

爆破作用下花岗岩坑道的模糊破坏分区

吴其苏 吴从师
(长沙矿冶研究院)

摘要 本文以实测数据和宏观调查资料为依据,用模糊数学方法研究了花岗岩坑道在爆炸作用下的破坏程度和多个地面运动物理量之间的关系,建立了破坏模糊集的隶属函数,提出了用模糊综合评定来预测坑道破坏分区的方法。

关键词 爆破震动 模糊综合评定 坑道破坏分区

1. 前言

确定坑道在爆炸应力波作用下的破坏分区,是一个复杂的问题。坑道的破坏程度受多因素的综合影响,用某一个地面运动物理量是难以确切、清晰地预计分区。这无论是他人的工作^[1,2,3,4]、还是我们的实践所表明,在某一相同地面运动物理量数值的条件下,即使岩石的力学性质、地质条件和受载情况相近,不同坑道的破坏程度不一定相同。在同一次爆破中,用相同或不同型号的仪器在相距很近的两个点上测到的记录也可能不一样,并且不同物理量关系之间的离散性也较大,这说明坑道的破坏分区有一定的模糊性。我们试图通过这种模糊性对坑道受爆炸应力波破坏的强烈程度确定一种综合的破坏分区方法。

当不耦合装药的条形药包在花岗岩中爆破时,我们在垂直于药包轴线的花岗岩坑道底板上(其高程与药室的高程基本一致,坑道断面一般为 $3 \times 3 \text{ m}^2$)测定和收集了60余组坑道底板垂直向振动速度、加速度和水平向振动加速度的峰值数据,以及相应的坑道破坏宏观调查资料,用模糊数学研究了它们之间的关系,提出了预测破坏分区的模糊评定方法。

2. 隶属函数的确定

评定破坏分区时,我们取论域 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 为破坏等级的集合,论域 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 为评定因素的集合。

按照破坏程度的轻重,破坏等级集合 U 大致分为5等,即

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\} = \{I, II, III, IV, V\} \quad (1)$$

式中, I 为完全破坏; II 为严重破坏; III 为中等破坏; IV 为轻微破坏; V 为未破坏。其宏观破坏特征是:

I 完全破坏 坑道整体性毁坏,坑道内全部被坍塌岩块充填,无修复价值。

II 严重破坏 坑道明显变形,围岩严重坍塌,内部成半堵塞状态,坑道壁爆破裂隙发育,原裂隙普遍张开 $2 \sim 3 \text{ cm}$,坑道基本无修复利用价值。

III 中等破坏 在某些受结构面控制的地方坑道变形,有些岩块之间出现 $2 \sim 10 \text{ cm}$ 的相对位移,爆破裂隙不甚发育,原裂隙普遍张开 $0.5 \sim 2 \text{ cm}$,坍塌的岩块可以清除,坑道被修

复加固后可以利用。

IV 轻微破坏 坑道基本完好, 变形不明显, 一般无爆破裂隙, 大部分原生裂隙张开宽度小于0.5厘米, 除局部软弱结构面出现明显相对位移有岩块掉落外, 围岩一般不坍塌, 稍加清理后, 坑道便可使用。

V 未破坏 坑道完好, 无爆破裂隙, 原生裂隙无可见性张开和延伸, 清除个别松石后便可使用。

我们把被评定的破坏分区结果看作论域 U 上的模糊子集,

$$\underline{Y} = \frac{y_1}{I} + \frac{y_2}{II} + \frac{y_3}{III} + \frac{y_4}{IV} + \frac{y_5}{V} \quad (2)$$

式中 $y_k (k=1, 2, \dots, 5)$ 为破坏等级 u_k 对模糊破坏分区 \underline{Y} 的隶属度。式(2)也可记为

$$\underline{Y} = (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5) \quad (3)$$

