

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.01.012

浅孔台阶爆破的合理性研究

杨琳¹,付天杰²,郭华杰²

(1. 深圳市安托山投资发展有限公司,深圳 518040;2. 中国铁道科学研究院,北京 100081)

摘要: 在台阶爆破中,台阶高度增加到一定值后,需保持孔排距不变,以优化爆破效果。在现场针对三种不同孔径及不同台阶高度的爆破进行试验,得到孔径76 mm的浅孔台阶爆破较深孔台阶单耗低,台阶高度小于12 m时,单耗随台阶高度变化大,当台阶高度大于12 m时,单耗变化率变小,此时宜进行爆前准备阶段爆破参数优化。为便于在现场直接根据台阶高度优化爆破参数,对三种不同孔径、不同高度台阶爆破后总结提出高抗比,并进行了长径比,长抗比的对比分析,提出其合理爆破系数。在邻近保护物位置爆破时,采用孔径76 mm的浅孔台阶爆破,装药长径比为25~43,对应长抗比为0.86~1.5,对应高抗比为1.59~2.27;对孔径76 mm的深孔台阶爆破,装药长径比为108~134,对应长抗比为3.28~4.08,对应高抗比为4~4.8;对孔径115 mm的深孔台阶爆破,装药长径比为22~64,对应长抗比为0.74~2.06,对应高抗比为1.5~2.78;对孔径140 mm的深孔台阶爆破长径比及高抗比不易控制,应用少。针对总爆破进行了年度成本累计分析,得到钻孔成本占到总成本的59%左右,并提出了降低爆破成本的方法。

关键词: 浅孔台阶爆破;高抗比;长径比;台阶高度;长抗比;大块率

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)01-0087-08

Study on Rationality of Shallow Hole Bench Blasting

YANG Lin¹, FU Tian-jie², GUO Hua-jie²

(1. Shenzhen Antuoshan Investment & Development Co., Ltd., Shenzhen 518040, China;

2. Chinese Academy of Railway Science Beijing, Beijing 100081, China)

Abstract: In bench blasting, when bench height increases to a certain value, the spacing between rows of holes should be kept constant to optimize the blasting effect. Three blasting experiments were conducted with different hole diameters and bench heights in the field. It is found that the shallow-hole bench blasting with a hole diameter of 76 mm has lower powder factor than that of the deep-hole bench blasting. More specifically, the change rate of powder factor is lower with the bench height more than 12 m compared to that with the bench height smaller than 12 m, at which time it is suitable to optimize the blasting parameters in the pre-blasting preparation stage. In order to optimize the blasting parameters according to the bench height on site, three post-blast cases with different hole diameters and bench heights were analyzed and the ratio of bench height/burden was presented. At the same time, the ratios of charge length/hole diameter and charge length/burden were compared in order to determine reasonable blasting parameters. When the blast is conducted near the object to be protected, a shallow hole bench blasting with a hole diameter of 76 mm is used. The corresponding ratios of charge length/hole diameter, charge length/burden and bench height/burden are in the ranges of 25~43, 0.86~1.5 and 1.59~2.27, respectively. In other cases, for the deep hole bench blasting with a hole diameter of 76 mm, the aforementioned ratios are in the ranges of 108~134, 3.28~4.08 and 4~4.8, respectively. For the deep hole bench blasting with a hole diameter of 115 mm, the aforementioned ratios are in the ranges of 22~64, 0.74~2.06 and 1.5~2.78, respectively. However, it is not easy to control the ratios of charge length/hole diameter and bench height/burden for the deep hole bench blasting with a hole diameter of 140 mm, and thus the application is rare. Finally, a cumulative annual blast cost analysis was carried out, and it is

found that the drilling cost accounts for about 59% of the total cost. Besides, a method to reduce the blasting cost was proposed.

Key words: shallow hole bench blasting; ratio of bench height/burden; ratio of charge length/ hole diameter; bench height; ratio of charge length/burden; block rate

在现在的大方量爆破中,为减少采准工作量^[1],一般采用较高的深孔台阶爆破^[2-8],尤其是在露天矿台阶爆破中,常识认为此种爆破方法速度快,单耗低,经济上较浅孔台阶爆破有优势,但可能大块率高,后续破碎、筛分、转运效率低,成本高,若台阶高度设置过低,单耗、炮孔直径和孔、排距不合理,又会造成工程进度缓慢,爆破振动增大,易冲孔、飞石等,导致经济不合理^[9-10]。因此,爆破时如何选用合理的台阶高度、炮孔直径、炮孔深度和装药量,以达到最低炸药单耗,同时达到最优爆破效果,是一直以来需要解决的问题。目前国内外露天矿山开采趋于机械设备大型化,为深孔台阶爆破提供了条件,并对5 m以上的深孔台阶通过采用空气间隔装药来提高爆破质量^[11],降低成本,本文通过研究药包作用范围与台阶高度的关系,在应用深孔台阶爆破的同时有效降低成本,对同类工程有借鉴意义。

