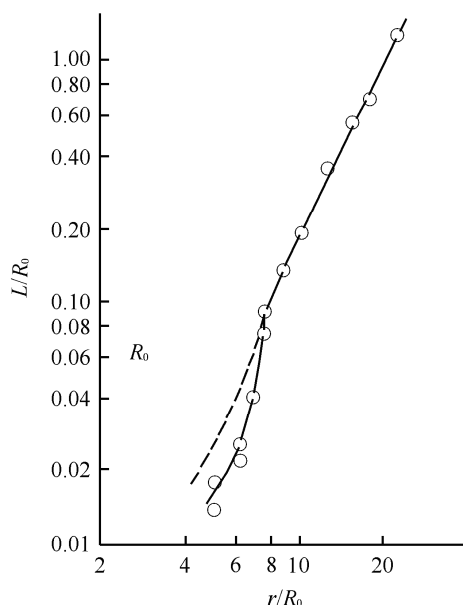


图 3 在松脂中爆炸时破坏块的尺寸与距爆心距离之间的依赖关系^[3]

Fig.3 Dependence of fragmentation size on distance under explosion of TEN in pine rosin^[3]

在松脂中做的试验表明^[4]，在 $r \leq 2.7R_0$ 的范围

内应力大小为 $\sigma_r = 1.1 \cdot 10^3 \text{ MPa}$, 松脂的透明度没有丧失, 这说明在这一范围内材料的变形是塑性的, 这与图 2 及表 1 所示结果相符合。在这一范围内材料主要受到静水压力的作用, 而且材料的应变率很高。在 $2.7R_0 < r \leq 4R_0$ 的范围内, 破裂波阵面与爆炸波阵面重合, 介质的应力状态逐渐从静水压力状态向剪压受力状态过渡。在 $r = 4R_0$ 处破裂波阵面的速度突然降低, 这应该与剪切破坏的开始有关。在 $r > 4R_0$ 时破裂波阵面逐渐落后于爆炸波阵面, 速度逐渐降低, 在 $r = 10R_0$ 时趋于稳定, 达到 0.96 km/s 时, 破裂波速度接近于瑞利波速 ($c_R = 1.0 \text{ km/s}$)。在这一范围内剪切应力与静水压力共存, 这一距离范围内的材料破坏主要是以剪切破坏为主, 随着静水压力的降低, 材料的破坏逐渐从多重破坏向单重破坏过渡。在 $10R_0 < r \leq 22R_0$ 的范围内破裂波稳定传播, 这一范围内的应变率为 $10^2 \sim 10^3 / \text{s}$, 这一段距离上材料的破坏就是前面所说的自相持破坏, 直到 $r = 25R_0$ 时破裂波失稳并停止。在 $10R_0 < r \leq 22R_0$ 范围内, 材料的破坏主要是由环向拉力引起的径向裂纹所致, 由于受拉破坏形成径向裂纹后, 裂纹附近的应力迅速释放, 附近不可能再出现裂纹, 因此在此范围内破坏是单重的, 这时创造径向裂纹需要的能耗少, 裂纹能够长距离以稳定的速度传播。

所以由上面的分析可以看出, 材料破坏块度的对数正态分布主要集中于爆心附近, 此处的破坏是以材料的多重破坏为主。而 Rosin-Rammler 分布主要发生于离爆心较远处, 此处材料的破坏以单重破坏为主。由于 Rosin-Rammler 分布所涉及的区域比对数正态分布所涉及的区域大一个数量级, 所以总的块度分布还是服从 Rosin-Rammler 分布。

3 结 论

本文就岩石在爆炸载作用下破坏块度分布的物理机理进行了分析。从分析可以看出, 岩石破坏块度的对数正态分布与材料的多重破坏有关。在封闭爆炸情况下这种分布描述爆心附近岩石破裂块度的分布, 此处材料处于静水压力状态, 应变率很高。而 Rosin-Rammler 分布主要描述离爆心较远处岩石破坏的块度分布, 此处材料的破坏主要是由环向拉

力引起的径向裂纹所致, 以单重破坏为主。

参 考 文 献

- [1] Кузнецов В. М. Математические модели взрывного дела[М]. Новосибирск: Наука, 1977.
- [2] Колмогоров А. Н. О логарифмически нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении [J]. ДАН СССР, 1941, 31(2): 99—101.
- [3] Радионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М. Основы геомеханики[М]. Москва: Недра, 1986.
- [4] Сизов И. А., Цветков В. М. О механизме образования осколков при камуфлетном взрыве [J]. Физика горения и взрыва, 1979, 15(5): 108—113.
- [5] Кошелев Э. А., Кузнецов В. М., Софронов С. Т. и др. Статистика осколков, образующихся при разрушении твердых тел взрывом[J]. ПМТФ, 1971, 2: 87—100.
- [6] Барон Л. И., Сиротюк Г. Н. Проверка применимости уравнения Розина-Заммлера для исчисления диаметра среднего куска при взрывной отбойке горных пород[J]. Взрывное дело №62/19: 111—121. Москва: Недра, 1979.
- [7] Замышляев Б. В., Евтерев Л. С., Лоборев В. М., Чернейкин В. А. Локальный двухмодальный закон распределения обломков по размерам при взрывном разрушении горных пород [J]. ДАН СССР, 1987, 293(2): 326—329.
- [8] 戚承志, 钱七虎. 岩石等脆性材料动力强度依赖应变率的物理机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 21(2): 177—181.
- [9] QI C Z, WANG M Y, QIAN Q H, et al. Structural hierarchy and mechanical properties of rock mass. Part II, Structural hierarchy, size effect and strength of rock mass[J]. Physical Mesomechanics, 2006, 9(6): 41—53.
- [10] Спивак А. А. Поведение среды при самопроизвольном разрушении[J]. ФТПРПИ, 1982, (4): 51—56.
- [11] Адушкин В. В., Спивак А. А. Разрушающее действие взрыва в предварительно напряженной среде[J]. ФТПРПИ, 2002, (4): 61—69.