

露天爆破排距随台阶高度、孔径变化规律及其应用*

丁汉堃, 石磊, 王峰, 张阳

(北京中科力爆炸技术工程有限公司, 北京 100089)

摘要:露天爆破抵抗线(排距)是重要的爆破参数,选择合理的抵抗线需要平衡和规避各种受制条件,其中台阶高度(孔深)、炮孔直径是直接影响因素。台阶高度、孔径、抵抗线三者匹配,以及以台阶高度、孔径变化前的抵抗线求出变化后的新抵抗线是爆破设计中待解决的问题。针对台阶高度、孔径作用下的抵抗线计算,介绍了经验公式的“重合”算法,阐述了压杆原理和条形药包公式相结合导出的“压杆”算法,并以中间抵抗线 W_{12} 为过渡,以条形药包单耗 q_L 为中介推导出三元转换公式,该公式应用简便,适用于施工现场,具有准确、简单、实用等特点,同时弥补了重合法中出现的重合现象。两种计算方法的实用性已在工程实例中得到了验证,可为爆破施工中类似问题的解决提供参考。

关键词:上压杆算法;重合算法;抵抗线;排距;台阶高度;炮孔直径

0 引言

如何在爆破施工中选择合理抵抗线是爆破研究的重要课题。露天采场为保护边坡稳定,设计坡脚、高度等各异的开采台阶,并布置不同炮孔深度与之适应。由于剥离厚度以及应用的爆破技术(抛掷/松动)不同而选择不同的炮孔直径。进而引发台阶高度与孔径变化影响下,合理抵抗线计算方法的探讨。

廉江石场爆区分散,各山体台阶高度要求不同,分别为8 m、10 m、15 m等,采用不同钻机形成典型孔径 $\Phi 90$ mm和 $\Phi 115$ mm,由于破碎机口较小,施工初期降低大块率成为施工重点。

黑岱沟露天煤矿,采用“抛掷爆破+拉斗铲倒堆”剥离工艺,施工效果表明,不需要倒堆剥离的部分可达30%~60%,提高了剥离效率,大幅度降低了剥离成本。而抛掷爆破发挥了重要作用,影响抛掷率的因素有很多,其中孔网参数是重要的影响因素,对于爆破炮孔的间距、排距与炮孔间的抵抗线关系最为密切,因此,炮孔排距(抵抗线)将影响抛掷爆破效果及爆破块度。

上述两例工程项目出现的问题是相同的,亟待

解决大块率和抛掷率的问题,其最主要影响因素是抵抗线(排距)的大小。

基于工程实践与理论研究,抵抗线、台阶高度、孔径三者相互关联,且可以相互转换,找出规律,建立实用公式,由经验上升到理论,并在其指导下进行科学试验,避免以前单凭经验决定抵抗线的做法。在实际爆破施工中,关注的是在不同的台阶高度及孔径条件下抵抗线的确定。目前有两种方法可解决,即重合法和压杆法。

重合法是利用排距在两个经验公式中重合区域选择合理排距,并推导出在台阶高度、孔径变化前后排距计算公式。

压杆法是通过台阶爆破柱体运动动态分析,表明压杆原理与之契合,并利用其中的欧拉公式推导出炮孔直径相同条件下,孔深与抵抗线关系式,在此基础上,借助孔深转换和条形药包单耗作为爆破效果参数的中介作用,推导建立孔深、孔径和抵抗线三者前后的关系式,弥补了重合法中不重合的不足。

参数中,由于超深相对台阶高度 H 和孔深 l 的比例较小,可将台阶高度和孔深等同对待,抵抗线与排距等同对待以示与底盘抵抗线区别。

* 收稿日期: 2023-09-13

作者简介: 丁汉堃(1946—),男,北京人,高级工程师,主要从事工程爆破技术与施工的研究工作, E-mail: 1915311258@qq.com。

通信作者: 石磊(1993—),男,安徽合肥人,工程师,主要从事工程爆破技术与施工方面的研究工作, E-mail: 1915311258@qq.com。

1 炮孔排距重合计算法

1.1 经验公式

由炮孔直径计算排距的经验公式,公式来源于条形药包中线装药密度计算公式 $L_P = W^2 \cdot q_L$, 其中 $L_P = \frac{\pi d^2}{4} \Delta$ 建立孔径与排距关系,即 $W = d \cdot \sqrt{\frac{\pi \Delta}{4 q_L}}$, 若以 $\Delta = 1000 \text{ kg/m}^3, q_L = 1 \text{ kg/m}^3$ 计算得到 $W = 28 d$ 。

