

宽孔距微差爆破机理及其 合理的孔距与排距

邓正道

(长沙矿山研究院)

摘要 本文以爆破漏斗理论为基础,通过分析密集系数 m ——炮孔孔距与排距之比的变化所引起的爆破几何条件、岩石破碎机理的变化,说明宽孔距微差爆破对改善破碎质量是由于临空面的增加,发育的爆破裂隙系、最小抵抗线的减小,应力降低区域的消失,附加破碎概率的增加和爆方单耗的微小增加。合理的 m 值以大于4(至少应大于3)小于8为好。

关键词 宽孔距爆破;爆破漏斗;岩石破碎;密集系数。

1. 前言

矿山和采石场爆破的目的应当是在满足安全的前提下,力求获得最合适的岩石破碎块度,使凿岩、爆破、铲装、运输和磨碎的综合成本降低到最小。

实践证明,在保持孔距与排距乘积不变的条件下,也就是在不增加任何成本的条件下,在一定范围内增大密集系数 m 能显著地改善破碎质量。这就是瑞典宽孔距微差爆破技术。

早先,对这种爆破的成功得不到令人满意的解释。后来,兰格福尔斯认为^[1],增大 m 就是增大了被爆岩体内的剪应力和拉应力,使暴露的岩石面不能以一个平面而是以一个曲面向前移动。这样,岩体将在每个炮孔的前方出现更明显的弯曲,从而改善了破碎质量。佐佐宏一通过分析兰格福尔斯模型的试验结果,并根据自己的研究成果认为^[2],这种宽孔距爆破技术实质上是有效利用前排炮孔爆破产生的向破裂面内侧发展的裂隙来进行破碎的方法。此外,有的研究者认为是由于最小抵抗线的减小,加大了应力波和气态能量的作用^[3,5];前排爆破为后排爆破创造了近似弧形的临空面^[4]。

对于合理的 m 值,许多工作者进行了实验与理论的研究。最早,兰格福尔斯在丙烯酸树脂模型上进行的试验表明, m 可以增大到8。澳大利亚哈根博士,理论计算出合理的 m 值应为2.59^[3]。苏联弗里波夫等认为 $m=3.5$ 最好^[3,4]。日本佐佐宏一认为 $m=3\sim 6$ 为好^[2,3]。我国许多研究人员认为 $m=3\sim 4$ 为好。

由此看来,对于宽孔距微差爆破的机理以及合理的 m 值都还没有一个统一的认识。

本文以爆破漏斗理论为基础,通过分析 m 值变化所引起的爆破几何条件的一系列变化,说明宽孔距微差爆破的机理。最后,提出对合理 m 值的认识。

2. 爆破漏斗基本理论的试验结果

爆破漏斗形成机理是众所周知的,这里只简单介绍一些有用的试验结果。对于一定重量

的装药（球状或柱状），随着最小抵抗线的增加，爆破漏斗体积、半径也增加。当抵抗线达到利文斯顿称之为“最佳抵抗线”时，漏斗体积、漏斗半径最大。再进一步增加抵抗线时，漏斗体积、半径减小。当达到“临界抵抗线”时，只在介质表面产生裂缝而不形成爆破漏斗。

但是，随着最小抵抗线的增加，破碎质量变差。因此，布亨德勒^[5]提出了两种不同的抵抗线，最佳抵抗线和最佳破碎抵抗线。高士才等认为最佳破碎抵抗线为最佳抵抗线的 1/2 倍^[3]。布亨德勒的试验表明^[5]，当抵抗线介于 0.75~0.87 倍最佳抵抗线时，没有大块产生，破碎介质的颗粒分布均匀。

萨莫伊洛夫的柱状药包漏斗试验表明^[6]，当抵抗线 w 小于最佳抵抗线 w_0 时，爆破漏斗半径 r 与 w 之间的函数关系是一个通过座标原点的圆；当抵抗线 w 大于最佳抵抗线时， w 与 r 的函数关系为圆心在坐标原点的圆，如图 1 所示。即

