

文章编号: 1001-1455(2004)04-0363-07

爆破地震信号的分形盒维数值分析^{*}

姜建武, 龙 源, 徐全军, 万文乾

(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 在岩石场地进行了单段深孔爆破试验, 获得了具有该场地特征的爆破地震波传播规律。从理论上推导了爆破地震波振动强度衰减系数 K 和 α 与分形盒维数 D 以及盒维数计算中 $-\lg(k \delta) - \lg N_k \delta$ 的双对数拟合直线方程参数 b 的关系。采用了适用于爆破地震波曲线双尺度特征的矩形盒模型计算了爆破地震波的盒维数 D 。数据分析表明: 在同一场地条件下, 爆破地震波的盒维数比较稳定, 且爆破地震波振动强度的场地衰减指数 α 与 D 为两倍的关系; 药量和距离对盒维数拟合直线方程参数 b 的影响明显, 且其关系与场地衰减指数 α 对爆破地震波峰值强度的作用相近。通过数据分析, 获得了参数 b 与爆破地震波振动峰值 A 的关系式: $b = 0.689 \times \lg A + 3.0669$, 其相关系数为 0.93。

关键词: 爆炸力学; 盒维数; 分形; 爆破地震信号; 频谱特征; 有效振动持续时间

中图分类号: O389; TD235.1 国标学科代码: 130°35 文献标志码: A

1 引言

形体的局部与整体以某种方式相似的性质叫分形, 它的原意是“不规则的、分数的、支离破碎的”形体特征, 最早由美国的 B. B. Mandelbrot 提出^[1~3]。当前分形已发展成为一门以局部与整体具有自相似的复杂形体(可以是线、面或体, 也可以是以某种尺度度量的物理参数)为研究对象的科学。分形几何的主要工具是它形式众多的维数, 维数是分形对象的重要特征量。在求解分形维数的方法中, 盒维数是应用最广泛的维数之一, 它的普遍应用主要是由于这种维数的数学计算及经验估计相对容易。分形体的盒维数值体现的是该种对象的统计自相似性, 即分形。随着分形理论的发展, 它在岩石力学、爆炸力学、爆破块度分布及地震学研究方面取得了一定的进展^[1, 3~4]。

振动信号是一种满足统计自相似性的随机分形^[5~9], 为了研究爆破地震波信号的分形特征, 分析它的分形盒维数与爆破地震波振动强度的关系, 本文中通过在岩石场地进行单孔或单段多孔的深孔爆破实验, 在获得了一定数据的基础上, 计算爆破地震波的盒维数, 研究了爆破地震波信号的分形盒维数所反映的物理意义, 并分析了分形盒维数的影响因素, 建立了盒维数值与爆破地震波振动强度间的关系。

2 爆破地震波的分形盒维数计算

设爆破地震波信号 $s(n) \subset F$, F 是 n 维欧氏空间 R^n 上的闭集。将 R^n 划分成尽可能小的宽度为 δ 的正方形网格, 如 N_δ 是网格宽度为 δ 的离散空间上覆盖 F 集的最少网格个数, 则 $s(t)$ 盒维数定义为^[1]

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg N_\delta}{-\lg \delta} \quad (1)$$

对于实测的爆破地震波离散信号, 在其采样时间间隔 Δt 内, 波形曲线是一直线段。因而在用基本尺寸为 δ 的方形网格去覆盖集 F 时, δ 的最小值应大于 Δt 。实际计算中, 一般不根据式(1)得到盒维数 D , 而是根据分形对象在其无标度区 $(k_1 \delta \sim k_2 \delta)$ 内 $(k_1 \delta \sim k_2 \delta)$ 分别为使曲线能被有效覆盖的方形网格的最小尺寸和最大尺寸, δ 为覆盖盒的基本尺寸), 将一系列尺寸为 $k \delta (k_1 \leq k \leq k_2)$ 的方形网格对分形对象进

* 收稿日期: 2003-07-07; 修回日期: 2004-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(10372117)

作者简介: 姜建武(1975—), 男, 博士研究生。

行覆盖,得到各尺度下的有效覆盖网格数量 $N_{k\delta}$ 通过最小二乘法得到 $-\lg(k\delta)-\lg N_{k\delta}$ 的拟合直线,其斜率就是该形体的分形盒维数 D 。

