

文章编号: 1004-4051(2024)09-0186-09

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20230800

某石灰岩矿露天台阶爆破设计及安全分析

余业清

(四川省冶金设计研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 为了提高石灰岩矿开采效率, 确保爆破安全, 以四川省某石灰岩矿为研究背景, 基于理论分析和现场经验, 确定了台阶爆破方案, 并对台阶爆破孔网参数进行了设计。同时, 以爆破振动、爆破飞石、爆破冲击波和爆破噪音的安全允许距离为指标, 对爆破效果进行了分析评价。研究表明: 对于 120 mm 的炮孔, 爆破振动安全允许距离为 30.0 m; 爆破冲击波安全允许距离约为 193 m, 爆破噪音安全允许距离约为 196.9 m。相比于齐发起爆, 毫秒延时起爆可以有效减少爆破飞石的产生, 为防止某些炮孔由于与其临近炮孔之间的延时时间差过大而导致飞石加剧, 并考虑到岩石的挤压破碎效果, 计算确定 40 ms 作为各炮孔间的延期时间。此外, 预裂爆破可大幅降低爆破振动对露天矿边坡的危害。设计了预裂爆破方案及参数, 预裂孔起爆时间早于主爆孔 150 ms 起爆。爆破台阶自由面法向应背离公路和民房方向, 或者与公路和村庄走向平行, 能够有效保护附近构筑物; 非爆破开采应该滞后于爆破开采, 为爆破开采提供安全遮挡。研究成果为台阶爆破设计与施工提供一定指导。

关键词: 台阶爆破; 石灰岩矿; 爆破振动; 预裂爆破; 安全论证

中图分类号: TD872; TD235 **文献标识码:** A

Design and safety analysis of open-pit bench blasting for limestone mine

YU Yeqing

(Sichuan Metallurgical Design & Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to improve the mining efficiency and ensure the blasting safety of limestone mine, the bench blasting scheme and its parameters of hole network are designed based on theoretical analysis and field experience, taking a limestone mine in Sichuan Province as the research background. At the same time, the blasting effect is analysed and evaluated by the safety allowable distance of blasting vibration, blasting flying stone, blasting shock wave and blasting noise. The research results show that the safety allowable distance of blasting vibration is 30.0 m for 120 mm blasthole. The safety allowable distance of blasting shock wave is about 193 m, and the safety allowable distance of blasting noise is about 196.9 m. Compared with simultaneous initiation, millisecond delayed initiation can effectively reduce the generation of blasting flying stones. In order to avoid flying stone due to too large of delay time, as well as crack of rock, the delay time is calculated and determined as 40 ms between with each blasthole. In addition, presplitting blasting can greatly reduce the damage of blasting vibration to the slope of open-pit mine. The scheme and parameters of presplitting blasting are designed, the presplitting holes are initiated before the main holes for 150 ms. The normal direction of the free surface of the blasting bench should deviate from the direction of the road and the house, or parallel to the direction of the road and the village, which can effectively protect the nearby structures. Non-blasting mining should lag behind blasting mining to provide safe shelter for blasting mining. The research results provide some

收稿日期: 2023-11-06 责任编辑: 刘硕

作者简介: 余业清(1980—), 男, 汉族, 湖北蕲春人, 硕士, 主要从事非煤矿山设计等方面的工作, E-mail: 38616011@qq.com。

引用格式: 余业清. 某石灰岩矿露天台阶爆破设计及安全分析[J]. 中国矿业, 2024, 33(9): 186-194.

YU Yeqing. Design and safety analysis of open-pit bench blasting for limestone mine[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(9): 186-194.

guidance for the design and construction of bench blasting.

Keywords: bench blasting; limestone mine; blasting vibration; presplitting blasting; safety demonstration

0 引言

我国西南地区矿产资源丰富,富存石灰岩、煤、铁矿等多种矿产资源。随着经济发展水平的提高,研究高效的资源开采方法尤为重要。在岩石开采方法中,台阶爆破开采方法具有开采效率高、运用广泛等特点^[1-4],同时爆破开采过程中,合理地进行爆破参数优化可以显著提高矿山生产效率,但同样需要考虑爆破振动荷载对周边重要构筑物、民用建筑的影响程度。露天爆破开挖引起的爆破振动是影响矿山环境安全的问题之一,台阶爆破作业往往是大范围的岩石破碎工程,其产生的振动效应影响范围广、振动危害大,因此,对台阶爆破的振动效应进行预测显得尤为重要。爆破振动不仅会造成炸药能量不必要的浪费,还会影响边坡或建(构)筑物的稳定性,威胁到矿山企业的发展^[5]。目前,国内外均采用加速度、速度、位移等参数来描述爆破振动强度指标^[6-9]。为解决根底和大块两大制约采矿效率和效益的突出难题,采矿和爆破从业者们开展了深入的研究,进行了大量现场实践,总结出了一系列改善措施,取得了良好的成效^[10]。如酒钢西沟石灰石矿区采用合理增大超深、增大前排孔孔径及炮孔底部装填重铵油炸药等措施治理根底^[11];德兴铜矿通过提高炸药单耗、优选布孔方式、适当加大堵塞长度、合理设置延期时间来降低大块率和根底率^[12];鑫岩石料露天石灰石矿采用了增大炮孔密集系数、更换炸药品种、优化起爆网路、深孔间加密浅孔等技术措施来降低大块率^[13];牛苦山露天采场将起爆顺序调整为相邻两排同时起爆的方法降低大块率^[14],采用间隔装药结构、“V”形起爆网路、前排加密钻孔(或钻倾斜孔)的方法降低大块率和根底率^[15]。因此,合理进行爆破参数优化设计,并对爆破开采方案进行安全验证具有重要意义。本文针对四川省某石灰岩矿区开展露天台阶爆破设计及安全验证。

