

宽孔距爆破破碎机理的研究

王修勇^a 王树仁^b

(a 湘潭矿业学院 湘潭 411201)

(b 中国矿业大学北京研究生部 北京 100083)

摘要 通过分析爆破试验结果,建立了以成梁假设为基础的宽孔距爆破破碎机理模型。提出了以孔间裂缝扩展速度 V_p 和裂缝扩宽速度 V_s 表达的岩石破坏准则,并通过实验进行了验证。

关键词 宽孔距爆破 破碎机理模型 孔间贯穿裂缝 V_p (孔间裂缝扩展速度)

中图法分类号 TD 235 1

1 引言

宽孔距爆破,又称小抵抗大孔距爆破,是国内外近来普遍研究和采用的一项爆破新技术。实践表明,与普通梯段爆破相比,宽孔距爆破能明显地改善破碎质量,降低生产成本。对于宽孔距爆破的破碎机理,目前主要有四种理论^[1],即临空面理论、几何学理论、减小抵抗线增强自由面应力波反射作用理论和减小抵抗线排除应力降低区理论。上述理论具有明显的局限性,有的没有考虑同排炮孔的相互作用,有的没有对爆破破碎过程作出分析。我们在分析爆破结果的基础上,提出了一种新的破碎理论,并通过实验进行了验证。

2 宽孔距爆破破碎机理模型

2.1 爆破试验结果分析

根据在砂浆试块上进行的实验表明,在一定炮孔密集系数(即孔间距 a 与抵抗距 W 之比,用 m 表示)条件下,相邻炮孔间总能形成贯穿裂缝,如图1由图1可以看出,当 m 较小时(图1(a)),裂缝沿着炮孔连线开裂;当 m 较大时(图1(b)),由于炮孔间的相互作用减弱,贯穿裂缝的开裂方向与炮孔连线稍有偏离,爆破后形成的自由面呈弧形。

2.2 宽孔距爆破破碎机理模型

2.2.1 成梁假设

根据一定炮孔密集系数条件下相邻炮孔间能形成贯穿裂缝一现象,对于宽孔距爆破岩石破碎机理和过程,我们认为:孔间裂缝和自由面间岩石形似材料力学中的梁,其破碎机理和过程可以用梁的破坏理论来描述。在炮孔起爆后,炮孔间的裂缝开始扩展,裂缝和自由面间岩石形似一两端固定的梁,随着裂缝的扩展,梁的固定端也在发生移动。相邻炮孔起爆后成梁及力学模型见图2

* 1996-05-27收到原稿,1996-10-15收到修改稿。

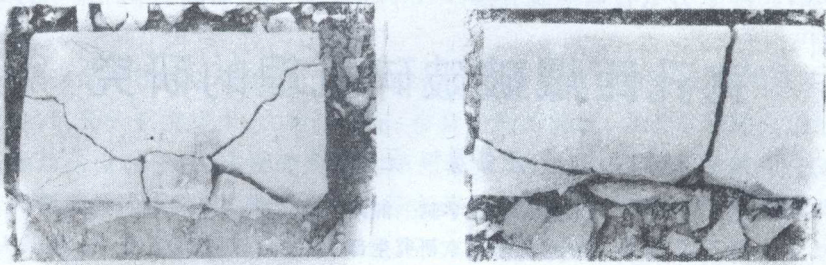
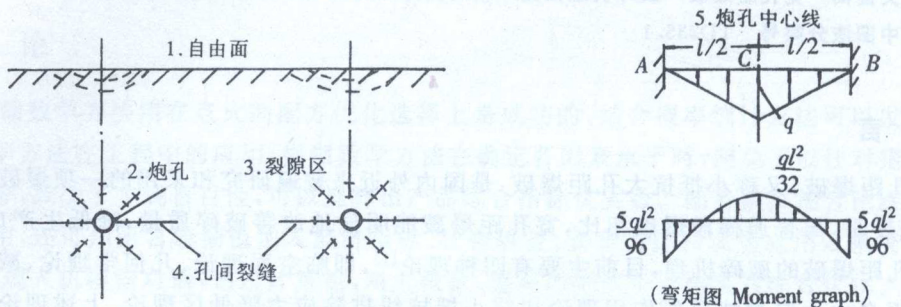
(a) $m=1.6$ (b) $m=4.0$

