ISSN 1671－2900
CN 43－1347/TD
采矿技术　第 17 卷　第 5 期
Mining Technology，Vol.17，No.5
2017 年 9 月
Sep. 2017

基于能量分布的深孔预裂爆破参数优化研究

丁汉堃，张　阳，西子阳，张光权，郭维浩

（北京中科力爆炸技术工程有限公司，　北京　101318）

摘　要：针对预裂爆破中主炮孔爆破时双侧均存在自由面和抵抗线的情况，采用能量分析法，研究了条形药包等效子药包两侧炸药能量分布与相应抵抗线的相关性。结果表明，炮孔两侧等效线装药密度与同侧抵抗线大小成反比，即抵抗线越大，等效线装药密度越小。随后，推导出了炮孔两侧等效炸药单耗计算公式，并将该公式运用到台阶深孔预裂爆破参数优化中，得出了更合理的孔网参数和起爆方案，既保证了爆破效果，又保护了预裂边坡，为类似工程提供了有益参考和借鉴。

关键词：深孔预裂爆破；双侧抵抗线；条形子药包；等效单

DOI:10.13828/j.cnki.ckjs.2017.05.040

0　前　言

在预裂爆破时，常发生预裂面附近主炮孔爆堆抛距变小，大块增加，部分块石贴靠在预裂面侧，预裂面前根底增加等现象。分析认为，主要是在预裂爆破后，主炮孔不但拥有原临空面，还增加了预裂缝形成的新临空面，即炮孔同时存在双侧抵抗线，炮孔内爆破能量分散，作用于设计抛掷方向的单耗值降低，影响了爆破效果。

为改善上述效果，根据多年爆破施工经验，并结合多面临空子药包理论的研究，推导出了双侧抵抗线条件下条形药包爆破能量的分配及作用于二侧岩体单耗的计算方法，并将理论研究成果应用于爆破工程实践中，以期改善爆破效果。

1　条形药包等效子药包能量分配研究

1.1　研究模型的建立

根据多向群药包能量分配、等效子药包爆破能量的分配模型，假定在一个均质的、无限长的、不等半径的厚壁圆的轴线上，设置一个等直径的柱状小药包，其体积与厚壁圆相比可忽略。从中截取一段单位长度，研究抛体质心速度。由于单位长度圆柱形药包是无限延长药包中截取的一段，故其轴线方向不存在能量逸散问题，爆源能只能均匀地沿厚壁圆内壁径向传递[1]。在双侧抵抗线条件下，常规的深孔装药结构实质是条形药包，当孔径确定后，炮孔线装药密度即 L_p 是一定的。炮孔内条形药包可以看做为 2 个等效子药包，其孔内炸药能量分解为 L_{p1}，L_{p2}（见图 1）。

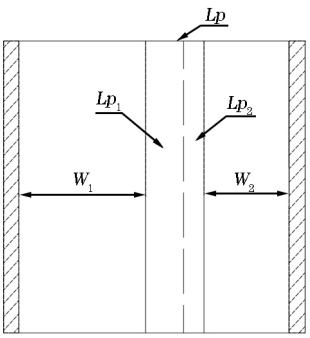

图 1　等效子药包

1.2　炸药能量分布与抵抗线相关性研究

根据能量守恒定律：

$$L_p = L_{p1} + L_{p2} \tag{1}$$

式中：L_{p1}，L_{p2}——炮孔内条形子药包线装药密度，kg/m；

L_p——炮孔线装药密度，kg/m。

根据等效子药包爆破能量分配的力学模型[1-2]，爆炸的瞬间爆炸能向炮孔壁均匀传递，不同块体以不同的速度飞散。爆炸气体作用于炮孔气腔内壁的冲量应等于抛体获得的动量。

$$mv = \int_0^t Pa\theta \mathrm{d}t \tag{2}$$

$$m = \frac{1}{2}\theta w^2 \rho \tag{3}$$

式中：m——飞块质量；

v——飞块速度；

P——爆炸气体压强；

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

a——炮孔半径；

θ——炮孔径向圆心角；

t——作用时间；

w——炮孔抵抗线；

ρ——飞块密度。

由式(2)、式(3)可得：

$$\frac{V_1}{V_2}=\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2 \tag{4}$$

式中：V_1、V_2——分别为炮孔两侧飞块速度；

w_1、w_2——分别为炮孔两侧抵抗线。

美国雷德帕思通过对利文斯顿爆破理论研究，从几何相似和量纲分析出发，建立了点、线、面药包之间的相关关系[3-4]。本文利用其点、线、面药包之间的相关关系公式推导出条形药包炮孔两侧岩石质心速度关系公式。

