

# 用垂直摄影法测定爆堆块度分布<sup>①</sup>

李悦焜 范文忠

(鞍山钢铁学院)

## 摘 要

在国内率先采用垂直摄影法对东鞍山铁矿生产爆堆表面进行垂直拍照,并在实验室进行模拟爆堆测定,求出了照片分布与筛分分布的转换关系;用此转换关系求得了东鞍山铁矿的爆堆分布规律。

**关键词:** 表面垂直摄影 爆堆块度 模拟爆堆块度

爆破块度及其组成是衡量爆破效果的标准,特别是穿爆优化以及穿、爆、采、运、破碎、选矿系统优化的重要依据。目前,测定爆破块度及其组成的方法主要有筛分法、摄影法、电视摄像法、高速摄影法,其中应用得最广泛的是摄影法,该法依摄影轴线与爆堆表面法线之间的关系,分为倾斜摄影和垂直摄影。倾斜摄影法简单、易用,但使爆堆表面的不同部位在照片上的投影具有不同的缩小比例,给照片的统计分析带来诸多困难。

垂直摄影的摄影轴线与爆堆表面法线重合即摄影偏角为零。它保证了照片缩小的比例一致而减少失真,是最理想的拍照方式。但是,我们的前驱者认为在露天矿现场,特别是山坡露天矿,很难做到对爆堆表面进行垂直拍照,或者说垂直拍照几乎是不可能实现的。我们则将照相机固定在特制的摄影架上,实现了爆堆表面的垂直拍照,为测定爆堆块度组成提供了一种新方法。

我们采用该法对东鞍山铁矿的典型爆堆表面进行了垂直拍照,并利用人工级配模拟爆堆测定的表面分布与块度分布的关系,即图(照)

片分布与筛分分布的关系,求得了东鞍山铁矿爆堆分布规律,为穿爆或整个系统优化提供了科学的数据。

## 1 模拟爆堆的分布规律

### 1.1 爆堆表面块度与爆堆块度的分布关系

爆堆表面块度分布是爆堆表面层矿(岩)块的块度分布。爆堆块度分布是整个爆堆的岩块块度分布。摄影法记录的仅仅是岩块在爆堆表面出露的部分,其记录的岩块几何尺寸一般只等于或者小于真实岩块的几何尺寸。加上在图(照)片处理过程中,即在图面上切割、圈定岩块时,产生了所谓的“小化”现象。爆堆中内外层岩块的分布是不均匀的。表层分布的岩块可能小于或大于内部分布的岩块,这与矿岩性质、结构面的发育程度、爆破参数等各种因素有关。因此,爆堆表面的块度分布与爆堆块度分布是不同的。但是,大量的试验研究表明,爆堆表面块度分布与爆堆分布之间的偏差主要是系统误差,是有规律可循的。该规律一般通过试验求得。

### 1.2 爆堆块度分布的蒙特卡罗模拟

用摄影法评估矿岩爆破块度遇到的一个基本问题是，如何将图(照)片分析结果转换成筛分分析结果，即“图分”向“筛分”的转换。

确定“图分”向“筛分”的转换规律的最佳方法是从爆堆内抽取1%的矿石量进行筛分，以筛分的结果作为爆堆分布的真值，与图片分析结果进行分析比较，建立两者之间的转换关系。然而，对于象东鞍山铁矿这样的大型矿山，每次爆破的量少则几十万千牛吨，多则几百万千牛吨；想从其中抽取1%的矿石量进行筛分，无论从人力、物力、时间和场地等条件看都是难以达到的。本研究参考马鞍山矿山研究院在南芬露天矿的研究成果，采用蒙特卡罗模拟——即统计实验法，用人工级配爆堆模拟现场生产爆堆。模拟生产爆堆的充要条件是矿岩爆破块度在形状上具有几何相似性。

### 1.3 爆堆岩块的几何相似性

爆堆岩块的形状是不规则的，我们采用统计方法来研究不规则岩块几何形状的相似程度，并用最小的包裹六面体作为测量的统一标准，以其最长边为基准，依次取三个相互垂直的尺寸来表征岩块的几何形状。三个相互垂直

的尺寸分别为长、宽、高，记作  $a$ 、 $b$ 、 $c$ ，其中  $a > b > c$ 。且用  $a/b$ 、 $c/b$ 、 $a/c$  表示折算系数，并分别称为长度、厚度和长度/厚度偏差系数。

