

# 露天金属矿山深孔台阶爆破技术研究与应用

石国瑞

中铁七局海外公司

**摘要:** 结合露天金属矿爆破案例, 陈述露天矿山深孔台阶爆破参数设计理论过程, 介绍了改善爆破效果的技术措施, 对孔底间隔器、分段间隔装药等措施进行了详细的论述。

**关键词:** 深孔台阶爆破; 微差延时逐孔起爆; 垂直孔预裂爆破技术; 多排孔微差挤压爆破

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.02.119

## 一、前言

穿孔爆破是露天矿山针对不可用采掘设备直接挖掘硬质矿岩的第一道工序, 爆破质量对后面的采装、运输、排卸、矿石加工等工序的效率和成本都有至关重要的影响, 爆破工程技术人员要选用合理的爆破参数和爆破方法, 从而达到爆堆形状和爆渣尺寸可控。

## 二、穿孔设备的配置

穿孔工作是在开采或剥离的工作平台上, 按照爆破设计确定的参数用穿孔设备钻凿炮孔, 以便装入炸药爆破。大型露天矿山一般选用重型牙轮钻为主要穿孔设备, 并配有潜孔钻进行边坡控制爆破和二次破碎穿孔。

### (一) 牙轮钻配备

牙轮钻机配备数量计算公式:  $N = \frac{Q}{Q_1 q (1 - e)}$

式中N为钻机台数; Q为设计矿山年度爆破量,  $m^3/a$ ;  $Q_1$ 单台设备年生产能力,  $m/a$ ; q每米炮孔的爆破量,  $m^3/m$ ; e费孔率, %。

单台设备年生产能力计算按照下述公式计算:

$$Q_1 = BD\eta_1$$

式中 $Q_1$ 为牙轮钻机年生产能力; D为牙轮钻机年工作台班数,  $\eta_1$ 为设备年出勤率, 根据实际按照0.8考虑。

牙轮钻机台班生产能力计算:  $B = VT\eta$

式中B为牙轮钻机的生产能力,  $m/(台 \cdot 班)$ ; v牙轮钻机钻进速度,  $m/h$ ; T班工作时间,  $h$ ;  $\eta$ 工作时间利用系数, 0.4~0.5。

该矿山的牙轮钻配置计算如下:

(1) 牙轮钻的台班生产效率:

牙轮钻钻凿不同硬度岩石的速度在35m/h~45m/h之间, 按照最不利条件计算台班效率。

$$B = VT\eta = 35 \times 8 \times 0.4 = 112m$$

(2) 单台设备的年生产效率:

$$Q_1 = BD\eta_1 = Q_1 = 112 \times 600 \times 0.8 = 53760m$$

D为牙轮钻机年工作台班数, 每年工作300天, 每天工作2个台班  $T = 300 \times 2 = 600$ ;  $\eta_1$ 为设备年出勤率, 根据实际按照0.8考虑。

(3) 牙轮钻的配备数量计算

该矿山每年设计爆破量为400万 $m^3$ , 需配备上述牙轮钻机台数(费孔率5%), 单孔爆破量q根据爆破参数设计为43 $m^3/m$ 。

$$N = \frac{Q}{Q_1 q (1 - e)} = N = 4000000 \div [53760 \times 43 \times (1 - 5\%)] = 1.82$$

, 取整2台。

### (二) 潜孔钻

该矿山配备阿特拉斯生产的内燃型PowerROC D55型, 工作最大倾斜角为20度, 配备的钻头直径为152mm。主要边坡爆破、二次破碎、较硬岩石补钻浅眼小孔等辅助爆破作业。

### 三、爆破器材

#### (一) 乳化炸药及炸药混装车

该矿山使用的乳化炸药有卷状和散装两种。卷状乳化炸药主要用于二次爆破, 有38\*560mm、32\*270mm、110\*540mm三种规格。卷状乳化炸药敏感度较高, 将外包装割开插入一发孔内雷管既能起爆。

