

文章编号: 1001-1455(2012)02-0211-05

露天煤矿的台阶高度对抛掷率的影响*

李祥龙¹, 刘殿书², 何丽华³, 栾龙发^{1,2}, 张智宇^{1,3}

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 北京 100083;

3. 昆明冶金高等专科学校矿业学院, 云南 昆明 650033)

摘要: 以黑岱沟露天煤矿为例, 在理论分析和现场实验的基础上, 探讨台阶高度对抛掷爆破效果的影响。现场实验结果表明: 爆堆最远抛距和抛掷率随台阶高度的增加而增大, 爆堆形态也变得更平滑; 随台阶高度的进一步增加, 抛掷率增大的幅度逐渐减小。当炸药单耗 $q=0.70 \text{ kg/m}^3$, 台阶高度 $H>37 \text{ m}$ 时, 随台阶高度的增大, 抛掷率的提高不明显, 甚至是停留在 47% 左右, 此时单靠提高台阶高度来获取较高抛掷率的方法将受采场条件和钻采机械设备的限制。

关键词: 爆炸力学; 台阶高度; 抛掷爆破; 露天煤矿; 爆堆形态; 抛掷率

中图分类号: O389; TD235.31

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

提高露天矿山的台阶高度是大型露天矿生产中一个十分重要的问题。长期以来, 我国露天矿山的台阶高度, 一般为 10~12 m。近年来, 许多露天矿, 特别是大型露天矿采用的穿孔、装载、运输设备不断更新, 为采用高台阶生产工艺提供了可能^[1-2]。台阶高度小, 已经严重限制了大型设备生产效率和矿山生产能力, 增大台阶高度可减少大型设备的移动, 提高生产效率, 改善破碎效果, 降低生产成本^[3]。台阶高度对抛掷爆破效果的影响是高台阶抛掷爆破中亟待解决的问题, 本文将依据现场高台阶抛掷爆破实验研究台阶高度对抛掷率的影响规律。

1 台阶高度对抛掷爆破效果的影响分析

1.1 抛掷率及其计算方法

抛掷率是指运用抛掷爆破技术将尽可能多的剥离岩石直接抛入采空区且不需要二次搬运的部分与抛掷爆破破碎岩石总体积的百分比, 在图 1 中即 A 部分岩石与抛掷爆破破碎岩石总体积的百分比^[4]

$$E_p = V_E / V_Z \quad (1)$$

式中: E_p 为抛掷率; V_E 为抛掷到空区且不需要二次运输的岩石体积; V_Z 为抛掷爆破破碎岩石的总体积。

显然, 抛掷率越大, 抛掷爆破效率越高, 这个指数直观反映高台阶抛掷爆破的经济效果, 也是评价抛掷爆破成败的重要指标。

1.2 抛掷爆破效果分析

露天矿抛掷爆破的目标将近可能多的上覆岩体抛掷出去, 成功与否决定于台阶高度 H 和采场宽度 B 。南非露天矿公司研究成果表明^[5-6], 抛掷量和台阶高度 H 与采宽 B 之比呈线性关系, 如图 2 所示。因此, 台阶高度越大, 抛掷量越大, 抛掷率越高, 抛掷单位体积岩体的费用也就越低。

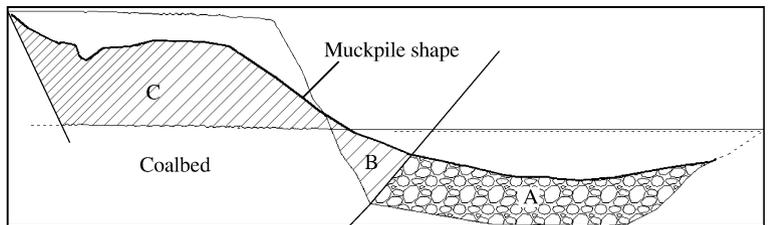


图 1 抛掷爆破爆堆剖面图

Fig. 1 A cross-sectional sketch of cast blasting muckpile

* 收稿日期: 2011-01-26; 修回日期: 2011-08-18

基金项目: 云南省科技厅面上自筹基金项目(KKSA201121083)