图1 爆破效果图

Fig.1 Effects of blasting



1. Free surface; 2. Hole; 3. Radial cracks; 4. Cracks between holes; 5. Hole centreline

图2 相邻炮孔间成梁及力学模型

Fig.2 Mechanical model of forming beam

2.2.2 断裂破碎模型

根据上述成梁假设及力学模型,由材料力学知,图2所示荷载为对两端固定作用的梁,梁上弯矩分布如图2中的弯矩图,梁在固定端A、B处弯矩最大。按理梁将在A、B处首先开裂,设梁在A、C处的实际高度分别为 W_A 、 W_C ,边缘正应力分别为 σ_A 、 σ_C ,则

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_C} = \left(\frac{5ql^2}{96} / \frac{W_A^2}{6} \right) / \left(\frac{ql^2}{32} / \frac{W_C^2}{6} \right) = \frac{5}{3} \frac{W_C^2}{W_A^2} \quad (\text{截面宽度取1})$$

当 $\sigma_A/\sigma_C < 1$,即 $W_C < \sqrt{3} W_A / \sqrt{5}$ 时,梁首先在炮孔中心C处开裂。但在这种情况下,炮孔中心线方向裂缝扩展迅速,抑制了其它方向(如A点)裂缝的产生和扩展;当中心线方向裂缝与爆腔贯通时,爆生气体将沿裂缝泄漏。而对于宽孔距爆破来说,孔间距比抵抗距大得多,因而在中线C处,裂缝贯通并有爆生气体泄漏时,孔间裂缝还未充分扩展或贯穿。所以如梁首先在炮孔中心C处开裂,将导致爆生气体过早泄漏,孔间裂缝将不能形成,岩石难以充分破碎。这与前述的在一定的炮孔密集系数条件下,孔间形成贯穿裂缝的实际结果不符,因此这种情况在实际工程爆破中一般不会发生。

当 $\sigma_A > \sigma_C$,即 $W_C > \sqrt{3} W_A / \sqrt{5}$ 时,梁将在固定端处开裂,这是比较普遍的情况。此时在炮孔中心处,梁自由面侧承受拉应力而炮孔侧承受压应力,这使原有自炮孔向自由面

扩展的裂缝受到了抑制,且在压应力作用下开始闭合,并能承受部分压应力。

梁在固定端开裂后,在爆生气体的准静压力作用下,裂缝进一步扩展,同时梁的整体位移也带动了孔间裂缝的扩展,在孔间裂缝尖端(即梁的固定端)其拉应变最大(因该处弯矩最大),当 $\epsilon_{m\max} = \epsilon_k$ (ϵ_k 为岩石极限抗拉应变)时,梁在孔间裂缝尖端又将发生横向拉裂破坏。在整个贯穿裂缝的形成过程中,梁的横向开裂可能发生许多次,下面研究梁第 i 次开裂的条件。研究第 i 次开裂的力学模型如图 3(a),忽略 AB 段上爆生气体压力的作用, B 点以右梁对 AB 的作用以力偶 M_0 和集中力 p 表示,令 $M = M_0 + px$,则图 3(a)简化为图 3(b)所示力学模型。