点、线、面药包之间的相关关系公式：

$$K_a{}^3=K_x{}^2=K_m \tag{5}$$

式中：K_a——点药包的比值深度；

K_x——线药包的比值深度；

K_m——面药包的比值深度。

则有：

$$W_a=K_a Q^{1/3} \tag{6}$$

$$W_x=K_x L_p{}^{1/2} \tag{7}$$

式中：W_a——集中药包抵抗线，m；

Q——集中药包装药量，kg；

W_x——条形药包抵抗线，m；

L_p——条形药包线装药密度，kg/m。

将式(6)、式(7)代入式(5)得：

$$\left(\frac{Q^{1/3}}{W_a}\right)^2=\left(\frac{L_p}{W_x{}^2}\right)^{2/3} \tag{8}$$

集中药包质心速度公式[2]：

$$v_a=k_a\left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{W_a}\right)^2 \tag{9}$$

依据式(8)($\frac{Lp}{W_x{}^2}$)即为条形药包抛速公式中的$\overline{R}$的函数[5]。

因此条形药包的速度公式为：

$$v_x=k_x\left(\frac{L_p}{W_x{}^2}\right)^{2/3} \tag{10}$$

所以有：

$$\frac{v_1}{v_2}=\left(\frac{L_{p1}}{L_{p2}}\right)^{2/3}\left(\frac{W_2}{W_1}\right)^{4/3} \tag{11}$$

解式(1)、式(4)、式(11)方程组，得双向条形子药包的线药量密度分配公式为：

$$L_{p1}=\frac{L_p}{1+\frac{W_1}{W_2}} \tag{12}$$

$$L_{p2}=\frac{L_p}{1+\frac{W_2}{W_1}} \tag{13}$$

由式(12)、式(13)得：

$$\frac{L_{p1}}{L_{p2}}=\frac{w_2}{w_1} \tag{14}$$

以式(14)可知$\frac{W_1}{W_2}$与$\frac{L_{p1}}{L_{p2}}$成反比(见图2)，随着$\frac{W_1}{W_2}$增大，$\frac{L_{p1}}{L_{p2}}$减小，正符合药包爆破的最小抵抗线原理。抵抗线越小，岩石获得的能量越多、破碎程度越高、抛掷速度越大；相反抵抗线越大，岩石获得的能量越少，破碎程度越低、抛掷速度越小，以至于仅产生破碎裂隙没有抛掷。

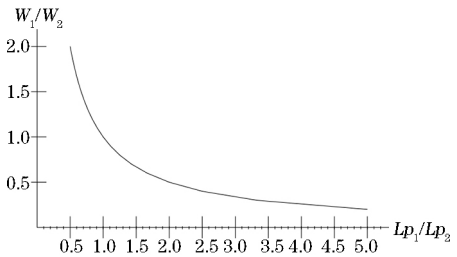

图2 $\frac{W_1}{W_2}$与$\frac{L_{p1}}{L_{p2}}$关系曲线

则作用于炮孔两侧的等效单耗计算式为：

$$q_1=\frac{L_p}{1+\frac{W_1}{W_2}}\frac{1}{W_1{}^2} \tag{15}$$

$$q_2=\frac{L_p}{1+\frac{W_2}{W_1}}\frac{1}{W_2{}^2} \tag{16}$$

通过计算作用于炮孔两侧的等效单耗值，能够形象说明作用于炮孔两侧的能量分配大小，在工程具体应用中具有重要指导意义。

2 工程应用及效果

在露天岩石中进行预裂爆破时，可以运用上述条形子药包理论调整炮孔最佳位置及孔网参数，使其充分发挥作用，既能使远离预裂缝方向的岩石充分破碎，利于清渣，又可使炮孔两侧岩石破碎程度悬殊，保护好预裂边坡。

某工程实施预裂爆破，岩石性质为未风化花岗岩，石质坚硬，采用80 mm孔径炮孔，线装药量4.5

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

kg/m。爆破时常出现爆堆前沿抛距缩短,大块石多,台面留有根底,预裂面受到一定程度的破坏。

据上述理论分析其原因是预裂孔前排主炮孔在爆炸时双侧均临空,5 号炮孔右侧与一般台阶爆破相比,炸药能量相对分散,爆破能力降低,而 5 号炮孔左侧因存在自由面,引导炸药爆炸后的能量向预裂缝方向分布,造成靠近预裂缝方向爆炸能量与一般台阶爆破相比趋于集中,对预裂面造成了一定的冲击,从而使预裂面受到破坏。