1 工程概况

1.1 矿区概况

该矿区东西长约6 000 m,南北宽约700 m,开采控制标高为+510~+340 m。矿区所在区域地貌属丘陵类型,为一近东西向延伸的长垣状脊岭,地貌总体上南高北低,北部有一槽谷与煤炭赋存区相隔,勘查区最高点位于南西角窑子湾附近山顶,标高约为622.70 m,最低点在勘查区中部龙蟠溪沟底,标高约

为330 m,勘查区相对高差约为292.70 m。矿区内地层出露较全,除泥盆系、第三系以外,从寒武系至第四系均有不同程度的发育,矿区内第四系分布覆盖率约85%,较为广泛,但厚度较薄。

1.2 矿区周边环境

矿区周边存在一些村庄,村庄主要位于采区的北侧、西北侧和东侧。根据《爆破安全规程》(GB 6722—2014)规定,设置200 m安全警戒线,部分房屋位于矿区外扩200 m线范围内,需要考虑采取搬迁安置措施。而对于200 m范围外的房屋则需要考虑爆破飞石安全和爆破振动的影响问题,需要进行合理的爆破设计,采用合适的爆破装药量及起爆顺序等措施,确保矿区200 m范围外的房屋安全。此外,矿区北面有省道通过,省道用平行线表示(图1)。该省道刚好位于矿区200 m安全范围的边缘内侧,因此,矿区开采也不可避免会对省道行驶车辆,以及道路带来安全影响。在省道的两侧,存在沿公路分布的部分房屋。

2 台阶爆破设计

2.1 爆破方案选择

台阶爆破效果跟施工环境有很大的关系^[16],如爆破区域岩石物理力学性质、工程地质和水文地质条件、爆破器材性能、施工工艺及爆破参数等^[17]。其中,爆破参数作为人为可控因素,科研工作者们进行了大量现场试验与优化工作^[18-20]。数码电子雷管作为一种安全可靠、高精度、智能型、环保型性能优良的起爆器材,可满足复杂爆破工程的减振要求,是实现大型爆破作业网路优化设计和干扰减振的理想爆破器材^[21]。

根据该矿区的开采技术条件,采用深孔台阶爆破方案。台阶高度为15 m,采用2号岩石乳化炸药,连续装药结构,数码电子雷管孔底反向起爆技术。考虑到矿区警戒范围为200 m,为保护公路过往行人、车辆,以及民房的安全;同时,为了减小爆破振动的危害,采用毫秒延时、逐孔起爆技术,合理控制单孔药量;此外,为了防止飞石对公路或民房安全造成危害,在靠近公路和民房的一侧,爆破台阶自由面法向应背离公路和民房方向,或者与公路和村庄走向平行,绝对不能让自由面正对着公路和村庄。

2.2 爆破参数设计

2.2.1 台阶爆破设计

台阶爆破设计装药量选择很重要,理论上来说,



图 1 矿区周边环境

Fig. 1 Surrounding environment of mining area

通过量纲理论推导,爆破药量计算的基本公式可以表示为式(1)。

$$Q = k_2 W^2 + k_3 W^3 + k_4 W^4 \quad (1)$$

式中: $k_2 W^2$ 为克服张力形成断裂面需要的能量; $k_3 W^3$ 为体积变形需要的能量; $k_4 W^4$ 为克服重力场需要的能量。

瑞典学者兰格福尔斯在《现代岩石爆破》一书中,提出的在一般岩石中采用松动爆破情况下的药量计算公式可以表示为式(2)。

$$Q = 0.07W^2 + 0.35W^3 + 0.004W^4 \quad (2)$$

分析表明:在最小抵抗线 $0.1 \text{ m} \leq W \leq 1.0 \text{ m}$ 时,式(2)第一项占需要总能量的 16% 以上,不能忽略。在抵抗线大于 20 m 时,式(2)第一项占需要总能量的比例小于 1%,可以忽略;此时,式(2)第三项上升到占需要总能量的 18% 以上,不能忽略。在最小抵抗线 $1.0 \text{ m} \leq W \leq 20.0 \text{ m}$ 时,爆破装药量可以忽略岩石的内聚力和自重,主要用于使介质体积变形所需能量,其药量计算公式可只采用式(2)第二项,计算见式(3)。

$$Q = k_3 W^3 \quad (3)$$

式(3)即是工程爆破常用的体积药量计算公式。由此可以认为,在工程中,最小抵抗线取 4.0~12.0 m 是合理和经济的。

根据《爆破安全规程》(GB 6722—2014)规定,对于深孔台阶爆破,最小安全允许距离根据设计确定,但是不得小于 200 m。由于矿区周边有公路、民房,搬迁压力大,因此,考虑把爆破警戒范围控制在 200 m,对于 120 mm 钻孔考虑采用倾斜孔布置。在实际设计中,对于 120 mm 炮孔,为了确保最小安全允许距离在 200 m 范围内,也可以根据式(4)进行计算。

$$R_1 = 100K_1 \cdot K_2 \frac{r^3}{W^3} \quad (4)$$

式中: R_1 为露天深孔爆破飞石安全允许距离, m; K_1 为深孔密集(邻近)程度系数,取值参考表 1 确定; K_2 为炸药爆能与抵抗线相关系数,取值参考表 2 确定; r 为深孔半径, cm; W 为第一排炮孔的最小抵抗线, m。

