第12卷 第4期 爆炸与冲击 Vol. 12, No. 4
1992年10月 EXPLOSION AND SHOCK WAVES Oct., 1992

露天矿台阶爆破合理微差间隔时间的研究与应用

高晓初 吴从师 宋新辉

(冶金部长沙矿冶研究所 长沙 410012)

摘 要 本文介绍了应用高速摄影结果建立的合理微差间隔时间的数学模型，以及通过现场和室内模拟试验进行验证的结果，最终结合爆破地震模拟的方法，确定了水厂铁矿台阶爆破的合理微差间隔时间。

关键词 露天台阶爆破 微差时间

1. 引 言

微差间隔时间的选择是微差爆破中的一个核心问题，是台阶有效爆破的先决条件。即使在孔网参数和装药条件及起爆顺序都合理的情况下，如果选取的微差间隔时间不合适，也不可能取得好的爆破效果。因此多少年来，爆破工作者对微差间隔时间的研究都给予了极大的关注。

微差爆破合理间隔时间是指破碎质量和降震效果最好的间隔时间，研究确定合理微差间隔时间的方法一般有以下三种：

(1)微差爆破改善破碎质量的原理之一是形成新的自由面，并利用岩块的动能进行补充破碎。这样，利用高速摄影观测台阶坡面岩石开始移动的时间到形成新自由面时间为岩石开始移动时间加上爆破岩石脱离开岩体一定距离的时间，此时间便为合理的微差间隔时间。

(2)在矿岩性质、爆破参数和装药都相似的条件下，比较不同间隔时间对爆破破碎效果的影响，破碎效果最佳的那个间隔时间即为合理的微差间隔时间。

(3)测定和比较不同微差间隔时间的几组炮孔或条件类似的爆区爆破震动的速度，震速最低的那个间隔时间即为合理的微差间隔时间。

本研究首先应用高速摄影观测的结果建立合理微差间隔时间的数学模型，为露天矿山台阶爆破选择合理微差间隔时间提供参考，并通过现场和实验室模拟试验进行验证，最终结合爆破地震模拟等综合研究方法，确定了水厂铁矿台阶爆破的合理微差间隔时间。

2. 合理微差间隔时间数学模型的建立

在水厂铁矿进行了高速摄影观测，观测条件为：台阶高度12～14m，炮孔为直径250mm和310mm的垂直孔，孔深14.5～16.5m。干炮孔装多孔粒状铵油炸药，涌水多的炮孔装乳化炸药，起爆采用8段的塑料导爆管毫秒雷管和起爆弹(铵油炸药用2个300g的，乳

1991年3月28日收到原稿。

化炸药用2个500g的)。矿岩按爆破性分四个区:难爆区、较难爆区、较易爆区和易爆区。

高速摄影观测紧密结合生产爆破进行,在不同矿岩中共观测了五次台阶坡面的岩石运动过程,获得台阶坡面上73个特征点岩石运动过程的资料。

从形成新自由面观点出发,利用高速摄影结果确定微差爆破合理间隔时间的准则如下:

$$\tau = t_b + s/v_0 \tag{1.1}$$

式中:τ 合理微差间隔时间,ms;t_b 为岩石开始移动时间,ms;s 为岩石脱离岩体的距离,取 $s=100$mm;v_0 为岩石移动初速度,mm/ms。

利用岩石运动的观测资料可确定炮孔不同抵抗线处(特征点)岩石开始移动的时间 t_b 和岩石移动初速度 v_0,从而利用(1.1)式能确定不同抵抗线炮孔爆破所需的合理微差间隔时间。