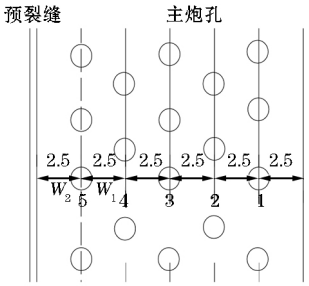

图 3 预裂爆破布孔

如图 3 所示,以预裂缝前排炮孔孔号 5 为例,当两侧排距 W_1 与 W_2 均为 2.5 m 时,作用于两侧单耗 q_1 与 q_2 均为 0.36 kg/m^3。调整后取 W_1 为 1.5 m,W_2 为 2.2 m,则作用于两侧单耗 q_1 为 1.2 kg/m^3,q_2 为 0.37 kg/m^3,5 号炮孔右侧炸药单耗变大,破碎、抛掷能力均变强,有利于矿岩破碎抛掷,左侧炸药单耗降低,能够很好的保护预裂缝不受破坏,爆破效果大为改善(见表 1)。

表 1 5#炮孔等效子药包不同抵抗线与单耗变化

序号	W_1 /m	W_2 /m	L_{p1} /(kg/m)	L_{p2} /(kg/m)	q_1 /(kg/m^3)	q_2 /(kg/m^3)
1	2.5	2.5	2.25	2.25	0.36	0.36
2	1.5	2.2	2.7	1.8	1.2	0.37

本工程中,若按常规布孔装药,等排距布孔(见图 3),从一侧逐排顺序起爆,则后排单耗逐减,会经常出现“墙”、大块石、根底等情况,分析其炮孔等效子药包抵抗线与线装药密度如表 2。

表 2 常见装药布孔等效子药包抵抗线与单耗

起爆顺序	排号	W_1 /m	W_2 /m	L_{p1} /(kg/m)	L_{p2} /(kg/m)	q_1 /(kg/m^3)	q_2 /(kg/m^3)
1	1	2.5	12.5	3.75	0.75	0.60	0.005
2	2	2.5	10	3.6	0.9	0.58	0.009
3	3	2.5	7.5	3.4	1.10	0.54	0.02
4	4	2.5	5	3	1.5	0.48	0.06
5	5	2.5	2.5	2.25	2.25	0.36	0.36

针对上述情况,以本文“双侧抵抗线”理念对爆破设计进行改进,采用“外疏里密”的布孔方式,“先外围后中心”的起爆顺序,可有效解决上述“墙”、大块石、根底等现象,炮孔布置见图 4。

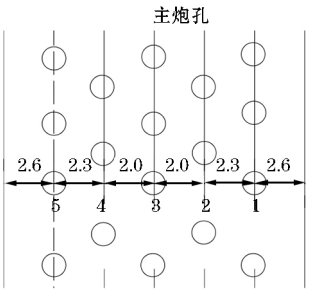

图 4 调整后的布孔方式

等效子药包抵抗线与线装药密度见表 3。

表 3 调整后等效子药包抵抗线与单耗

起爆顺序	排号	W_1 /m	W_2 /m	L_{p1} /(kg/m)	L_{p2} /(kg/m)	q_1 /(kg/m^3)	q_2 /(kg/m^3)
1	1、5	2.6	8.6	3.5	1.0	0.52	0.001
2	2、4	2.3	4	2.8	1.7	0.53	0.11
3	3	2	2	2.25	2.25	0.56	0.56

以上实践及数值分析表明,表 2 的单耗值越来越小,q_1 由 0.6 kg/m^3 降至 0.36 kg/m^3,易形成“墙”;表 3 的单耗 q_1 基本无变化,在 0.53 kg/m^3 左右,有利于岩石破碎抛掷及对预裂边坡的保护,实际效果也是如此。

3 结 论

双侧抵抗线条件下深孔爆破理论研究与应用为露天深孔预裂爆破的精细化设计提供了理论借鉴与参考。本文推导出的双侧抵抗线条形子药包线密度及等效单耗计算公式,对解决现场有关问题及判断爆破结果都具有有效的指导及实用效果。

参考文献:

[1] 李温平,杨人光.爆破工程学论文选集[C]//中国科技咨询服务中心爆破新技术开发公司,1985.

[2] 林睦盘.爆破工程学论文:多面临空地形爆破理论与设计[C]//中国科技咨询服务中心爆破新技术开发公司,1984.

[3] 周浩仓.硐室爆破药包间距的确定[J].长沙矿山研究院季刊,1991.

[4] 张志呈.爆破中量纲分析及相似原理[J].四川建材学院学报,1992.

[5] 汪旭光.爆破设计与施工[M].北京:冶金工业出版社,2013.

(收稿日期:2017-06-17)

作者简介:丁汉堃(1946—),男,高级工程师,主要从事工程爆破施工与技术研究,Email:xishina@foxmail.com。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net