

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.03.018

长九神山灰岩矿爆破开采滚石控制研究*

陈名英¹, 刘建程¹, 熊峻巍^{2a,2b}, 尹岳降¹, 卢文波^{2a,2b}, 陈明^{2a,2b}

(1. 中国水利水电第八工程局有限公司, 长沙 410004; 2. 武汉大学 a. 水资源与水电工程科学国家重点实验室; b. 水工岩石力学教育部重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 在矿山爆破开采中, 爆破滚石控制是安全生产的重要保障。依托于长九神山灰岩矿, 采用理论分析和模型研究相结合的方法, 阐述了矿山露天爆破开采过程中滚石产生的机理, 建立了简化的边坡滚石运动学模型, 计算了不同开挖高程下的滚石运动距离并预测了影响范围。结果表明: 在无防护措施时, 滚石最大运动距离可以达到 150 m 以上, 影响范围覆盖部分民房、农田及公路, 对矿区周边居民生产生活带来安全隐患。基于此, 针对长九神山矿的工程实际及生产需求, 研究了爆破开采过程中的滚石控制措施, 提出了预留岩墙的微差松动爆破方案, 辅以挡石墙和截石沟对滚石进行拦截, 分别从源头上和运动过程中对滚石运动危害进行控制; 同时, 设立了合理的警戒范围, 在矿权线 300 m 范围内采取搬迁措施。该技术为复杂环境下工程爆破滚石的有效防护提供了参考。

关键词: 爆破滚石; 滚石控制; 滚石运动; 矿山开采

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)03-0113-07

Study on Rockfall Control in Blasting Mining of Changjiu Shenshan Limestone Mine

CHEN Ming-ying¹, LIU Jian-cheng¹, XIONG Jun-wei^{2a,2b},
YIN Yue-jiang¹, LU Wen-bo^{2a,2b}, CHEN Ming^{2a,2b}

(1. Sinohydro Engineering Bureau 8 CO., LTD., Changsha 410004, China;

2. a. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science;

b. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering of Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The control of blasting rockfall is the crucial guarantee for safety production in the blasting process of mining exploitation. A comprehensive method of theoretical analysis and model research is used to study the control of blasting rockfall in Changjiu Shenshan Limestone Mine. The mechanism of rockfall in the blasting process is summarized. A simplified kinematic model is established, and the distance of rock movement is calculated and the influence range is predicted. The results show that without any control measures, the maximum movement distance of the rockfall can reach more than 150m, and the influence scope covers the surrounding houses, fields and highways. According to the engineering practices and production demands of Changjiu Shenshan Limestone Mine, millisecond loose blasting method with preserved dike, holding rockfall net and ditch safety system are proposed from the source and the process respectively to control the hazards of blasting rockfall movement. In the meantime, measures relocating out of precautionary areas within 300m of the mine right line are taken. The technology provides reference for rockfall protection engineering and blasting projects in other complex environments.

Key words: blasting rockfall; rockfall control; rockfall movement; mining

爆破是矿山开采中常用的手段^[1],在加快施工速度、提高生产效率的同时,也不可避免地带来了如振动、噪声、飞石、滚石、有毒有害气体等有害效应。其中,滚石引起的灾害在矿山梯段爆破开采中不容忽视。

国内外学者对滚石运动路径已进行了大量的研究计算。黄润秋等通过现场试验研究了边坡类型对滚石运动的阻滞作用^[2],试验发现70%的岩体停留于坡面,缓坡、覆盖层和坡面平台对滚石坡面运动的阻滞作用明显。张亚辉^[3]、吕庆等人将滚石简化为刚体^[4],进行运动学分析,分别提出了边坡滚石的运动路径和运动距离计算公式。李新翰通过AUTODYN建模进行爆破飞散物抛掷初速度研究^[5],并在此基础上进行运动分析;张云鹏提出在梯段爆破开挖中可以将柱状药包分解为球形药包,利用叠加原理对各点运动初速度进行矢量叠加。