1 应力场分析孔网参数

在台阶爆破中,条形药包的爆炸特征的研究结果表明:在炮孔周围的爆炸应力场,假设药包长径比为 δ ,当 $6 \leq \delta \leq 20$ 范围内时,等应力面的剖面图为一个椭圆形^[12,13],随着条形药包长度的增加,椭圆的长径比发生改变。考察能够有效破碎岩石的部分,应力波作用带从椭圆变化到两端椭圆形、中间圆柱形的形状(见图1)。

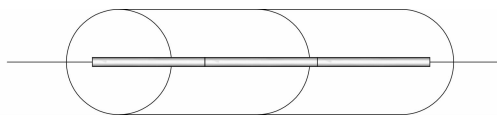


图1 条形药包的爆炸应力作用带

Fig. 1 The blasting stress action zone of the strip charge

图1中,药包长度增加到一定范围以后,爆炸应力波的有效作用半径不再继续增加,即在进行深孔爆破设计时,当台阶高度超过一定数值后,孔距和排距不宜相应的增加,否则将会出现大块率上升或松散不良的现象。也就是说,当台阶高度超过一定值

后,如果不改变钻孔直径和岩石条件,而只是增加炮孔深度,所选择的孔网参数 a 和 b 应该保持不变。

戈鹤川,张志毅提出了长抗比的概念^[14],即装药长度与抵抗线的比值,并指出在长抗比一定时,长径比变化不影响爆破效果,为此本次工程进行了长径比和长抗比的比较。同时提出了高抗比,即台阶高度与抵抗线的比值,以研究不同炮孔直径时台阶合理高度。

2 基本关系

炸药实际单耗是指一次爆破中炸药使用总量和爆破总方量的比值,是衡量爆破效果的一个重要指标,直接与爆破成本相关。

炸药实际单耗和台阶高度的关系可以从下式(1)中得到^[15]

$$\frac{Q}{V} = \frac{Q_0}{V_0} = \frac{q(H + L_1 - L_n)}{abH} = \frac{q}{ab} \left(1 - \frac{L_n - L_1}{H} \right) = A \left(1 - \frac{B}{H} \right) \quad (1)$$

式中: $A = q/ab$; $B = L_n - L_1$; Q 为每孔药量; a 为孔距; b 为排距; H 为台阶高度; L_1 为超深; L_n 为堵塞长度; V 为每孔爆破岩石方量; q 为线装药密度; A 和 B 是单耗和台阶高度关系公式参数。

上式表明炸药实际单耗和台阶高度的关系为单调上升曲线,随着台阶高度的增加,炸药实际单耗不断上升,相应的爆破成本增加。如图2所示。

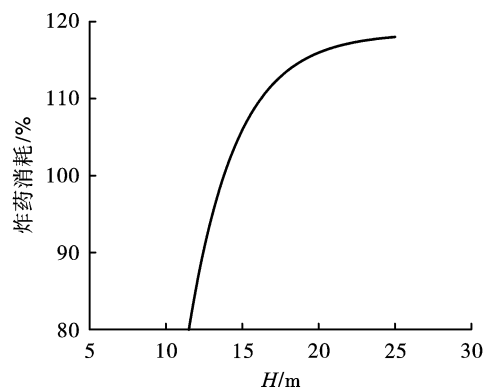


图2 炸药用量和炮孔深度的关系图(以 $H = 12$ m为100%)

Fig. 2 The relationship between the amount of explosives and the depth of the blasthole

收稿日期:2021-09-10

作者简介:杨琳(1972-),女,高级工程师、硕士学位,从事工商管理研究,(E-mail)68092366@qq.com。

通讯作者:郭华杰(1985-),男,博士研究生,从事岩土与爆破工程研究,(E-mail)765990023@qq.com。

3 分析

(1)大量的研究证明:当装药长度大于 20 倍炮孔直径时,即可以认为是条形药包。这就是说,对于 76 mm、115 mm 和 140 mm 的炮孔,装药长度分别超过 1.52 m、2.3 m、2.8 m 时装药就可以按照条形药包的理论进行设计计算。例如河北石人沟铁矿实际生产中使用的是 $\phi = 250 \text{ mm}$ 、 $H = 10 \text{ m}$ 、 $a = 7 \text{ m}$ 、 $b = 6 \text{ m}$ 、 $L = 12 \text{ m}$ 、 $L_n = 7 \text{ m}$ 的爆破参数,在磁铁石英岩 ($f = 12$) 矿体中爆破取得了成功^[16];文献[17]等瑞

典的著述中提到深孔爆破中要求堵塞长度和最小抵抗线一致,或较最小抵抗线稍大一些,符合爆破实际情况。因此在实际生产爆破中可以使用 $\delta \geq 20$ 当作条形药包的判据,并依此作为深孔爆破中最小台阶高度的计算依据。

(2)在实际工程中,根据岩石普氏系数,结合我们常用的两种岩石情况硬岩($f = 8 \sim 10$)和软岩($f = 4 \sim 8$),通过类比法和台阶高度结合公式(1)选定基准值如表 1 和表 2^[18,19]。见图 3。

