

炸药单耗对爆破块度分布影响的理论探讨*

刘 慧 冯叔瑜

(铁道部科学研究院 北京 100081)

摘要 基于爆破块度分布的分形特征,从理论上推导了炸药单耗与爆破块度分布均匀性指数的关系,对爆破块度分布的预测具有重要的指导意义。

关键词 爆破块度 分形 炸药单耗

中图法分类号 TD 235 46

影响爆破块度分布因素的复杂多变决定了爆破块度预测的困难性。近年来,分形几何在岩石力学中的应用为人们开辟了一个研究岩石破碎机理及效果的新途径。高金石等^[1]提出了一个块度分布预测的分形模型,但其中块度分布分维数的确定仍停留在实测水平上,尚无法实现爆前对爆破效果的预测。为此,我们从理论角度对此问题进行了初步的探讨。

1 爆破块度分布的分形特征

1.1 分形几何简介

分形几何创立于70年代,是揭示那些不规则形状局部与整体的自相似规律的数学分支。描述这种自相似性的参数分形维数 D 与经典几何拓扑意义下的整数维 D_T 不同。这不仅在于分维数是变化的,还在于分维数反应了构成这些不规则形状(系统)的复杂程度和物质(信息)充满空间的程序。分形的基本特征是: $D > D_T$ 。

对于一个规则的曲线,用一尺度 W 去度量,例如直线,有

$$L(W) = N \cdot W = \text{const} \quad (1)$$

式中: N 是量测直线时使用尺码 W 覆盖的次数。

但对于自然界中一个不规则曲线不存在以上简单的关系,此时有

$$L = L_0 W^{-D_f} \quad (2)$$

式中: L_0 为常数, D_f 是分维值且 $D_f \in [1, 0, 2)$ 。

同样,对于一个光滑的具有线度 x 的曲面,其面积为

$$S_0 = K_s x^2 \quad (3)$$

式中: K_s 为表面形状因子。

* 1996-07-21收到原稿,1996-11-25收到修改稿。

而一个不光滑的分形曲面面积为

$$S = S_0 x^{2-D_s} = K_s x^{4-D_s} \quad (4)$$

式中: D_s 是面积分维数且 $D_s \in [2, 3]$

1.2 爆破块度分布的分形特征

大量的事例表明, 块度分布具有分形特征。由风化、爆破或其它作用造成的破碎在很大尺寸范围内满足分形分布特征。若以 $N(r)$ 表示爆破碎块尺寸大于 r 的碎块数, 破碎分维数为 D , 则由分形维数的定义可得: $N(r) = Cr^{-D}$, $N_T = Cr_0^{-D}$ 。其中: N_T 为总的碎块数; r_0 与平均块度有关; C 为比例系数。则 $N(r)/N_T = (r/r_0)^{-D}$, $1 - N(r)/N_T = 1 - (r/r_0)^{-D}$, 相应质量百分比可表为

$$F(r) = 1 - \frac{M(r)}{M_T} = \frac{\int_0^r \frac{4}{3}\pi dx^3 d[1 - \frac{N(r)}{N_T}]}{\int_0^{r_{\max}} \frac{4}{3}\pi dx^3 d[1 - \frac{N(r)}{N_T}]} = \left(\frac{r}{r_{\max}}\right)^{3-D} \quad (5)$$

式中: $F(r)$ 为碎块尺寸小于或等于 r 的质量百分比; $M(r)$ 为尺寸大于 r 的碎块质量; M_T 为总的碎块质量。

2 爆破破碎分维数 D 的理论求解

2.1 一般假设

(1) 岩石爆破破碎的过程是爆破应力波与爆生气体后继破岩共同作用的结果。爆生气体的后继破岩过程是一个准静态过程。

(2) 应力波能量全部转化为应力波破岩区形成新表面所需的表面能。

2.2 推导过程

由文献 [2] 及假设 (1) 知: 岩体内的裂纹系在准静态作用下, 将作准静态扩展, 这一过程可看作一个岩体内原有裂纹系分维数保持不变的准静态生长过程, 因而气体后继破岩作用不改变应力波作用下的裂纹分维数。