苏联古捷里耶夫等人[1]在实验研究及理论分析的基础上,在均质岩石中的球状药包单排孔微差爆破的假设前提下,推导出了计算微差爆破合理间隔时间的理论公式,认为微差爆破合理间隔时间由三种部分组成:一是第一组药包使介质获得受力状态所需时间,$t_1=W/c_p$;二是从裂隙产生到裂隙表面形成抛掷体轮廓线的时间,即 $t_2=W/u_{\text{т}}x\cos(\beta/2)$;三是抛掷体产生100毫米位移所需时间,即 $t_3=T_3W^2\gamma_0\text{tg}(\beta/2)/\varphi$;因此:

$$\tau = t_1 + t_2 + t_3 = W/c_p + W/u_{\text{т}}x\cos(\beta/2) + T_3W^2\gamma_0\text{tg}(\beta/2)/\varphi \tag{1.2}$$

式中:W 为抵抗线,m;c_p 为介质中纵波传播速度,m/s;x 为介质中的破碎能力系数;$u_{\text{т}}$ 为裂隙发展速度,m/s;β 为抛掷棱柱体的抛掷角,(°);γ_0 为介质密度,kg/m^2;φ 为炮孔直径,m;T_3 为考虑到其他因素影响的系数。

为了使该公式适合于非均质岩石中多排孔台阶微差爆破的条件,需要对原式进行修正。为此,令 $t_2=W/u_{\text{т}}x\cos(\beta/2)=mW/u_{\text{т}}=mt_2'$,其中 $t_2'=W/u_{\text{т}}$ 为裂隙由孔壁向自由面扩展所需时间。一旦裂隙与自由面贯通,孔内爆炸气体即通过裂隙大量泄漏,据文献[2],t_2' 与孔内爆炸气体压力作用时间一致,而后者与孔内装药量的立方根成正比[3],即 $t_2\propto Q^{1/3}$,故令 $t_2k_1Q^{1/3}$,再令 $t_3=T_3\text{tg}(\beta/2)W^2\gamma_0/\varphi=k_2W^2\gamma_0/\varphi$。因此,修正后的合理微差间隔时间计算公式为:

$$\tau = W/c_p + k_1Q^{1/3} + k_2W^2\gamma_0/\varphi \tag{1.3}$$

式中:Q 为炮孔折合装药量,kg;k_1 为系数,mm/kg$^{1/3}$;k_2 为单位体积岩石获得单位能量所需的时间,ms(kg·m/m^3)$^{-1}$;其他符号意义同前。

把高速摄影观测结果按(1.1)式确定的合理微差间隔时间代入(1.3)式,然后进行曲线拟合,得出台阶爆破合理微差间隔时间计算公式为:

$$\tau = W/c_p + 2.45Q^{1/3} + 3.84\times10^{-5}W^2\gamma_0/\varphi \tag{1.4}$$

样本数 $n=61$,相关系数 $R=0.8872$。式中:W 为爆区前排炮孔的底盘抵抗线,m;Q 为以炸药的爆热比容特性乘积($Q_{max}\cdot v_m$)换算的炮孔折合装药量(多孔粒状铵油炸药和乳化炸药的折合系数分别为1和0.77)kg;γ_0 为矿岩容重,kg/m^3;φ 为炮孔直径,m。

3.现场爆破试验的验证

在水厂铁矿不同的矿岩中共进行了不同微差间隔时间的爆破试验19次,主要以大块根底率和电铲纯铲装效率评价爆破的破碎效果,各次试验的有关参数如表1所示。表中

所指预测的微差间隔时间是由(1.4)式决定的，从表中可以看出，无论起爆方案如何，当实际选择的微差间隔时间 $t_{实}$ 等于或大于预测值 $t_{预}$ 时，破碎效果较好，表现出大块根底率较低或电铲纯铲装效率较高。这说明合理微差间隔时间不是一个极值，而是一个区间，而由(1.4)式计算的结果为其下限值。