表 1 台阶高度和炸药实际单耗的关系(软岩)

Table 1 The relationship between bench height and actual explosive powder factor (soft rock)

H / m	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
K / kg/m ³	0.250	0.267	0.280	0.291	0.300	0.308	0.314	0.320	0.325	0.329	0.333	0.337	0.340	0.343	0.345	0.348	0.350	0.352

表 2 台阶高度和炸药实际单耗的关系(花岗岩)

Table 2 The relationship between bench height and actual explosive powder factor (granite)

H / m	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
K / kg/m ³	0.342	0.374	0.399	0.418	0.435	0.448	0.460	0.470	0.478	0.486	0.492	0.498	0.503	0.508	0.512	0.516	0.520	0.523

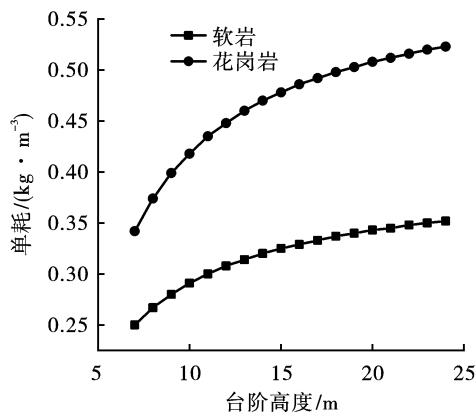


图 3 软岩和花岗岩中台阶高度和单耗关系图

Fig. 3 Relationship between bench height and powder factor in soft rock and granite

从计算结果来看,使用 12 m 的台阶高度比 8 m 时多用 20% 的炸药;16 m 的台阶高度比 8 m 时多用 30%;20 m 的台阶高度比 8 m 时多用 36%;25 m 的台阶高度比 8 m 时多用了 41%。

台阶高度小于 12 m 时,单耗随台阶高度变化较大,当台阶高度大于 12 m 后,单耗随台阶高度变化较小,因此当爆破振动要求不严格,但对单耗及飞石安全要求严格时,为加快爆破进度,控制爆破成本,在应优先选用台阶高度大于 12 m 的深孔台阶爆破。

4 工程实例分析

以安托山场平工程为例,安托山整治工程位于

深圳市福田区北环路南安托山片区,开挖山体原始地貌为丘陵地带,地形变化很大,山体以风化、中风化和微风化花岗岩为主,山体上部以风化石和表土为主,下部为微风化花岗岩,岩体节理发育,岩石结构中至细粒结构,大部分为灰色,局部肉红色,岩石坚固性系数 $f = 6 \sim 14$ 。山体北侧边坡高 26 m,距北环大道 20 m,山体南侧边坡高 30 ~ 92 m,距油罐区 14 m,另距民房仅 1 m,要求南北侧山体开挖后达到与邻近保护物相同标高,山体最大开挖深度达 138 m。

随着山体开挖后期山体地势降低,大规模深孔爆破对周边建筑爆破振动影响加大,钻孔孔径的选择直接影响到钻爆成本,一般孔径越大,钻爆成本越低,但对爆破振动和飞石控制不利,故山体距被保护物 100 m 范围内全部采用直径 $d = 76 \text{ mm}$ 的钻孔爆破,尤其在根坎处理部位,钻孔深度不小于 3 m;距离被保护物大于 100 m 区域范围时,采用了 140 mm 和 115 mm 的炮孔进行爆破,以便与 76 mm 的炮孔爆破进行比较,山体主炮区爆破以装铵油炸药为主,起爆药包用乳化炸药,现场不同孔径和不同深度的台阶爆破参数见表 3、表 4、表 5、表 6。

现场爆破时要求严格控制爆破飞石,以防飞石击中罐体,引发爆炸同时要求距山体 20 m 的发电机组振速小于 1 cm/s。

经现场多次试验已得到安托山片区爆破振动的

衰减规律见式(2)为

$$V = 87.29 \times \left[\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right]^{1.41} \quad (2)$$

式中: V 为振动速, cm/s; Q 为单段最大齐发药量; R 为爆源距离被保护物的距离。

表 3 台阶钻孔控制爆破参数 ($d=76$ mm)

Table 3 Bench drilling control blasting parameters ($d=76$ mm)