散装乳化炸药主要用于中深孔爆破, 爆破当天由供应商站将原料混装于炸药混装车中运至爆破地点, 此种炸药的单价约为卷装炸药的50%。

#### (二) 导爆管雷管

该矿山选用非电工业雷管为主体的塑料导爆管雷管。主要分为孔内雷管和地表雷管两种, 孔内雷管通常放置到炮孔中下部用来引爆炸药。一般为500ms的延期时间, 有6m、7.5m、10m、12m、15m、20m等不同长度, 头部为8号工业雷管。可根据生产需要通常选不同规格的孔内雷管。

地表雷管用以将每个炮孔的孔内雷管按照一定连线方式连接起来, 并与起爆器材连接, 组成爆破网络。地表雷管为7.5米长, 延期时间有0ms、17ms、25ms、42ms、75ms, 头部为4号工业雷管。通过组合试验, 发现17ms(用于孔间)与75ms(用于排间)的地表雷管进行组合达到逐孔微差起爆网络, 爆破效果最佳。孔内雷管的导爆管为耐高温、耐油型管, 而地表雷管的导爆管为耐低温型。

#### (三) 起爆弹

散装乳化炸药较钝感, 单发孔内雷管无法将其引爆, 因此在中深孔爆破中要求孔内雷管多连接一发起爆

弹置于孔内协助引爆。孔内雷管起爆先引爆起爆弹，起爆弹爆炸后再引爆孔内填装的乳化炸药。

#### 四、爆破技术设计

##### (一) 露天矿台阶构成要素

穿孔爆破的台阶的要素如图1所示，H为台阶高度；

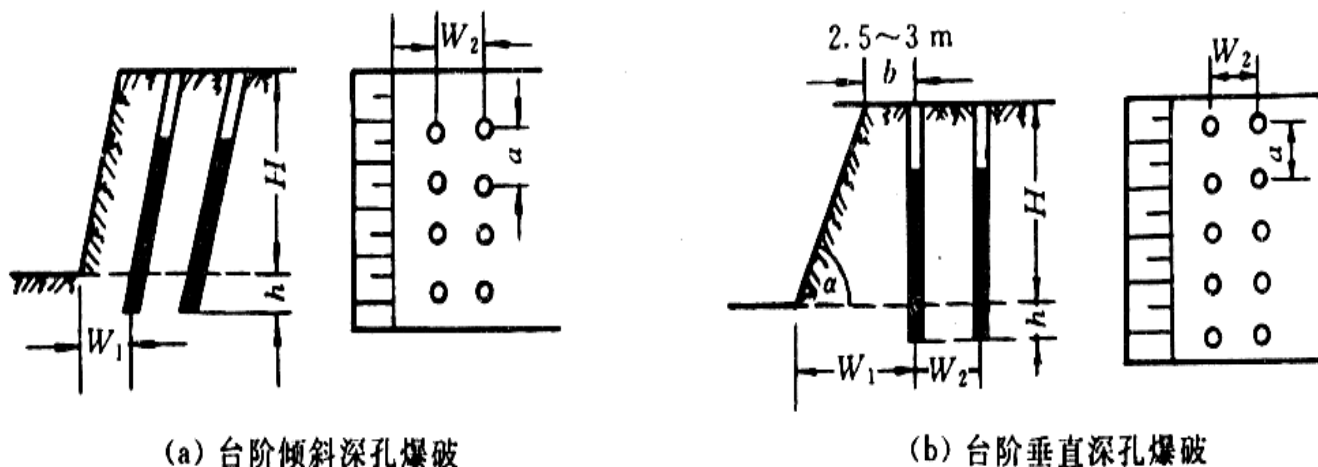


图1 中深孔爆破台阶要素图

##### (二) 布孔方式

优良的布孔方式即爆破成功了一半，孔位的布置对爆破效果影响很大。布孔方式有单排布孔和多排布孔两种，多排布孔又分方形、矩形及三角形（或称梅花形）三种。目前为了改善爆破质量和增大爆破规模，在矿山上广泛推广使用大区多排微差爆破技术。