评定因素集合 V , 由坑道底板质点运动的三个物理量组成(我们仅测定和收集到三个物理量), 即垂直向振动速度 V , 垂直向振动加速度 a_1 和水平向振动加速度 a_2 。

$$V = (v_1, v_2, v_3) = (V, a_1, a_2) \quad (4)$$

评定因素 V 上的模糊子集为

$$\underline{X} = \frac{x_1}{V} + \frac{x_2}{a_1} + \frac{x_3}{a_2} \quad (5)$$

式中 $x_j (j=1, 2, 3)$ 为 v_j 对 \underline{X} 的隶属度。式(5)也可记为

$$\underline{X} = (x_1, x_2, x_3) \quad (6)$$

为建立论域 U 与 V 之间的模糊关系, 我们先求各评定因素 v_j 对各破坏等级 u_k 的隶属函数 $u_{jk}(V_j)$ 。

根据实测和收集的数据, 在同一破坏等级 u_k 中, 底板质点运动的物理量(即评定因素) V 、 a_1 、 a_2 都比较离散, 也没有严格的界限。经过对这些数据的统计分类结果发现, 同一破坏等级下, 这些物理量基本接近正态分布。因此, 我们假设这些物理量对同一破坏等级的隶属函数为正态型

$$u_{jk}(v) = \exp(-[(v_j - d)/c]^2) \quad (7)$$

式中, v_j 为各破坏等级对应的物理量的数值; d 和 c 分别为各破坏等级对应的各物理量样本点的算术平均值和均方差

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (8)$$

$$c = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - d)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (9)$$

表1给出了5个破坏等级中实测的各物理量范围, 以及根据式(8)和(9)求出的各评定因素各破坏等级的隶属函数中的 d 、 c 值。将表1中各等级各因素的 d 、 c 值分别代入

(7)式,就确定了各评定因素 v ,对破坏等级的隶属函数共13个。因缺少第V级的实测加速度数据,我们暂规定垂直和水平加速度对破坏等级V的隶属度为零。

表1 各破坏等级实测物理量范围及隶属函数中的参数

Table 1 Destroy degree measuring physical parameters and parameters in the membership functions

破坏等级	垂直速度 V_{\perp} (cm/s)				垂直加速度 a_{\perp} (m/s ²)				水平加速度 a_{\pm} (m/s ²)			
	范围	d	c	n	范围	d	c	n	范围	d	c	n
I	247.0~1000.0	550.42	210.82	15	1470.0~6566.0	4587.58	2286.54	10	1744.4~3920.0	2823.20	1538.40	6
II	126.0~286.0	186.25	45.09	9	239.1~2037.3	1044.39	682.08	11	365.54~1881.6	936.63	659.83	6
III	86.9~264.0	146.79	56.99	13	25.2~598.7	336.63	156.90	10	125.4~430.2	264.21	119.66	5
IV	18.2~221.84	89.27	47.25	20	8.62~222.46	61.94	57.23	14	47.0~172.5	90.55	50.67	5
V	22.2~36.9	30.23	4.91	6								

注: n 为样品数

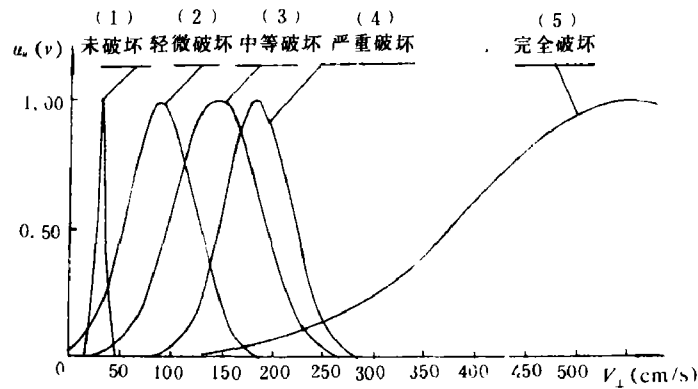


图1 垂直向振动速度 V_{\perp} 的隶属函数曲线

Fig 1 Curve of the membership function of the vertical vibration velocity V_{\perp}