爆破地震信号是双向尺度的:纵向的振动幅值和横向的时间效应,因而在对曲线进行盒覆盖时,盒的尺度应能反映曲线的双尺度振动特征。本文中将采用矩形盒模型计算爆破地震波曲线的盒数量,即用一个基本尺度为 $\hat{q} \times \hat{\delta}$ 的矩形网格去覆盖集 F ,其中 \hat{q} 为时间尺度, $\hat{\delta}$ 为振幅尺度。 \hat{q} 的最高取值由爆破地震波最高振动峰值所处的波峰或波谷与基线(时间轴)交点之间的时间跨度 ΔT 决定, $k \leq [\Delta T/\Delta t]$ (中括号表示取整数部份),如图 1(b)所示的矩形框宽度;同时这种矩形盒的纵向尺度 $\hat{\delta}$ 应大于振动曲线相邻数据点间的最小非零差值而小于最高峰值 A 的 $1/(2k_2)$,即 $\hat{\delta} < A/(2k_2)$ 。在矩形盒覆盖时,无标度区内 $-\lg(k\hat{q})$ 与 $\lg N_{k\hat{q}}$ 满足线性回归方程

$$\lg N_{k\hat{q}} = -D \hat{q} \times \hat{\delta} \times \lg(k\hat{q}) + b \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

盒维数值计算式为

$$D_{\hat{q} \times \hat{\delta}} = - \frac{(k_2 - k_1 + 1) \sum \lg k \lg N_{k\hat{q}} - \sum \lg k \sum \lg N_{k\hat{q}}}{(k_2 - k_1 + 1) \sum \lg k^2 - (\sum \lg k)^2} \quad k_1 \leq k \leq k_2, i = 1, 2 \quad (3)$$

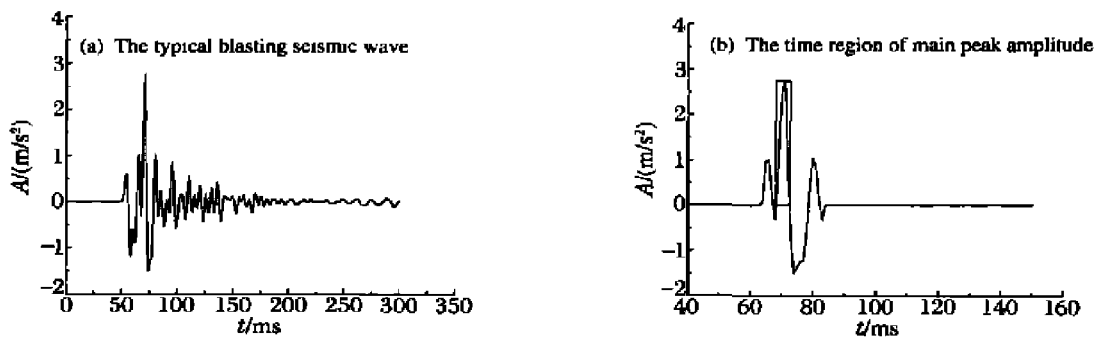


图 1 时间尺度 \hat{q} 的最大取值示意图

Fig.1 The sketch of maximum value decision of \hat{q}

图 2 为本次试验中第 4 炮次测点 1 处爆破地震波的盒维数计算时 $-\lg k$ 与 $\lg N_k$ 拟合直线。在进行直线拟合时,将采样时间间隔 Δt 作归一化处理,取矩形盒横向尺度 \hat{q} 的基本尺寸为 1(即 $\hat{q} = \Delta t = 1$)。采用不同的矩形盒对曲线进行覆盖,得到该曲线在无标度区内 k 的取值范围为 $1 \leq k \leq 6$ 。图 2 所示拟合直线方程为