作者简介: 李祥龙(1981—), 男, 博士, 讲师。

1.2.1 增大台阶高度可提高炮孔利用率^[7]

露天矿深孔台阶爆破,从对岩石的不同破碎作用看,沿炮孔深度可分为 3 个部分:超深、填塞和装药。在一定范围内,超深和填塞高度并不随台阶高度增加而成比例增大。随着台阶高度增加炮孔装药空间所占的比例提高,因而炮孔利用率得到提高。

在其他条件不变时,增大台阶高度将使底部抵抗线增大,这时需要采用大直径倾斜深孔,或扩大深孔底部直径,或缩小抵抗线,相应地增大炮孔间距。总之,在增加台阶高度的同时,必须寻求相应的合理爆破参数^[8]。

1.2.2 增大台阶高度可改善破碎效果

爆破理论认为,延长炮孔中爆炸气体作用时间是增强爆破作用,提高破碎程度的一个主要途径。炮孔中爆炸压力随炸药的密度、爆速、装药高度变化的关系,可表示为

$$p = \frac{1}{8} \rho D^{\frac{8}{3}} \left(\frac{t}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \exp \left(1 - \frac{Dt}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

式中: p 为爆炸压力; ρ 为装药密度; D 为炸药爆速; L 为装药高度; t 为爆炸气体作用时间。

从上式可以看出,对于给定的 D 、 ρ 和 L ,存在 $P=f(t)$ 关系。所以在超深和填塞高度不变条件下,如果台阶高度变化, $P=f(t)$ 的具体函数关系也将变化。如图 3 所示,炸药的装药密度 $\rho=1.16 \text{ g/cm}^3$,爆速 $D=3\,600 \text{ m/s}$ 时,台阶高度由 10 m 变化至 45 m。爆炸压力 P 随作用时间 t 变化的关系,说明台阶高度愈大,爆炸作用时间愈长。从延长爆炸作用时间可增强爆破破碎效果来看,适当增大台阶高度是合理的。

1.2.3 增大台阶高度可提高抛掷距离^[9-12]

对于高台阶深孔抛掷爆破过程中,若不计空气阻力的作用,岩块仅受重力作用,将沿弹道轨迹运行。岩石抛掷堆积的落点和岩石抛掷前有相对高差 H ,抛掷体的抛掷距离 s' 为

$$s' = \frac{v^2}{2g} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2gH}{v^2 \cos^2 \varphi}} \right) \sin(2\varphi) \quad (3)$$

式中: φ 为岩石的抛掷角; v 为岩石爆破后抛掷的初速度。

由此可知,当抛掷初速度和抛掷角确定时,抛掷距离都随着台阶高度增加而增大。

台阶爆破的最远抛掷距离与台阶高度的关系为

$$L_m = kH \quad (4)$$

式中: k 为岩石系数; f 为岩石的普氏系数, k 的取值与 f 相关

$$k = \begin{cases} 1.5 \sim 2.0 & f < 6 \\ 2.0 \sim 2.5 & 6 \leq f \leq 12 \\ 2.5 \sim 2.8 & 12 < f < 20 \end{cases} \quad (5)$$

2 台阶高度对抛掷率的影响实验

2.1 实验数据采集与统计

采用 MDL 高精度激光扫描仪对坡顶面、煤顶板、煤底板、台阶坡面、抛掷爆破前坡面及采空区的扫描数据进行采集,并与抛掷爆破后爆堆扫描数据进行整合与可视化,最终得到爆堆形态三维数字化图。

