

# 用灰关联分析方法确定影响岩体 爆破质量的主要因素

张继春 钮强 徐小荷

(东北工学院 沈阳 110006)

**摘要** 用灰关联分析方法确定影响岩体爆破质量的主要因素。在简介灰关联分析原理及其计算方法后,通过实例计算与分析,得到各影响因素的主次关系。并且发现:节理裂隙岩体中的爆破块度指标主要受爆区内节理裂隙分布特征的控制;其次,也与均质岩体中的爆破一样,影响块度分布的主要因素是炮孔间距、排距和最小抵抗线等。

**关键词** 灰关联分析 节理裂隙岩体爆破 爆破参数 爆破质量

## 1 问题的提出

影响岩体爆破质量的因素多达数十个,其中包括:炸药参数、爆破参数、岩体结构与力学特征等各种不同类型的因素,它们的共同作用决定了岩体爆破质量。然而,由于理论分析和现场试验的目的不同,以及受各种客观条件的限制,不可能也不必要将各个影响因素都反映出来。所以,如何简单、可靠地从众多因素中确定出影响岩体爆破质量的主要因素,成为岩体爆破理论与应用研究的基本问题,也是准确控制和预测爆破质量的前提。

迄今为止,国内外的研究工作一般只局限于采用相关分析、回归分析和显著性检验来确定各个因素对爆破质量的影响程度,这些方法要求有大量数据,并且各种样本值还需服从某个典型的概率分布。可是,工程实际中能收集到的爆破质量指标和影响因素的样本量受到一定的限制,而且有时离散性较大。因此,用上述方法得出的结论可靠性难以保证。

灰关联分析方法的特点是不用太多的样本,便可较准确地决定出影响爆破质量各因素的主次关系,本文旨在对该问题进行有益的探讨。

## 2 灰关联分析的原理

### 2.1 系统特征变量和相关因素变量

岩体爆破前炸药参数、爆破参数以及岩体结构分布特征和岩体强度范围虽属已知,但岩体结构及其力学性质在爆区内的变化并不明确,尤其是岩体爆破物理过程至今尚未完全弄清楚。因此,可将岩体爆破视为灰色系统加以研究,应用灰色系统理论的灰关联分析方法确定影响岩体爆破质量的主要因素。

岩体爆破中存在两类参量。一类是衡量爆破质量优劣的指标量,如:块度分布函数中的均匀性指数、特征块度和最大块度以及大块率、平均块度等指标。另一类是对爆破质量

起控制作用的因素量,即:炸药波阻抗、炸药单耗、孔径、孔距、排距、炮孔密集系数、抵抗线、微差时间、节理裂隙间距和迹长、岩体强度和岩体波阻抗等参量。进行灰关联分析时,将反映爆破质量优劣的指标量定义为系统特征变量,记为 $Y_i$ , ( $i=1, 2, \dots, s$ ),  $s$ 表示指标量个数;相应地,将各种因素量定义为相关因素变量,记为 $X_j$ , ( $j=1, 2, \dots, m$ ),  $m$ 表示因素量个数。

若利用 $n$ 次试验结果来确定影响岩体爆破质量的主要因素,那么,每一个系统特征变量和相关因素变量在各次试验中所测得的数据就形成相应的系统特征变量数据序列和相关因素变量数据序列,即:

$$Y_i = [y_i(1), y_i(2), \dots, y_i(k), \dots, y_i(n)] \quad (1)$$

$$X_j = [x_j(1), x_j(2), \dots, x_j(k), \dots, x_j(n)] \quad (2)$$

式中: $y_i(k)$ ,  $x_j(k)$ 分别表示第 $i$ 个系统特征变量和第 $j$ 个相关因素变量在第 $k$ 次试验时的测量数据(样本值)。

## 2.2 灰关联度及其计算方法

灰关联分析的基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密,曲线越接近,相应序列之间的灰关联度就越大,反之就越小<sup>[1]</sup>。灰关联分析方法就是通过计算系统特征变量数据序列与相关因素变量数据序列之间的灰关联度,建立起灰关联矩阵,利用优势分析原则,得出各影响因素的顺序,最终确定出主要影响因素。