$$\lg N_k = 1.276 \times (-\lg k) + 3.727 \quad (4)$$

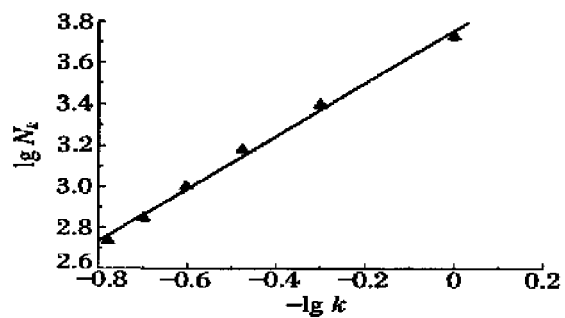


图 2 $-\lg(k)$ 与 $\lg N_k$ 关系

Fig.2 Relationship of $-\lg(k)$ and $\lg N_k$

3 爆破地震波分形盒维数的物理意义分析

在爆破地震效应研究中,普遍采用萨道夫斯基公式来研究振动强度与折算距离的关系

$$A = K (\bar{r})^\alpha = K (\sqrt[3]{q/R})^\alpha \quad (5)$$

式中: A 为爆破地震记录中的最大峰值强度,本文中为振动加速度; q 为最大段药量; R 为测点与爆源的距离;折算距离定义为: $\bar{r} = \sqrt[3]{q/R}$; K 、 α 为爆破地震波强度的场地衰减系数。一般采用 $-\lg \bar{r}$ 与 $-\lg A$ 的双对数最小二乘法进行直线方程回归求解,获得衰减系数 K 和 α

$$\lg A = \alpha \lg \bar{r} + \lg K \quad (6)$$

上式进一步化解为

$$\lg A = \alpha \lg \bar{r} + b' \tag{7}$$

式中： $b' = \lg K$ 。比较式(2)和式(7)可以看出，两式具有相类似的表达形式。根据分形盒维数计算关系，所分析形体必须为可以量测的标量，而在式(7)中振动强度 A 和折算距离 \bar{r} 均为标量，即在坐标平面内其大小都是可以用某个尺度进行量测的。虽然不能仅根据式(7)就能称 α 为该爆破地震波曲线的分形维数，而此时 \bar{r} 则被视为矩形盒的量测尺度。但这却意味着式(5)中爆破地震波振动强度的衰减指数 α 与爆破地震波的分形维数 D 有一定的关系。

4 爆破地震波的分形盒维数分析

在计算爆破地震波的分形盒维数 D 时，为了研究折算距离的影响，计算中只对爆破地震波有效振动持续时间内的记录曲线进行分析。爆破地震波振动持续时间在不同研究目的下有着不同定义。在地质学中，持续时间是指地震波到达时起直到可见记录消失并出现脉动信号的时间间隔，在这种意义下的持续时间是绝对持续时间。爆破地震动是装药于瞬间爆炸后，炸药能量释放而引起地表面介质运动的地震动现象，爆破地震波的振动持续时间比较短，主振相持续时间一般在 $0.1 \sim 2s$ 范围内。爆破地震波对结构物的破坏作用主要是爆破震动强度超过某一许可值时造成的破坏累积效果，因而定义爆破地震信号的有效振动持续时间为：爆破振动记录 $s(t)$ 的绝对值 $|s(t)|$ ($|s(t)| \geq \beta g$, g 为重力加速度) 第一次与最后一次出现的时间差，在抗震设计中 β 取 0.05 ，这主要是考虑了在当前的爆破振动安全控制标准里指出的当地面运动加速度大于等于 $0.05g$ 时，将会造成结构物的破坏^[10]。考虑到本次试验爆破地震波记录中最大加速度值均小于一个 g ，大多在 $0.5g$ 以下(见表 1)，如果仍采用上面的定义来计算本次实验地震波记录的有效振动持续时间，则其有效记录过程是非常有限的，不利于问题的分析。考虑到爆破地震波曲线具有一定的包络特征(即振动上升阶段、振动持续阶段和衰减阶段)和本次实验爆破地震记录的普遍规律，将振动持续时间定义为：设各记录最大峰值为 A ，则从记录值开始达到 $0.05A$ 到振动强度最后衰减为 $0.05A$ 为止，这一过程中所经历的时间为有效振动持续时间。在信号振动强度由峰值 A 衰减到强度值为 $0.05A$ 的首次出现，关于有效振动持续时间的计算并没有就此简单结束，而仍需继续搜索并比较此时刻的后五个振动峰值时间段内的记录，如果没有出现强度大于 $0.05A$ 的记录值，则有效振动持续时间在首次出现的振动为 $0.05A$ 处结束；否则，以该五个波峰中出现的最后一个振动记录为 $0.05A$ 处为新起点，对其后面的五个波峰值时间段内的记录重复上面的搜索分析过程。一般地