实际应用为:

$$B = c_1 \cdot d \quad (1)$$

式中, B 为排距, m; c_1 为系数; d 为孔径, mm。

当 $d > 16.66H + 50$ 时, 取 $c_1 = 15 \sim 35$; 当 $10H \leq d \leq 16.66H + 50$ 时, 取 $c_1 = 20 \sim 35$; 当 $d < 10H$ 时, 取 $c_1 = 20 \sim 40$ 。

由台阶高度计算排距的经验公式,公式来源台阶爆破倾斜炮孔抵抗线公式 $W = \frac{H}{\tan \alpha}$, 其中倾斜角为 $60^\circ \sim 75^\circ$ 时, $W = (0.27 \sim 0.58)H$ 。

实际应用为:

$$B = c_2 H \quad (2)$$

式中, c_2 为系数, 取 $c_2 = 0.25 \sim 0.5$; H 为台阶高度, m。

1.2 运算

分别以式(1)和式(2)进行计算,在其中相重合区域选择合理排距。

当 $d = 250 \text{ mm}, H = 10 \text{ m}$ 时,由式(1)得 $B = 3.75 \sim 8.8 \text{ m}$; 由式(2)得 $B = 2.5 \sim 5 \text{ m}$; 取重合区域得 $B = 3.75 \sim 5 \text{ m}$ 。

根据上述计算结果,排距 B 在 $3.75 \sim 5 \text{ m}$ 范围内进行试验,最后确定 5 m 为生产施工的炮孔排距。

1.3 台阶高度、孔径变化前后排距计算

台阶高度、孔径变化前通过式(1)、式(2)计算排距 B 的下限为 $B_{1\min}$, 上限为 $B_{1\max}$ 。而二者变化后排距 B 的下限为 $B_{2\min}$, 上限为 $B_{2\max}$ 。如图1所示, $B_{1\min}$ 对应 $B_{2\min}$, $B_{1\max}$ 对应 $B_{2\max}$ 。变化前最佳排距 B_1 位于 $B_{1\min} \sim B_{1\max}$ 范围内, 待求 $B_{2\min} \sim B_{2\max}$ 范围内的 B_2 。

由内插法得:

$$\frac{B_2 - B_{2\min}}{B_1 - B_{1\min}} = \frac{B_{1\max} - B_{1\min}}{B_{2\max} - B_{2\min}} \quad (3)$$

整理得到:

$$B_2 = B_{2\min} + \frac{B_{1\max} - B_{1\min}}{B_{2\max} - B_{2\min}} \cdot (B_1 - B_{1\min}) \quad (4)$$

式(3)、式(4)说明爆破参数组1转换到组2时,由排距 B_1 求组2排距 B_2 的公式。一般运算程序为:先利用式(1)、式(2)求出台阶孔径变化前的 B_1 值范围 $B_{1\min} \sim B_{1\max}$, 及变化后的 B_2 范围 $B_{2\min} \sim B_{2\max}$ 。由已知的 B_1 , 利用式(3)或式(4)求出 B_2 。

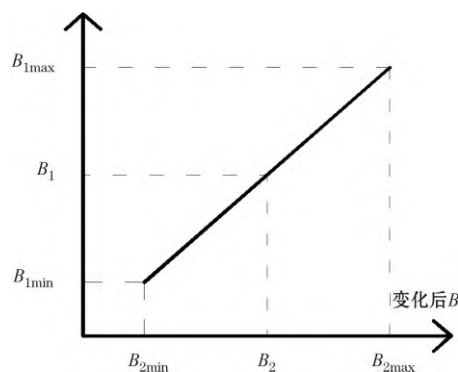


图1 内插法图形

变化前利用式(1)、式(2)得 $B = 3.35 \sim 5.8 \text{ m}$, $B = 3 \sim 6 \text{ m}$ 。

由重合区域得 $B_{1\min} = 3.3 \text{ m}, B_{1\max} = 5.8 \text{ m}$ 。

变化后利用式(1)、式(2)得 $B = 4 \sim 7 \text{ m}, B = 2.5 \sim 5 \text{ m}$ 。

由重合区域得 $B_{2\min} = 4 \text{ m}, B_{2\max} = 5 \text{ m}$ 。由式(4)得 $B_2 = 4.2 \text{ m}$ 。