我们测定了东鞍山铁矿三种主要矿岩(赤铁矿、混合岩、千枚岩)块体的几何形状。其中矿石分10个级别，岩石分11个级别，每个级别中随机测量100块，实测数据经整理并计算出各偏差系数及其与均值的偏差，详见表1。在用小粒级组合模拟全粒级时，岩块的各项偏差系数与均值的偏差明显减少，见表2。从表2中可见，小于40mm的岩块组合模拟全粒级岩块组合，除千枚岩厚度偏差系数为15.6%外，其余矿岩最大偏差值仅为7.2%。因此，可以认为，爆破的矿岩几何形状基本是相似的，可以用小粒级组合替代全粒级组合。

### 1.4 人工级配模拟爆堆块度的分布

用筛分分析的方法确定人工级配模拟爆堆块度分布的真值，分布函数采用R-R分布：

$$y = 100 \times \{1 - \exp[-(x/x_0)^n]\} \quad (1)$$

式中  $y$ —岩块尺寸小于  $x$  的筛下累积产率，%；

$x$ —岩块尺寸；

表1 各级岩块偏差系数统计

矿岩名称	分级标准 / mm	<10	+10 -20	+20 -40	+40 -60	+60 -80	+80 -100	+100 -200	+200 -400	+400 -600	+600 -800	>800	各级平均
赤铁矿	长度偏差系数	1.840	1.426	1.531	1.744	1.800	1.703	1.525	1.361	1.414	1.407		1.572
	与均值的偏差(%)	14.8	9.3	2.6	10.9	14.5	8.3	3.0	13.4	10.0	10.5		
	厚度偏差系数	0.702	0.639	0.633	0.774	0.717	0.723	0.698	0.705	0.741	0.699		0.703
	与均值的偏差(%)	0.1	9.1	10.0	10.1	2.0	2.8	0.7	0.3	5.4	0.6		
	长度/厚度偏差系数	2.681	2.706	2.775	2.748	2.757	2.367	2.447	2.539	2.127	2.236		2.538
	与均值的偏差(%)	5.6	6.6	9.3	8.3	8.6	6.7	3.6	0.0	16.1	11.9		
混合岩	长度偏差系数	1.513	1.524	1.432	1.438	1.573	1.489	1.439	1.510	1.499	1.399	1.612	1.493
	与均值的偏差(%)	1.3	2.1	4.1	3.7	5.4	0.2	3.6	1.1	4.0	6.3	8.0	
	厚度偏差系数	0.735	0.677	0.613	0.727	0.699	0.685	0.693	0.721	0.724	0.696	0.810	0.707
	与均值的偏差(%)	4.0	4.2	13.3	2.8	1.1	3.1	2.0	2.0	2.4	1.6	14.6	
	长度/厚度偏差系数	2.067	2.290	2.290	2.095	2.208	2.201	2.022	2.077	2.202	2.030	1.848	2.121
	与均值的偏差(%)	2.5	8.0	8.0	1.2	4.2	3.8	4.7	2.1	3.8	4.3	12.9	
千枚岩	长度偏差系数	1.861	1.482	1.365	1.652	1.531	1.433	1.732	1.562	1.673	1.402	1.372	1.552
	与均值的偏差(%)	19.9	4.5	12.0	6.4	1.3	7.6	11.6	0.6	7.8	9.7	11.6	
	厚度偏差系数	0.512	0.403	0.326	0.428	0.422	0.443	0.517	0.543	0.607	0.521	0.679	0.491
	与均值的偏差(%)	4.3	17.9	33.6	12.8	14.1	9.8	5.3	10.6	23.6	6.1	38.3	
	长度/厚度偏差系数	2.659	2.936	3.110	3.239	3.098	3.175	3.223	3.972	2.832	2.979	2.630	3.078
	与均值的偏差	13.6	4.6	1.0	5.2	0.6	3.2	4.7	29.0	8.0	3.2	14.6	