H/m	W/m	h/m	a/m	b/m	L/m	l/m	l'/m	Q/kg	$q'/(kg \cdot m^{-3})$	δ	η	θ
1.5	1.5	0.7	2.0	1.8	2.2	0.6	1.6	2.4	0.30	8	0.40	1.00
2.0	2.0	0.7	2.2	2.0	3.0	0.9	2.1	3.6	0.27	12	0.45	1.00
2.5	2.0	0.7	2.2	2.0	3.2	1.1	2.1	4.4	0.31	14	0.55	1.25
3.0	2.0	0.7	2.2	2.0	3.5	1.4	2.1	5.6	0.36	18	0.70	1.50
3.5	2.2	0.7	2.5	2.2	4.2	1.9	2.3	7.6	0.33	25	0.86	1.59
4.0	2.2	0.7	2.5	2.2	4.6	2.3	2.3	9.2	0.36	30	1.05	1.82
4.5	2.2	0.7	2.5	2.2	4.8	2.5	2.3	10.0	0.38	33	1.14	2.05
5.0	2.2	0.8	2.5	2.2	5.8	3.3	2.5	13.2	0.41	43	1.50	2.27
6.0	2.2	0.8	2.5	2.2	6.8	4.3	2.5	17.2	0.46	57	1.95	2.73
7.0	2.2	0.8	2.5	2.2	7.8	5.3	2.5	21.2	0.49	70	2.41	3.18
8.0	2.3	0.8	2.6	2.3	8.8	6.2	2.6	24.8	0.47	82	2.70	3.48
9.0	2.3	0.8	2.6	2.3	9.8	7.2	2.6	28.8	0.49	95	3.13	3.91
10.0	2.5	1.0	2.6	2.5	11.0	8.2	2.8	32.8	0.46	108	3.28	4.00
11.0	2.5	1.0	2.6	2.5	12.0	9.2	2.8	36.8	0.47	121	3.68	4.40
12.0	2.5	1.0	2.6	2.5	13.0	10.2	2.8	40.8	0.48	134	4.08	4.80

注:单位长度装药量按 4 kg/m 计算

表 4 深孔台阶钻孔控制爆破参数 ($d=115$ mm)

Table 4 Deep hole bench drilling controlled blasting parameters ($d=115$ mm)

H/m	W/m	h/m	a/m	b/m	L/m	l/m	l'/m	Q/kg	$q'/(kg \cdot m^{-3})$	δ	η	θ
5.0	3.4	1.0	3.2	3.0	6.0	2.5	3.5	20.0	0.35	22	0.74	1.47
6.0	3.4	1.0	3.4	3.2	7.0	3.5	3.5	28.0	0.37	30	1.03	1.76
7.0	3.5	1.0	3.4	3.2	8.0	4.4	3.6	35.2	0.40	38	1.26	2.00
8.0	3.5	1.0	3.5	3.4	9.0	5.4	3.6	43.2	0.40	47	1.54	2.29
9.0	3.6	1.0	3.5	3.4	10.0	6.3	3.7	50.4	0.42	55	1.75	2.50
10.0	3.6	1.1	3.5	3.4	11.1	7.4	3.7	59.2	0.45	64	2.06	2.78

注:单位长度装药量按 8 kg/m 计算

表 5 深孔台阶钻孔控制爆破参数 ($d=140$ mm)

Table 5 Deep hole bench drilling controlled blasting parameters ($d=140$ mm)

H/m	W/m	h/m	a/m	b/m	L/m	l/m	l'/m	Q/kg	$q'/(kg \cdot m^{-3})$	δ	η	θ
6.0	3.8	1.0	4.0	3.8	7.0	3.0	4.0	36.0	0.34	21	0.79	1.58
7.0	3.8	1.0	4.0	3.8	8.0	4.0	4.0	48.0	0.39	29	1.05	1.84
8.0	3.8	1.0	4.0	3.8	9.0	5.0	4.0	60.0	0.44	36	1.32	2.11
9.0	3.8	1.0	4.0	3.8	10.0	6.0	4.0	72.0	0.47	43	1.58	2.37
10.0	4.0	1.1	4.2	4.0	11.1	6.9	4.2	82.8	0.44	49	1.73	2.50
11.0	4.0	1.1	4.2	4.0	12.1	7.9	4.2	94.8	0.47	56	1.98	2.75
12.0	4.0	1.1	4.2	4.0	13.1	8.9	4.2	106.8	0.49	64	2.23	3.00

注:单位长度装药量按 12 kg/m 计算。

表中各字母表达意义如下: H 为台阶高度; W 为底盘抵抗线; h 为钻孔超深; L 为炮孔深度; l 为装药

长度; l' 为堵塞长度; a 为孔间距; b 为排间距; Q 为单孔药量; q 为炸药单耗; δ 为药包长径比; η 为长抗

比; θ 为高抗比。

表6 安托山片区不同安全震动速度的容许最大炸药量(单位:kg)

Table 6 The allowable maximum explosive quantity for different safe vibration velocities in Antuoshan area(unit: kg)

$[V]/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	10	20	50	75	100	125	150
1	0.07	0.6	9.2	31	74	144	249
2	0.30	2.6	40.4	136	323	631	1091
3	0.80	6.1	95.8	323	766	1496	2586
5	2.30	18.2	284.0	959	2272	4438	7669

从图4分析长径比和长抗比的关系知,对孔径76 mm的炮孔,除5~10 m台阶高度外,其余台阶爆破中二者相关性较好,变化趋势大小基本一致,即当台阶高度为3.5~5 m和10~12 m时,可用长径比或长抗比进行爆破效果的评判依据,如在3~5 m台阶高度时可用18~43的长径比或对应0.7~1.5的长抗比来衡量条形药包爆破效果。对115 mm的炮孔在5~10 m台阶高度范围内二者相关性较好,可互为表示。对140 mm的炮孔,在6~12 m台阶高度范围内二者相关性较差,所以对抵抗线不规则时,140 mm孔径的炮孔较少应用。

