

台阶爆破破碎度的分布规律

栾龙发

(中国矿业学院北京研究生部)

王文龙

(中国矿业学院)

摘要 本文采用摄影方法在海州露天煤矿对台阶爆破破碎块度进行了测量。根据现场试验所获得的数据,通过多元曲线拟合处理,给出了二种岩石爆破破碎块度的分布规律。所得结论对控制和提高爆破破碎质量具有重要意义。

关键词 台阶爆破, 工程爆破的摄影测量, 爆破破碎度。

1. 综述

设计经济的工业爆破作业时,取得良好的破碎度级配是重要的因素之一。对于给定的一组地质条件来说,破碎度是岩体中能量输入和能量分布的结果。决定破碎作用的参数可分为三组,即岩石参数、炸药参数、凿岩和起爆布置方式。

爆破后的岩石破碎度,包括块度组成、平均块度,破碎率和大块率等,是评估露天矿台阶爆破破碎质量的一个重要目标函数。它直接影响着后续工序、铲装和运输等的效率及采剥总成本。

随着爆破动力学的发展和计算机的出现,目前对岩石爆破已建立了许多理论模型。可在计算机上模拟岩体内爆破裂隙的扩展过程及其空间分布,从而确定出在不同爆破参数条件下岩石的破碎度。但由于现场岩石地质条件的复杂性,这种方法给出的结果往往与实际结果相差较大。另一种方法是通过现场试验,应用数理统计原理,找出岩石破碎度随爆破参数变化的经验方程。这种方法虽然有其局限性,但较符合现场实际。

描述爆破破碎度常见的方法有三种,块度分布函数、平均块度和大块率。一般研究认为,可以根据所用炸药单耗来计算破碎曲线中点 K_{50} 或 K_{80} ^[1](K_{50} 、 K_{80} 分别是破碎矿石的50%重量和80%重量能够通过筛号的)。由于Kuznetsov方程是考虑到每个炮眼的总装药和岩石强度参数的唯一公式,因此被国内外学者普遍接受。Lownds C.M.^[2]曾证明了以裂隙生长理论为基础的破碎过程模拟法与Kuznetsov提出的爆破参数同平均块度之间的简单关系有很好的相关性。

Rosin-Rammler曲线被公认能够给出被爆岩石破碎情况的适合的描述^[3],这个曲线上的一个点,即50%岩石可以通过的筛孔尺寸,是用Kuznetsov方程求得的。综合两者就是目前广泛应用的Kuz-Ram模型^[4]。

Kuznetsov方程为

1987年12月24日收到原稿,1988年4月19日收到修改稿。

$$\bar{x} = A \cdot (V_0/Q)^{0.8} \cdot Q^{1/6} \quad (1)$$

式中 \bar{x} 为平均破碎度; A 为岩石系数; V_0 为每孔破碎岩石体积; Q 为相当于每孔中药包能量的 TNT 质量。通常将超钻部分的装药除外, 因为它在纵断面中对破碎度提供不了明显的贡献。

Rosin-Rammler 方程是

$$R = e^{-(x/x_c)^n} \quad (2)$$

式中 R 为筛上物料比率; x 为筛网尺寸; x_c 为特性尺寸。由 Kuznetsov 方程求得

$$x_c = \bar{x} / (0.693)^{1/n} \quad (3)$$

式中 n 为均匀度指标。联解 Kuz-Ram 方程即可求得破碎块度的分布。用此公式可以对爆破所产生的破碎度进行预先估算, 但若根据上述公式按预先指定的破碎度进行爆破参数的设计就存在一定的困难。

2. 量测方法

采用摄影法量测爆破块度是基于测面积法原理, 认为爆堆内部的块度分布与不同块度在爆堆表面上的分布相似。这一观点是基于能量分布原理导出的。对此, Бутаен Е. А.^[5] 曾经作过详细的论证。根据我们一年多的实际应用及国内外同行所做的工作^[6], 证明对大型生产矿山而言, 采用摄影法测量破碎块度是唯一可行的方法。

考虑到由于观测角的不同, 岩块在照片上的可见度将随之改变, 以及实际上的爆堆表面块度分布差异于内部(由于细粒在大块空档处下漏, 表面大块一般较多)。因此, 对面积法量测出的块度分布必须予以修正, 才能真实反映整个爆堆的块度分布。

(1) 量测方法

采用普通照相机, 由矿山测量人员配合对爆堆表面进行摄影测量。测量系统如图 1 所



图1 测试系统

示，图2为实测的爆堆照片。

由于所测爆堆和相机镜头有一倾角，因此照片上所测岩块均有所变形。为了校正岩块的这种变形，真实地读出照片上岩块的大小，我们根据下式给出了纠偏网格^[6]。图3为表征这种关系的测试系统示意图。