按照灰关联分析的不同目的,灰关联度可分为灰色绝对关联度、灰色相对关联度和灰色综合关联度。对于以确定影响岩体爆破质量主要因素为目的的灰关联分析,不需要考虑变量序列中各次测量的数据相对于始点的变化速率,以及避免关联度计算中因分辨系数的选取而出现的计算问题。本文将以灰色绝对关联度为基础进行灰关联分析。

由于各变量数据序列样本值的单位不统一,必须对各序列样本值进行无量纲化,才能保证计算出的关联度的准确性<sup>[2]</sup>。为此,通过均值化算子 $D_1$ 的作用求得各变量序列的均值象。则(1), (2)式可化为:

$$Y_i^1 = Y_i D_1 = [y_i^1(1), y_i^1(2), \dots, y_i^1(k), \dots, y_i^1(n)] \quad (3)$$

$$X_j^1 = X_j D_1 = [x_j^1(1), x_j^1(2), \dots, x_j^1(k), \dots, x_j^1(n)] \quad (4)$$

式中: $y_i^1(k) = y_i(k) / \bar{y}_i$ ,  $\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_i(k)$ ,  $x_j^1(k) = x_j(k) / \bar{x}_j$ ,  $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_j(k)$ 。

对(3), (4)式分别经过始点零象化算子 $D_0$ 作用得到其相应的始点零化象:

$$Y_i^0 = Y_i^1 D_0 = [y_i^0(1), y_i^0(2), \dots, y_i^0(k), \dots, y_i^0(n)] \quad (5)$$

$$X_j^0 = X_j^1 D_0 = [x_j^0(1), x_j^0(2), \dots, x_j^0(k), \dots, x_j^0(n)] \quad (6)$$

式中: $y_i^0(k) = y_i^1(k) - y_i^1(1)$ ,  $x_j^0(k) = x_j^1(k) - x_j^1(1)$ 。

由灰色绝对关联度定义得<sup>[1]</sup>:

$$e_{ij} = \frac{1 + |YS_i| + |XS_j|}{1 + |YS_i| + |XS_j| + |XS_j - YS_i|} \quad (7)$$

式中: $e_{ij}$ 表示第 $i$ 个系统特征变量与第 $j$ 个相关因素变量的灰色绝对关联度。 $|YS_i|$ ,  $|XS_j|$ 和 $|XS_j - YS_i|$ 由下式给出:

$$|YS_i| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} y_i^0(k) + \frac{1}{2} y_i^0(n) \right|, \quad |XS_j| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_j^0(k) + \frac{1}{2} x_j^0(n) \right|$$

$$|XS_j - YS_i| = \left| \sum_{k=2}^{i-1} [x_j^0(k) - y_i^0(k)] + \frac{1}{2}[x_j^0(n) - y_i^0(n)] \right|$$

### 2.3 优势分析原则

利用(7)式计算出灰色绝对关联度  $e_{ij}$ , 得到灰色绝对关联矩阵:

$$A = (e_{ij}) = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1m} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ e_{s1} & e_{s2} & \cdots & e_{sm} \end{pmatrix}$$

当  $l, j \in \{1, 2, \dots, m\}$  满足  $e_{li} \geq e_{lj} (i=1, 2, \dots, s)$ , 则认为因素  $X_l$  优于因素  $X_j$ . 若对任意的  $j=1, 2, \dots, m, j \neq l, X_l$  均优于  $X_j$ , 则  $X_l$  为最优因素。

若不存在最优因素, 必然存在  $l, j \in \{1, 2, \dots, m\}$ , 满足  $\sum_{i=1}^s e_{li} \geq \sum_{i=1}^s e_{lj}$ , 那么, 因素  $X_l$  准优于因素  $X_j$ . 若对任意的  $j=1, 2, \dots, m, j \neq l, X_l$  均准优于  $X_j$ , 则称  $X_l$  为准优因素。工程上把最优因素和准优因素统称为优势因素。