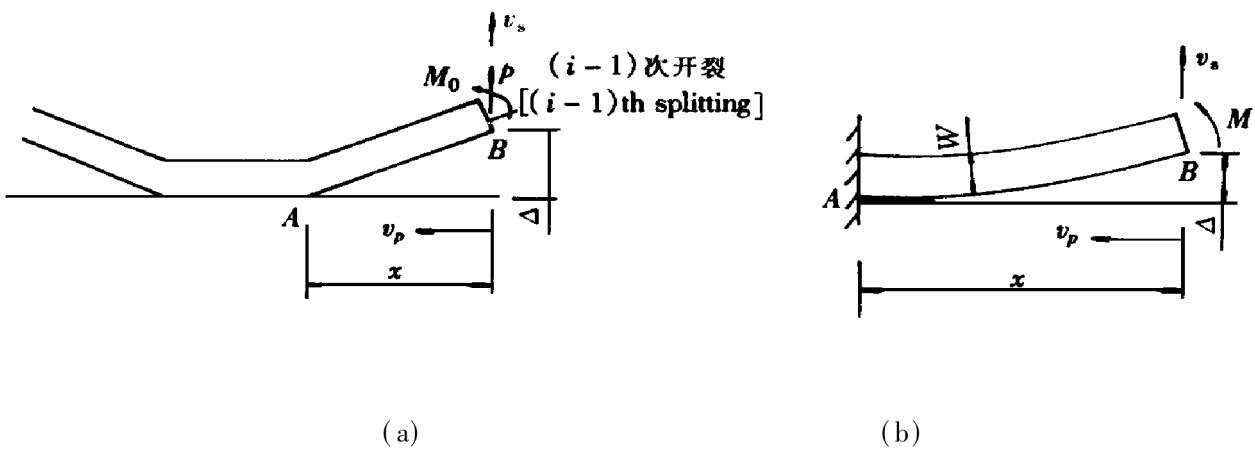


图 3 梁裂缝侧拉应变分析图

Fig 3 Mechanical model of strain analysis

设孔间裂缝扩展的平均速度为 v_p , B 点孔间裂缝扩宽的平均速度为 v_s , 则有

$$\Delta = v_s t \quad x = v_p t \tag{1}$$

式中: t 为孔间裂缝从 B 点扩展到 A 点的时间。由材料力学可知,图 3(b)力学模型为一纯弯曲问题,梁外侧各点的拉应变一样,事实上因为 AB 上作用有爆生气体压力,所以 AB 梁在 A 点的应变最大,即 $\epsilon_{m\max} = \epsilon_k$, 于是可得

$$\epsilon_{m\max} = \epsilon_k = \frac{M}{EI} \frac{W}{2} \tag{2}$$

$$\Delta = \frac{M x^2}{2EI} \tag{3}$$

式中: $E I$ 为梁的抗弯刚度。将 (1)、(3) 式代入 (2) 式得

$$\epsilon_{m\max} = \Delta \frac{W}{x^2} = \frac{W}{x} \frac{v_s}{v_p} \tag{4}$$

于是可得梁在 A 点开裂的条件为

$$\epsilon_{m\max} = \frac{W}{x} \frac{v_s}{v_p} = \epsilon_k \tag{5}$$

在 (5) 式中, v_s, v_p 是两个反映爆破效果的中间参数,它们与爆破参数、介质性质和炮孔中心连线位置有关,既反映了爆破的动作用和静作用,也反映了炮孔间的相互作用,所以能更全面衡量爆破作用。由 (5) 式可知, $\epsilon_{m\max}$ 的大小决定梁是否开裂,即 $\epsilon_{m\max}$ 的大小决定了爆破破碎质量,而 $\epsilon_{m\max}$ 的大小与 v_s / v_p 成正比。对于宽孔距爆破,由于采用了大密集系数的布孔方式,提高了 v_s / v_p 值,从而改善了爆破破碎质量。