图2 所测爆堆

网格垂距 b 为

$$b = \frac{(y_2 - y_1)(y_1 \tan \alpha - Z'_0) f_k}{y_1 y_2} \quad (4)$$

式中 y 为相机镜头至爆堆表面上一点的水平距离， f_k 为相机焦距， $Z'_0 = Z_0 - Z_2$ ， $\tan \alpha$ 为

$$\tan \alpha = \frac{Z_1 - Z_2}{y_2 - y_1} \quad (5)$$

网格平距 a 为

$$a = A \cdot \frac{f_k}{y} \quad (6)$$

式中 A 为实际孔网距。

(2) 可见度系数和分布系数

由照相机物镜至所拍摄爆堆表面中心的光线方向与爆堆表面间的夹角 γ 称为观测角 (图3)。当观测角 $\gamma = 90^\circ$ 时，爆堆表面上的所有岩块都将被看到。随着观测角的减小，部分岩块、尤其是较小岩块将被大岩块遮挡，因此，当观测角 $\gamma < 90^\circ$ 时，根据面积法量测出各种块度组成的百分比中中小块偏低，而大块偏高。

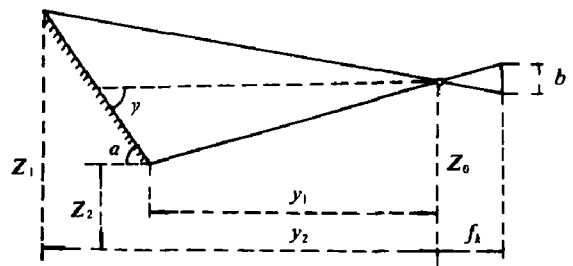


图3 测量系统示意图

将在 $\gamma < 90^\circ$ 条件下测出的各种组成与 $\gamma = 90^\circ$ 时测出的比值相比称为可见度系数。

Буцаев Е.А. 通过大量的模拟试验证明可见度系数只与不同块度的筛下累积百分比及观测角相关。他^[5]给出的各种块度的可见度系数在不同的累积百分比下,随观测角的变化规律列于表1之中。

表1 可见度系数 k_B 随 γ 的变化规律

累积百分比	可见度系数 k_B 随观测角 γ 的变化规律
0	$k_B = 5.717 \times 10^{-3} \gamma + 0.488$
10	$k_B = 4.55 \times 10^{-3} \gamma + 0.591$
20	$k_B = 3.433 \times 10^{-3} \gamma + 0.694$
30	$k_B = 2.317 \times 10^{-3} \gamma + 0.793$
40	$k_B = 1.111 \times 10^{-3} \gamma + 0.90$
50	$k_B = 1$
60	$k_B = 1.104 - 1.167 \times 10^{-3} \gamma$
70	$k_B = 1.205 - 2.3 \times 10^{-3} \gamma$
80	$k_B = 1.306 - 3.4 \times 10^{-3} \gamma$
90	$k_B = 1.408 - 4.567 \times 10^{-3} \gamma$
100	$k_B = 1.50 - 5.65 \times 10^{-3} \gamma$

整体爆堆内部块度组成百分比与修正后的表面块度组成百分比的比值被称为分布系数,以 k_p 表示。已经证明^[5], k_p 只是块度组成累积百分比的函数,且有

$$k_p = 5.6 \times P^{-0.53} \quad (7)$$

式中 P 为块度组成累计百分数。

3. 试验所得结果

在不影响正常生产的条件下,结合具体情况在阜新矿务局海州露天矿分别对砂岩、页岩各进行了12次试验。表2给出了实测各岩种的岩石物理力学性能,表3和表4分别为两种岩石经过两次校正后的测试结果。表中 q 为炸药单耗, m 为炮孔邻近系数, k_s 为炮孔堵塞系数, k_g 为炮孔超钻系数。

表2 实测各岩种的物理力学性能

岩种	比重 (克/厘米 ³)	纵波波速 (米/秒)	横波波速 (米/秒)	泊松比	动弹模 (兆帕)	坚固性 系数	孔隙 率	含水 率
页岩	2.31	3085	1821	0.23	1.94×10^4	3-4	12.1	7.95
砂岩	2.42	3549	2090	0.23	2.66×10^4	6-8	10.3	3.56