滚石的冲击与防护也得到了广泛的研究。Pichler B等通过岩崩试验^[6],得到了一种被广泛运用的半经验的冲击力计算公式。王星等提出了滚石冲击力的LS-DYNA算法^[7],并与传统的脉冲算法、弹塑性算法等计算结果对比相吻合。冉永华基于重庆某高速公路边坡危岩崩塌的工程背景^[8],利用Rockfall软件进行落石运动路径分析,并在此基础上进行拦石网的设计。陶志刚通过对“平台滚石防护措施”和“平台V形槽滚石防护措施”的正交试验对比^[9],提出设计V形槽或者增加平台宽度均可以加速减小滚石运动距离。Zhu C和Wang D S等通过试验证明砂石垫层对落石冲击产生有效缓冲^[10],其中垫层厚度是最主要的设计参数。

在矿山露天梯段爆破开采作业中,爆落的岩块中不乏大体积岩石,且常伴有较大的初速度,在高陡边坡地形的影响下向坡底滚落,对矿山内设施设备、施工人员构成较大威胁,在本工程中甚至对周边农田、公路、民房带来安全隐患。因此,对爆破过程中滚石的运动路径和运动距离进行合理预测,并采取有效措施进行防护,是必须面对和亟待解决的重要问题。

1 工程背景

长九神山灰岩矿位于安徽省池州市西南方向约37 km处,池州神山北麓山脚,隶属池州市贵池

区牌楼镇青山村、神山村、济公村管辖,矿区范围面积5.14 km²。矿山以生产建筑骨料为主、水泥用原料为辅,投产后矿山即建成产能达7000万t的建筑石料生产线,开采规模与露天骨料加工规模都将成为世界第一。由于神山骨料矿开采范围广、规模大,服务年限长,矿区周边村庄多,运行环境复杂,其中爆破开采过程中产生的滚石危害得到了极大关注,是工程中亟待重视及控制的重要因素。

矿区属丘陵地貌,山体总体走向呈北东向NE40°~60°,东西长约4.5 km,南北宽约1.5 km;矿区内地势总体特征为中部高,向周边逐步降低,最大标高408.63 m,最低点标高27.60 m,相对最大高差381.03 m。矿区灰岩矿埋藏浅,厚度大,赋存标高基本位于当地地表标高以上。矿山为缓倾角的独立山体,坡度为20°~30°,山体植被发育,主要为灌木及阔叶林,如图1所示。基于此,采取露天爆破开采方式,矿山采剥工作面采用矿体走向布置方式,自上而下开采,采场梯段高度为15 m。



图1 长九神山灰岩矿边坡

Fig. 1 Highwall of Changjiu Shenshan limestone mine

长九神山矿区涵盖多个村庄,居民较为密集,周围有民房300余户,主要分布在矿区东南部山坡坡脚,大都位于300 m爆破警戒线范围内。根据矿山生产规划,矿权线300 m范围内的民房都将搬迁,但目前仍有部分未搬迁的民房。此外,矿山周边300 m爆破警戒线内有部分农田和部分农村道路通过,主要分布于矿区东南部区域。

2 滚石的产生与运动过程

2.1 滚石产生机理

滚石是指因某种原因从原岩体表面失稳,并经下落、回弹、跳跃、滚动或滑动等运动方式沿坡面向下快速运动,最后在较平缓的地带或障碍物附近静止下来的个别块石^[11],滚石的发生过程实质上是一种动力演化过程。

在台阶爆破过程中,在爆炸应力波和爆生气体的联合作用下,绝大多数爆落的块体向临空面方向

收稿日期:2021-04-30

作者简介:陈名英(1983-)男,高级工程师,主要从事矿山及水利水电工程管理,(E-mail)22877832@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(51979205,51779193)

抛掷形成爆堆,部分岩块顺坡继续向下滚动,少量岩块会脱离爆堆飞散一定距离后顺坡继续向下运动;后述两种情况均会形成滚石。此外,爆破滚石的危害还包括由于爆破振动引起的原临边危石、孤石等发生的位移和滚动,停滞在边坡上的石块在雨水冲刷、地震作用或者爆破作用下再次发生滑动而产生的危害。