表2 用小粒级替代全粒级的偏差系数及偏差分析

矿岩名称	组合级别 / mm											全粒级
		<10	<20	<40	<60	<80	<100	<200	<400	<600	<800	
赤铁矿	长度偏差系数	1.804	1.615	1.587	1.661	1.668	1.626	1.647	1.612	1.589		1.572
	替代全粒级的偏差(%)	14.8	2.7	1.0	5.7	6.1	3.4	4.8	2.5	1.1		
	厚度偏差系数	0.702	0.671	0.658	0.693	0.698	0.687	0.698	0.699	0.710		0.703
	替代全粒级的偏差(%)	0.1	4.6	6.4	1.4	0.7	2.3	0.7	0.7	1.0		
	长度/厚度偏差系数	2.681	2.694	2.721	2.733	2.672	2.728	2.644	2.628	2.572		2.538
	替代全粒级的偏差(%)	5.6	6.2	7.2	7.7	5.3	7.5	4.2	3.6	1.3		
混合岩	长度偏差系数	1.513	1.518	1.440	1.476	1.496	1.494	1.487	1.489	1.491	1.481	1.493
	替代全粒级的偏差(%)	1.3	1.7	3.5	1.1	0.3	0.7	0.4	0.3	0.1	0.8	
	厚度偏差系数	0.735	0.706	0.675	0.688	0.690	0.689	0.690	0.694	0.697	0.698	0.707
	替代全粒级的偏差(%)	4.0	0.1	4.5	3.0	2.4	3.5	2.4	1.8	1.4	1.5	
	长度/厚度偏差系数	2.067	2.179	2.216	2.186	2.190	2.192	2.168	2.156	2.161	2.148	2.121
	替代全粒级的偏差(%)	2.5	2.7	4.5	3.9	4.1	4.2	3.1	2.5	2.8	2.1	
千枚岩	长度偏差系数	1.861	1.672	1.569	1.590	1.578	1.554	1.579	1.577	1.588	1.569	1.552
	替代全粒级的偏差(%)	19.9	7.7	1.1	2.4	1.7	0.1	1.7	1.6	2.3	1.1	
	厚度偏差系数	0.512	0.458	0.414	0.418	0.418	0.422	0.436	0.449	0.467	0.472	0.491
	替代全粒级的偏差(%)	4.3	6.7	15.6	14.9	14.9	14.1	11.2	8.6	5.0	3.9	
	长度/厚度偏差系数	2.659	2.798	2.901	2.986	3.008	3.036	3.063	3.051	3.043	3.022	3.078
	替代全粒级的偏差(%)	13.6	9.1	5.8	3.0	2.3	1.4	0.5	0.9	1.1	1.8	

$x_0$ —特征尺寸, 等于筛下累积产率为63.2%时的岩块尺寸;

$n$ —块度分布参数

每种矿岩分两组进行人工级配, 见表3。

表3 人工级配爆堆筛下累积产率(%)

试验组别	岩块尺寸 mm						回归结果			特征值	
	3.8	7.6	9	12	19	30	A	B	R	n	$x_0$
1	11.42	33.83	42.68	60.23	87.36	99	-5.98	2.19	0.998	2.19	15.33
2	5.84	22.73	30.84	49.06	82.97	99	-6.71	2.37	0.994	2.37	16.96

分布函数:  $y = 100\{1 - \exp[-(x/x_0)^n]\}$   
 回归方程:  $\ln \ln[100 / (100 - y)] = B \ln x + A$

1.5 人工级配模拟爆堆试验结果分析

按表3数据, 三种矿岩共配得六类标准人工级配模拟爆堆。用摄影法测得的分布结果见表4。

1.6 “图分”向“筛分”的转换

先用同一人工级配模拟爆堆, 经“筛分”和“图分”, 得到两个分布参数不同的R-R分布; 再把“图分”的块度分布换算成“筛分”的块度分布, 其中也包含了将长度分布转换成重量分布。其主要步骤如下:

(1) 给定  $y_i = i$  ( $i = 10, 20, \dots, 80, 90, 99$ )

式中  $y_i$ —筛下累积产率, %

表4 据照片分析的人工级配爆堆表面块度分布

岩石名称	试验组别	回归结果			特征值	
		A	B	R	n	$x_0$
赤铁矿	1	-4.45	1.76	0.9999	1.76	12.57
	2	-5.61	2.10	0.9999	2.10	14.48
混合岩	1	-5.74	2.11	0.8140	2.11	15.19
	2	-6.65	2.36	0.8170	2.36	16.73
千枚岩	1	-5.79	2.15	0.8860	2.15	14.78
	2	-6.03	2.16	0.8370	2.16	16.31

分布函数:  $y = 100\{1 - \exp[-(x/x_0)^n]\}$   
 回归方程  $\ln \ln[100 / (100 - y)] = B \ln x + A$

(2) 计算同种矿岩块度的平均换算系数

$$\bar{C}_{i2} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 C_{ij} \tag{2}$$

$$C_{ij} = x_i / x_{si} \tag{3}$$

式中  $i = 10, 20, \dots, 80, 90, 99; j = 1, 2$

$$x_{si} = \exp\{[\ln \ln(100 / (100 - y_i)) - A_{si}] / B_{si}\} \tag{4}$$

$$x_i = \exp\{[\ln \ln(100 / (100 - y_i)) - A_i] / B_i\} \tag{5}$$

式中  $x_{si}$ —筛分岩块尺寸;

$x_i$ —图分岩块尺寸;