由假设 (2), 在单位体积岩石中应有

$$E = S_V r_s = \int e dV(e) = Zqe_0 \quad (6)$$

式中: S_V 为单位体积岩石的表面积; e 是岩体中的能量密度; Z 为炸药能量利用率, 可由文献 [3] 确定; q 为炸药体积单耗; e_0 为单位质量炸药所能释放的能量; E 为单位体积岩石中形成新表面所需的能量; r_s 为岩石材料的表面能。由 (6) 式知

$$S_V = \frac{Zqe_0}{r_s} \quad (7)$$

另一方面, 爆破形成的岩石碎块的表面为一分形曲面, 爆后的块度分布为 (5) 式, 于是

$$S_V = \int_0^{+\infty} \frac{S(x)}{V(x)} dY(x) = \int_0^{x_{\max}} \frac{S(x)}{V(x)} dY(x)$$

又 $S(x) = K_s x^{4-D_s}$, $V(x) = K_v x^3$, 其中 K_s 为面积系数, $K_s = 2 \sim 3$, K_v 为体积系数, $K_v = 0.6 \sim 0.7$ 所以有

$$\frac{S(x)}{V(x)} = \frac{K_s}{K_v} x^{1-D_s} = K_{sv} x^{1-D_s}$$

式中: $K_{SV} = \frac{K_S}{K_V}$ 为单位面积 体积系数; 而 $dY(x) = \frac{3-D}{x_{max}} \left(\frac{x}{x_{max}}\right)^{2-D} dx$, 于是

$$S_V = \frac{3-D}{x_{max}} K_{SV} \int_0^{x_{max}} x^{1-D_S} \left(\frac{x}{x_{max}}\right)^{2-D} dx = (3-D) K_{SV} x_{max}^{1-D_S} \int_0^{x_{max}} \left(\frac{x}{x_{max}}\right)^{3-D-D_S} d\left(\frac{x}{x_{max}}\right) \quad (8)$$

在爆破实践中, x 不可能取得无限小。事实上, 令爆破岩体中最大能量密度为 e_{max} , 它与爆破条件有关, 是个有限值。根据 (6) 式应有

$$K_V x^3 e_{max} = K_S x^{4-D_S} r_S$$

则有

$$x_{min} = (K_{SV} e_{max} / r_S)^{\frac{1}{1-D_S}} \quad (9)$$

同理

$$x_{max} = (K_{SV} e_{min} / r_S)^{\frac{1}{1-D_S}} \quad (10)$$

式中: e_{min} 为使岩石破碎的最小能量密度; x_{max} 为最大块度。

岩体内应力波能量密度 e 可编程求算^[3-4]。

于是 (8) 式可化为

$$S_V = K_{SV} (3-D) x_{max}^{1-D_S} (m^{D+D_S-4} - 1) / (D + D_S - 4) \quad (11)$$

式中: $m = x_{max} / x_{min}$ 将 (11) 式代入 (7) 式, 令 $B = Z_{e0} / (K_{SV} r_S x_{max}^{1-D_S})$, 得

$$\frac{3-D}{D + D_S - 4} (m^{D+D_S-4} - 1) = Bq \quad (12)$$

由于 $D_S = D + 3$ ^[5], 于是 (12) 式可简化为

$$\frac{3-D}{1-D-2.5} (m^{1.5D-2.5} - 1) = Bq \quad (13)$$

上式是个超越方程, 可采用数值方法求解。至此我们得到了炸药单耗与爆破块度分布分维数的方程

3 理论预测与实测结果对比

实验现场选在某地采石场进行, 试验点选在一花岗岩地段, $r_S = 15.7 \text{ J/m}^2$, $K_{SV} = 0.63 \text{ m}^{-1}$ 。所用炸药为 2 号岩石炸药, $e_0 = 3 \text{ MJ/kg}$ 具体试验参数如下: 最小抵抗 $w = 1 \text{ m}$, 爆破作用指数 $n = 1$, 装药量 $Q = qv^3$ ($0.4 + 0.6n^3$), 炸药单耗 q 分别为 $0.45, 0.80, 1.10, 1.47, 1.95 \text{ kg/m}^3$ 。