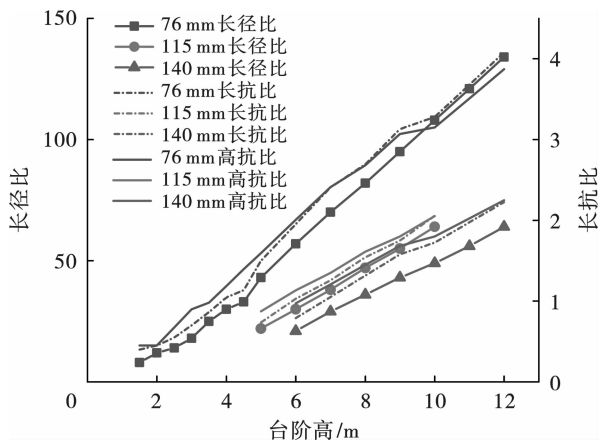


图4 长径比和长抗比随台阶高度变化关系图
Fig. 4 The relationship curve of δ/H and η/H

山体以孔径76 mm的台阶爆破为主,孔排距基本未变化,单耗与爆破台阶高度成正比,经现场多次爆破后发现,对孔径76 mm的浅孔台阶爆破长径比为25~43,对应长抗比为0.86~1.5,对应高抗比为1.59~2.27,爆破效果好;对孔径76 mm的深孔台阶爆破长径比为108~134,对应长抗比分别为3.28~4.08,对应高抗比为4~4.8,此时爆破岩石块度均匀,基本无大块率。现场在爆前准备阶段可快速结

合高抗比进行爆破参数优化。

对直径115 mm的深孔台阶爆破,孔排距基本未变化,长径比为22~64,对应长抗比为0.74~2.06,对应高抗比为1.5~2.78时为爆破效果好,大块率低,单耗低。对直径140 mm的深孔台阶爆破,爆破效果不及前两者好,大块多,抵抗线不容易掌握,易超过振动控制标准。

同时在现场爆破施工过程中,为更直观的通过台阶高度来保证条形药包爆破效果,引入高抗比,要求三种孔径76 mm、115 mm和140 mm的炮孔高抗比不小于1.58,即台阶高度与抵抗线比值,可达到条形药包的爆破要求,保证爆破效果。

现场爆破实测中,电厂电机处最大爆破振动响应为0.82 cm/s,达到了振动控制要求。

5 经济成本分析

(1)浅孔台阶爆破能够有效地减少设计误差,钻孔误差和前排抵抗线变化较小,即使出现较大的坡脚也容易处理,能够减少根底产生,提高爆破质量,装药方便,堵塞几率小,出现了卡孔也易处理,留下的根底的比较小,单耗低,缺点是影响爆破进度,由于钻孔成本高,单位方量岩石爆破准备时间较深孔长,单位方量岩石延米数多,而由表8知钻孔成本占总成本的一半多,钻孔成本较深孔高,总体年累计成本高,故只在距建筑物100 m振动保护范围内运用浅孔爆破。

(2)由于采用的是耦合装药,所以深孔台阶爆破单耗要比浅孔台阶高,但从图3知台阶高度超过12 m后,单耗随台阶高度增大变化率放缓,故现场对深孔爆破易控制其单耗,可实现爆后根据拉裂情况提前布孔,节省准备工作时间。而浅孔台阶爆破单耗随孔深及台阶高度变化大,在上一循环未及及时完成,下一循环自由面不明确的情况下,准备工作难度较深孔加大。

(3)山体以76 mm深孔爆破为主,在表7中开挖十年间,单耗平均只有0.3957 kg/m³,但日均爆破方量达到了1万 m³以上,有效加快了爆破进度。

(4)经济成本分析:表8中,钻孔成本占到总成本的一半多,所以要降低深孔爆破成本最有效的办法就是提高钻孔延米爆破量,并采用低成本的炸药,如铵油炸药;同时通过增大炮孔直径、提高炮孔线装药密度来改善爆破效果;选择合理孔网参数、堵塞长度和台阶高度。现场经验测算得到炮孔合理孔径和台阶高度分别为76 mm和10~12 m左右,爆破后块度均匀,大块率少,省去了破岩工效和低台阶重复