(1) Unbroken (2) Slightly broken (3) Moderately broken

(4) Seriously broken (5) Wholly broken

由表1和式(7)可以作出各物理量对于各破坏等级的隶属函数曲线。图1是垂直振动速度 V_{\perp} 的隶属函数曲线,其它两个物理量的隶属函数曲线也同图1类似。它们表明了各物理量对于各破坏等级的隶属特征。

从表1和图1可看出,各相邻破坏等级的物理量之间有一个搭接区,它说明用来评定相

邻两个破坏等级间的物理量界限不能截然分明,而具有一定的模糊性,这是符合实际情况的,人为地规定一界限值来衡量各破坏等级不太合理。

3. 模糊分区与预测

模糊破坏分区的目的是,根据预测的震动强度,用综合评定的方法,判断坑道的破坏程度,以便制定相应的防护措施。

对实测的坑道底板各物理量数据分别进行回归分析,得到的震动强度预测公式如下

$$V_1 = 152.05 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.58} \quad (\text{cm/s}) \quad (\text{样品数 } n = 63, \text{ 相关系数 } \gamma = 0.823) \quad (10)$$

$$a_{\perp} = 306.25 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{3.01} \quad (\text{m/s}^2) \quad (\text{样品数 } n = 44, \text{ 相关系数 } \gamma = 0.924) \quad (11)$$

$$a_{\pm} = 282.63 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.50} \quad (\text{m/s}^2) \quad (\text{样品数 } n = 22, \text{ 相关系数 } \gamma = 0.961) \quad (12)$$

式中, Q 为最大一段起爆的药量 (kg); R 为预测点至爆心的距离 (m)。

由式(10~12)可求得组成因素集 V 的各因素 (即物理量) V_1 、 a_{\perp} 及 a_{\pm} , 这些因素对各破坏等级的隶属函数值 (隶属度) 可按表1的参数 d 、 c 和式(7)求得。这些隶属函数值构成 v_j 的模糊破坏分区向量

$$\underline{I}_j = [v_{j1}, v_{j2}, v_{j3}, v_{j4}, v_{j5}] \quad (j = 1, 2, 3) \quad (13)$$

式中 $v_{jk} = u_{uk}(v_j)$, ($k = 1, 2, \dots, 5$)。

向量 \underline{I}_j 是从因素 v_j 着眼时的单因子评定结果。由于我们的破坏分区涉及到三个物理量 (即三个评定因素), 从某一因素出发可以对分区作一种评定, 而从另一因素出发又可以对分区作出另一种评定。这样, 就得考虑一个综合各因素作出一个更接近实际的评定问题。为解决这个问题, 需建立一个集合 V 和 U 之间的模糊关系矩阵 \underline{R} , 这个矩阵由各单因素评定结果 \underline{I}_j 汇总构成:

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11}, & \gamma_{12}, & \dots, & \gamma_{15} \\ \gamma_{21}, & \gamma_{22}, & \dots, & \gamma_{25} \\ \gamma_{31}, & \gamma_{32}, & \dots, & \gamma_{35} \end{bmatrix} \quad (14)$$

综合评定的数学模型是

$$\underline{Y} = \underline{X} \circ \underline{R} \quad (15)$$

式中“ \circ ”为运算记号, 用不同的算子, 式(15)会形成不同的模型, 本文采用“加权平均型”^[6]运算, 这种运算的结果兼顾了各种因素, 没有“泯没”掉一些次要因素的影响。至于 \underline{X} 可以认为是各因素重要性的权向量, 目前我们取等权分配, $\underline{X} = (0.33, 0.33, 0.33)$ 。这样式(15)的具体形式为

$$\underline{Y} = (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5) = (0.33, 0.33, 0.33) \begin{bmatrix} \gamma_{11}, \gamma_{12}, \dots, \gamma_{15} \\ \gamma_{21}, \gamma_{22}, \dots, \gamma_{25} \\ \gamma_{31}, \gamma_{32}, \dots, \gamma_{35} \end{bmatrix} \quad (16)$$