##### (三) 孔径、孔深与超深

露天矿中深孔爆破的孔径与孔深主要取决于钻机类型、台阶高度等。孔深为台阶高度加超深深度。超深是指钻孔超出底盘标高的那一部分孔深，作用是克服台阶底盘的岩石夹制作用，从而爆破后形成平整的底部底盘，不残留根底，超深可用下列公式确定：

$$h = (0.15 \sim 0.35)W_1$$

当岩石坚硬时取大值，岩石较松软时取小值，如底盘有天然分离面或者底盘岩石需要保护，则可不留超深或者留下一定厚度的保护层。

##### (四) 底盘抵抗线

底盘抵抗线是影响露天爆破效果的重要参数。底盘抵抗线大会造成根底多、大块率高、后冲作用大，底盘抵抗线小则会浪费炸药、增加钻孔工作量、爆堆分散和产生飞石。

钻孔直径、坡面角度、台阶高度、炸药威力、岩石可爆性、爆破块度要求等因素都直接影响着底盘抵抗线的选取，多因素互相影响和作用很难用一个精确的数学公式描述，有以上三种经验公式进行参考计算，在实践中再不断调整，从而达到最佳效果。

##### (1) 按炮孔直径计算：

$W_1$ 为前排钻孔的底盘抵抗线； $\alpha$ 为台阶坡面角； $b$ 为孔边距； $h$ 为钻孔超深； $W_2$ 为排距； $a$ 为孔距。露天矿爆破的钻孔形式一般分为垂直钻孔和倾斜钻孔两种，一般在开采量较大时采用垂直钻孔，在软质岩石开采时可采用倾斜钻孔。

$$W_1 = nD$$

式中 $n$ 为系数，一般为孔径的20~50倍。

##### (2) 按台阶高度H计算：

$$W_1 = (0.6 \sim 0.9)H$$

当岩石较软、台阶高度大时，取大值；岩石硬度大，台阶高度小，取小值。

##### (3) 按照钻机安全作业的需要计算：

$$W_1 = H \geq H \cot \alpha + A$$

式中 $\alpha$ 为台阶坡面角， $A$ 为安全距离取不小于2.5m。该矿山15m台阶、250mm孔径的爆破设计，一般底盘抵抗线为6~9m。

##### (五) 排间距和孔间距

##### (1) 排间距： $W_2 = (0.8 \sim 0.9) W_1$

##### (2) 孔间距： $a = \frac{Q}{HWq}$ 式中 $Q$ 为炮孔的装药

量，kg； $H$ 为台阶高度，m； $q$ 单位矿岩的炸药消耗量， $\text{Kg/m}^3$ ； $W$ 为抵抗线，m，前排孔 $W=W_1$ ，后排孔 $W=W_2$ 。

##### (六) 堵塞长度

堵塞长度 $L$ 一般可按炮孔直径或底盘抵抗线确定，即

$$L = (20 \sim 30)D \text{ 或 } L \geq 0.75W_1$$

堵塞长度和堵塞质量，对改善爆破效果和提高爆破威力有重要作用，根据经验矿山大孔径深孔爆破的堵塞长度一般为5~8m，堵塞材料一般就地取材。

##### (七) 炸药单耗量

岩体结构和构造、岩石的坚固性、选用炸药种类、

施工技术和自由面的数量，对炸药的单耗都有影响，其值可以通过试验确定，并在施工过程中不断修正。表1列出了在两个自由面的条件下爆破，不同硬度岩石爆破，2号岩石铵梯炸药的经验单耗。

表1 炸药单耗经验值

普氏系数f	3~4	5	6	8	10	12	14	16	20
单耗kg/m <sup>3</sup>	0.43	0.46	0.5	0.53	0.56	0.60	0.64	0.70	0.79