表 1 深孔密集(邻近)程度系数 (K_1) 值

Table 1 Deep hole density (proximity) coefficient (K_1) value								
深孔密集系数	0.5	1	2	3	4	5	6	7
K_1	2	1.5	1.0	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3

表 2 炸药爆能与抵抗线相关系数 (K_2) 值

Table 2 Explosive energy and line of resistance correlation coefficient (K_2) value									
抵抗线/m	1	2	3	4	5	6	7	8	9
K_2	0.3	0.6	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.0

计算得到第一排孔的最小抵抗线应该至少为 6.3 m 比较合适, 考虑到钻孔为底盘抵抗线可近似取 6.3 m, 120 mm 炮孔的爆破参数如下: 台阶高度 $H=15$ m、钻孔直径 $d=120$ mm、底盘抵抗线 $W_1=6.3$ m; 超深 $h=1.5$ m; 孔深 $L=H/\sin 70^\circ+h \approx 17.46$ m; 堵塞长度 $L_1=6.3$ m; 装药长度 $L_2=17.46-6.30=11.16$ m; 单孔装药量约为 125.31 kg; 排距 $b=W_1=6.3$ m; 孔距 $a=6.5$ m; 炸药单耗约为 0.204 kg/m³。装药结构如图 2 所示, 露天台阶爆破参数如图 3 所示。每次爆破 32 个炮孔, 一次爆破作业使用的药量为 4 009.92 kg, 炮孔布置如图 4 所示。

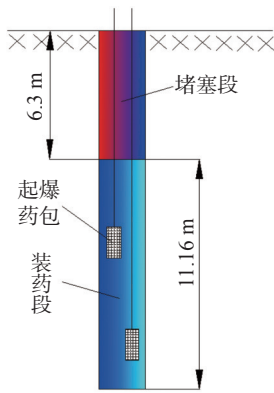


图 2 装药结构

Fig. 2 Structure of charging

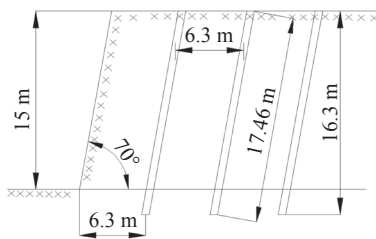


图 3 露天台阶爆破参数

Fig. 3 Parameters of open-pit bench blasting

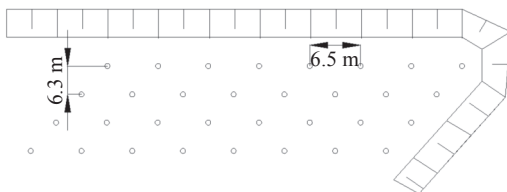


图 4 炮孔布置

Fig. 4 Layout of blasthole

爆破延时时间根据式(5)计算。

$$\Delta t = (30 \sim 40) \sqrt[3]{a/f} \quad (5)$$

式中: a 为炮孔间距, m; f 为普氏系数; Δt 为孔间延期时间, ms。

根据地质资料, 如果取 $f=1.5 \sim 4.0$ 、 $a=6.5$ m 计算,

可得孔间延期时间 Δt 位于 35~65 ms 之间; 此外, 考虑到数码电子雷管与导爆管雷管起爆方式的差异, 以及数码电子雷管起爆网路的特点, 为防止某些炮孔由于其临近炮孔之间的延时时间差过大而导致飞石加剧, 并考虑到岩石的挤压破碎效果, 选择 40 ms 作为各炮孔间的延期时间。起爆网路^[22]如图 5 所示。

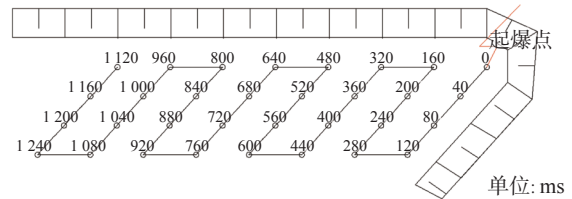


图 5 起爆网路

Fig. 5 Network of initiation

2.2.2 预裂爆破设计

预裂爆破通常是指沿着开挖轮廓布置密集炮孔, 采用不耦合间断装药或装填低爆速炸药, 在主爆区爆破之前起爆, 形成贯穿裂缝, 以减弱主体爆破对保留岩体的破坏, 使开挖面光滑平整的爆破作业。在爆破过程中, 对于需要设置隔振带的爆破区, 边坡开挖宜采用预裂爆破; 预裂孔应沿开挖边界布置, 炮孔倾斜角度应与设计边坡坡度相同, 炮孔底应处在同一标高上; 爆破孔直径可根据预裂爆破的台阶高度、地质条件和钻机设备确定; 预裂爆破应在露天台阶主体爆破前开始, 以减小爆破振动对露天矿边坡的危害^[21]。具体爆破设计如下: 孔径 $d=120$ mm, 台阶高度 $H=15$ m, 超深 $h=1$ m, 炮孔倾角 $\alpha=65^\circ$, 孔深 $L=17.55$ m, 孔距 $a=(8 \sim 12)d=1.0$ m, 堵塞长度 1.5 m, 不耦合系数 $K \approx 3.75$; 采用乳化炸药药卷直径 32 mm, 长 200 mm, 重 0.2 kg; 底部加强装药段长度 $L_3=0.2(L-1.5) \approx 3.21$ m, 中部正常装药段长度 $L_4=0.5(L-1.5) \approx 8.025$ m, 顶部减弱装药段长度 $L_5=0.3(L-1.5) \approx 4.815$ m, 装药结构如图 6 所示。底部加强段线装药密度 1.0 kg/m, 总装药量 3.21 kg; 中部正常装药段线装药密度 0.4 kg/m, 总装药量约 3.21 kg; 顶部减弱段线装药密度 0.2 kg/m, 总装药量 0.963 kg, 则单孔总装药量约为 7.4 kg, 单孔平均线装药密度为 0.46 kg/m。装药时将药卷绑扎在竹片上, 为确保药包的安全引爆, 沿药卷应布设连续导爆索。预裂装药完后, 用杂草或废纸堵至孔上部 1.5 m 处, 上部用黏土或穿孔粉进行填塞, 以保证气体的能量充分利用。