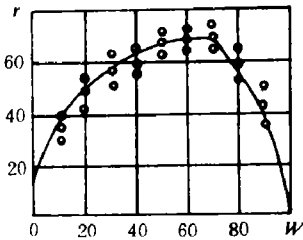


图 1 w 与 r 关系曲线^[3]

当 $w \leq w_0$ 时

$$r^2 + (w - w_0)^2 = w_0^2 \quad (1)$$

当 $w \geq w_0$ 时

$$r^2 + w^2 = 2w_0^2 \quad (2)$$

理论分析和实验都表明，在漏斗附近的岩体布满了裂隙。在其下部有径向和切向裂缝系，其

两旁有近似平行于自由面的裂缝系^[2,7]。

实际上，爆破漏斗的断面形状不是一个三角形。本文为了便于说明主要问题，将其近似地看作三角形。

2. 宽孔距微差爆破的机理

在多排孔微差爆破中，根据炮孔与炮孔之间、炮孔与自由面的关系，可以分为三角形布孔和方形布孔两种型式，如图 2、图 3 所示。

从数学上讲，台阶爆破的孔网面积（孔距与排距的乘积）总可以表示成 w_0^2 的倍数。在给定的爆破条件下， w_0 应是常数。因此，设孔网面积为 cw_0^2 。那么，根据宽孔距爆破技术，排距 B ，孔距 S 、密集系数 m 和最佳抵抗线之间有如下数学关系

$$S \times B = cw_0^2 \quad (3)$$

$$S = m \times B \quad (4)$$

即 $S = \sqrt{cm} w_0 \quad (5)$

$$B = \sqrt{c/m} w_0 \quad (6)$$

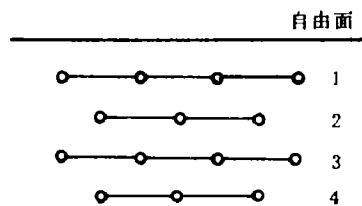


图 2 三角形布孔

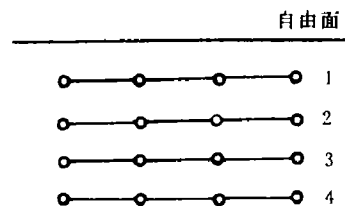


图 3 方形布孔

式(5)、(6)表示孔距、排距的取值随 c 与 m 的变化而变化。通常, c 的取值为1~1.25。表1和表2分别列出了当 $c=1$ 和 $c=1.25$ 时孔距和排距随 m 变化的取值。

表 1

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S/w_0	1	1.4	1.7	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3	3.16
B/w_0	1	0.71	0.58	0.5	0.45	0.4	0.38	0.35	0.33	0.32

表 2

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S/w_0	1.12	1.57	1.9	2.24	2.46	2.68	2.9	3.13	3.35	3.53
B/w_0	1.12	0.79	0.65	0.56	0.5	0.45	0.42	0.39	0.37	0.36

对于第一排炮孔,排距 B 即是最小抵抗线。随着 m 的增大,最小抵抗线变小,孔距增加。这样,当 m 增大到一定值后,就会在两孔中间留下近似三角形的岩埂。当 m 增大到 m_0 时,两个炮孔正好形成彼此孤立的爆破漏斗,如图4所示。

此时的孔距 S_0 ,最小抵抗线(排距) B_0 ,密集系数 m_0 和漏斗半径 r_0 有如下几何关系

$$S_0 = m_0 \times B_0 = 2r_0 \quad (7)$$

同时 B_0 和 r_0 应当满足方程(1),即

$$r_0 = \sqrt{2B_0 w_0 - B_0^2} \quad (8)$$

$$\text{由(6)式, } B_0 = \sqrt{c/m_0} w_0 \quad (9)$$

根据(7)、(8)、(9)三式,得

$$m_0^2 - 8\sqrt{m_0/c} + 4 = 0 \quad (10)$$

系数 c 的大小影响到方程(10)的根的大小,也就是说,孔网面积的大小影响到 m_0 的大小。

解方程,当 $c=1$ 时, $m_0 \doteq 3.2$;当 $c=1.25$ 时, $m_0 \doteq 2.8$ 。

因此,当 $m > m_0$ 时,第一排炮孔爆破的结果就是形成彼此独立的爆破漏斗。这在实际是一致的。

对于微差起爆的第二排炮孔来说,它的爆破几何条件是由第一排炮孔的爆破结果和布孔型式决定的。由于方形布孔的 m 值只能增大到2左右^[2,8],并且实际应用也较少,因此,我们只讨论三角形布孔。