根据当地的爆破工作经验，该矿山爆破炸药单耗在0.4kg/m<sup>3</sup>至0.6kg/m<sup>3</sup>之间，岩石松软、节理较发育取小值，反之取大值。另外根据统计分析，炸药的单耗随着装药结构、气候等不同而产生变化：

(1) 分段装药及带有孔底间隔器时比普通装药单耗可降低10%至15%。

(2) 雨季比旱季炸药单耗要增加10%左右。

(3) 压渣爆破比清渣爆破单耗增加10%至15%。

当前露天矿山有增大炸药单耗量的趋势，改善爆破效果，提高后续采装、破碎等效率，降低露天开采总体生产成本。

### 五、采矿对爆破工作的要求

#### (一) 有足够的爆破矿岩量

露天矿山生产过程中，将采区分为采装区、爆破区和穿孔区三个区段，并且以采装工作作为中心组织生产。为了确保挖掘设备的连续作业，工作面的爆破矿岩总量至少能满足挖掘机5~10昼夜的采装需求，各个区段的最小长度要满足一次爆破量的需求。

#### (二) 爆堆的形状和规格尺寸合理

爆堆的形状和尺寸对于采装和运输工作都有影响。爆堆高，挖掘机的安全作业难以保证；爆堆低，挖掘机不易于装满铲斗，降低了挖掘机的作业效率；前冲距离大，增加了挖掘前的清理工作、妨碍运输线路；前冲距离小，说明矿岩的碎胀不够，爆破效果不佳；爆破后台阶工作面的形状要规整，避免出现根底、伞岩等现象。

#### (三) 爆破块度要合理

矿岩块度是检视爆破质量的一项重要指标。块度过小，会增加穿孔工作量和炸药单耗；块度过大，不利于挖掘机采装。该矿山对爆破后矿岩的块度要求如下。

按照挖掘机铲斗容积确定允许块度：

$$d \leq (0.75 \sim 0.8) E^{\frac{1}{3}}$$

矿岩进破碎机时，按照破碎机入口最小尺寸确定允许块度： $d \leq (0.75 \sim 0.8) B$

式中E为挖掘机铲斗容积，B为破碎机入口最小尺寸。

超过上述规格的矿岩统称大块，露天矿山爆破大块率要小于5%。

### 六、改善爆破效果的技术措施

#### (一) 多排逐孔微差爆破

多排逐孔微差爆破指多排孔爆破各排之间、各孔之

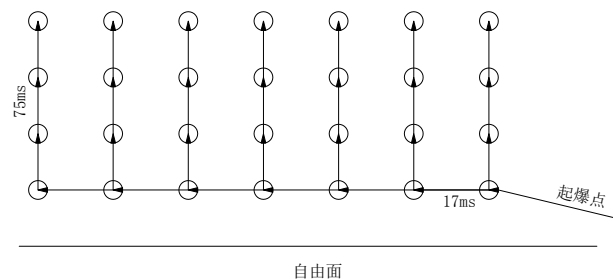
间以毫秒级时间微差间隔的爆破。与齐发爆破相比有以下优点：(1) 改善爆破质量，大块率、爆堆集中度、根底、后冲等指标都能达到理想的效果；(2) 可以扩大孔网参数，提高每米炮孔的爆破量，从而降低炸药单耗；(3) 单次爆破强度大，减少爆破次数，减少对爆破对其他工序的影响频率，提高采装运输效率；(4) 降低爆破地震作用，降低爆破对边坡和其他设施的地震危害。

微差时间大小与爆破方法、矿岩性质、孔网参数、起爆方式及爆破条件等因素有关，计算公式较多，介绍2个经验公式： $\Delta t = AW$   $\Delta t = (20 \sim 40)W / f$