表3 页岩设计参数与爆堆块度

试验号	设计参数				破碎度累积百分数					平均观测角(度)
	q	m	k_s	k_r	0.4以下	0.7以下	1.0以下	1.2以下	1.4以下	
1	0.177	0.85	0.76	0.24	56.9	81.2	95.3	95.9	99.0	18.1
2	0.189	1.01	0.79	0.20	50.0	73.6	91.4	91.4	97.3	15.8
3	0.191	0.88	0.72	0.17	64.5	85.1	97.3	97.3	98.3	24.1
4	0.176	1.30	0.92	0.15	58.9	85.0	95.2	98.8	98.9	16.1
5	0.172	1.09	0.73	0.23	39.4	77.5	89.9	94.8	97.7	25.2
6	0.173	1.00	0.63	0.19	74.2	90.6	96.1	97.5	98.9	25.1
7	0.175	1.25	0.81	0.21	63.7	88.3	96.1	98.0	98.0	27.9
8	0.174	1.31	1.00	0.15	53.8	80.7	92.0	95.2	95.2	27.4
9	0.205	1.08	0.65	0.22	61.4	91.4	98.4	99.2	100	19.9
10	0.186	1.23	0.89	0.20	64.4	91.6	97.4	99.6	100	23.9
11	0.206	0.88	0.68	0.36	55.1	83.4	92.0	95.7	97.4	30.7
12	0.203	0.84	0.68	0.29	43.4	85.6	95.8	97.5	98.4	26.7
平均	0.186	1.06	0.77	0.22	57.1	84.5	94.7	96.7	98.3	23.4

表4 砂岩设计参数与爆堆块度

试验号	设计参数				破碎度的累积百分比					平均观测角(度)
	q	m	k_s	k_r	0.4以下	0.7以下	1.0以下	1.2以下	1.4以下	
1	0.270	1.03	0.70	0.25	50.0	69.7	83.9	84.7	87.8	21.0
2	0.237	1.12	0.75	0.32	46.4	70.6	87.6	90.8	93.2	18.9
3	0.238	0.93	0.58	0.35	45.0	74.0	86.1	89.9	90.6	13.9
4	0.264	1.10	0.67	0.25	54.9	75.5	86.0	89.8	93.1	26.6
5	0.261	1.13	0.83	0.34	56.9	79.5	91.3	95.0	95.3	21.0
6	0.244	1.09	0.79	0.31	48.8	76.4	86.7	89.7	91.7	25.0
7	0.256	1.00	0.81	0.31	42.6	70.6	85.3	88.8	92.1	27.9
8	0.255	0.73	0.59	0.28	47.9	77.7	89.8	93.1	96.1	21.2
9	0.265	1.03	0.68	0.36	54.2	81.8	93.3	96.8	98.6	21.2
10	0.243	1.07	0.67	0.27	40.6	69.4	82.1	86.1	91.1	18.4
11	0.231	1.09	0.77	0.31	46.3	69.6	81.3	85.1	89.7	24.6
12	0.252	1.12	0.73	0.34	38.6	62.5	76.7	82.4	86.4	19.5
平均	0.251	1.04	0.71	0.31	47.7	73.1	85.8	89.4	92.1	21.6

注: 表3、表4中q的单位为公斤/米³

4. 台阶爆破破碎度的分布规律

(1) 套用 Kuz-Ram 方程求得各系数值

(a) kuznetsov 方程

试验采用铵沥腊炸药的相对重量威力与 TNT 的相对重量威力之比为

$$Q = Q_e \cdot 100/115 \quad (8)$$

式中 Q_e 为每孔装药量, 将 (8) 式代入 (1) 式有

$$\bar{x} = 1.09 A \cdot q^{-0.8} Q_e^{1/6} \quad (9)$$

计算所得 A 值如表 5 所示。表 5 利用 kuznetsov 方程求得的 A 值

岩种 \ 序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
页岩	3.68	4.55	3.48	3.55	4.88	2.83	3.34	4.12	3.90	3.50	4.16	5.18
砂岩	5.88	5.59	5.73	5.03	4.88	5.27	6.90	5.64	5.32	6.62	5.61	7.12