### 3 应用与讨论

从现有的研究成果来看, 主要是通过爆破机理分析和实验室模型试验以及现场爆破试验等方法, 分别研究节理裂隙、爆破参数等因素对爆破质量的影响<sup>[3-5]</sup>, 而常用回归分析和显著性检验等方法只能说明单个因素与爆破质量的关系<sup>[6,7]</sup>。下文以几个现场爆破试验结果为例, 应用灰关联分析法讨论节理裂隙和爆破参数对爆破质量的影响。

马鞍山矿山研究院在江苏观山铜矿采石场均质岩体中进行小台阶单排炮孔爆破试验的爆破参数和试验结果列于表 1<sup>[7]</sup>。以块度分布参数为系统特征变量, 爆破参数为相关因素变量, 按照上述计算方法得出灰色绝对关联矩阵见表 2。

由表 2 知, 四个爆破参数对块度分布参数影响的顺序为: 最小抵抗线, 孔距, 密集系数和起爆时差(相应的  $\sum e_{ij}$ ) 为: 2.0694, 1.9971, 1.8340, 1.7082)。其中, 孔距和最小抵抗线分别对均匀性指数和特征块度起主要影响( $e$  值为 0.8855 和 0.7207)。因此, 要获得预期的爆破块度分布首先必须合理选取孔距和最小抵抗线。

表 1 单排孔小台阶爆破参数与结果

Table 1 Parameters of the single-row hole small bench blasting and its results

序号	相关因素变量( $X_j$ )				系统特征变量( $Y_i$ )		
	最小抵抗线/(m) $X_1$	孔距/(m) $X_2$	起爆时差/(ms) $X_3$	密集系数 $X_4$	特征块度/(mm) $Y_1$	均匀性指数 $Y_2$	平均块度/(mm) $Y_3$
1	0.75	0.75	0	1	1115	1.1998	821.5
2	0.53	1.06	0	2	622	1.4869	486.2
3	0.43	1.30	0	3	466	1.6566	373.8
4	0.75	0.75	1.9	1	611	1.2804	459.0
5	0.53	1.06	1.9	2	412	1.4871	323.0

表 2 单排孔小台阶爆破的灰色绝对关联矩阵( $a_{ij}$ )  
Table 2 The grey absolute relational matrix of the single-row hole small bench blasting ( $a_{ij}$ )

	$X_1(e_{11})$	$X_2(e_{12})$	$X_3(e_{13})$	$X_4(e_{14})$
$Y_1(e_{1j})$	0.7207	0.5540	0.5340	0.5451
$Y_2(e_{2j})$	0.6102	0.8855	0.6389	0.7415
$Y_3(e_{3j})$	0.7385	0.5576	0.5353	0.5474
$\sum_{i=1}^3 a_{ij}$	2.0694	1.9971	1.7082	1.8340

岩体中各种地质结构软弱面的分布对爆破质量有着极其重大的影响,下面以三个实例进行讨论。

长沙矿冶研究院等单位在首钢水厂露天铁矿进行现场爆破试验<sup>[8]</sup>。按其试验数据计算灰色绝对关联度时,以大块率和平均块度作为系统特征变量  $Y_1, Y_2$ , 爆区内裂隙间距和长度、孔距、排距及炸药单耗作为相关因素变量  $X_j (j=1 \sim 5)$ , 以 17 次爆破试验测得的数据为样本值,其灰色绝对关联矩阵见表 3。

表 3 水厂铁矿爆破的灰色绝对关联矩阵( $a_{ij}$ )  
Table 3 The grey absolute relational matrix of the water plant iron mine blasting ( $a_{ij}$ )