1.4 不重合现象

不重合的概念是指在利用重合法计算排距(抵抗线)时,发现以孔径确定的排距范围和以台阶高度确定的排距范围没有重合区域,以致“重合法”无法进行。针对这种情况,首要是弄清在什么条件发生不重合现象,以便在工程设计中规避。

不重合条件推导如图2所示。

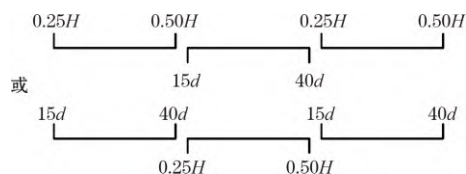


图2 不重合情况示意

如图2所示, $0.5H < 15d$ 和 $40d < 0.25H$, 不重合条件即为 $H < 30d$ 或 $d > 0.033H$, 和 $H > 160d$ 或 $d < 0.00625H$ 。

不重合条件分成两个部分,即 $H < 30d$ 和 $H > 160d$ 。在利用“重合法”计算排距(抵抗线)时,首先核算不重合条件,若 H 和 d 符合以上关系,则“重合

法”不宜应用。

例 1: $d=150\text{ mm}$, $H=4\text{ mm}$, $B=(15\sim 35)\times 0.15=2.25\sim 5.25\text{ m}$, $B=(0.25\sim 0.5)\times 4=1\sim 2\text{ m}$ 。

例 2: $d=200\text{ mm}$, $H=33\text{ mm}$, $B=(20\sim 40)\times 0.2=4\sim 8\text{ m}$, $B=(0.25\sim 0.5)\times 33=8.25\sim 16.5\text{ m}$ 。

上述事例表明重合法中不重合现象的存在,例题中排距范围分别以(1~2)(2.25~5.25)和(4~8)(8.25~16.5)排列,其中没有重合区域,无法确定最佳抵抗线。

1.5 公式推导

$$L_p = W^2 q_L \quad (5)$$

式中, L_p 为线装药密度, kg/m ; W 为抵抗线, m ; q_L 为条形药包单耗, kg/m^3 。

$$L_p = \frac{\pi}{4} \cdot \phi^2 \cdot \Delta \quad (6)$$

式中, ϕ 为炮孔直径, m ; Δ 为装药密度, kg/m^3 。

将式(5)代入式(6)得:

$$W = \phi \sqrt{\frac{\pi \cdot \Delta}{4q_L}} \quad (7)$$

当 $q_L=1\text{ kg/m}^3$, $\Delta=1000\text{ kg/m}^3$ 时, 则 $W=28\phi$, 实际以 $W=(25\sim 30)\phi$ 居多。

倾斜炮孔

$$w = \frac{H}{\tan\alpha} + B_0 \quad (8)$$

式中, H 为台阶高度, m ; α 为边坡角, ($^\circ$); B_0 为边线距, m 。

当 $\alpha=60^\circ\sim 75^\circ$, $B_0=1.5\text{ m}$ 时, $W=(0.25\sim 0.5)H+1.5\text{ m}$ 。

由 $W = \phi \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \Delta}{4q_L}} = \frac{H}{\tan\alpha} + B_0$ 数值代入可得:

$$(25\sim 30)\phi = (0.25\sim 0.5)H + 1.5$$

$$\text{即 } \phi = (10\sim 16.66)H + 50。$$

孔径范围条件为上限 $\phi = 16.66H + 50$, 下限 $\phi = 10H$, 因此, 当 $c = 20\sim 35$ 时, $10H \leq \phi \leq 16.66H + 50$ 。