在长九神山灰岩矿山爆破开采过程中,爆落的岩块具有一定初速度,其中的大体积块石相对一般情况的落石具有更大能量,对周边环境将构成更大威胁。

2.2 运动过程

本工程将坡面简化为边坡段和平直段。假设在边坡段滚石由滑动变为滚动状态,在变坡点发生滚石的抛掷运动,进入平直段,落下后发生连续弹跳碰撞,当法向速度小于某一值时转为滚动运动,直至运动结束。

参考张亚辉提出的运动学计算模型^[3],并根据长九神山矿实际情况对该模型进行简化,该模型计算图示如图 2 所示,并提出如下假设:①忽略滚石之间的相互影响和空气阻力;②考虑滚石平动时,将滚石简化为一个质点;考虑滚石转动时,将滚石简化为刚性的均质球体;③滚石的碰撞属于刚体碰撞,碰撞过程中动能的损失通过恢复系数来考虑;④不考虑滚石碰撞破碎情况。

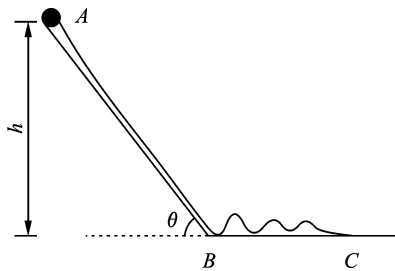


图 2 边坡滚石运动轨迹计算图示

Fig. 2 Schematic diagram of rockfalls' motion on slope

A 边坡段

一般来说,当边坡坡角小于 60°时,滚石表现为滚动。根据工程资料分析可知长九神山矿山体坡度一般在 20°~30°,在本例中取 25°的山体坡度。

假设滚石由 A 点以初速度 v_0 (沿坡面) 开始沿坡面滚下,摩擦系数 μ 取 $\tan \phi_1$,则滚石到达谷底平直段 B 点时速度为

$$v_B = \sqrt{2gh(1 - \cot \theta_1 \tan \phi_1) + v_0^2} \quad (1)$$

在本工程中,通过不同的摩擦角取值,考虑不同坡面对滚石运动的阻碍作用。其中,岩质坡面、植被

覆盖土质坡面的摩擦角 ϕ_1 分别取 10°、13°,初速度考虑 0、5、10 m/s 三种情况。

B 谷底平直段

滚石以速度 v_B 在 B 点碰撞后,继续进行连续的碰撞弹跳,当竖向速度减小到一定程度时,转为滚动运动状态,如图 3 所示。

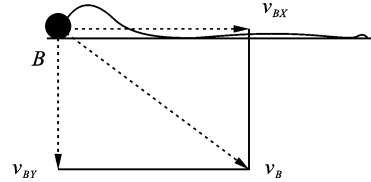


图 3 平直段滚石运动轨迹计算图示

Fig. 3 Schematic diagram of rockfalls' motion on straight segment

根据图 3,假设滚石在 B 点发生平直段的第 1 次碰撞,碰撞前有

$$v_{BT_1} = v_{BX} = v_B \cos \theta_1 \quad (2)$$

$$v_{BN_1} = v_{BY} = v_B \sin \theta_1$$

式中, v_{BN_1} 、 v_{BT_1} 分别表示滚石在平直段发生第 1 次碰撞前的法向、切向分速度。滚石在边坡段运动时,其自转对于最终运动距离的影响不能忽略,因此在边坡段需要考虑滚石的自转,则第 1 次碰撞后滚石的法向、切向速度分别为^[3]

$$v_{BN_2} = R_N v_{BN_1} \quad (3)$$

$$v_{BT_2} = \sqrt{\frac{r^2 (I\omega^2 + mv_{BT_1}^2) \times F_1 \times F_2}{I + mr^2}} \quad (4)$$