在爆堆三维可视化图上每隔一个炮孔位置切一次剖面,统计该剖面上所包含的数据信息包括:台阶

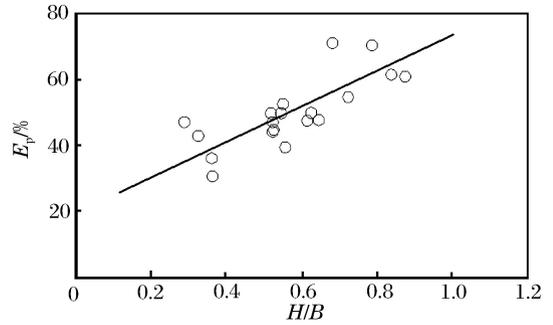


图 2 抛掷率和孔深与采宽比的关系

Fig. 2 Blast cast percentage varied with blast depth-width ratio

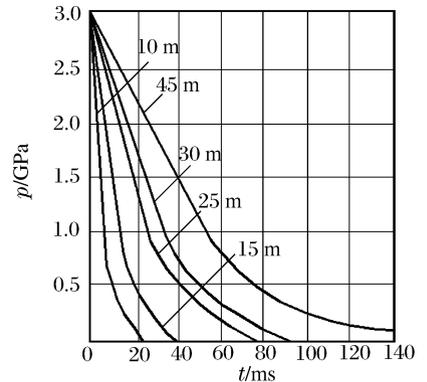


图 3 爆炸压力随作用时间变化的关系

Fig. 3 Explosion pressure varied with action time

高度 H 、孔距 a 、排距 b 、最小抵抗线 W 、最远抛距 L_m 、单耗 q 、岩石实方体积、岩石松散体积、有效抛掷岩石的松散体积、采空区上口宽度 L_k 、煤层厚度 H_c 、煤层坡面倾角 α 等参数。其中以剖面面积代表岩石体积，并假设爆堆各处岩石松散系数相等，岩石经倒堆后形成坡面倾角为松散岩体的自然安息角。

2.2 实验方案

实验设计炮孔直径 $\Phi = 311 \text{ mm}$ 、炮孔倾角 $\varphi = 65^\circ$ 、孔距 $a = 7 \text{ mm}$ 、排距 $b = 11 \text{ mm}$ 、最小抵抗线 $W = 7 \text{ m}$ 、采场宽度 $B = 80 \text{ m}$ 。

2.2.1 实验方案 1

选取第 18 次和第 19 次的统计平均炸药单耗 $q = 0.65 \text{ kg/m}^3$ ，选择 7 组剖面作为研究对象，各剖面台阶高度分别为：35.2、35.4、35.6、37.4、39.9、40.1、43.1 m，具体参数如表 1 所示。

2.2.2 实验方案 2

实验方案 2 选取第 13 次、第 22 次和第 29 次的统计平均单耗 $q = 0.70 \text{ kg/m}^3$ ，选择 11 组剖面作为研究对象，各剖面台阶高度分别为：28.4、29.8、29.9、31.8、33.8、34.3、34.5、35.2、35.3、36.4、37.5 m，具体参数如表 2 所示。

表中， V_A 为实方体积， ξ 为松散系数，其余各量同式(1)，P18-18 表示第 18 次实验的第 18 个剖面。

表 1 实验结果统计表 ($q = 0.65 \text{ kg/m}^3$)

Table 1 Statistical table of site test ($q = 0.65 \text{ kg/m}^3$)

No.	H/m	V_Z/m^3	V_A/m^3	V_E/m^3	L_m/m	ξ	$E_p/\%$
P18-18	35.2	3 474.9	2 825.6	964.5	84.4	1.23	27.76
P19-17	35.4	3 366.9	2 709.5	1 031.1	85.7	1.24	30.63
P18-17	35.6	3 588.6	2 793.3	1 105.6	86.6	1.28	30.81
P18-13	37.5	3 878.9	3 041.2	1 225.3	98.2	1.28	31.59
P19-10	39.9	3 890.1	3 108.0	1 284.1	102.2	1.25	33.01
P18-10	40.1	3 892.7	3 207.6	1 286.2	105.9	1.21	33.04
P18-6	43.1	3 979.6	3 353.9	1 323.9	109.1	1.19	33.27