以此归纳为:

$$c_1 = 15\sim 35, \phi > 16.66H + 50;$$

$$c_1 = 20\sim 35, 10H \leq \phi \leq 16.66H + 50;$$

$$c_1 = 20\sim 40, \phi < 10H。$$

2 炮孔抵抗线(排距)压杆计算法

露天钻孔爆破实质是条形药包爆破, 爆破瞬间在抵抗线方向形成三棱柱体, 脱离岩石母体。在自重作用下, 柱体呈弓形向外抛移, 运动中柱体经历变形、压弯和断裂, 分成上下两个部分, 继续塌落、碰撞和挤压为一体, 向前冲击形成爆堆。炮孔在爆炸后, 柱形岩体连续的运动状态如同压杆失稳状态。压杆失稳即在轴向压力作用下, 不仅产生轴向变形, 而且还在横向产生弯曲变形和塑性变形, 从而导致岩体破坏。以上分析得出, 压杆失稳的判断公式即欧拉公式适用于岩体运动状态计算。

2.1 抵抗线和孔深关系式

$$P_y = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\min}}{4L^2} \quad (9)$$

式中, P_y 为临界压力, N ; E 为弹性模量, MPa ; I_{\min} 为柱体横截面最小惯性矩, m^4 ; L 为柱体长度(炮孔长度), m 。炮孔爆炸后岩体形成截面为三角形的三棱体。其三角形截面惯性矩为:

$$I_{\min} = \frac{n \cdot W^4}{18} \quad (10)$$

式中, n 为爆破指数, 代入式(9)得:

$$P_y = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot n \cdot W^4}{18 \times 4L^2} \quad (11)$$

设 $K = \frac{\pi^2 E n}{72}$, 代入式(11)得:

$$P_y = K \cdot \frac{W^4}{L^2} \quad (12)$$

式(12)表明, 临界压力与柱长 L 成反比, 与抵抗线 W 成正比。在同一抵抗线下, 长柱体易发生弯曲断裂, 短柱体不易发生断裂。要达到相同的爆破效果, 则只有在同一临界压力 P_y 条件下, 调整炮孔的抵抗线尺寸。不同孔深的柱体达到相似压杆破坏状态, 则只有 $P_{y1} = P_{y2}$ 条件下, 得到相同的爆破效果。

由此可得:

$$\frac{W_1^2}{L_1} = \frac{W_2^2}{L_2} \quad (13)$$

式(13)表明在同一爆区相同孔径前提下抵抗线与孔深的关系, 并以孔深 L_1 最佳抵抗线 W_1 , 求出另一组孔深 L_2 最佳抵抗线 W_2 。

2.2 建立三元关系式

式(13)说明同孔径条件下孔深与抵抗线关系, 但在实际施工中也时常加入孔径变化, 形成台阶高

度 H (孔深 L)、孔径 ϕ 、抵抗线 W (排距 B)成组以致发生组间转换变化,并在其中要求找到最佳抵抗线 W 。经过简便的试验,确定现场最佳抵抗线。

借式(13),将组 1 炮孔转移到组 2 台阶上,其中炮孔抵抗线 W_{12} 为过渡。在组 2 台阶上,以相同的爆破效果为目的,即条形药包单耗 q_L 相等,借用公式 $L_p = \frac{\pi}{4} \cdot \phi^2 \cdot \Delta$ 完成组间炮孔直径转换并建立了三元关系式。

推导步骤如下:

$$\frac{W_1^2}{L_1} = \frac{W_{12}^2}{L_2}, W_{12}^2 = \frac{W_1^2 L_2}{L_1} \quad (14)$$

$$L_{p_1} = W_{12}^2 q_L, q_L = \frac{L_{p_1}}{W_{12}^2} \quad (15)$$

$$L_{p_2} = W_2^2 q_L, W_2^2 = \frac{L_{p_2}}{q_L} \quad (16)$$

$$L_{p_1} = \frac{\pi}{4} \cdot \phi_1^2 \cdot \Delta \quad (17)$$

$$L_{p_2} = \frac{\pi}{4} \cdot \phi_2^2 \cdot \Delta \quad (18)$$

将式(14)、式(15)、式(17)、式(18)代入式(16)得三元公式:

$$W_2 = W_1 \frac{\phi_2}{\phi_1} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (19)$$