预裂孔可同时起爆, 延期时间取 0 ms, 也可以分批同时起爆, 各不同批次之间设置合适的延期时间, 根据式(5), 则不同批次相邻炮孔的延期时间 Δt 位于 18.9~35.0 ms 之间。孔外网路起爆采用电子雷管专

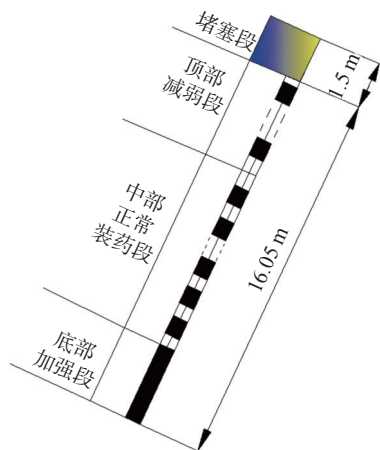


图6 预裂爆破装药结构

Fig. 6 Charging structure of presplitting

用双股铜母线,两发数码电子雷管与起爆器具组成起爆药包用于孔内起爆。当爆破靠近需要永久保留岩体或者边坡平台时,就需要考虑增加预裂爆破,或者在台阶爆破之前,先进行预裂爆破。有预裂爆破时,应先起爆预裂孔,再起爆主爆孔,其中,预裂孔起爆时间可早于主爆孔 150 ms。预裂爆破孔网参数、预裂孔布置、预裂爆破起爆网路分别如图 7~图 9 所示。

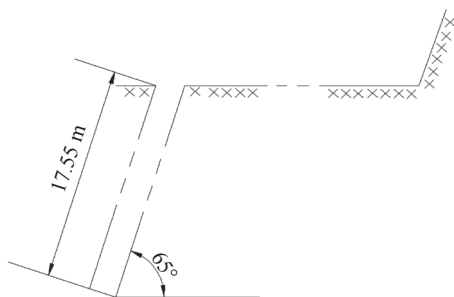


图7 预裂爆破孔网参数

Fig. 7 Parameters of presplitting holes

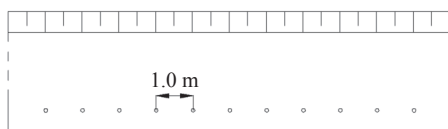


图8 预裂孔布置

Fig. 8 Layout of presplitting holes

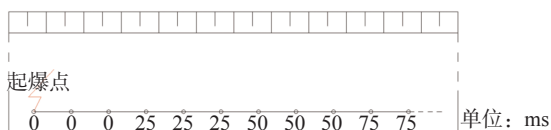


图9 预裂孔分批起爆网路

Fig. 9 Network of batch initiation of presplitting holes

3 爆破安全分析与防护措施

3.1 爆破振动安全允许距离分析

由图 1 可以看出,周围存在部分居民住宅,因此,

需要对爆破的安全允许距离进行预测分析。爆破振动安全允许距离的计算,根据《爆破安全规程》(GB 6722—2014)的规定,爆破振动安全允许距离用式(6)计算。

$$R_2 = \left(\frac{K_3}{V} \right)^{\frac{1}{\alpha_3}} Q^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

式中: R_2 为爆破振动安全允许距离, m; Q 为炸药量, 齐发爆破为总药量, 延时爆破为最大单段药量, kg; V 为保护对象所在地安全允许质点振速, cm/s; K_3 、 α_3 为与爆破点至保护对象间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数, 应通过现场试验确定; 在无试验数据的条件下, 可参考表 3 选取。

表3 爆区不同岩性的 K_3 值、 α_3 值Table 3 K_3 and α_3 values for different lithologies in the blast area

岩性	K_3	α_3
坚硬岩石	50~150	1.3~1.5
中硬岩石	150~250	1.5~1.8
软岩石	250~350	1.8~2.0

该石灰石矿台阶爆破设计的最大单响药量为 $Q=125.31$ kg; 矿区主要为软岩和中硬岩石, 岩石抗压强度 15~40 MPa。根据表 3, 以 $K_3=250$ 、 $\alpha_3=1.8$ 计算, 可以对爆破振速影响下的安全允许距离进行估算。经计算, 对于 120 mm 钻孔, 考虑频率 $f \leq 10$ Hz, 一般民用建筑的爆破振速应小于 2.0 cm/s (表 4), 则安全允许距离应大于 73.2 m。如果以 1.5 cm/s 的爆破振速计算, 则对于 120 mm 炮孔的安全允许距离约为 85.8 m。

此外, 对于露天台阶爆破, 还有可以采用式(7)验证爆破振动安全允许距离。

$$R_2 = K_4 \cdot \alpha_4 \sqrt[3]{Q} \quad (7)$$

式中: K_4 为爆破介质系数, 取值与岩土性质有关, 参考表 5; α_4 为爆破条件系数, 与装药类型有关, 根据不同爆破条件下的爆破装药类型取值, 参考表 6。