杨更社等^[6]在大量现场实测的基础上运用数理统计分析方法得到了岩石块度分维数与单耗的关系。图 1 为本文理论预测结果与文献 [6] 的对比, 可以看出两曲线在低单耗区相当接近。

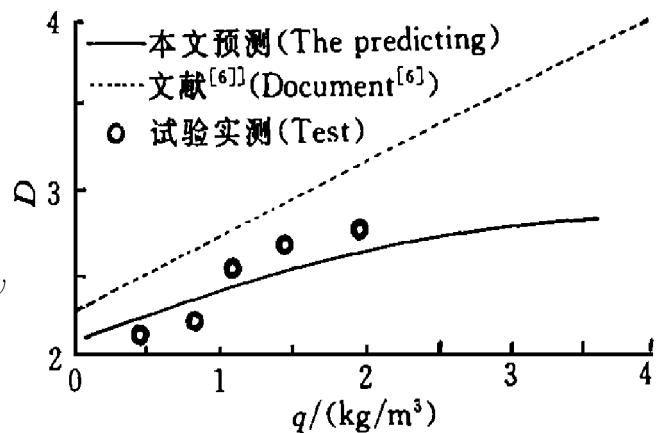


图 1 预测、试验及文献 [6] 的比较

Fig. 1 Results of predicting test and reference [6]

文献 [6]的结果是在低单耗区 ($0.2 \sim 0.37 \text{ kg/m}^3$)得到的,这可能是本文结果与之在高单耗区差别较大的一个原因。而由文献 [7]知,岩石破碎的块度分布分维数 $D \in [2.0, 2.7628]$,因而从图 1可以预见,本文的结果更为合理。

值得一提的是,上述的推导过程同样适用于条形药包,只是炸药能量利用率 Z 不同。有关条形药包的 Z 值确定方法参见文献 [8]。

4 结 论

分维数是衡量岩石爆破块度分布的定量指标,概念清晰,适用面广,避免了爆破块度分布函数中较多的参数求算。本文的理论分析可直接从理论上求出爆破块度分布的分维值 D ,为爆破块度的预报和爆破参数的优化提供了一定的理论基础。

参 考 文 献

- 1 高金石,张奇.爆破理论与爆破优化.西安:西安地图出版社,1992:307
- 2 Xie H P. Fractals in Rock Mechanics. Netherlands: Balkema A, 1993:317~318
- 3 颜事龙,陈叶青.岩石集中装药能量分布的计算.爆破器材,1993,22(6):1~5
- 4 刘为洲.台阶爆破的能流分布及块度组成的维数模型.金属矿山,1987,12(6):25~28
- 5 Nagahama H. Fragmentation Fractal Distribution for Brittle Rock Breaking. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1993,3(4):469~471
- 6 杨更社,刘增荣.岩石爆破块度分布的分形结构.西安矿业学院学报,1994,18(2):120~124
- 7 谢和平.分形几何及其在岩土力学中的应用.岩土工程学报,1992,14(1):14~23
- 8 切尔尼高夫斯基 A A.定向抛掷爆破.史家育译.北京:中国建筑工业出版社,1983:142

THEORETICAL RESEARCH OF THE EFFECT ON THE BLASTING FRAGMENTATION DISTRIBUTION FROM THE EXPLOSIVE SPECIFIC CHARGE

Liu Hui Feng Shuyu

(China Academy of Railway Science, Beijing, 100081)

ABSTRACT Based on the fractal characteristics of the blasting fragmentation distribution, the paper derived a relationship between the explosive specific charge and the uniform exponent of the distribution, which is instructive for predicting the fragmentation.

KEY WORDS blasting fragmentation, fractal, explosive specific charge