3 实验研究与验证

实验采用砂浆模型,设计了一组抵抗距相同而孔间距不等的试验,通过测试孔间裂缝扩展平均速度 \bar{v}_p 及分析爆破效果来验证本文提出的破碎机理理论。

3.1 孔间裂缝扩展平均速度 \bar{v}_p 测试系统

测试系统采用直径为 0.1mm 的漆包线作传感材料,试验前将漆包线粘贴于与裂缝扩展方向垂直的模型表面,当孔间裂缝扩展时,漆包线随裂缝扩展而断裂,经转换电路产生的电信号由瞬态记录仪记录,这样,粘贴于模型上相邻两漆包线断裂的间隔时间可以在连接瞬态记录仪的高频示波器上读出,从而可以计算出两漆包线间裂缝扩展的平均速度。上述测试方法已由文献[2]证明是可行的,我们所得典型实测波形如图 4 所示。

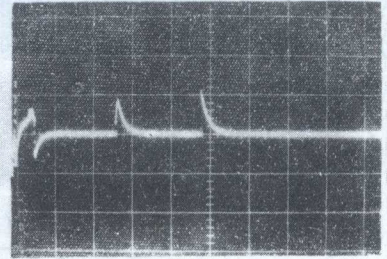


图 4 典型实测波形图

Fig. 4 Measured waveform

3.2 试验参数及结果

试验参数及结果如表 1。经回归后得到

$$\bar{v}_p = 260.07 - 0.4858a \quad (6)$$

相关系数 $\gamma = -0.9655$,说明孔间距 a 与孔间裂缝扩展平均速度 \bar{v}_p 之间具有较好的相关性。

表 1 试验参数及结果

Table 1 Parameters and results of tests

序号	模型编号	$W \times a$ /(mm ²)	装药量 /(mg)	炮孔直径 /(mm)	装药直径 /(mm)	x_1 /(mm)	x_2 /(mm)	Δt /(μ s)	\bar{v} /(m/s)
1	M ₁₃	60×60	450	8.5	5.5	15	30	64	234.4
2	M ₁₄	60×120	450	8.5	5.5	20	43	108	213.0
3	M ₁₅	60×180	450	8.5	5.5	20	45	142	176.1

说明:1.装药量中 Pb_2N_4 50mg,DDNP100mg,其余为 RDX;2. x_1, x_2 表示漆包线距炮孔中心距离;

3. Δt 为 x_1, x_2 处漆包线断裂的间隔时间。

3.3 结果分析及验证

3.3.1 裂缝扩宽速度 v_s

对于式(5)中提出的裂缝扩宽速度 v_s ,目前尚不能采用实验方法测定。它可用下式表示

$$\bar{v}_s = f(Q, a, W, E, \rho) \quad (7)$$

式中: Q 为炮孔装药量; E 为介质弹性模量; ρ 为介质密度。对于本文中进行的模型实验,因 Q, W, E, ρ 均相同,因而(7)式可表示为

$$\bar{v}_s = f(a) \quad (8)$$

事实上,裂缝扩宽主要是爆生气体推动岩石的结果,与炮孔间的相互作用无关,因而对于本文抵抗距 W 相同而孔间距 a 不同的模型,在距炮孔中心距离相同处可认为 v_s 相同,即 \bar{v}_s 为常数。

3.3.2 爆破结果分析及验证

对于模型 M_{13} 、 M_{14} 、和 M_{15} ,考虑其孔间裂缝扩展至距炮孔中心距离均为 x 处的应变,则由(4)式得

$$\epsilon_{13 \max} = \frac{W}{x} \frac{\bar{v}_{s13}}{\bar{v}_{p13}}, \quad \epsilon_{14 \max} = \frac{W}{x} \frac{\bar{v}_{s14}}{\bar{v}_{p14}}, \quad \epsilon_{15 \max} = \frac{W}{x} \frac{\bar{v}_{s15}}{\bar{v}_{p15}}$$