当 $m \leq m_0$ 时,可以近似地认为每个炮孔有两个临空面,如图5所示。最小抵抗线 w 不等于排距 B ,而是 $B < w < 2B$;当 $m > m_0$ 时,可以认为临空面增大到3个,抵抗线 $w \leq 2B$ 。在这两种情况下,临空面的面积都增加。

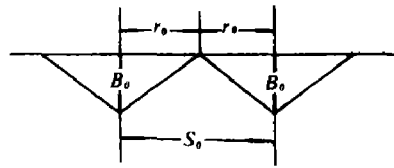


图 4

第三排和第三排以后的各排炮孔，它受到前面炮孔爆破的影响，应当说它的情况比第二排炮孔要复杂一些。图 6、图 7、图 8 是根据萨莫伊洛夫的试验资料 ($c = 1$) 作出的简单爆破图象。

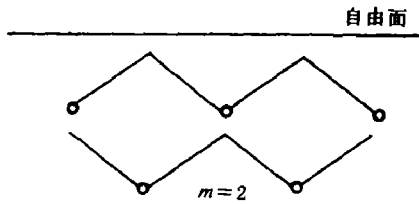


图 5

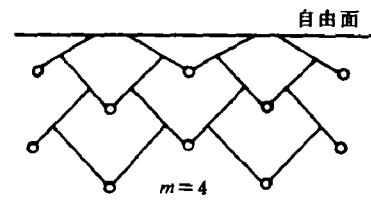


图 6

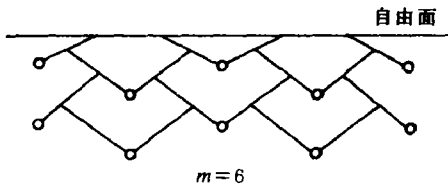


图 7

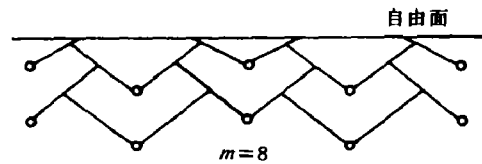


图 8

通过以上分析 m 值变化所引起的爆破几何条件的变化，很容易清楚宽孔距微差爆破的机理。

随着 m 值的增加，抵抗线减小，以第一排炮孔尤其突出。比如当 $m = 8$ 时，第一排炮孔的抵抗线为最佳抵抗线 w_0 的 $0.35 \sim 0.39$ 倍 ($c = 1 \sim 1.25$)，以后各排炮孔的抵抗线不大于最佳抵抗线的 $0.7 \sim 0.8$ 倍。因此，由于最小抵抗线的减小，每个炮孔的破碎质量将变好。

当 m 增大时，临空面增加。一般说来，临空面面积愈大，岩石的夹制力愈小，反射波的能量愈大，岩石愈容易爆破；临空面愈多，爆破效果愈好。苏联 Kucheryavii 等^[7] 用高速摄影在透明的模型中研究过两个自由面条件下的爆破。他们求得附加的自由面产生一个变化的反射应力场，它与入射波的干涉导致生成一个很强的非均匀拉应力场。非常强烈的破碎发生在与自由面相交的角内。这是由于在表面上很强烈的反射波的干扰引起的。

对于同一排起爆的炮孔，当 $m > 2$ 时，两孔之间已不存在应力降低区域；当 $m > m_0$ 时，每个炮孔的爆破过程几乎是独立的，它们的效应没有重叠干扰；不存在由于两炮孔相互影响产生贯通裂缝使应力释放的问题。