	裂隙间距 $X_1$ ( $e_{11}$ )	裂隙长度 $X_2$ ( $e_{12}$ )	孔距 $X_3$ ( $e_{13}$ )	排距 $X_4$ ( $e_{14}$ )	炸药单耗 $X_5$ ( $e_{15}$ )
$Y_1(e_{1j})$	0.7042	0.8391	0.7146	0.6701	0.5650
$Y_2(e_{2j})$	0.9599	0.8274	0.6349	0.6158	0.5551
$\sum_{i=1}^2 a_{ij}$	1.6641	1.6665	1.3495	1.2859	1.1201

从表 3 知,各因素对爆破质量指标影响大小的顺序为:裂隙长度、裂隙间距、孔距和炸药单耗。这表明爆破后大块率和平均块度主要受裂隙长度和间距控制。其中裂隙长度和孔距决定着大块率,而裂隙间距与平均块度的关系最密切。

陕西机械学院为了论证岩体天然块度与爆破块度的关系,分别在陕西省金堆城钼矿的石英岩和石砭峪水库的风化花岗岩与片麻岩中进行野外小型爆破试验<sup>[9]</sup>,其试验参数与结果列于表 4,表中  $K_{50}$  表示爆后筛下累积重量百分比为 50% 时的碎块尺寸。

金堆城钼矿试验爆破和石砭峪水库爆破的灰色绝对关联矩阵见表 5。

从表 5 知,作为反映岩体节理裂隙分布特征的天然块度(平均块度和特征块度)对爆后块度分布起着最主要作用。四个爆破参数中,以最小抵抗线和炸药单耗的作用较大,孔距的作用次之。以单个质量指标看,天然岩块的平均块度和特征块度控制着爆破碎块的  $K_{50}$  指标和特征块度。此外,在金堆城钼矿试验中,最小抵抗线和天然岩块特征块度对爆后特征块度有明显影响,且均匀性指数与炮孔密集系数和孔距密切相关。而在石砭峪水库爆破中,炸药单耗、抵抗线和孔距决定均匀性指数大小。这两个实例的计算结果表明,岩体中的节理裂隙分布对爆后块度分布起控制作用,爆破参数则主要影响块度分布的均匀性指

数。这一结论与前例一致。

表 4 金堆城钼矿和石砭峪水库的爆破数据与结果  
Table 4 The blasting data of both Jin Duichen molybdenum mine  
and Shi Bianyu reservoir and their results

试 验 地	相关因素变量( $X_i$ )						系统特征变量( $Y_i$ )			
	序号	最小抵抗线 /(cm) $X_1$	孔距 /(cm) $X_2$	密集系数 $X_3$	炸药单耗 /(kg/m <sup>3</sup> ) $X_4$	天然岩块 平均块度 /(cm) $X_5$	天然岩块 特征块度 /(cm) $X_6$	$K_{50}$ $Y_1$	特征块度 /(cm) $Y_2$	均匀性指数 $Y_3$
A	1	50	110	2	0.38	14.0	16.7	15.0	18.0	2.013
	2	90	90	1	0.55	18.6	21.8	16.5	23.0	1.105
	3	70	90	1.3	0.37	19.0	24.0	25.0	33.5	1.254
	4	80	55	0.7	0.39	12.8	15.0	9.8	15.0	0.862
B	1	80	88	1.1	0.77	12.6	15.1	26.9	32.5	1.941
	2	80	96	1.2	0.38	21.8	28.6	27.9	39.0	1.096
	3	80	92	1.15	0.12	25.1	29.1	51.8	71.4	1.144
	4	80	80	1.0	0.09	30.8	43.5	39.2	55.0	1.086

注:表中 A 栏表示金堆城钼矿爆破数据, B 栏为石砭峪水库爆破数据, 下表同。

表 5 金堆城钼矿和石砭峪水库爆破的灰色绝对关联矩阵( $\varepsilon_{ij}$ )  
Table 5 The grey absolute relational matrixes of both Jin Duichen mine  
and Shi Bianyu reservoir blasting ( $\varepsilon_{ij}$ )