准备工序,爆堆集中,便于装运。

表 7 爆破数据汇总表
Table 7 Summary of blasting data

年份	(铵油+乳化)/kg 合计	钻孔延米/m			合计	次数	爆破方量/m ³			单耗/ (kg·m ⁻³)
		φ 76	φ 115	φ 140			花岗石	风化岩	合计	
1999	350 803	130 520	5422	1236	137 178	190	575 768	830 898	1 406 666	0.2494
2000	583 240	141 453	36 357	12 282	190 092	266	470 544	972 246	1 442 790	0.4042
2001	538 812	147 711	27 805	642	176 158	158	610 649	627 603	1 238 252	0.4351
2002	403 011	125 192	19 018	17	144 227	138	591 882	312 061	903 943	0.4458
2003	1 412 142	160 572	176 204	650	337 425	277	1 160 229	2 309 222	3 469 451	0.4070
2004	1 431 048	243 169	389 520	2045	634 734	324	2 129 313	1 176 398	3 305 711	0.4329
2005	1 063 458	263 309	70 013	1496	334 818	359	1 864 207	612 372	2 476 579	0.4294
2006	1 253 054	304 318	97 224	1236	401 542	566	2 055 399	1 067 331	3 122 730	0.4013
2007	824 774	240 284	52 918	24 121	317 323	353	2 210 211	113 849	2 324 060	0.3549
2008	1 002 562	205 909	81 729	34 235	321 873	426	2 486 684	203 132	2 689 816	0.3727
2009	756 144	170 074	45 486	34 867	250 427	441	1 914 393	12 856	1 927 249	0.3923
总计	9 619 048	2 001 991	996 272	110 355	3 245 796	3498	16 069 279	8 237 968	24 307 247	0.3957

表 8 2004 年累计成本表
Table 8 Table of cumulative costs in 2004

项目	钻孔成本/ (元·m ⁻³)	爆破成本/ (元·m ⁻³)	人工成本/ (元·m ⁻³)	年总成本/ (元·m ⁻³)
成本	3.40	2.28	0.15	5.83
成本比例/%	58.3	39.1	2.6	100

此外,采用高威力炸药扩大孔网参数也是降低深孔爆破成本的有效途径,如重铵油炸药,成本低,抗水性好,爆炸能量高,可实现机械化装填,进一步降低成本。见图 5。

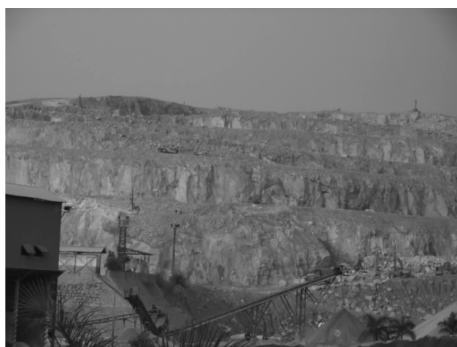


图 5 爆破台阶施工图
Fig. 5 Bench blasting sites

6 总结

(1) 台阶爆破中,当台阶高度增大到一定值后,孔内药包作用半径保持不变,此时要想获得理想的爆破效果,在不改变孔径的情况下,需保持孔排距不变。

(2) 经现场爆破总结提出高抗比的概念,并对不同孔径的浅孔和深孔台阶爆破提出了三种优化系

数,即在爆破振动要求严格的地段使用孔径 76 mm 的浅孔台阶爆破,装药长径比为 25 ~ 43,对应长抗比为 0.86 ~ 1.5,对应高抗比为 1.59 ~ 2.27;对孔径 76 mm 的深孔台阶爆破长径比为 108 ~ 134,对应长抗比为 3.28 ~ 4.08,对应高抗比为 4 ~ 4.8;对孔径 115 mm 的深孔台阶爆破,装药长径比为 22 ~ 64,对应长抗比为 0.74 ~ 2.06,对应高抗比为 1.5 ~ 2.78;在此爆破参数下,爆破效果好,大块率低,单耗低。孔径 140 mm 的深孔台阶爆破长径比及高抗比不易控制,振动强度大,爆破效果不佳,应用少。

(3) 浅孔台阶爆破单位方量岩石延米数要较深孔台阶高,而且钻孔成本占到总成本的一半多,使总成本较深孔台阶高,虽浅孔爆破振动和飞石较易控制,但严重影响工期,只用在距建筑物较近的保护范围内。

(4) 采用提高钻孔延米爆破量的方法来降低深孔爆破成本,此外采用低成本的炸药,增大炮孔直径、提高炮孔线装药密度等方法来改善爆破效果;现场经验测算得到炮孔合理孔径和台阶高度分别为 76 mm 和 10 ~ 12 m 左右。

参考文献 (References)

- [1] 曾宪文. 对地下采准工作量指标的看法[J]. 化工矿山技术, 1982(6):61.
[1] ZENG Xian-wen. Views on the workload index of under-