$A_{si}, B_{si}$ —图分回归方程的回归系数

(3) 建立  $y_i$  与  $\bar{C}_{i2}$  的相关关系

$$\hat{C}_{i2} = A_c + B_c y_i \quad (6)$$

式中  $A_c$ 、 $B_c$ —回归系数(参见表5)

(4) 计算修正的图分块度尺寸、即图分换算成筛分的块度尺寸  $x_{ci}$

$$x_{ci} = x_i / \hat{C}_{i2} \quad (7)$$

(5) 建立  $y_i$  和  $x_{ci}$  的相关关系

$$\ln \ln [100 / (100 - y_i)] = A_k + B_k \ln x_{ci} \quad (8)$$

式中  $A_k$ 、 $B_k$ —回归系数

## 2 东鞍山铁矿爆堆块度分布规律

### 2.1 东鞍山铁矿概况

该矿年产矿石(7 000~8 000)×10<sup>4</sup>kN, 采剥总量为(17 000~18 000)×10<sup>4</sup>kN, 工作水平, 台阶高度为13 m, 45-R 牙轮钻机, 4 m<sup>3</sup>电铲装车、铁路运输。该矿矿床为前震旦纪条带状含铁石英岩(即鞍山式铁矿), 主要矿岩种类为赤铁矿, 混合岩和千枚岩。

### 2.2 现场垂直摄影

垂直摄影难于实现的主要原因是无法给拿照相机的人提供一个支点, 使摄影轴线和爆堆表面法线重合。如果不是给人, 而是给照相机在垂直爆堆表面的法线上设置一个支点, 则垂直摄影就不难实现。我们研制了一个专门的摄影架, 使相机始终在垂直于爆堆表面的法线上实现了爆堆表面的垂直摄影。垂直摄影的主要步骤如下:

- (1) 选择典型的爆堆;
- (2) 把爆堆分成几个有代表性的条带;
- (3) 在代表性的条带上拉一条准绳;
- (4) 沿准绳从底部到顶部依次拍照。

我们在9个爆区38个条带上拍摄了641张照片, 平均每条带约拍17张。计算表明, 拍摄的照片张数满足了显著性水平检验和精度的要求, 见表5。

### 2.3 分析与结果

我们用幻灯机将照相底片放大投影于屏幕上, 进行描绘或数据处理。该法虽不及用计算机处理那样先进、快捷, 却适应当前国情, 又能

减小统计中产生的误差和提高精度。

表5 爆堆拍照张数( $\alpha=0.20$ )

矿岩种类	赤铁矿	赤铁矿	高亚铁	赤铁矿	千枚岩	千枚岩	混合岩
离散系数(%)	37.5	36.7	33.6	43.3	39.0	36.0	39.9
照片张数	12	11	10	15	13	11	13

爆堆块度分布仍用R-R分布描述, 并用人工级配模拟爆堆得到的转换关系, 把东鞍山铁矿爆堆表面块度分布转换成爆堆块度分布, 其结果见表6。

表6 东鞍山铁矿实测爆堆块度分布

矿岩种类	赤铁矿	赤铁矿	高亚铁	赤铁矿	千枚岩	千枚岩	混合岩
A	-10.66	-7.89	-10.56	-10.92	-9.23	-9.79	-11.13
B	2.23	1.64	2.05	2.20	1.76	1.92	2.23
C	0.984	0.987	0.779	0.948	0.960	0.980	0.970
n	2.23	1.64	2.05	2.20	1.76	1.92	2.23
$x_0$	120	123	173	148	190	164	211
回归方程	$\ln \ln [100 / (100 - y)] = B \ln x + A$						
回归函数	$y = 100 \times \{1 - \exp[-(x / x_0)^n]\}$						

## 3 结论

(1) 东鞍山铁矿矿岩爆破块体几何形状相似, 在爆堆块度分布的研究中, 可以进行人工模拟爆堆的试验研究;

(2) 东鞍山铁矿爆堆表面块度分布, 可以利用人工级配模拟爆堆的试验研究结果, 转换成爆堆块度分布;

(3) 利用摄影架能对爆堆表面进行垂直摄影。它为爆堆表面块度的拍摄提供了一种新方法。该法可在表面块度的测定中推广使用;

(4) 拍摄的底片可以直接通过幻灯机在屏幕上放大, 并在上面描绘和进行数据处理, 既省时省钱, 又提高了处理精度;

(5) 东鞍山铁矿爆堆的块度分布可以用R-R分布来描述, 测得的分布参数为:

- 赤铁矿  $n = 16.4 - 2.23$ ,  $x_0 = 120 - 173$  mm;
- 千枚岩  $n = 1.76 - 1.92$ ,  $x_0 = 164 - 190$  mm;
- 混合岩  $n = 2.23$ ,  $x_0 = 211$  mm。