三元公式表明,抵抗线(排距)、孔深(台阶高度)和炮孔直径三者变化前后关系。当变化前后孔径相

等,即 $\phi_1 = \phi_2$, $W_2 = W_1 \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$;当变化后孔深相等,

即 $L_1 = L_2$, $W_2 = W_1 \frac{\phi_2}{\phi_1}$ 。

3 两种计算方法分析

两公式在应用转换方面,适用于岩石性质构造形迹等地质条件相同或相近的地域。地质条件相差较大的地区应以公式值并参考以往试验效果,确定最佳取值。在施工中台阶孔径相对固定,能准确选择抵抗线是最重要的。

前述公式以不同视角推演出计算公式,为计算抵抗线提供了方便。

重合法是排距依据孔径确定范围与台阶高度,确定范围选择相重合区域,收缩了排距选择范围。这种方法计算步骤较多且存在“不重合”的情况,使得其计算无法进行。

压杆法是以压杆原理推导出的,在转换计算中,以 W_{12} 过渡, q_L 为中介,建立公式 $W_2 = W_1 \frac{\phi_2}{\phi_1}$

$\sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$ 。其应用简便,弥补了重合法“不重合”的现象。

4 应用实例

4.1 黑岱沟露天煤矿

2007年,黑岱沟露天煤矿首次在我国采用拉斗铲倒堆工艺。基本作业流程:先在煤层顶板之上约 50 m 岩石上进行穿孔装药,然后进行抛掷爆破,拉斗铲站立于平整后的爆堆上,将剩余未进入排土场的物料倒堆至排土场,从而揭露煤层。实践证明:拉斗铲倒堆+抛掷爆破生产系统在该矿取得了良好的经济效益。

岩石多为黏土岩和泥岩,裂隙较发育,岩石厚度主要在 50~70 m 范围内。经论证设计,倒堆剥离实体采宽为 80 m,台阶高度为 45 m,抛掷爆破采用大孔径爆破,孔径为 310 mm。根据式(1)、式(2)及以上分析,当由炮孔直径计算排距 B 时, $B = 6.2 \sim 12.4$ m;当由台阶高度计算排距 B 时, $B = 11.25 \sim 22.5$ m。两种方法计算的排距值重合区域在 11.25~12.4 m 之间,因此布孔排距选择 12 m。

采用压杆法中式(19)进行计算,以 $\phi_1 = 250$ mm, $H_1 = 10$ m, $B_1 = 5$ m 转换成 $\phi_2 = 310$ mm。由 $H_2 = 45$ m 求出 $B_2 = 13.1$ m,计算结果排距(抵抗线)在 12~13 m 之间,经试验确定为最佳值。

4.2 廉江石场

广东湛江至玉林高速公路建设以廉江石场为供应全线公路石料场,该石场包括山体爆破、石料破碎及石料运输。爆破区域离村庄较远,山头分散且台阶高度要求不同,山体岩石为花岗岩系微风化状态,不同爆区采纳的钻机孔径不同。由于破碎机机口较小(小于 50 cm),施工初期大块石成为工地亟待解决的问题。该项目遇到的问题与澳门石排湾石场相同。石排湾石场也是因为大块石影响施工,一度成为施工难点。经过多种爆破方案比较和试验,最后得到最佳一组数据,即孔径 $\phi_1 = 90$ mm,孔深 $L_1 = 10$ m,排距(抵抗线) $W_1 = 2$ m, $a \times b = 2.8$ m \times 2 m。由于两石场同样是花岗岩,地质条件相似,因此以石排湾石场数据为基础,利用式(19)进行组间转换计算,

在廉江石场孔径 $\phi_2 = 115 \text{ mm}$, 孔深 $L_2 = 15 \text{ m}$ 时, 得到抵抗线 $W_2 = 3.1 \text{ m}$, 调整布孔参数为 $a \times b = 3.5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, 结合 V 型起爆网路, 爆破效果显著, 爆破块度适应了破碎机口需要。工程实测汇集见表 1。