对于 120 mm 炮孔, 计算得到爆破振动安全允许距离约为 30.0 m。综合式(6)和式(7), 为了充分确保爆破振动的安全性, 应以式(6)的计算结果为准。

3.2 飞石距离分析

矿区爆破时, 飞石距离也必须引起重视, 理论上可用式(8)进行验算。

$$l = 2v_0^2 \cos^2 \alpha \frac{\tan \alpha + \tan \beta}{g} \quad (8)$$

式中: l 为飞石距离, m; v_0 为飞石初速度, m/s; α 为飞石抛射角, 对于垂直炮孔可取 0° ; β 为山坡坡角, ($^\circ$); g 为重力加速度, m/s^2 。

式(8)计算需要获取相关参数, 直接计算沿山坡

表 4 爆破振动安全允许标准

Table 4 Safe and permissible standards for blasting vibration

序号	保护对象	安全允许质点振动速度 $v/(cm/s)$			
		$f < 10\text{ Hz}$	$10\text{ Hz} \leq f \leq 50\text{ Hz}$	$f > 50\text{ Hz}$	
1	土窑洞、土坯房、毛石房屋	0.15~0.45	0.45~0.90	0.90~1.50	
2	一般民用建筑	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	
3	工业和商业建筑物	2.5~3.5	3.5~4.5	4.2~5.0	
4	一般古建筑古迹	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.5	
5	运行中的水电站及发电厂中心控制设备	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.9	
6	水工隧洞	7~8	8~10	10~15	
7	交通隧道	10~12	12~15	15~20	
8	矿山巷道	15~18	18~25	20~30	
9	永久性岩石高边坡	5~9	8~12	10~15	
10	新浇大体积混凝土(C20)	龄期: 初凝~3 d	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0
		龄期: 3~7 d	3.0~4.0	4.0~5.0	5.0~7.0
		龄期: 7~28 d	7.0~8.0	8.0~10.0	10.0~12.0

注：爆破振动检测应同时测定质点振动相互垂直的三个分量。

表 5 爆破介质系数(K_4)值

Table 5 Blasting medium coefficient (K_4) value

岩土性质	坚硬致密岩石	坚硬破裂岩石	砾石、碎石	砂石	黏土	回填土	流沙、泥煤
K_4	3	5	7	8	9	15	20

注：装药在水中或含水土壤中时，系数值增加 0.5~1.0 倍。

表 6 爆破条件系数(α_4)值

Table 6 Blasting condition coefficient (α_4) value

爆破条件	微量或松动爆破	爆破作用指数			
		标准爆破	1.5	2	3
α_4	1.2	1.0	0.9	0.8	0.7

爆破时飞石的安全允许距离较为困难。此外，根据《爆破安全规程》(GB 6722—2014)中的规定，沿山坡爆破时，下坡方向的个别飞散物安全允许距离应增大 50%。

为了合理控制飞石最小安全允许距离在 200 m 范围以内，可采用更小的炮孔直径。经计算，炮孔直径不能超过 80 mm，这导致设备选型受到限制；而降低炸药单耗也是一个可行的办法，该方法虽然会导致大块率变高，但是设备选型不受限制，同时也能确

保最小安全允许距离在 200 m 范围以内。虽然本文严格按照 200 m 的最小安全允许距离开展设计，但在爆破作业中也需采用必要的防飞石措施，从而充分确保爆破作业的可靠性和安全性。此外，非爆破开采应滞后于爆破开采，因为非爆破开采区域可提供一定的遮挡作用，进一步保证公路和民房安全。

为了验证爆破飞石的安全允许距离问题，可以继续采用式(4)进行验算。对于 120 mm 的炮孔，最小安全允许距离计算约等于 200 m，刚好位于最小安全允许距离 200 m 的临界点。表 7 为常规爆破下的单位炸药消耗量，对于矿区岩体爆破，合理的炸药单耗应该为 0.40~0.45 kg/m³，可见，在考虑 200 m 的最小安全允许距离条件下，导致炸药单耗比一般情况下小。理论上讲，炮孔越小，炸药单耗减少越小，因此，应该优先选择小孔径的炮孔。

表 7 常规爆破下的单位炸药消耗量 q 值

Table 7 Unit explosive consumption under conventional blasting q -value

岩石坚固性系数 f	0.8~2	3~4	5	6	8	10	12	14	16	20
$q/(kg/m^3)$	0.40	0.45	0.50	0.55	0.61	0.67	0.74	0.81	0.88	0.98

3.3 爆破冲击波和噪音安全允许距离评价

1) 爆破冲击波安全允许距离评价。对于露天台阶深孔爆破空气冲击波安全允许距离 R_3 ，可按式(9)

计算。

$$R_3 = K_5 \sqrt[3]{Q} \tag{9}$$

式中： R_3 为爆破空气冲击波安全允许距离； K_5 为爆破

危险系数,当人体在掩体内时, $K_5=5$, 无掩体时 $K_5=30$; Q 为装药量, kg。

对于 120 mm 的台阶爆破炮孔, 起爆方式为毫秒延期逐孔起爆, 单孔装药量为 125.31 kg。考虑完全无伤害, 那么可计算得到对于无掩体时, 人的最小冲击波安全允许距离约为: 150 m。

对于露天台阶深孔爆破, 还可以采用式(10)验算爆破空气冲击波安全允许距离 R_3 。

$$R_3 = K_6 \frac{\sqrt[3]{Q}}{(\Delta P)^{1/\alpha_6}} \quad (10)$$

式中: Q 为装药量, kg; ΔP 为保护对象的允许超压, Pa; K_6 为常数, $K_6=0.08$ (瞬发爆破), $K_6=0.03$ (毫秒延时爆破); 指数 α_6 , $\alpha_6=1.31$ (瞬发爆破); $\alpha_6=1.55$ (毫秒延时