- ground mining [J]. Chemical Mining Technology, 1982(6):61. (in Chinese)
- [2] 李建华,樊保龙,李立波,等. 露天深孔台阶爆破质量的模糊综合评价[J]. 爆破器材,2020,49(3):59-64.
- [2] LI Jian-hua, FAN Bao-long, LI Li-bo, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of blasting quality of open-air deep-hole bench [J]. Explosive Materials, 2020, 49(3):59-64. (in Chinese)
- [3] 杨超. 露天矿山台阶深孔爆破大块成因及解决措施[J]. 工程爆破,2019,25(6):32-37,55.
- [3] YANG Chao. Causes and solutions of large blocks in bench deep hole blasting in open-pit mines[J]. Engineering Blasting,2019,25(6):32-37,55. (in Chinese)
- [4] 李辰发,张中雷,何勇芳,等. 大型露天深孔台阶爆破炸药单耗选取的影响因素[J]. 工程爆破,2019,25(3):17-21.
- [4] LI Chen-fa, ZHANG Zhong-lei, He Yong-fang, et al. Influencing factors for the selection of explosive unit consumption for large open-air deep-hole bench blasting[J]. Engineering Blasting,2019,25(3):17-21. (in Chinese)
- [5] 马力,涂宇航,马成卫,等. 露天矿台阶深孔大孔距小排距爆破参数优化[J]. 中国科技论文,2019,14(5):506-509.
- [5] MA Li, TU Yu-hang, MA Cheng-wei, et al. Optimization of blasting parameters for benchped deep hole large hole spacing and small row spacing in open-pit mine[J]. Chinese Science and Technology Papers, 2019, 14(5):506-509. (in Chinese)
- [6] 周咸领,于绪杰,赵君,等. 深孔爆破技术在不规则台阶中的应用[J]. 工程爆破,2019,25(2):38-44.
- [6] ZHOU Xian-ling, YU Xu-jie, ZHAO Jun, et al. Application of deep hole blasting technology in irregular benches [J]. Engineering Blasting,2019,25(2):38-44. (in Chinese)
- [7] 张中雷,王林桂,李厚龙,等. 复杂环境大区深孔台阶爆破技术[J]. 工程爆破,2019,25(1):19-23.
- [7] ZHANG Zhong-lei, WANG Lin-gui, LI Hou-long, et al. Deep-hole bench blasting technology in large area with complex environment [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(1):19-23. (in Chinese)
- [8] 孙鹏昌,卢文波,雷振,等. 单薄山体岩质高边坡爆破振动响应分析及安全控制[J]. 岩土工程学报,2021(4):1-10.
- [8] SUN Peng-chang, LU Wen-bo, LEI Zhen, et al. Blast vibration response and control of high rock slope belonging to thin mountain[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021(4):1-10. (in Chinese)
- [9] 余敏,林从谋,常方强,等. 岩质深基坑爆破振动放大效应测试研究[J]. 爆破,2017,34(4):27-32,65.
- [9] YU Min, LIN Cong-mou, CHANG Fang-qiang, et al. Research on amplification effect of blasting vibration in rock deep foundation pit [J]. Blasting, 2017, 34(4):27-32, 65. (in Chinese)
- [10] 叶海旺,汪柳俊,冉成,等. 分层装药爆破间隔堵塞长度优化研究[J]. 爆破,2017,34(2):26-33.
- [10] YE Hai-wang, WANG Liu-jun, RAN Cheng, et al. Optimization on interval stemming length of blasting in layered charge [J]. Blasting, 2017 34(2):26-33. (in Chinese)
- [11] 任少峰,杨静,张义平,等. 降低深孔台阶爆破大块率的试验研究[J]. 爆破,2018,35(4):58-62.
- [11] REN Shao-feng, YANG Jing, ZHANG Yi-ping, et al. Experimental study on reduction of bulk rate by deep holes bench blasting [J]. Blasting, 2018, 35(4):58-62. (in Chinese)
- [12] 高文学,刘运通. 岩石动态损伤机理及其应用研究 [C]//中国力学学会、中国工程爆破协会. 第七届全国工程爆破学术会议论文集,2001:6.
- [12] GAO Wen-xue, LIU Yun-tong. Research on dynamic damage mechanism of rock and its application [C] // Chinese Society of Mechanics, China Engineering Blasting Association. Proceedings of the Seventh National Engineering Blasting Conference, 2001:6. (in Chinese)
- [13] 杨年华,邓志勇. 条形药包爆炸应力波场特征 [C]//第五届铁路工程爆破学术会议论文集. 成都:中国铁道学会,1996:6-11.
- [13] YANG Nian-hua, DENG Zhi-yong. Characteristics of strip charge explosion stress wave field [C] // Proceedings of the Fifth Railway Engineering Blasting Academic Conference. Chengdu: China Railway Society, 1996:6-11. (in Chinese)
- [14] 戈鹤川,张志毅. 条形药包长抗比的提出及其作用 [C]//第六届全路工程爆破学术会议论文集. 北京:中国铁道学会,2000:37-42.
- [14] GE He-chuan, ZHANG Zhi-yi. Proposal and effect of strip drug package length-to-resistance ratio [C] // Proceedings of the Sixth Academic Conference on Engineering Blasting. Beijing: China Railway Society, 2000:37-42. (in Chinese)
- [15] 汪旭光. 爆破设计与施工 [M]. 北京:冶金工业出版社,2011:228.
- [15] WANG X G. Blasting design and construction [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011:228. (in Chinese)
- [16] 李晓东,向伟华. 石人沟铁矿井下开采中深孔爆破工艺关键技术的优化 [J]. 建筑工程技术与设计, 2017(21):4477-4477.
- [16] LI Xiao-dong, XIANG Wei-hua. Optimization of key technology of medium and deep hole blasting in underground mining of Shirengou Iron Mine [J]. Architecture Engineering Technology and Design, 2017(21):4477-4477. (in Chinese)
- [17] 张世雄. 现代岩石爆破技术 [J]. 西部探矿工程, 1992,4(3):48-53.