通过式(16)的运算,我们求得论域 U 上的一个模糊子集 \underline{Y} ,这也就是所需的模糊评定的结果。

下面举例说明用上述综合评定来预测坑道破坏程度的步骤:

设某工程爆破的最大一段药量为500吨,预测点到爆心距离为70m,试估计坑道破坏等级。

(1) 由式(10~12)求得质点运动参数 V_z , a_z , a_r 分别为185.43 cm/s、446.98 m/s²、386.90 m/s²。

(2) 根据表1给出的 d 、 c 值和(7)式组成的13个隶属函数式,将上面三个运动参数分别代入这些函数式,求得三个评定因素的隶属度如表2,按表2的排列即得到模糊关系矩阵 \underline{R} 的各元素。

表2 各因素的隶属度
Table 2 Membership of each factor

等级 评定因素	I	II	III	IV	V
V_z	0.05	1.00	0.63	0.02	0.00
a_z	0.04	0.46	0.61	0.00	0
a_r	0.08	0.50	0.35	0.00	0

从表2看出,单就振动速度这一因素考虑,预估的破坏分区等级为II等;但就垂直向振动加速度而言,破坏分区等级为III等;而从水平向加速度看来,破坏分区等级又为II等,所以预计分区的等级要通过综合评判才可得出合乎实际的结果。

(3) 由式(16)得

$$\underline{Y} = (0.33, 0.33, 0.33) \begin{bmatrix} 0.65 & 1.00 & 0.63 & 0.02 & 0.00 \\ 0.04 & 0.46 & 0.61 & 0.00 & 0 \\ 0.08 & 0.50 & 0.35 & 0.00 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= (0.06 \ 0.65 \ 0.52 \ 0.07 \ 0.00)$$

归一化后, $\underline{Y} = (0.05 \ 0.50 \ 0.40 \ 0.05 \ 0.00)$,模糊综合评定破坏分区的预估等级为II级——严重破坏。

4. 结语

由于坑道的破坏程度受多因素的影响,难以简单地用某一物理量来衡量,本文采用了多因素模糊综合评定方法来预测花岗岩坑道在爆炸作用下的破坏分区,它较好地反映了坑道破坏的客观规律,因而要优于单因素的“准确界限”评定方法。

本文用统计方法确定的各因素对于破坏等级的隶属函数表明,相邻各破坏分区等级对应的物理量之间有一过渡区,即不存在明确的界限,这是符合实际情况的。

随着经验的积累和数据资料的增多,本文中的振动强度预测公式和隶属函数中的 d 、 c 值将得到进一步修正而趋于完整,并且隶属函数的形式和各因素权向量 \underline{X} 的取值也可以商榷,

以使破坏分区更趋科学和正确。

参 考 文 献

- [1] 柯吉恩, 爆炸与冲击, 7 (2) (1987), 117.
- [2] 黄承贤, 岩土力学, 7 (1) (1986), 35.
- [3] 杨开田等, 爆炸与冲击, 5 (4) (1985), 34.
- [4] 朱瑞廉、李延芥, 爆炸与冲击, 1 (1) (1981), 58.
- [5] 贺仲雄, 模糊数学及其应用, 天津科学技术出版社, (1983).
- [6] 许仁忠, 模糊数学及其在经济管理中的应用, 西南财经大学出版社, (1987).

FUZZY DESTROY ZONING OF GRANITE TUNNEL EFFECTED BY BLAST

Wu Qisu, Wu Congshi

(Changshu Research Institute of Mining and Metallurgy)

ABSTRACT Based on the data of field measurement with apparatus and visual investigation, by applying the method of fuzzy mathematics, we study the relation between the ground movement parameters and the destroy degree of granite tunnel effected by blast. The membership functions corresponding to the fuzzy subsets of destroy are determined. The method of forecasting tunnel destroy zone by synthetic evaluation is proposed.

KEY WORDS blasting vibration, fuzzy synthetic evaluation, zoning of tunnel destroy.