表 2 实验结果统计表 ($q = 0.70 \text{ kg/m}^3$)

Table 2 Statistical table of site test ($q = 0.70 \text{ kg/m}^3$)

No.	H/m	V_Z/m^3	V_A/m^3	V_E/m^3	L_m/m	ξ	$E_p/\%$
P29-3	28.4	2 765.2	2 311.2	687.9	89.9	1.2	24.88
P29-14	29.8	2 785.5	2 293.8	827	91.4	1.21	29.69
P29-9	29.9	3 040.9	2 369.9	969.3	91.8	1.28	31.88
P29-17	31.8	2 953.7	2 418.8	1 004.5	94.1	1.22	34.01
P13-25	33.8	3 496.1	2 883.6	1 279.3	101.0	1.21	36.59
P13-27	34.3	3 156.0	2 471.8	1 255.4	102.3	1.28	39.78
P13-22	34.5	3 174.9	2 657.8	1 287.7	118.6	1.19	40.56
P22-1	35.2	3 343.2	3 069.9	1 473.6	127.2	1.09	44.08
P22-5	35.3	3 824.9	3 073.9	1 746.1	127.5	1.24	45.65
P22-6	36.4	3 773.4	3 015.4	1 757.8	130.1	1.25	46.58
P22-7	37.5	3 637.0	2 994.7	1 698.2	131.3	1.21	46.69

2.3 实验结果分析

选择表 2 与表 3 中数据对应作图，台阶高度 H 对最远抛距 L_m 的影响规律如图 4 所示，对抛掷率 E_p 的影响规律如图 5 所示。由图 4 和图 5 可以看出，爆堆最远抛距和抛掷率随着台阶高度的增加而增大。

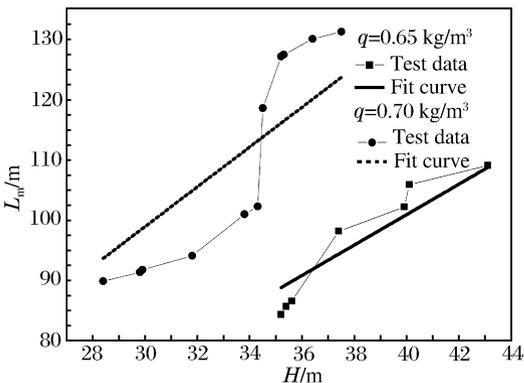


图 4 L_m 随 H 变化关系图

Fig. 4 Relations between L_m and H

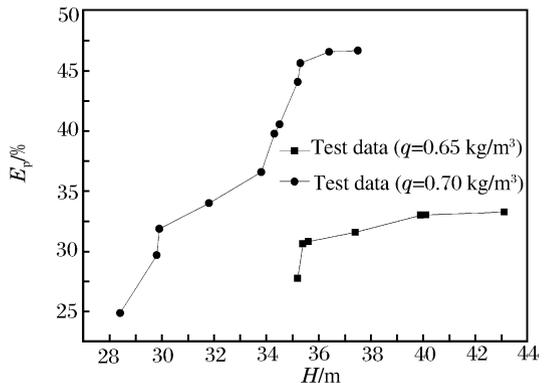


图 5 E_p 随 H 变化关系图

Fig. 5 Relations between E_p and H

列举表 2 中 P22-6 和 P29-3 爆堆作为说明，前者台阶高度大于后者，爆堆较平滑，表明台阶上下各点岩块移动速度差较小，增大台阶高度使得炸药在炮孔中能量分布较合理并得到有效利用。采空区内