表 1 爆破地震波参数

Table 1 Data of blasting seismic wave

炮次	q/kg	测点 1			测点 2			测点 3			测点 4		
		R_1	A_1	f_1	R_2	A_2	f_2	R_3	A_3	f_3	R_4	A_4	f_4
		/m	/(m/s ²)	/Hz	/m	/(m/s ²)	/Hz	/m	/(m/s ²)	/Hz	/m	/(m/s ²)	/Hz
1	27	90	5.282	196	115	4.098	70	154	2.389	104	179	1.580	60
2	21	89	2.762	204	114	1.804	156	153	0.975	104	178	0.725	58
3	14	83	3.352	200	108	1.528	128	147	0.947	110	172	0.499	66
4	18	83	5.898	198	108	2.004	128	147	1.328	110	172	1.557	52
5	14	78	3.067	206	103	2.300	128	142	1.233	102	167	0.798	54
6	18	78	5.242	204	103	2.564	58	142	2.115	102	167	0.866	52
7	9	74	2.370	206	99	1.138	128	138	0.932	118	163	0.347	66
8	6	74	2.969	204	99	1.144	40	138	0.568	106	163	0.564	54
9	28	71	5.898	198	96	3.664	128	135	2.656	116	156	1.143	52
10	7	66	3.280	206	91	2.034	142	130	1.401	108	155	0.393	68

说,根据上述方法计算的有效振动持续时间是较为严密和准确的。上述定义和计算具有一定的相对性。

表 2 为本次试验的爆破地震信号盒维数的有关计算参数。表中同时给出了 $-\lg(k \delta) - \lg N_k$ 拟合直线方程式(2)的参数 b 的值, ΔN 为计算爆破地震波曲线在有效振动持续时间内的采样点数,即 ΔN 与采样时间间隔 Δt 的乘积为该记录的有效振动持续时间。在本文的计算中,各记录有效振动持续时间段曲线的盒维数计算的矩形盒纵向尺度 δ 的基本取值相同,为表 1 中所有炮次记录中最小峰值的二十分之一。如表 1 所示,本次实验记录中最高峰值 A 的最小振动强度 $A_{\min} = 0.347 \text{m/s}^2$,则 $\delta = 0.05 A_{\min} = 0.01235 \text{m/s}^2$ 。通过对 δ 基本取值的统一,各爆破地震记录中大小各异的振动峰值强度对覆盖于信号曲线上的矩形盒数量的影响将会得到明显的体现。

表 2 爆破地震波信号盒维数计算参数

Table 2 Data of blasting seismic wave's box dimensions and the computation parameters

炮次	测点 1			测点 2			测点 3			测点 4		
	ΔN_1	b_1	D_1	ΔN_2	b_2	D_2	ΔN_3	b_3	D_3	ΔN_4	b_4	D_4
1	70	3.692	1.283	180	3.600	1.188	180	3.410	1.098	210	3.235	1.141
2	55	3.187	1.282	180	3.376	1.191	210	3.158	1.203	230	2.964	1.118
3	80	3.436	1.257	145	3.285	1.172	170	3.142	1.165	210	2.854	1.120
4	100	3.727	1.276	140	3.217	1.062	160	3.264	1.147	200	3.248	1.085
5	90	3.349	1.231	145	3.313	1.086	165	3.155	1.148	230	3.004	1.005
6	85	3.541	1.239	130	3.288	1.151	165	3.352	1.130	210	3.035	1.065
7	120	3.240	1.217	150	3.053	1.133	130	3.018	1.157	120	2.780	1.102
8	80	3.230	1.210	140	2.966	1.122	160	2.965	1.111	140	2.706	1.040
9	70	3.587	1.222	100	3.440	1.170	135	3.390	1.220	175	3.102	1.084
10	75	3.332	1.247	110	3.102	1.192	135	3.170	1.186	155	2.841	1.086

通过对计算数据的分析表明:

(1)对于所有炮次而言,相同测点处的分形盒维数 D 比较稳定。如在第一测点处 D_1 的均值和标准差分别为 1.2464 和 0.0272,第二测点为 1.1467 和 0.0454,第三测点为 1.1565 和 0.0387,第四测点为 1.0846 和 0.0402。

(2)药量和距离对 b 值的影响明显,其规律类似于爆破地震波振动强度与药量和距离的关系,即药量增加 b 值增大,距离增大 b 值减小。但对 D 而言,只体现在随着距离的增大 D 值下降,与药量的相关性不强。由于试验中药量大小差别显著,从而各测点处(即使是相同测点) b 值离散性远大于 D 。