	$X_1(\varepsilon_{1i})$	$X_2(\varepsilon_{2i})$	$X_3(\varepsilon_{3i})$	$X_4(\varepsilon_{4i})$	$X_5(\varepsilon_{5i})$	$X_6(\varepsilon_{6i})$	
A	$Y_1(\varepsilon_{1j})$	0.8848	0.6374	0.5857	0.9294	0.9896	0.9730
	$Y_2(\varepsilon_{2j})$	0.9994	0.6173	0.5774	0.8300	0.8925	0.9062
	$Y_3(\varepsilon_{3j})$	0.5817	0.7897	0.9651	0.5960	0.5902	0.5890
	$\sum_{j=1}^3 \varepsilon_{ij}$	2.4659	2.0444	2.1282	2.3554	2.4723	2.4682
B	$Y_1(\varepsilon_{1j})$	0.6813	0.7138	0.7138	0.5460	0.8711	0.8565
	$Y_2(\varepsilon_{2j})$	0.6520	0.6793	0.6793	0.5438	0.9426	0.9252
	$Y_3(\varepsilon_{3j})$	0.6206	0.6156	0.6156	0.7274	0.5729	0.5713
	$\sum_{j=1}^3 \varepsilon_{ij}$	1.9539	2.0087	2.0087	1.8172	2.3866	2.3530

表 5 所列石砭峪水库爆破试验孔距和密集系数的灰色绝对关联度相等, 这是由于各次爆破抵抗线相同之故。说明两者作用相同, 符合密切系数的定义。

对比表 2、表 3 和表 5 中各因素对块度的影响可知, 均质岩体爆破块度分布主要受最小抵抗线、孔距的影响。但对节理裂隙岩体爆破, 节理裂隙的分布状态却对爆破块度分布起决定作用, 这是由于节理裂隙既控制着岩体力学性质, 又控制着岩体的破坏形式<sup>[10]</sup>。岩体节理裂隙分布特征是客观存在的, 工程爆破中只能通过合理选取爆破参数来控制爆破块度。

从表 3 和表 5 中还发现, 炸药单耗对爆破块度分布参数影响都很小; 这时工程爆破中在保证岩体能破碎的条件下, 如何合理确定炸药单耗有着积极的指导意义。

从以上四个实例分析可知,爆破参数主要对爆后块度分布的均匀性指数起较大影响,而且每种爆破参数在不同的爆破试验中对块度分布影响程度又有差异。这说明在不同类型和力学性质的岩体中爆破时,就已确定的各爆破参数取值范围而言,存在着不同的影响块度分布的优势因素。因此,通过灰色关联分析,能为确定块度预测参数和爆破优化参数提供可靠依据。

## 4 结 论

通过以上应用灰关联分析方法实例计算分析可以得出如下结论:

1. 灰关联分析能确定不同矿山、不同爆破方式下影响爆破质量各因素的主次关系,从而为控制和预测爆破质量提供选择控制参数和预测参数的方法。
2. 有多个爆破质量指标时,往往是由两个或两个以上的因素共同控制着爆破质量。但对于单个爆破质量指标,必然存在着一个对其起决定作用的最优因素;并且不同的爆破质量指标所对应的最优因素不一定相同。这反映了岩体爆破的复杂性和多变性。
3. 爆破块度指标主要受岩体节理裂隙长度和间距的影响。节理裂隙间距影响着平均块度和特征块度,而节理裂隙长度决定着大块率。因此,对岩体爆破块度的控制与预测研究,节理裂隙分布特征是不可缺少的参数。
4. 对爆破块度分布起主导作用的爆破参数是炮孔间距和排距。如果爆区节理裂隙分布特征变化不大,只有抓住孔网参数与节理结构相关关系这一关键因素,才能达到爆破参数优化与块度控制的目的。
5. 不同岩体性质和不同爆破条件下,同一种爆破参数对爆破块度分布的影响程度不同。因此,在进行爆破块度预测和参数优化时,应根据具体爆破条件,通过试验数据的分析研究,正确选择预测参数和优化参数,才能达到预期目的。