式中: ω 为滚石的自转角速度,按照计算 $\omega = \frac{v}{r}$

计算; m 为滚石的质量, $r = \sqrt{\frac{3m}{4\pi\rho}}$,其中 ρ 为滚石密度; $I = \frac{2mr^2}{5}$ 为转动惯量。通过引入 F_1 摩擦函数和 F_2 尺度函数^[3],分别考虑自转过程中摩擦阻力和滚石尺寸的影响

$$F_1 = R_T + \frac{1 - R_T}{\left(\frac{v_{BT_1} - \omega r}{C_{F_1}}\right)^2 + 1.2} \quad (5)$$

$$F_2 = \frac{R_r}{\left(\frac{v_{BN_1}}{C_{F_2} R_N}\right)^2 + 1} \quad (6)$$

式中: $C_{F_1} = 6.096$ m/s; $C_{F_2} = 76.200$ m/s 为经验常数。

之后由于滚石的速度和角速度较小,自转对于弹跳距离的影响较小,可以忽略不计,可以只考虑动

能损失。第 i 次碰撞后,滚石的法向、切向分速度分别为

$$\begin{aligned} v_{BN_{i+1}} &= R_N v_{BN_i} \\ v_{BT_{i+1}} &= R_T v_{BT_i} \end{aligned} \quad (7)$$

则滚石在平直段坡面发生第 i 段弹跳的水平运动距离 S_i 为

$$S_i = \frac{2v_{BN_{i+1}}v_{BT_{i+1}}}{g} \quad (8)$$

需要提出的是,根据文献[3],当法向分速度衰减为初始法向速度的 0.1 以下时,可忽略不计认为不再发生弹跳。根据碰撞恢复系数,本工程中滚石在平直段仅发生三次碰撞:前两次碰撞后发生弹跳运动,第三次碰撞后不再发生弹跳仅滑动,即法向分速度为 0。之后,滚石沿平直段发生滚动直至停止,运动距离为

$$S_3 = \frac{v_{BT_4}^2}{2g \tan \varphi_2} \quad (9)$$

式中, $\tan \varphi_2$ 为本段的摩擦系数,岩石坡面和土质坡面 φ_B 分别取 25° 和 30° 。

综上所述,滚石在平直段最终运动距离为

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \quad (10)$$

现根据长九神山矿工程实际,对边坡爆破开挖滚石运动路径及范围进行计算分析及评价。参考相关文献[12]和铁道部运输局推荐的系数,法向恢复系数 R_N 和切向恢复系数 R_T 按表 1 取值。

表 1 不同坡面的法向、切向恢复系数
Table 1 Collision recovery coefficient of different slope types

坡面类型	R_N	R_T
基岩和砾石	0.33 ~ 0.37	0.83 ~ 0.87
软土边坡	0.28 ~ 0.30	0.78 ~ 0.82

实践经验表明,滚石的法向恢复系数在 0.2 ~ 0.5 之间,切向恢复系数在 0.4 ~ 0.9 之间^[13]。在本工程中,对于基岩坡面和有少量植被覆盖的软土边坡,不同坡面下的恢复系数 R_N 、 R_T 取值如表 2 所示。

表 2 长九神山灰岩矿不同坡面的法向、切向恢复系数
Table 2 Collision recovery coefficient of Changjiu Shenshan Limestone Mine

坡面类型	R_N	R_T
基岩边坡	0.35	0.85
软土边坡(灌木)	0.28	0.78

同时,考虑到该工程软土边坡下部常有乔木覆盖,根据黄润秋等的试验研究^[14],树木与滚石碰撞一次的速度恢复系数为 0.55,本例中假设滚石仅在边坡段与树木发生一次碰撞。

根据公式(1)~(10),计算得到不同高差下滚石落点距边坡坡脚的距离,计算结果如表 3 所示。

表 3 不同坡高下滚石停止点距坡脚距离计算表(单位:m)

Table 3 Rockfall movement distance from toe of slope on different slopes(units:m)