在计算分形盒维数时,由于考虑了爆破地震波振动强度和振动持续时间的差异,在这种情况下计算出来的盒维数 D 和参数 b 能体现不同试验情况下爆破地震记录曲线的特征。对于曲线的盒维数 D 而言,它反映了曲线的复杂程度。如对于最简单的直线而言,它的盒维数 $D = 1$;而对于复杂曲线,其盒维数 $D = 1 \sim 2$,如果一条曲线的极限发展能使它充满整个平面,则它的盒维数接近于 2,但可以想象该曲线的复杂程度。不难理解,可以认为直线的周期为无穷大,也可以认为其频率为无穷大而其振幅为无穷小。对于工程测试振动信号,其曲线的复杂度可以根据它的频率成份反映出来。这可以分析表 2 中盒维数 D 的最大及最小值所对应的爆破地震波曲线来比较它们的曲线振荡特性及频谱特征。

图 3(a)、(b)分别给出了盒维数值最大($D_{\max} = 1.283$)和最小($D_{\min} = 1.005$)时爆破地震波波形及所对应的功率谱。从波形曲线可以看出 $D_{\max} = 1.283$ 时的爆破地震波曲线要比 $D_{\min} = 1.005$ 时的复杂,而它的频率主要集中在 $180 \sim 200 \text{Hz}$, $D_{\min} = 1.005$ 时地震波的频率则集中于 $24 \sim 32 \text{Hz}$ 的低频区域。因而对于爆破地震波的分形盒维数 D 而言,其大小反映了所分析爆破地震波主振频率的高低,体现了信号的振荡剧烈程度。

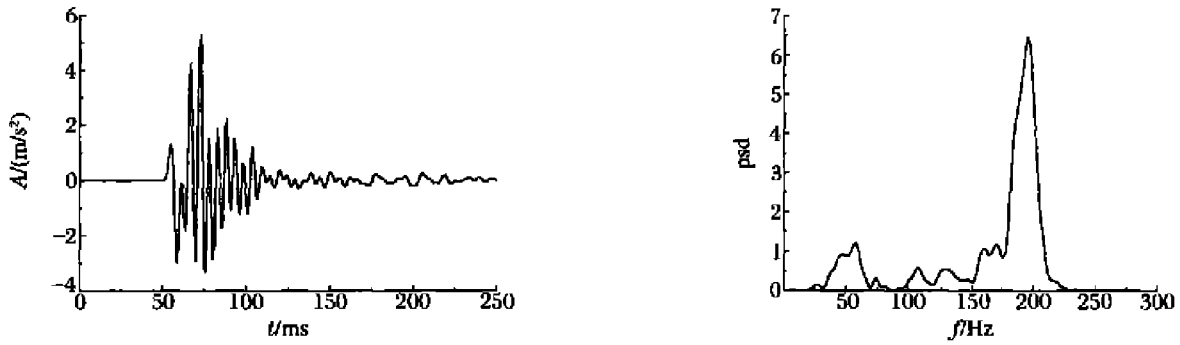


图 3(a) 第 1 炮测点 1 波形曲线及功率谱 ($D_{max}=1.283$)

Fig.3(a) Blasting seismic wave and spectrum of 1st test

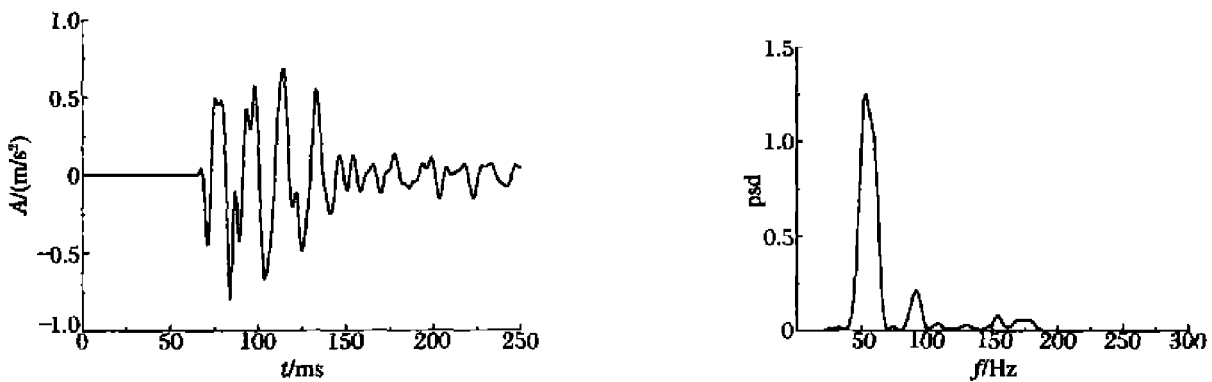


图 3(b) 第 5 炮测点 4 波形曲线及功率谱 ($D_{min}=1.005$)