(b) Rosin-Rammler 公式

由公式 (2) 和公式 (3) 求得

$$n = \frac{\ln(-\ln R) - \ln(0.693)}{\ln x - \ln \bar{x}} \quad (10)$$

 n 值的计算结果示于表 6 之中。表 6 利用 R-R 方程求得 n 值

序号	页岩				砂岩			
	$x=70$	$x=100$	$x=120$	$x=140$	$x=70$	$x=100$	$x=120$	$x=140$
1	1.27	1.41	1.24	1.37	0.97	1.06	0.91	0.89
2	1.17	1.38	1.15	1.32	1.23	1.34	1.23	1.17
3	1.24	1.41	1.22	1.17	1.50	1.31	1.22	1.08
4	1.39	1.37	1.47	1.31	1.06	1.02	0.99	0.99
5	2.03	1.63	1.58	1.58	1.19	1.20	1.19	1.07
6	1.29	1.18	1.12	1.14	1.37	1.20	1.11	1.04
7	1.39	1.32	1.28	1.15	1.51	1.39	1.26	1.21
8	1.36	1.30	1.26	1.11	1.57	1.37	1.29	1.28
9	1.69	1.61	1.50	1.59	1.41	1.37	1.36	1.37
10	1.56	1.42	1.53	1.53	1.59	1.31	1.20	1.21
11	1.43	1.27	1.26	1.22	1.23	1.11	1.03	1.05
12	2.33	1.90	1.70	1.57	1.34	1.21	1.15	1.11
平均	1.51	1.43	1.36	1.34	1.33	1.24	1.16	1.12

(2) 破碎块度的分布规律

采用多元曲线拟合, 对表3和表4中所列数据进行处理, 得到了台阶爆破中破碎块度随设计变量的变化规律。筛上物料比率 R 为

$$R = e^{A_1(x-100) + A_2 + A_3q + A_4m + A_5k_s + A_6k_z} \quad (11)$$

式中 x - 筛网尺寸; q - 炸药单耗; m - 炮孔邻近系数; k_s - 炮孔填塞系数; k_z - 炮孔超钻系数。

$$m = \frac{A}{B} \quad k_s = \frac{H_s}{B} \quad k_z = \frac{H_z}{B}$$

其中 A 为孔间距; H_s 为填塞高度; H_z 为超钻深度; B 为底盘抵抗; $A_1 - A_6$ 分别对应的回归系数, 其值见表7所示。

表7 对应式(11)的 $A_1 - A_6$ 值

岩种	普氏系数	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
页岩	3 - 4	-0.032	-0.479	-28.233	-0.998	2.838	-4.395
砂岩	6 - 8	-0.019	-0.095	-9.867	1.073	-0.76	0

5. 结语

本文根据试验结果, 分析了台阶爆破破碎块度的变化规律, 给出了以设计变量为自变量的块度分布函数。利用该方程可以根据预先给定的破碎要求方便地求出所需的设计变量, 对控制爆破质量和指导实际施工具有重要意义。

在海州露天煤矿穿爆参数优化过程中, 我们以该分布函数作为一约束条件建立适应的经验数学模型, 找出了合理的优化参数。在实际应用中证明, 爆破破碎块度完全满足要求。大块率下降了近70%, 取得了可喜的经济效益^[7]。

在试验与数据处理过程中得到了杨善元教授的悉心指导及海州露天煤矿的大力协助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Agne. Rustan. 等. 炸药单耗, 均质岩石的几何尺寸和物理性质对破碎度的影响, 第一届国际爆破破岩会议论文集 (1984), 64.
- [2] Lownds, C.M., 炮孔排列破碎的计算机模拟, 第一届国际爆破破岩会议论文集 (1984), 258.
- [3] 大家一雄等, 破碎产物的粒度分布特性—岩石爆破的基础研究, 日本矿业会志, 1121 (1981).
- [4] Cunningham, C., 预估爆破破碎的Kuz-Ram模型, 第一届国际爆破破岩会议论文集 (1984), 251.
- [5] Бутаев, Е.А., Фотограмметрия В Горном Деле, Физматгиз, Москва, (1960).
- [6] Nie Shu-Lin et al., Techniques and Procedures in Analysing Fragmentation after Blasting by Photographic Method, 4th Int. Symp. on Rock Frag. by Blasting, (1987), 102.
- [7] 李忠刚等, 海州露天矿超钻率下降, 纯爆破率提高, 中国煤炭报 (1987) (第一版), 2.11.

THE DISTRIBUTED LAWS ON THE
FRAGMENTAL DEGREE IN
BENCH BLASTING

Luan Longfa

*(Beijing Graduate School, China Institute of
Mining and Technology)*

Wang Wenlong

(China Institute of Mining and Technology)

ABSTRACT The fragmental degree under bench blasting is measured with the photographic method at the Haizhou opencut coal mine. With the aid of the testing data, the authors give the distribution laws on the fragmental degree for two kinds of rocks using the curve regression in this paper. The results obtained are important to controlling the fragmental quality under bench blasting.

KEY WORDS bench blasting, photographic measuring method for blasting engineering, blasting fragment degree.