本文仅在应用灰关联分析方法讨论岩体爆破质量与影响因素的关系方面做了初步的分析,尚未对影响爆破质量的众多因素进行系统研究。因此,有待做更深入细致的据数收集和分析工作,以求得此问题的全面解决。总之,灰关联分析方法开拓出一条确定各因素主次关系的简捷、有用的途径。岩体爆破属于多个相关因素作用下多个系统特征变量的复杂系统,只能通过建立多控制变量的系统预测模型,才能进行有效的块度分布预测,这将是今后进行岩体爆破块度预测的主要任务。

## 参 考 文 献

- 1 刘恩峰,郭天榜编著.灰色系统理论及其应用.开封:河南大学出版社,1991,50
- 2 邓聚龙著.灰色系统(社会,经济).北京:国防工业出版社,1985,51
- 3 王卫星,等.地质构造弱面对岩体爆破块度分布影响的实验研究.爆破,1986,(4),21~25
- 4 蔡恒学.试论裂隙对爆破效果的影响.爆破器材,1990,(4),4~8
- 5 郑瑞春,等.爆破参数对破岩质量的影响规律及小抵抗线大孔距爆破机理的探讨.爆破,1987,(2),5~10
- 6 吴子骏,等.爆破参数对矿岩破碎影响的研究.长沙矿山研究院学报(季刊),1993,3(2),24~33
- 7 马柏令,等.露天矿小台阶爆破试验研究及其块度分布规律性的统计分析.金属矿山,1993,(12),1~7
- 8 长沙矿冶研究院,等.首钢水厂铁矿矿岩爆破性分区的研究.大型露天铁矿控制爆破技术与爆破器材的研究(鉴定材料),A-2,1990,34~35
- 9 刘兰亭,等.天然块度对爆破块度影响的野外小型试验研究.陕西机械学院水利系研究资料,1989
- 10 孙广忠.岩体结构力学.北京:科学出版社,1988,6~8

## DETERMINATION OF PRINCIPAL FACTORS AFFECTING THE QUALITY OF ROCK BLASTING WITH GREY CORRELATION ANALYSIS

Zhang Jichun Niu Qiang Xu Xiaohu  
(*Northeast University of Technology, Shenyang, 110006*)

**ABSTRACT** Rock blasting is considered as a grey system and the principal factors affecting the quality of rock blasting are determined by the grey correlation analysis in this paper. The fundamentals of the grey correlation analysis and its calculating method are briefly introduced. Taking four field blasting results as examples, the authors calculated their grey absolute correlation grades respectively and obtain the corresponding grey absolute correlation matrixes. Through calculations and analyses, the authors come to the main conclusion as following:

1. The grey correlation analysis may determine the relationship between the primary and the secondary of all the factors affecting the blasting quality in different mines and blasting conditions. It supplies a simple and useful method in selecting parameters to control and predict the blasting quality.

2. For multiple blasting quality indexes, usually, two or more factors control the blasting quality. But for a single index, it is necessary that there is a factor which dominantly affects the blasting quality.

3. The size indexes of fragments resulting from rock masses blasting are mainly influenced by the distribution of the joints and cracks within rock masses. The space of joints and cracks affects the average and characteristic size of fragments, the length of joints and cracks determines the amounts of big fragments.

4. Among all the blast parameters, the hole space and row space as well as the burden play a leading role in the size distribution of fragments. When joints and cracks are not developed within blasting regions, the optimum blasting and the control of fragment size will be realised by adjusting these parameters reasonably.

5. Under different characteristics of rock masses and blasting forms, the same blast parameter plays a different role in the size distribution of fragments.

**KEY WORDS** grey correlation analysis, joint-cracked rock masses blasting, blasting parameter, blasting quality