- [17] ZHANG Shi-xiong. Modern rock blasting technology[J]. West China Exploration Engineering, 1992, 4(3): 48-53. (in Chinese)
- [18] 李辰发, 张中雷, 何勇芳, 等. 大型露天深孔台阶爆破炸药单耗选取的影响因素[J]. 工程爆破, 2019, 25(3): 17-21.
- [18] LI Chen-fa, ZHANG Zhong-lei, HE Yong-fang, et al. Factors influencing the selection of explosive specific consumption in large open-pit deep-hole bench blasting [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(3): 17-21. (in Chinese)
- [19] 胡福祥, 蔡鸿起. 露天矿台阶高度的优化[J]. 金属矿山, 1998(2): 1-7.
- [19] HU Fu-xiang, CAI Hong-qi. The optimization of the bench height of open-pit mines [J]. Metal Mine, 1998(2): 1-7. (in Chinese)

英文编辑: 陈东方

(上接第 67 页)

- [9] 王志光. 坚硬顶板定向断裂强制放顶技术研究及应用[J]. 能源与环保, 2019, 41(2): 50-53.
- [9] WANG Zhi-guang. Research and application of forced roof release technology for directional fracture of hard roofs [J]. Energy and Environmental Protection, 2019, 41(2): 50-53. (in Chinese)
- [10] 弥壮壮, 张向荣, 李刚, 等. 煤矿岩巷爆破掘进周边质量控制技术研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(8): 103-106.
- [10] MI Zhuang-zhuang, ZHANG Xiang-rong, LI Gang, et al. Research on quality control technology around blasting excavation in coal mine rock tunnel [J]. China Mining, 2019, 28(8): 103-106. (in Chinese)
- [11] 岳中文, 张士春, 邱鹏, 等. 装药结构对切缝药包爆破效果影响的研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(10): 27-34.
- [11] YUE Zhong-wen, ZHANG Shi-chun, QIU Peng, et al. Study on the effect of charge structure on the blasting effect of slit packet [J]. Vibration and Impact, 2018, 37(10): 27-34. (in Chinese)
- [12] 岳中文, 田世颖, 陈志远. 炮孔间距对切缝药包爆生裂纹扩展规律的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11): 2460-2467.
- [12] YUE Zhong-wen, TIAN Shi-ying, CHEN Zhi-yuan. Influence of the interval between holes on crack propagation in slit charge blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(11): 2460-2467. (in Chinese)
- [13] 魏垂胜. 岩巷环向聚能及切缝爆破技术的研究[J]. 煤炭技术, 2020, 39(8): 108-110.
- [13] WEI Chui-sheng. Research on circumferential energy gathering and slit blasting technology in rock tunnel [J]. Coal Technology, 2020, 39(8): 108-110. (in Chinese)
- [14] 宇广鑫, 张瑞. 岩石巷道聚能管定向光面爆破技术应用[J]. 化学工程与装备, 2020(5): 191-192.
- [14] YU Guang-xin, ZHANG Rui. Application of directional light-surface blasting technology for rock roadway polyenergy tube [J]. Chemical Engineering and Equipment, 2020(5): 191-192. (in Chinese)
- [15] 吴振华, 褚凯, 王凯. 岩石巷道聚能管定向光面爆破技术的研究与应用[J]. 山东煤炭科技, 2019(9): 182-184.
- [15] WU Zhen-hua, CHU Kai, WANG Kai. Research and application of directional light surface blasting technology for rock roadway polyenergy tube [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2019(9): 182-184. (in Chinese)
- [16] 郭德勇, 赵杰超, 朱同功, 等. 双孔聚能爆破煤层裂隙扩展贯通机理[J]. 工程科学学报, 2020, 42(12): 1613-1623.
- [16] GUO De-yong, ZHAO Jie-chao, ZHU Tong-gong, et al. Mechanism of fracture extension penetration in coal seam by double-hole polyenergy blasting [J]. Journal of Engineering Science, 2020, 42(12): 1613-1623. (in Chinese)
- [17] 高林生, 郑学军, 王野驰, 等. 底板深孔爆破卸压机理及底鼓控制技术研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(8): 104-110.
- [17] GAO Lin-sheng, ZHENG Xue-jun, WANG Ye-chi, et al. Research on unloading mechanism of deep hole blasting of bottom slab and bottom drum control technology [J]. China Mining, 2020, 29(8): 104-110. (in Chinese)
- [18] 杨仁树, 王越, 林志博. 煤矿岩巷爆破掘进炮孔密度优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 183-191.
- [18] YANG Ren-shu, WANG Yue, LIN Zi-bo. Study on optimization of blast hole density for rock tunneling in coal mines [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 183-191. (in Chinese)

英文编辑: 黄刚