Fig.3(b) Blasting seismic wave and spectrum of 5th test

本次试验是在微风化的岩石场地进行的,均为单段深孔爆破,各孔装药结构相同。在爆源情况相近(除药量有差异)的情况下,场地特征是影响爆破地震波频率的主要因素。试验中测点固定,各炮次爆源与第一测点的距离变动幅度较小,为 74~90m,而测点间的距离是固定的。虽然爆破地震波的频率随着距离的增加而衰减,但可以认为在小距离变化范围内,频率因距离的这种小幅度变化而表现出来的大小差异不明显。数据分析表明,所有炮次中相同测点处的盒维数是一个离散范围很小的取值,可以认为盒维数的主要影响因素是场地特征,而对于同次爆破不同测点处的盒维数而言,它又体现了随距离增加而下降的趋势,这种规律与频率和距离的关系类似;根据爆破地震波振动强度与折算距离的关系式(7)可知,衰减参数 α 对距离的作用最直接。根据此次爆破试验数据的分析,爆破地震波振动强度衰减系数 $\alpha=2.0774$,偏差为 ± 0.1426 。 α 与表 2 中各测点处的 D 相比, $\alpha/D \approx 2$,近似为两倍关系。

在计算爆破地震波振动曲线的盒数量时,是用一系列特定尺度的矩形盒对曲线进行覆盖的,各盒之间彼此相邻而不相交,因而盒数量在一定意义上反映了计算曲线的长度。由于本文中在进行盒数量计算时,没有将爆破地震波的最高峰值归一化,并只取有效振动持续时间内的记录进行计算,因而所得盒数量大小能体现各记录振动强度差别(虽然曲线的振动频率是影响曲线盒数量计算的一个主要因素)。由式(2)所得的 $-\lg(k \delta) - \lg N_k$ 拟合直线方程参数 b 与爆源药量关系明显。在爆破地震波的所有

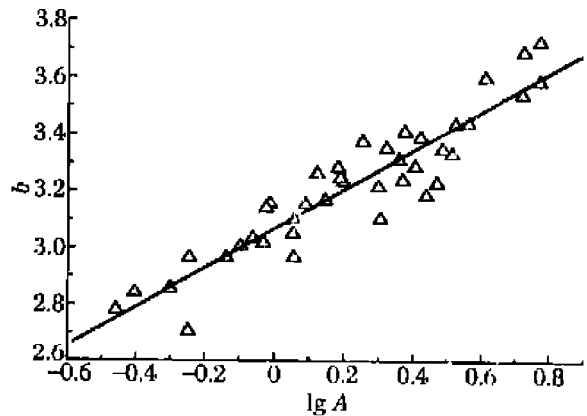


图 4 $\lg A$ 与 b 的关系

Fig.4 Relationship of $\lg A$ and b

分析参数中,折算距离对振动强度的作用最敏感,可以说参数 b 是药量与距离作用的一个综合体现。

下面分析参数 b 与地震波振动峰值 A 的关系。如果参数 b 能与 A 建立相关性极好的关系,则可以进一步通过式(5)来研究参数 b 与药量或距离的关系。参数 b 是数据对 $(k \delta - \lg N_{k \delta})$ 的双对数拟合时得到的一个直线方程参数,它是分析数据经一次对数作用后分析的结果,因而在研究参数 b 与峰值 A 的关系时,只研究 b 与 $\lg A$ 之间的对应关系,而不是 $\lg b$ 与 $\lg A$ 之间的双对数关系。

图 4 所示拟合直线方程为

$$b = 0.689 \times \lg A + 3.669 \quad (8)$$

相关系数为 0.93。

5 结 论

(1)在同一场地介质条件下,爆破地震波的分形维数 D 比较稳定;分形维数反映了爆破地震波频谱特征,较大的分形值对应高频占优的爆破地震波,而频率较低的爆破地震波分形值相对较低;