爆堆厚度增加,抛入采空区的岩石量大,抛掷效率高,易于场地平整和拉斗铲作业。

当抛掷爆破其它参数一定时,随着台阶高度的增加,抛掷率增大的幅度逐渐减小。表明当台阶高度增大到一定的值以后,再增大台阶高度对抛掷率提高影响开始减弱。图 5 中,当 $q=0.70 \text{ kg/m}^3$, $H>37 \text{ m}$ 时,随台阶高度增加抛掷率提高程度不大,甚至停留在 47% 左右,所以适当增加台阶高度能提高抛掷率,改善抛掷爆破效果。单靠提高台阶高度来获取较高抛掷率的方法受采场条件和钻采机械设备的限制,如台阶过高易使台阶坡面塌方,给下一循环布孔设计和钻孔带来困难,同时给出煤作业设备和人员安全带来隐患。

当台阶高度相同时,提高炸药单耗可明显提高抛掷率和爆堆前沿抛距。比较表 1 和表 2 可以明显看出,当台阶高度同为 37.5 m 时, $q=0.70 \text{ kg/m}^3$ 时, $L_m=131.3 \text{ m}$, $E_p=46.69\%$; $q=0.65 \text{ kg/m}^3$ 时, $L_m=98.2 \text{ m}$, $E_p=31.59\%$ 。依据弹道理论,随着台阶的增高,抛掷距离也会增加,因为自由落体下落时间为 $t=\sqrt{H\cos\varphi/g}$,则下落时间的增量与水平向平均速度之积就是抛掷距离的增加量。

L_m 和 H 的拟合结果表明 L_m 和 H 存在线性关系,符合式(4)描述的线性关系。黑岱沟露天煤矿爆区岩体的可爆性为中爆和易爆岩体, f 普遍小于 6,然而 k 的取值范围:当 $q=0.70 \text{ kg/m}^3$ 时, $k=2.96\sim 3.61$;当 $q=0.65 \text{ kg/m}^3$ 时, $k=2.40\sim 2.64$,均大于式(4)中所定义的 $k=1.5\sim 2.0$ 。对于高台阶抛掷爆破,因为爆破的目的不同,为了提高抛掷率,采取较大的平均单耗,增强了抛掷效果,提高了抛掷距离,所以随着单耗的增加系数 k 增大。

3 结 论

(1)爆堆最远抛距和抛掷率随着台阶高度的增加而增大,最远抛距 L_m 和台阶高度 H 存在线性关系 $L_m=kH$ 。当 $q=0.65 \text{ kg/m}^3$ 时, $k=2.4\sim 2.64$,当 $q=0.70 \text{ kg/m}^3$ 时, $k=2.96\sim 3.61$,随着单耗的增加系数 k 增大。

(2)随着台阶高度增大,爆堆变得更加平滑,表明台阶上下各点岩块移动速度差较小,岩体位移和能量沿台阶高度的分布越来越均匀。并且采空区内爆堆厚度增加,抛入采空区的岩石量大,抛掷效率高,易于场地平整和拉斗铲作业。

(3)当抛掷爆破其他参数一定时,随着台阶高度的增加,抛掷率提高的幅度逐渐减小。当台阶高度增大到一个定值以后,再加大台阶高度对抛掷率提高的影响不大;当 $q=0.70 \text{ kg/m}^3$ 、 $H>37 \text{ m}$ 时,抛掷率的提高幅度很小,甚至停留在约 47%,所以适当增加台阶高度能提高抛掷率,改善抛掷爆破效果。

参 考 文 献:

- [1] Ludwiczak J T. Blast casting: Don't let it carry you away[J]. Exploration for Rock Engineering, 1985,3(1):20-22.
- [2] 张凤鹏,金校元,冯夏庭. 台阶高度对露天矿爆破效果影响的三维有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(12):1835-1838.
ZHANG Feng-peng, JIN Xiao-yuan, FENG Xia-ting. 3D FEM analysis of the influence of bench height on open-pitmines bench blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,21(12):1835-1838.
- [3] 傅洪贤,李克民. 露天煤矿高台阶抛掷爆破参数分析[J]. 煤炭学报,2006,31(4):442-445.
FU Hong-xian, LI Ke-min. Analysis of high bench castblasting parameters in surface coal miines[J]. Journal of China coal society, 2006,31(4):442-445.
- [4] 张幼蒂,傅洪贤,王启瑞,等. 抛掷爆破与剥离台阶开采参数分析:露天矿倒堆剥离开采方法系列论文之四[J]. 中国矿业大学学报,2003,32(1):26-30.
ZHANG You-di, FU Hong-xian, WANG Qi-ru, et al. Casting blast and a lysis of mining parameters of stripping bench: Technical paper series for open cast method in surface mines (IV) [J]. Journal of China University of Mining& Technology, 2003,32(1):26-30.
- [5] Grippo A P. How to get more cast per blast[J]. Coal Age, 1984,89(12):63-69.

- [6] Dupree P D. Applied drilling and blasting techniques for blast casting at trapper nine-potential to save on overburden removal[J]. *Mine Engineering*, 1987,26(1):13-15.
- [7] 林德余,马万昌,王明林.露天矿高台阶爆破问题[J].*中国矿业*,1992,1(2):18-23.
LIN De-yu, MA Wan-chang, WANG Ming-lin. High bench blasting problem in open pit[J]. *China Mining Magazine*, 1992,1(2):18-23.
- [8] 高晓初,吴从师,宋新辉.露天矿台阶爆破合理微差间隔时间的研究与应用[J].*爆炸与冲击*,1992,12(4):350-356.
GAO Xiao-chu, WU Cong-shi, SONG Xin-hui. An approach to reasonably selecting the delay interval of bench blasting and its use[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1992,12(4):350-356.
- [9] 切尔尼高夫斯基 A A.定向抛掷爆破[M].史家培,译.北京,中国建筑工业出版社,1983.
- [10] 冯叔瑜.体积平衡法一定向爆破抛掷堆积计算[M].北京,科学技术出版社,1994:53-65.
- [11] 于亚伦,高焕新.用弹道理论模型和 Weibull 模型预测台阶爆破的爆堆形态[J].*工程爆破*,1998,4(2):1-6.
YU Ya-lun, GAO Huan-xin. Prediction of muckpile profile for bench blasting with ballistics model and Weibull's distribution model[J]. *Engineering Blasting*, 1998,4(2):1-6.
- [12] 高荫桐,孟海利,刘殿中.集中药包和分集药包爆破效果的实验研究[J].*工程爆破*,2004,10(1):59-62.
GAO Yin-tong, MENG Hai-li, LIU Dian-zhong. Experimental study on the effects of blasting with concentrated and sub-concentrated charges[J]. *Engineering Blasting*, 2004,10(1):59-62.

Influences of bench height of an open-pit coal mine on cast percentage*

LI Xiang-long¹, LIU Dian-shu², HE Li-hua³,

LUAN Long-fa^{1,2}, ZHANG Zhi-yu^{1,3}

(1. *Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;*

2. *School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;*

3. *Faculty of Mining Industry, Kunming Metallurgy College, Kunming 650033, Yunnan, China)*

Abstract: Heidaigou open-pit coal mine was chosen as an example to explore the influences of bench height on cast blasting in open-pit coal mines. Theoretical analyses and site tests were carried out, respectively. Investigated results display that with the increase of the bench height, the maximum cast distance of the blast muckpile as well as the cast percentage increases, and the shape of the blast muckpile becomes smoother, on the other hand, the higher the bench, the more slowly the cast percentage increases. When the unit explosive consumption is equal to 0.70 kg/m^3 and the bench is higher than 37 m, with the increase of the bench height, the cast percentage increases slowly, even stays at 47 percent. Here, it is subject to mine conditions and mining equipments, which simply raises the bench height to obtain a higher cast percentage.

Key words: mechanics of explosion; bench height; cast blasting; open-pit coal mine; blast muckpile shape; cast percentage

* Received 26 January 2011; Revised 18 August 2011

Corresponding author: LI Xiang-long, lxl00014002@163.com