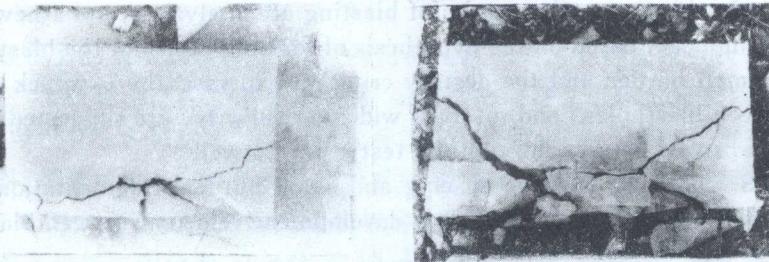
式中:下标 13、14 和 15 分别代表 M_{13} 、 M_{14} 、 M_{15} 的相应值。因为

$$\bar{v}_{s13} = \bar{v}_{s14} = \bar{v}_{s15}, \quad \bar{v}_{p13} > \bar{v}_{p14} > \bar{v}_{p15}$$

所以

$$\epsilon_{13 \max} < \epsilon_{14 \max} < \epsilon_{15 \max}$$

由此可以判断, M_{15} 的破碎质量最好, M_{14} 次之, M_{13} 最差。实际爆破效果如图5。由图可以看出,实际爆破质量与上述分析结果一致。从而验证了本文提出的破碎机理模型是正确的。



M_{13}

M_{15}

图5 实际爆破效果图

Fig. 5 Effects of blasting

根据破碎模型和实验结果,还可以得到炮孔密集系数 m 与破碎质量的关系。对于 M_{13} 、 M_{14} 和 M_{15} 模型,其相应炮孔密集系数为: $m_{13} < m_{14} < m_{15}$ 。若以 K_{50} (被爆下岩石 50% 能通过的方形筛边长)表示破碎质量,则 m 与 $1/K_{50}$ 之间有正变关系,即 m 值越大,则 $1/K_{50}$ 也越大(K_{50} 越小),破碎质量越好。

4 结束语

本文提出的宽孔距爆破破碎模型,描述了宽孔距爆破岩石的破碎过程,能合理地解释宽孔距爆破提高岩石破碎质量的原因。因本文提出的模型是以相邻炮孔形成贯穿裂缝为前提,所以宽孔距爆破的炮孔密集系数 m 并不能盲目确定,由前面的分析可知, m 值越大,破碎质量越好,但当 m 值增大到某一极限时,孔间贯穿裂缝将不能形成,破碎质量反而会下降。实验表明,对于砂浆模型,当炮孔密集系数取 4.5~5.5 时,孔间裂缝能够形成且偏离中心连线距离不大,爆破效果较好且不会影响后排炮孔和爆破条件。对于实际工程爆破,可以通过小型现场试验确定最佳 m 值。

实验结果分析中,公式(6)忽略了试件的边界效应等因素的影响,若考虑这些因素的作用,则实验结果及公式(6)必须作一定的修正,这需要更深入的研究。但并不影响本文提出的破碎机理模型,因此,本文的结论对实际工程爆破仍具有指导意义。

参 考 文 献

- 1 夏超,何君.宽孔距爆破机理分析及在黄麦岭磷矿的应用.爆破,1989,6(3):13~16
- 2 陶颂霖,王胜.爆破时岩石裂纹扩展规律的研究.中南工业大学学报,1990,21(1):16~21
- 3 王修勇.排孔爆破岩石破碎机理的研究: [硕士学位论文]北京:中国矿业大学,1991

STUDY OF FRAGMENTATION MECHANISM FOR THE BLASTING OF LARGE-SPACING AND SMALL-BURDEN

W ang X iuyong^a, W ang Shuren^b

(a *X iang tan M ining Institute, X iang tan, 411201*)

(b *Beijing Graduate School, China University of Mining & Technology, Beijing, 100083*)

ABSTRACT In this paper, the results of blasting are analysed and a new fragmentation mechanism model based on the hypothesis of forming beam for the blasting of large-spacing and small burden and the destroy criterion expressed by v_p (crack development velocity between blastholes) and v_s (crack widening velocity) are suggested. The mechanism model is proved correct through the test study as well.

KEY WORDS blasting of large-spacing and small-burden, fragmentation mechanical model, crack between blastholes, v_p (crack development velocity between blastholes)