如前所述，在爆破漏斗附近的岩体布满了裂隙。这些裂隙的存在使得后排爆破的炮孔形成了受裂隙包围的爆破条件^[2]。

由于临空面的增加，岩石的运动方向也增加。对于微差爆破来说，岩块发生相互碰撞的概率也大大增加，造成附加破碎的效应也就越明显。

实际上，由于最后一排炮孔之间会留下岩埂，使得爆破体积减少。因此，严格地说是，爆方单耗增加了。当然，随着一次爆破排数的增加，单耗增加这个因素的影响也就减小。

同时可以看出，第一排炮孔破碎质量的改善主要是由于最小抵抗线减小所致；第三排以

后的炮孔受裂隙包围的影响,临空面的影响比第一、第二排孔大。由此可见,每排孔的爆破情况是不完全相同的。

因此,宽孔距微差爆破改善质量是由于以上因素共同作用的结果。

3. 对合理 m 值的认识

如上所述,宽孔距爆破所以能够改善破碎效果是由于受到上述有利因素的共同作用。 m 值的变化引起了这种作用大小的变化,因而破碎效果也随 m 的变化而变化。但是,每个因素对破碎质量改善作用的大小是不相同的,且随 m 的变化而变化的情况也不尽相同。使得以上诸因素作用的“和”即最大的 m 值就是“最佳 m 值”。由于我们对每个因素使破碎质量改善的作用有多大,与 m 的关系又怎样,缺少定量的了解。因此,除非进行大量的试验,否则要计算出一个“最佳 m 值”是十分困难的。但是,我们可以根据现有的岩石爆破理论与实践考虑几个主要的影响因素,为 m 确定一个比较合理的大概范围。当 m 值在这个范围时,和常规孔距爆破相比,其破碎质量可以大大改善。

从前面的分析可以看出,若 $c = 1 \sim 1.25$, 当 m 大致为 $2.8 \sim 3.2$ 时,临空面大大增加;当 m 大致为 $4 \sim 5$ 时,抵抗线就不大于最佳抵抗线。因此,如果主要考虑这两点,那么 m 应大致为 $4 \sim 5$ 。根据兰格福尔斯的模型试验结果, m 可以增大到 8,考虑到模型材料与岩石性质的差别以及现场岩体的具体情况,为保险起见, m 值可小于 8。因此,作者认为,合理的 m 值大致介于 4 与 8 之间。

需要说明的是,以上分析大都是以均质岩体来考虑的。而现场岩体条件是多种多样的,对合理的 m 值会有影响(现在还不知道这种影响有多大,如何影响合理的 m 值)。这需要结合具体情况作进一步的研究。

4. 实验结果

国内外进行了大量的不同 m 值条件下的模型与现场爆破实验。最早,兰格福尔斯在丙烯酸树脂板上进行了比较详细的试验。图 9 为其试验结果之一——大块率与 m 的关系。在瑞典花岗岩和石灰岩中的爆破表明, m 值以 $4 \sim 6$ 最好,见表 3。

在我国,许多矿山和采石场已进行了大量的宽孔距爆破试验。乌龙泉矿在石灰石和白云石中分别进行了 m 分别为 1, 1.25, 2, 3.25, 5, 7.25, 10 的试验,其结果表明,最优的 m 值一般是 $3 \sim 5$ 。¹¹

莲花山采石场进行了 m 分别为 2.7, 3.5, 4.1 的对比试验,共爆破炮孔 454 个,从爆破的大块率、破碎度和铲装速度来看, m 为 2.7 爆破效果差些,3.5 和 4.1 的爆破效果好,大块率为 $4 \sim 5$ 。¹²