爆破)。

考虑到绝对安全, 因此, 空气冲击波超压应确保人员完全无伤害, 根据《爆破安全规程》(GB 6722—2014) 则应不超过 0.02×10^5 MPa。代入式(10), 得到 R_3 约为 193 m。

2) 噪声安全允许距离分析。爆破噪声安全允许距离可按式(11)计算。

$$R_4 = \sqrt[3]{Q/(P/82)^{1/1.2}} \quad (11)$$

式中: Q 为炸药量, kg; P 为声压, 1 b/in^2 。

根据式(11), 对于 120 mm 钻孔, 可以计算得到噪声安全允许距离 R_4 约等于 196.9 m。根据上述分析, 台阶爆破警戒线范围如图 10 所示。

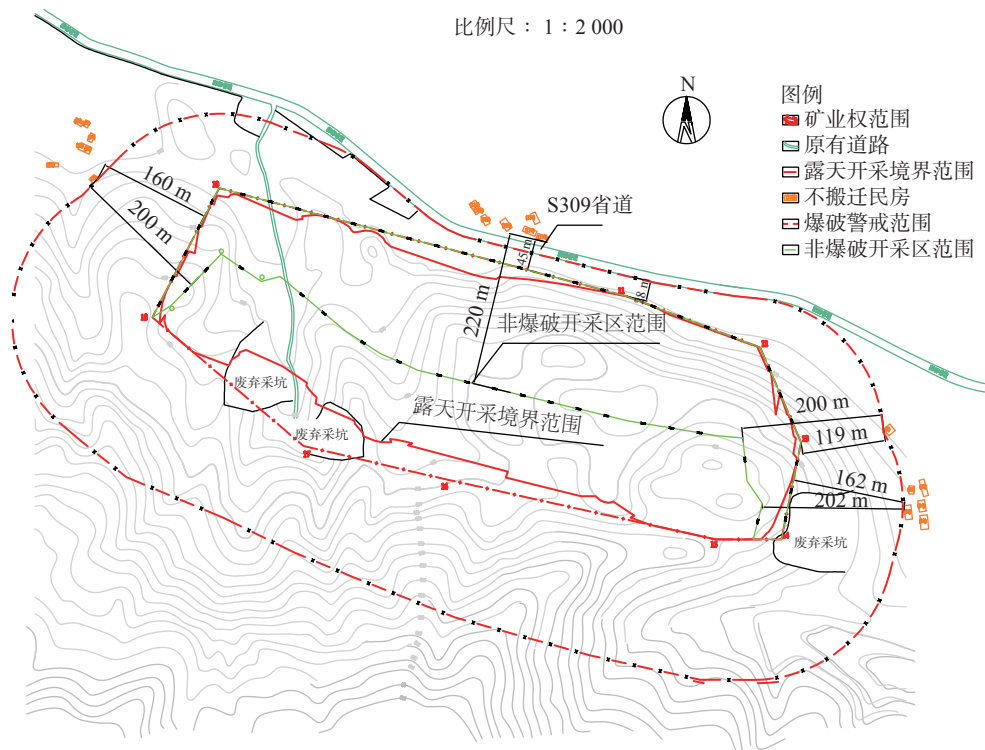


图 10 台阶爆破警戒线

Fig. 10 Alarm line of bench blasting

3.4 台阶爆破推进方向分析

考虑到矿区紧挨公路和民房, 为了确保矿区爆破作业的安全, 尤其是飞石的控制, 是矿山爆破作业需要重点考虑的因素。对于飞石的控制不仅与同时起爆的药量有关, 也与开采顺序密切相关。爆破台阶自由面法向应背离公路方向, 或者与公路走向平行, 绝对不能让自由面正对着公路或民房。因此, 台阶布置和开采顺序对于飞石控制也意义重大。台阶爆破应该从远离公路、民房的露天坑一侧开始, 然后往公路或民房一侧推进, 台阶的自由面应该背离公路、民房一侧设置或者与公路、村庄走向平行设置,

这样可以确保飞石的抛掷方向背离公路、最近民房或者与公路、最近民房平行, 最终确保飞石落在安全地带。图 11 中的箭头显示了爆破作业的推进方向。

由于 120 mm 炮孔的爆破设计考虑了 200 m 最小爆破飞石安全允许距离, 因此, 理论上爆破设计可以在矿区台阶爆破中采用, 现场爆破还需要结合地质情况考虑, 并进行必要的爆试验。同时在安全警戒范围内, 其噪音和冲击波也需满足 200 m 的安全范围要求。