因此，通过以上十九次现场爆破试验，初步验证了所建立的合理微差间隔时间的数学模型。

表1 微差间隔时间与爆破破碎效果

Table 1 Differential Interval time and Effect of Blasting

序号	矿岩种类	炮孔直径 /(mm)	炮孔平均折合药量 /(kg)	底*抵抗线 /(m)	排*距 /(m)	孔*距 /(m)	预测微差间隔时间 /(ms)	实际微差间隔时间 /(ms)	大块根底率 /(%)	纯铲装效率 (吨/台时)
1	较易爆岩石	310	585	5.5～11.0 (7.9)	7.9～9.0 (8.3)	10.3～13.6 (11.9)	44	50	0	2829 (16)
2	较易爆岩石	310	567	6.0～10.5 (8.5)	7.5～9.5 (8.0)	10.0～13.4 (11.2)	47	50	0	2032 (16)
3	较易爆岩石	310	647	9.5～13.5 (12.5)	7.0～10.0 (8.0)	10.0～14.0 (11.6)	77	50	0.03	—
4	较易爆岩石	310	600	8.5～10.5 (9.1)	6.5～8.5 (7.6)	10.5～12.5 (11.5)	50	50	0	2725 (16)
5	较易爆岩石	310	595	8.0	5.0	22.0	44	50	0	2055 (10)
6	较易爆岩石	310	600	6.5～12.5 (10.2)	8.5～10.5 (9.5)	9.7～12.0 (11.0)	59	50	0.64	2475 (16)
7	较易爆岩石	250	369	7.2	4.4	18.0	41	50～75	0	2920 (19)
8	较易爆矿石	250	389	7.0～10.5 (8.6)	4.5～5.5 (5.1)	7.2～10.2 (8.9)	56	75	0.66	401 (3.6)
9	较易爆矿石	250	445	5.5～7.8 (6.7)	4.0～7.5 (5.2)	8.3～10.2 (8.7)	42	75	0.46	629 (4.0)
10	难爆矿石	250	389	8.0	5.5～7.5 (6.3)	8.2～11.4 (9.6)	52	25	1.53	—
11	难爆矿石	250	389	5.0～9.0 (7.5)	5.0～7.0 (6.5)	7.2～10.3 (9.1)	48	50	0.66	585 (4.0)
12	难爆矿石	250	375	5.5～10.0 (8.6)	4.5～5.5 (7.1)	5.0～11.7 (9.2)	47	50	1.2	510 (3.6)
13	难爆矿石	250	400	5.5～10.0 (7.4)	4.5～6.0 (5.5)	6.5～10.5 (8.3)	47	25	1.4	392 (3.6)
14	难爆矿石	250	360	5.1～9.1 (7.6)	5.0～7.5 (6.1)	6.0～9.4 (7.5)	48	50～75	1.5	799 (4.6)

序号	矿岩种类	炮孔直径 /(mm)	炮孔平均折合药量 /(kg)	底* 抵抗线 /(m)	排* 距 /(m)	孔* 距 /(m)	预测微差间隔时间 /(ms)	实际微差间隔时间 /(ms)	大块根底率 /(%)	铲装效率(吨/台时)
15	较难爆矿石	310	491	7.0～10.5 (8.6)	6.0～8.5 (7.1)	5.0～11.7 (9.2)	49	25	2.23	—
16	较难爆矿石	310	498	9.0～10.5 (10.0)	6.0～8.0 (6.9)	9.0～11.3 (10.1)	62	50	1.46	490 (4.0)
17	较难爆矿石	310	493	6.5～11.5 (9.3)	6.0～7.5 (6.6)	6.8～11.0 (9.0)	56	75	1.46	580 (4.0)
18	较难爆矿石	310	563	6.0～12.0 (7.6)	4.5～10.5 (6.3)	6.0～13.0 (10.5)	45	50～100	1.35	699 (4.0)
19	较难爆矿石	310	536	7.3～9.4 (8.5)	4.5～7.0 (5.8)	6.5～14.0 (9.9)	51	75	1.24	696 (4.0)

* 括号内数字为平均值; * * 括号内数字为铲斗容积 m^3。

4. 室内模拟试验的验证

室内模拟爆破试验是用水泥块模型进行的。模型制作成小台阶，布置两排炮孔(前排4个，后排3个)，呈等腰三角形布置。炮孔直径 4mm，孔深 90mm，均为预留孔。台阶坡面角 90°，孔距 270mm，前后排孔抵抗线均为 50mm。模型物理力学参数为:抗压强度25.53MPa，容重 2.07t/m³，纵波速度 3048m/s。