(2)在计算爆破地震波的分形盒维数时, $-\lg(k \delta) - \lg N_{k \delta}$ 的拟合直线方程式中参数 b 与折算距离 $\bar{r} = \sqrt[3]{q/R}$ 的关系明显,它反映了爆破地震波振动的强弱;获得了参数 b 与爆破地震波振动峰值 A 的关系式: $b = 0.689 \times \lg A + 3.669$, 其相关系数为 0.93;

(3)在同一场地条件下采集的爆破地震波振动强度的场地衰减指数 α 与分形盒维数 D 为两倍的关系。

本文中的有关结论是建立在一定试验数据分析的基础上,但由于本次实验仅限于在岩石场地进行,在对其它场地介质下进行的爆破地震波实验数据的分析中,结论(2)和(3)所示的关系将会发生变化,并且上述结论中的规律及数值关系也还有待在不同场地和不同爆源情况下的实验数据进一步证实。将分形理论运用于爆破地震效应的研究,进行爆破地震波的波形特征分析、振动强度预报及其潜在破坏性方面的研究,势必会取得一些更为具体的方法和结论,提高爆破地震效应研究的理论技术水平。

参考文献:

- [1] 张济忠.分形[M].北京:清华大学出版社,1995.
- [2] 李后强,汪富泉.分形理论及其在分子科学中的应用[M].北京:科学出版社,1997.
- [3] 谢和平.分形应用中的数学基础与方法[M].北京:科学出版社,1997.
- [4] 杨军,金乾坤,黄凤雷.岩石爆破理论模型及数值计算[M].北京:科学出版社,1999.
- [5] Maragos P. Fractal Aspects of Speech Signals: Dimension and Interpolation[R]. ADA 249102, 1992.
- [6] Maragos P, Sun F K. Measuring the fractal dimension of signals: Morphological covers and iterative optimization[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 1993, 41(1): 108-121.
- [7] 张朝晖,黄惟一.振动波形的分形判别及特征提取[J].东南大学学报,1999, 29(4): 6-10.
ZHANG Zhao-hui, HUANG Wei-yi. Fractal determination and feature extraction from vibration waveform[J]. Journal of Southeast University, 1999, 29(4): 6-10.
- [8] Bukkapatnam S, Kumara S R T, Lakhtakia A. Fractal Estimation of Flank Wear in Turning[R]. DAA H04-96-1-0082. USA, 1996.
- [9] Wornell G W, Oppenheim A V. Estimation of fractal signals from noisy measurements using wavelets[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 1992, 40(3): 611-623.
- [10] 娄建武,龙源,徐全军.人工模拟爆破震动信号及其频谱特性检验[J].工程爆破,2001, 7(1): 7-11.
LOU Jian-wu, LONG Yuan, XU Quan-jun. Simulation of blasting vibration signal and verification of its frequency spectrum[J]. Engineering Blasting, 2001, 7(1): 7-11.

A study on the fractal dimension of blasting seismic waves

LOU Jian-wu^{*}, LONG Yuan, XU Quan-jun, WAN Wen-qian

(*Engineering Institute of Engineer Corps, PLA University of Science and Technology,
Nanjing 210007, Jiangsu, China*)

Abstract: Blasting experiments in deep-holes have been carried out on a rock site, and the resulting blasting seismic waves were measured. The relationship among the blasting seismic wave attenuation parameters K , α , the fractal box dimension D and the fitting parameter b in the formula $-\lg(k \delta) - \lg N_k \delta$ for the box dimension computation. The box dimension of measured seismic wave signals were calculated with the double-scaled rectangle box model method. The results in this paper show that the blasting seismic wave box dimensions value D distributes in a small range. It is concluded that the box dimension D is a characteristic parameter related to the test field conditions, and approximately $\alpha \approx 2D$. The effects of explosive charge and the measurement distance on the parameter b are obvious. The fitting relationship between parameter b and the amplitude of blasting seismic wave A is $b = 0.689 \times \lg A + 3.669$.

Key words: mechanics of explosion; box dimension; fractal; blasting seismic wave; frequency spectrum; duration of effective vibration

* Corresponding author: LOU Jian-wu
E-mail address: loujw2004@163.com
Telephone: 025-84867762