在爆破作业时, 要做好炮孔堵塞工作, 以防止出现冲孔现象。由于爆破点周围环境比较复杂时, 可

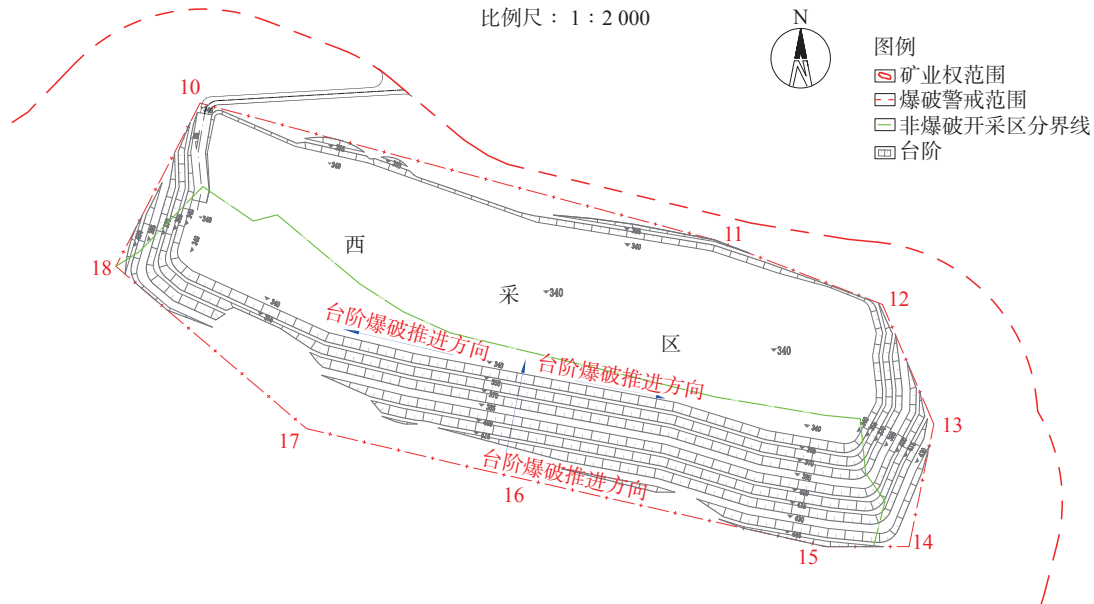


图 11 台阶爆破推进方向

Fig. 11 Advancing direction of bench blasting

以考虑对重点炮孔采取必要的覆盖措施。非爆破开采应该滞后于爆破开采,从而为爆破开采提供安全遮挡。非爆破开采应该至少滞后爆破开采 2 个台阶,从而提供至少 30 m 的安全遮挡。因此,一方面有非爆破开采区提供遮挡,另一方面台阶自由面法向背离或者平行公路和房屋走向,最后结合爆破参数设计,从而确保矿山台阶爆破安全。

4 结 论

本文以某石灰岩矿为例,对露天台阶爆破方法进行了设计优化,同时对爆破的安全性进行了分析。主要结论如下所述。

1) 设计了炮孔直径为 120 mm 的台阶爆破和预裂爆破参数。逐孔起爆方法可防止延时时间差过大而导致飞石加剧,能有效降低爆破危害。台阶预裂爆破先起爆预裂孔,再起爆主爆孔,可有效减小爆破振动对露天矿边坡的危害。

2) 对爆破振动的安全允许距离进行了分析。爆破振动安全允许距离为 30.0 m,最小安全允许距离约为 200 m,能够满足一般民用建筑爆破振速安全要求。炮孔越小,炸药单耗减少越小,应该优先选择小孔径的炮孔。

3) 对爆破冲击波安全允许距离和爆破噪音安全允许距离进行了分析。对于 120 mm 炮孔的台阶爆破,无掩体时,人的最小冲击波安全允许距离最大约为 193 m,噪声安全允许距离约为 196.9 m。

4) 为确保矿山台阶爆破安全,需考虑以下措施:非爆破开采应该滞后于爆破开采,为爆破开采提供安全遮挡。非爆破开采应该至少滞后爆破开采 2 个

台阶,提供至少 30 m 的安全遮挡。一方面有非爆破开采区提供遮挡,另一方面台阶自由面法向背离或者平行公路和房屋走向。

参考文献 (References):

- [1] 杨勃,陈庆凯,雷高.露天台阶爆破设计方法探讨[J].科技资讯,2014,12(7):70-71.
YANG Bo, CHEN Qingkai, LEI Gao. Discussion on the design method of open-air step blasting[J]. *Science and Technology Information*, 2014, 12(7): 70-71.
- [2] 刘泉,段峻峰,邹平,等.某石灰石矿露天台阶爆破对周边区域安全影响分析[J].采矿技术,2023,23(4):89-94.
LIU Quan, DUAN Junfeng, ZOU Ping, et al. Analysis of the safety impact of open pit blasting on the surrounding area of a limestone mine[J]. *Mining Technology*, 2023, 23(4): 89-94.
- [3] 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(4):4-6.
WEN Jiarong. Current status and development trend of deep hole step blasting technology in open pit mines[J]. *China Metal Bulletin*, 2023(4): 4-6.
- [4] 杨朝云,刘秋,周鹭,等.露天矿山深-浅耦合台阶爆破方法研究及应用[J].铜业工程,2022(6):24-28.
YANG Chaoyun, LIU Qiu, ZHOU Lu, et al. Research and application of deep-shallow coupled step blasting method in open-pit mine[J]. *Copper Engineering*, 2022(6): 24-28.
- [5] 郭浩.露天台阶爆破震动衰减规律的试验研究[D].鞍山:辽宁科技大学,2016.
- [6] 李庆利.露天台阶爆破振动速度与频率预测研究[D].北京:首都经济贸易大学,2010.
- [7] 李晋,陶铁军,雷振,等.考虑密集系数的台阶松动爆破振动速度预测模型[J].工程爆破,2023,29(1):48-54.