式中 $\Delta t$ 为毫秒延期间隔时间，ms； $A$ 为与岩石性质有关的系数，一般2~5； $W$ 为底盘抵抗线； $f$ 岩石坚固性系数。冶金露天矿山常用的微差间隔时间为25~75ms，坚硬岩石取小值，软岩可选取大值。

该矿山所在地区供应商供应的地表雷管有0ms、17ms、25ms、75ms四种延时类型，孔内管延时为500ms，通过爆破试验，使用斜向起爆网络，分别选取17ms+25ms、25ms+75ms、17ms+75ms三种间隔方式组成起爆网络，并对爆破效果进行分析。发现17ms主控排+75ms雁行列的起爆网络爆破后破碎程度适中、平均块度40cm左右，爆堆形状较好利于装载，且装载过后无根底伞岩现象产生。

多排逐孔起爆示意图。



#### (二) 分段间隔装药

将深孔中的药柱分为几段，用炮泥、岩粉等材料将炸药隔开。分段间隔装药主要用于：

##### (1) 孔内微差爆破：

指在同一炮孔内进行分段装药且各段装药间实行微差爆破，具有微差爆破和分段装药的双重优点，和相邻炮孔互相作用，不仅达到水平面内微差，而且垂直面也有微差，矿岩受到多次爆破作用，改善爆破效果

##### (2) 为了使台阶中部、上部都受到炸药的直接作用，在台阶中上部进行分段装药的普通爆破。

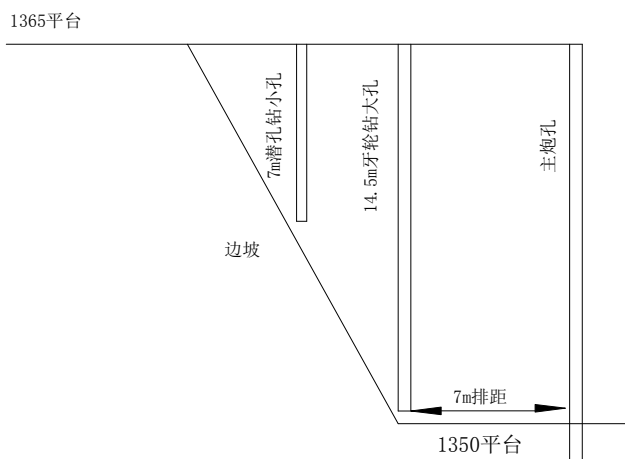
通过分段装药可以降低台阶上部的大块率，在台阶高度小于15m时，以分两段装为宜，分段过多，装药和起爆网路复杂。孔底装药量为装药总量的15%~35%，矿岩坚固取大值。

近年来在炮孔顶底部采用空气或水为间隔介质的间隔装药方法得到推广,用空气间隔的装药方法又称空气垫层或空气柱爆破。这种装药结构,可以降低爆炸起始压力峰值,使冲量沿着孔壁均匀分布,达到炮孔顶底部破碎块度均匀;延长孔内爆轰压力作用时间,使炮孔顶底部获得更大的能量,加强矿压的破碎。

### (三) 垂直孔预裂爆破技术

垂直孔预裂爆破就是简单易行的一种技术措施,爆破参数包括预裂孔直径、孔间距、线装密度等。预裂孔一般采用潜孔钻钻孔,炮孔直径为150~250mm,孔间距 $a=(8\sim 13)d$ , $d$ 为预裂孔直径,硬岩时取小值,不耦合系数取3.5~5.0,线装密度0.6~3.5kg/m,预裂孔超前主炮孔50~100ms起爆。缓冲孔距预裂孔的距离一般为距主炮孔的一半,缓冲孔的药量为主炮孔药量的50%~70%。下面以实例进行阐述。