这种宽孔距爆破技术已用于地下开采。在瑞典的波利登矿山,在分层充填回采的现场进行了孔径 35 毫米,孔深 4 米, m 为 3.5 的爆破,取得了很好的效果。

为了避免产生严重的飞石和留下凹凸不平的工作面,前排和后排孔都是按常规爆破的孔

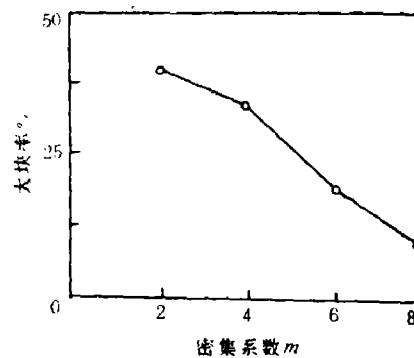


图 9

网布置。

表 3

岩石种类	花 岗 岩		石 灰 岩			
	<i>m</i>					
<i>m</i>	1.25	4.0	1.5	4.3	6	8
爆破次数	4	5	8	1	1	1
一次爆破孔数	10—44	41—68	39—69	67	66	45
一次爆破量($\times 10^3$ 米 ³)	1.3—5.9	4.0—7.4	4.7—8.3	11.1	7.9	5.8
炮孔直径(毫米)	76	76	76	76	76	76
抵抗线(米)	2.0—2.3	1.3	2	1.4	1	0.9
单耗(公斤/米 ³)	0.43	0.67	0.53	0.44	0.51	0.49
每千立方米的大块数	171—219	90—112	121	57	47	86

5. 结束语

常规孔距爆破是以炮孔之间的“共同作用”为基础的,而宽孔距爆破正好相反,每个炮孔的爆破过程是彼此独立的,先爆破的炮孔为后爆破的炮孔创造了条件。

宽孔距爆破改善破碎质量是几个因素共同作用的结果,而不是某一个因素影响的结果,当然,每个因素的“贡献”大小是不一定相同的,并且随 *m* 的变化而变化的情况也不一定相同。

考虑到现场岩体条件,合理的 *m* 值应以大于 4 (至少应大于 3) 小于 8 为好。因此,根据目前我国宽孔距爆破的实际情况,还可以增大 *m* 值。

参 考 文 献

- [1] 兰格福尔斯, U 等(岩石爆破现代技术翻译组译), 岩石爆破现代技术, 冶金工业出版社, (1983), 40.
- [2] 佐佐宏一(刘春林译), 大孔距爆破原理, 国外金属矿采矿, (10) (1980), 18.
- [3] 高士才等, 小抵抗爆破孔网参数对破岩质量的影响, 土岩爆破文集, 第二集, 冶金工业出版社, (1985), 113.
- [4] 杨人光等, 建筑物爆破拆除, 建筑工业出版社, (1985), 195.
- [5] 布亨德勒, S. (中译文), 在爆破中通过减小抵抗线和加大孔距改善了破碎效果, 国外采矿, 爆破专辑, (3) (1977), 23.
- [6] 萨莫伊洛夫, O. B. (吉天译), 在生产条件下最小抵抗线最优值的快速确定, 国外金属矿采矿, (10) (1985), 74.
- [7] 陈保基编译, 爆炸动力学及其应用(下册), 中国科技大学, (1983), 96.
- [8] 夏斯特里 S. M. (田良灿译), 岩石破碎, 国外采矿技术快报, 2 (25) (1986), 25.
- [9] 刘清荣, 爆破技术(下册), 湖北省爆破学会, (1984), 131.
- [10] 露天大爆破编写组, 露天大爆破, 冶金工业出版社, (1979).
- [11] 张家凯, 小抵抗线爆破与“V”型起爆在矿上的应用, 爆破, (1) (1985).
- [12] 何广沂, 宽孔距爆破技术在梯段爆破中的应用, 爆破, (3) (1985).

MECHANISM OF WIDE SPACING SHORT DELAY BLASTING AND ITS PROPER BURDEN AND SPACING OF THE HOLES

Deng Zhengdao

(Changsha Institute of Mining Research)

ABSTRACT Based up on the explosion crater theory, by analyzing the changes of the blasting geometric condition and the mechanism of rock breackage due to the variance of the adjacent coefficient m —the rate between the hole spacing and row span, the causes of improving the fragmentation by use of wide spacing short delay blasting are described. They are the decrease of burden, increase and extension of free face, development of exploded cracks, elimination of the decreased stress zone, increase of the probability of additional fragmentation and a few increase of powder factor. The proper value range of m should between 4(at least 3) and 8.

KEY WORDS wide spacing blasting, explosion crater, rock breackage, adjacent coefficient.