表 1 工程实例汇集

序号	前组合		前最佳排距 B_1/m	后组合		后最佳排距 B_2/m	
	ϕ_1/mm	L_1/m		ϕ_2/m	L_2/m	重合法	压杆法
1	165	12	3.8	200	12	4.4	4.6
2	165	12	3.8	135	10	3.6	3.5
3	165	12	3.8	200	10	4.2	4.2
4	250	10	5.0	150	10	3.0	3.0
5	250	10	5.0	250	12	6.0	5.5
6	250	10	5.0	150	12	5.3	5.3
7	150	10	4.0	100	10	3.0	2.7
8	150	10	4.0	150	12	4.1	4.4
9	150	10	4.0	100	10	3.5	3.0

5 结论

通过台阶高度(孔深)及孔径计算抵抗线(排距)的重合法、压杆法两类计算公式, 是从不同角度出发推演出来的。重合法是排距分别由孔径和台阶高度变化确定重合范围, 并以此排距求出台阶高度、孔径变化后的新排距。压杆法是以压杆原理解析爆破中柱体运动状态, 以欧拉公式为基础, 推出孔深与抵抗线关系, 并结合条形药公式导出组间变化转换公式(即三元公式)。工程实例验证表明这两类公式实用性较强。两者比较而言, 重合法具有排距的计算和转换功能, 计算步骤多且偶尔出不重合现象等特点。压杆法更具简便性, 抵抗线在条件变化中的转换应用更具特点, 同时弥补了重合法出现“不重合”的

不足。

参考文献:

- [1] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [2] 丁汉堃, 西子阳, 王彦军. 露天浅孔爆破抵抗线计算方法的探讨及其应用[J]. 采矿技术, 2020, 20(5): 164-166.
- [3] 王平亮, 周伟, 杨海春, 等. 露天煤矿抛掷爆破合理布孔排距分析[J]. 煤炭工程, 2011(11): 72-74.
- [4] 朱忠节, 何广沂. 岩石爆破新技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1986.
- [5] 丁汉堃, 石磊. 斜线起爆网路与布孔方式应用探讨[J]. 采矿技术, 2021, 21(6): 138-140.
- [6] 高尔新, 杨仁树. 爆破工程[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.
- [7] 傅洪贤, 张幼蒂. 露天煤矿中的爆破剥离技术[J]. 中国矿业, 2001, 10(2): 38-39.
- [8] 何金保, 明星, 宋玉庆. 关于露天采矿边坡控制性爆破施工技术的探讨[J]. 世界有色金属, 2017(8): 177-178.
- [9] 周传波, 等. 岩石深孔爆破技术新进展[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018.
- [10] 黄勇. 浅论加强露天矿山采矿中的深孔爆破质量控制措施[J]. 建筑工程技术与设计, 2017(21): 2211.
- [11] 柯丽华, 陈魁香, 张光权, 等. 基于 DEMATEL-SEWM 云模型的露天矿爆破效果评价方法及应用[J]. 爆破, 2022, 39(2): 172-178.
- [12] 吕文伟, 史晨飞, 张禹. 露天煤矿松动爆破效果评价分析[J]. 露天采矿技术, 2022, 37(1): 94-97.
- [13] 韦年迎, 粟军恒. 陇集山灰岩露天矿中深孔台阶爆破技术优化[J]. 现代矿业, 2021, 37(1): 89-91+138.
- [14] 马力, 李克民, 孙健东, 等. 抛掷爆破一拉斗铲倒堆工艺台阶采掘带宽度优化[J]. 煤炭学报, 2017, 42(11): 2867-2874.
- [15] 高朋. 影响露天矿大孔径深孔爆破的质量因素分析[J]. 世界有色金属, 2019(11): 151-152.
- [16] 常治国, 薛婷婷, 陈亚军, 等. 岩体断层位置对洞室爆破效果影响[J]. 煤矿安全, 2015, 46(3): 41-43+47.
- [17] 张鹏. 白石湖露天煤矿的爆破作业改进方案[J]. 内蒙古煤炭经济, 2018(21): 3-4.