表 2　块度回归分析结果

Table 2　Results of Regression Analysis of the size Degree of the Block

试验编号	微差间隔时间 /(μs)	回归参数	分布参数	最大块度尺寸 /(mm)	相关系数
		a	$k=\beta$	x_m	R
1	315	0.5314	0.8224	141.7	0.9953
2	235	0.7620	0.7170	212.7	0.9958
3	410	0.7022	0.7693	159.7	0.9932
4	590	0.2836	0.8427	168.7	0.9901
5	315	0.4027	0.8473	157.8	0.9787

炸药为粉状黑索金，炮孔装药 0.7g，用塑料导爆管及自制小雷管起爆并控制微差间隔时间。黑索金换算成多孔粒状铵油炸药的折合系数为 1.42。将装药等有关参数代入(1.4)式计算得合理微差间隔时间为 315μs，同时选择 235、410 和 590μs 三个微差间隔时间与其进行比较，并对合理微差间隔时间进行了重复试验。因此共进行了五个模型的爆破试验。

模型爆破后，对爆破碎块进行人工筛分，筛网尺寸 8～150mm，分九个粒级。对筛分进

行回归分析结果如表2所示。相关系数表明，回归的直线相关性非C。k为回归直线方程斜率，k越大，破碎块度越均匀。用k_{50}作为评价破碎块度的指标，表示碎块筛下累计含量为50%时能通过筛网的最大尺寸，k_{50}越小，破碎程度越高。规定尺寸≥150mm的碎块为大块。把各次试验的k、k_{50}值、大块率η和破碎量W4个参数作为评价因素集，并按100分制对爆破效果进行定量描述，评价集分优、良、中、差四个等级。应用模糊数学方法对爆破效果进行综合评分结果见表3。

从表3可清楚地看出，爆破效果从好到差对应的微差间隔时间依次为：315μs、410μs、590μs和235μs。即315μs的两个模型爆破效果最好，小于315μs的模型爆破效果最差，说明预测的微差间隔时间是合理的，这就进一步验证了所建立的合理微差间隔时间数学模型，同时也验证了数学模型计算结果为下限值。

表3 爆破效果评价指标及综合评分结果

Evaluation Index of Explosion Effect and Synthetical Evaluation Marks

试验编号		1	2	3	4	5
微差间隔时间/(μs)		315	235	410	590	315
评价指标	k	0.8224	0.7170	0.7693	0.8427	0.8473
	k_{50}/mm	65.76	74.75	65.23	77.19	61.59
	η/(%)	0	25.26	8.50	9.81	6.56
	W/(g)	20685	18210	19300	20380	19560
综合评分	最高分	94.67	65.65	84.42	80.59	86.86
	最低分	82.86	48.85	69.52	66.43	73.96
	平均分	88.76	59.76	76.85	73.36	80.40

5. 水厂铁矿合理微差间隔时间的确定

1. 应用数学模型确定的合理微差间隔时间

应用高速摄影观测结果和理论分析所建立的合理微差间隔时间数学模型，通过现场爆破试验和室内模拟爆破试验的验证，因此可用来计算水厂铁矿台阶爆破的合理微差间隔时间。

把水厂铁矿的有关物理力学参数和经试验研究确定的有关合理爆破参数代入(1.4)式计算所得的相应合理微差间隔时间如表4所示。从表4看出，二种孔径的炮孔均可取合理微差间隔时间$\tau=50\sim60$ms。考虑到(1.4)式计算的微差隔时间为下限值，从模型爆破试验结果看，当微差间隔时间为1.3τ时，爆破效果仍然较好，故拟以1.3τ作为其上限值，则水厂铁矿合理微差间隔时间$\tau=50\sim80$ms，孔径小或难爆矿岩中爆破取较小值，孔径大或易爆矿岩中爆破取较大值。以底盘抵抗线表示的合理微差间隔时间为每米抵抗线6～8ms。