- LI Jin, TAO Tiejun, LEI Zhen, et al. Vibration velocity prediction model of bench loosening blasting considering dense coefficient[J]. *Engineering Blasting*, 2023, 29(1): 48-54.
- [8] 张锁珠. 露天矿山爆破振动危害与防治措施探讨[J]. *山西冶金*, 2023, 46(5): 254-256.
- ZHANG Suozhu. Exploration of blasting vibration hazards and preventive measures in open pit mines[J]. *Shanxi Metallurgy*, 2023, 46(5): 254-256.
- [9] 贺建强. 爆破振动对白铁矿露天边坡稳定性影响研究[J]. *工程建设*, 2023, 55(7): 24-30.
- HE Jianqiang. Impact research of blast vibration on stability of open pit slope in Baima Iron Mine[J]. *Engineering and Construction*, 2023, 55(7): 24-30.
- [10] 司士营, 谌向阳. 某露天矿山无超深台阶爆破实践[J]. *水泥工程*, 2022(3): 79-82.
- SI Shiying, ZHEN Xiangyang. Practice of non ultra deep bench blasting in an open pit mine[J]. *Cement Engineering*, 2022(3): 79-82.
- [11] 陈宽. 酒钢西沟石灰石矿露天矿深孔爆破根底产生的原因及治理[J]. *现代矿业*, 2020, 36(3): 78-83.
- CHEN Kuan. Causes and treatment of deep hole blasting in Jiugang Xigou Limestone Open-Pit Mine[J]. *Modern Mining*, 2020, 36(3): 78-83.
- [12] 陈洪健. 德兴铜矿降低大块率和根底率的措施探讨[J]. *技术与市场*, 2017, 24(10): 133.
- CHEN Hongjian. Exploration of measures to reduce bulk rate and root rate in Dexing Copper Mine[J]. *Technology and Markets*, 2017, 24(10): 133.
- [13] 王晓, 张晓华, 赵曰超. 降低结构面发育露天矿爆破大块率的技术措施[J]. *露天采矿技术*, 2020, 35(6): 52-55.
- WANG Xiao, ZHANG Xiaohua, ZHAO Yuechao. Technical measures to reduce blasting boulder rate of open-pit mine with structural plane development[J]. *Open Pit Mining Technology*, 2020, 35(6): 52-55.
- [14] 许登伟, 邹武辉, 朱荣成. 牛苦头露天采场爆破工艺优化[J]. *现代矿业*, 2021, 37(6): 103-104.
- XU Dengwei, ZOU Wuhui, ZHU Rongcheng. Optimisation of the blasting process in the Niukitou Open-Pit Quarry[J]. *Modern Mining*, 2021, 37(6): 103-104.
- [15] 白二涛. 露天矿山台阶爆破过程中产生大块和根底的解决办法[J]. *云南冶金*, 2022, 51(1): 21-25.
- BAI Ertao. Solutions of lump ore and tight bottom produced in the process of bench blasting of open pit mine[J]. *Yunnan Metallurgy*, 2022, 51(1): 21-25.
- [16] 常建平, 张鹏飞, 段军, 等. 高台阶孔内微差爆破参数的确定与爆破效果分析[J]. *金属矿山*, 2020(12): 81-87.
- CHANG Jianping, ZHANG Pengfei, DUAN Jun, et al. Determination of millisecond blasting parameters and analysis of blasting effect in high-step hole[J]. *Metal Mine*, 2020(12): 81-87.
- [17] 陈亚军, 白晓杰, 李永武, 等. 复杂岩体不对称 V 型斜线起爆网路爆破效果分析[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(5): 135-140.
- CHEN Yajun, BAI Xiaojie, LI Yongwu, et al. Analysis of blasting effect of asymmetric V-shaped oblique initiation network in complex rock mass[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(5): 135-140.
- [18] 万佳. 不良地质条件下控制爆破技术在某露天矿山开采中的应用[J]. *世界有色金属*, 2022(13): 37-39.
- WAN Jia. Application of controlled blasting technology in mining of an open pit mine under adverse geological conditions[J]. *World Non-ferrous Metals*, 2022(13): 37-39.
- [19] 张阳光, 李强, 林飞, 等. 基于灰色关联分析法的爆破效果影响因素敏感性分析[J]. *煤矿爆破*, 2020, 38(4): 12-15, 30.
- ZHANG Yangguang, LI Qiang, LIN Fei, et al. Sensitivity analysis on influencing factors of blasting effect based on grey correlation analysis method[J]. *Coal Mine Blasting*, 2020, 38(4): 12-15, 30.
- [20] 兰小平. 数码电子雷管逐孔起爆网路延时时间应用探讨[J]. *工程爆破*, 2019, 25(2): 57-66.
- LAN Xiaoping. Discussion on application of delay time in hole-by-hole initiation network of digital electronic detonators[J]. *Engineering Blasting*, 2019, 25(2): 57-66.
- [21] 周文斌, 承财政, 杨帆, 等. 数码电子雷管在露天矿爆破中延期时间优化探讨[J]. *爆破*, 2024, 41(1): 1-8.
- ZHOU Wenbin, CHENG Caizheng, YANG Fan, et al. Discussion on delay time optimization of electronic detonator in open-pit blasting[J]. *Blasting*, 2024, 41(1): 1-8.
- [22] 董英健, 郭连军, 徐振洋, 等. 露天矿台阶爆破对邻近巷道的振动监测及分析[J]. *中国矿业*, 2019, 28(6): 128-132.
- DONG Yingjian, GUO Lianjun, XU Zhenyang, et al. Monitoring and analysis of vibration of adjacent roadway by bench blasting[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(6): 128-132.
- [23] 崔年生. 露天深孔台阶爆破振动特征分析及安全控制[J]. *中国矿业*, 2023, 32(3): 86-90.
- CUI Niansheng. Characteristics analysis and safety control of open-pit deep-hole bench blasting vibration[J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32(3): 86-90.