该矿山在1365-1350平台靠帮爆破时,涉及1365-1350永久边坡,采用预裂爆破技术,近永久边坡处设置1排缓冲孔,在靠近边坡用潜孔钻打孔进行边坡预裂爆破。如附图3所示,靠近边坡6.5m(经计算不伤害边坡)处用潜孔钻打直径为152mm、孔深7m的预裂孔、孔间距4m(主炮孔间距的一半);第二排孔为缓冲孔,孔深14.5m没有超深,直径为250mm,孔间距可以适当调整,不大于主炮孔正常孔距;第三排孔为主炮孔。该爆区岩石为钙质泥岩,硬度系数6-8,主炮孔炸药单耗用 $0.4\text{kg}/\text{m}^3$ ,单孔装药340kg;缓冲孔装药取主炮孔的0.6,每孔装药200kg;预裂孔炸药单耗取 $0.2\text{kg}/\text{m}^3$ ,每孔装药20kg。



附图3预裂爆破示例图。

### (四) 多排孔微差挤压爆破

露天台阶深孔采用挤压爆破时,在台阶面前留有一定厚度的渣堆作为挤压材料。挤压爆破的原理是利用渣堆延缓岩体运动和碎裂时间,延长爆炸气体的静压作用,利用岩块的碰撞,进行辅助破碎。多排孔微差挤压爆破兼具微差爆破和挤压爆破的优点,在爆堆集中、根

底控制、块度均匀性、飞石距离、矿岩备采等方面有较好的工作性。

挤压爆破参数设计:

(1) 留渣厚度B:

根据实践经验,减少炸药单耗,留渣厚度2~4m;减少第一排孔大块率,留渣厚度4~6m;综合提高技术经济效益,10~20m。留渣厚度与松散系数、炸药单耗、抵抗线大小、台阶高度、岩石性质等因素有关。

(2) 单次爆破排数:

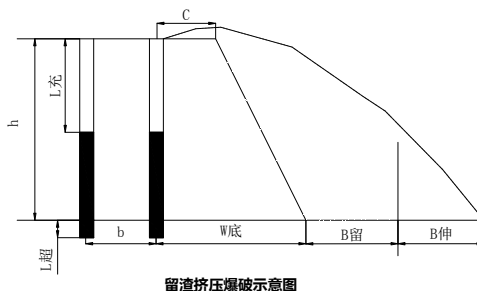
一般情况下露天留渣挤压爆破单次爆破应不少于3-4排不大于7排,排数过多增加炸药单耗,并且破坏爆破效果。

(3) 前排炮孔抵抗线:

适当减小最前排抵抗性,并加大超深。

(4) 各排孔装药量递增:

实践中有两种方法:第一排孔以后各排孔依次递增10%,若排数较多最后一排孔药量增加过大,影响经济效益;第一排炮孔比清渣爆破增加10%~20%药量,推移渣堆创造自由面,中间炮孔不增加药量,最后一排炮孔增加10%~20%药量,拉裂岩体,为下一次爆破提供自由面。



(5) 各排微差间隔时间:

比清渣爆破延时时间增加30%~60%。

## 七、结束语

绝大部分矿岩都需要进行松碎,爆破是露天矿山最常用的方法,爆破方法具有一次备采工作量大、对岩石适应性强等优点,但对技术管理和施工组织要求较高。通过合理的爆破参数设计、选用适当的起爆方法和运用合适的爆破器材,可以保证爆破质量。穿孔爆破作为露天矿开采的龙头工序,选用与矿山采掘能力匹配的穿孔设备、合理的划分工作区域,对提高整个矿山的生产效率和经济效益有至关重要的作用。

## 参考文献

[1] 文家荣. 露天矿山深孔台阶爆破技术的现状与发展趋势[J]. 中国金属通报, 2023(04): 4-6.  
 [2] 李胜林, 梁书锋, 李晨等. 露天矿山深孔台阶爆破技术的现状与发展趋势[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(05): 598-605.  
 [3] 罗毅超. 基于激光点云及地质数据的露天金属矿爆破后矿石界线预测研究[D]. 江西理工大学, 2019.