2. 降震合理微差间隔时间的确定

我们对单孔、单排孔和多排孔微差爆破等的震动进行了十五次观测,观测分析结果表明:即使矿岩条件和装药条件有所不同,同一爆区中各孔爆破产生的震动波形和频谱图基本上是相似的。因此以单孔震动波形作为源函数,采用波形时域叠加的方法进行了各种微差间隔时间爆破震动的模拟。通过频谱分析,绘制出一种较直观地反映频率、震幅与微差间隔时间关系灰度图[4]。用灰度图可确定水厂铁矿降震最佳的排间微差隔时间为50~80ms,孔间微差间隔时间为12~36ms。

表4 水厂铁矿合理微差间隔时间计算结果

Calculated Results of the Rational Difference time Interval in Dfferent Region

矿岩爆破性分区	矿岩容重 (kg/m³)	岩体纵波速度 /(m/s)	段高 /(m)	孔深 /(m)	深炮孔直径 /(mm)	底盘抵抗线 /(m)	炮孔装药量 /(kg)	合理微差间隔时间 /(ms)
难爆区(Ⅳ区)	3240	3810	12	14.5	250	7~7.5	390~410	44~48
					310	8~8.5	560~595	48~52
较难爆区(Ⅲ区)	3100	3250	12	14.5	250	7.5~8	365~390	46~51
					310	8.5~9	525~560	59~54
较易爆区(Ⅱ区)	2700	3300	12	14.5	250	8~8.5	345~365	46~50
					310	9.5~10	490~525	53~54
易爆区(Ⅰ区)	2600	<3000	12	14.5	250	8.5~9	325~345	49~54
					310	10~10.5	455~490	54~59

6.结 论

本研究采用了高速摄影、爆破震动观测和计算机模拟以及现场和模拟爆破试验等综合方法,对露天矿台阶爆破的合理微差间隔时间进行了较为系统地研究,得出如下几点结论。

(1)根据高速摄影观测结果和理论分析建立的计算台阶爆破合理微差间隔时间半统计数学模型,通过了十九次现场爆破试验和五次模拟爆破试验验证,证明是合理的和可行的。可用于露天矿台阶爆破合理微差间隔时间的选择。

(2)现场试验和室内模拟试验表明:合理微差间隔时间是一个范围,而不是一个极值,半统计数学模型计算的合理微差间隔时间为下限值,其上限值为1.3τ。

(3)为保证破碎质量和降震要求的水厂铁矿台阶爆破合理的微差间隔时间为$\tau=50$~80ms,孔径小或难爆矿岩中爆破取较小值,孔径大或易爆矿岩中爆破取较大值。与此同时,满足孔间微差间隔时间为12~36ms,则降震效果最佳。由此看来,目前普遍使用的普通八段导爆管毫秒雷管难以满足生产爆破的要求。

参 考 文 献

[1] Кучерявы и Ф И, ИД. Коротко-замедленное взрывание На Карырях. Москва Госгортехнидат. 1962

[2] Mark, et al., PB87-215513

[3] Казаков Н Н. Взрывая отбоика Рудскважинными Зарядами. Москва; недра, 1975

[4] 吴从师,吴其苏.爆破地震模拟初探.爆炸与冲击.1990,10(2):170~175

AN APPROACH TO REASONABLY SELECTING THE DELAY INTERVAL OF BENCH BLASTING AND ITS USE

Gao Xiaochu, Wu Congshi, Song Xinhui

(*Ministry of Metallurgy, Changsha Research Institute of Mine and Metallurgy, Changsha* 410012)

ABSTRACT Based on the data of high-speed photograph, a mathematical model of reasonably selecting delay interval for bench blasting has been established. The field blasting experiments and simulation in room have proved that the model is feasible. For large scale prodution blasts in shuichang iron mine, a combination of the model and the vibration simulation is used to choose the reasonable delay interval.

KEY WORDS bench blasting, delay interval