坡面类型	滚石抛掷初速度 $v_0/(m \cdot s^{-1})$	边坡高差/m				
		20	50	100	200	300
基岩	0	14.0	36.2	65.4	110.9	145.7
	5	19.0	41.8	73.8	123.3	160.7
	10	23.9	46.1	77.4	125.9	162.7
软土边坡 (少量植被覆盖)	0	8.4	19.4	34.5	57.0	73.7
	5	9.4	20.3	35.2	57.5	74.0
	10	12.3	22.8	37.2	58.9	75.1
软土边坡 (乔木覆盖)	0	2.7	6.5	12.4	22.9	32.0
	5	3.0	6.8	12.7	23.1	32.2
	10	4.0	7.7	13.5	23.9	32.8

通过表 3 的计算结果可以看出,当初速度较小时,其对爆破滚石运动距离的影响较小,可以忽略。其中高程对爆破滚石运动距离的影响占主导作用,当边坡高差达到 300 m,边坡基岩出露时,滚石停止点距坡脚的距离可达 160 m;边坡表面有少量植被(灌木)覆盖时,考虑到对滚石运动的阻碍作用,滚

石停止点距坡脚距离不大于 80 m;当边坡有乔木覆盖时,由于其对滚石的停滞作用,滚石最大运动停止点小于 40 m,但是在此情况下,需要特别注意边坡上停滞的块石在雨水冲刷、地震作用或者爆破作用下发生二次滚动危害。

由上述分析,在边坡高差的影响下,滚石的运动

距离较远,需要采取一定的措施加以防范和控制。需要说明的,上述模型假设滚石在运动过程中没有任何阻挡,且能够运动到坡底。事实上,在长九神山矿工程中,爆破后的岩块较小,由于边坡起伏或植被等的影响,会对滚石起到一定的拦截作用,且没有植被覆盖的岩石边坡较少,滚石的实际运动范围会略小于表 3 中的计算值,结果偏安全。

3 滚石控制措施

滚石的防护措施可分为主动防护和被动防护^[15]。主动防护是指从源头上控制潜在的滚石发生,即在爆破开采过程中通过调整爆破方案以控制滚石的产生;被动防护指在滚石产生后,采取一定措施避免发生滚石灾害,主要包括拦截法、疏导法、监测与警示等。

在长九神山矿爆破开采过程中,主要通过优化爆破方案、设置拦截措施和明确警戒范围进行滚石运动控制和滚石灾害防治。

3.1 优化爆破方案

针对长九神山矿开挖方量大、滚石影响范围广的特点,本工程主要采取预留岩墙的松动微差爆破

方案。自上而下分层爆破开采时,在靠近坡面一侧预留具有一定厚度和高度的岩墙,作为屏障阻挡爆破后石块顺坡向下运动产生滚石灾害。

内层爆区可以采取常用的深孔台阶爆破开挖方案,台阶高度为 15 m;岩墙爆区台阶高度略低于内层爆区,为 8~15 m,同时为保证岩墙发挥其阻挡作用,外侧岩墙爆区应该滞后内部爆区 1~2 个循环。对岩墙进行开挖时采取微差松动爆破方案,并控制爆破方向与山体轮廓线平行,以尽量使外侧岩石仅松动而不产生抛掷和滚落。根据相关工程经验和资料^[16],对于岩墙爆区,岩墙顶部宽度不小于 3 m,底部宽度不小于 10 m,在本工程中为保证钻孔的质量和安,顶部宽度取 8~15 m,布置 2~3 排炮孔,采用相对较小的炮孔直径、小单耗的松动爆破方案,并采用逐孔起爆网路,其中为尽可能保证爆破后岩石“破而不飞”,最外侧炮孔采用相对更小的单耗。以 3 排炮孔布置为例,爆破参数如表 4 所示,爆破开挖示意图及炮孔布置图如图 4 所示。其中,预留岩墙台阶内侧倾角为 70~85°,整体采用微倾斜炮孔布置,基本与内侧坡面平行,最外侧炮孔位于台阶面边缘。

表 4 松动爆破参数表

Table 4 Millisecond loose blasting parameters

炮孔位置	梯段高度	炮孔直径/mm	炮孔密集系数	孔距/m	排距/m	超深/m	炮孔深度/m	堵塞长度/m	单耗/(kg·m ⁻³)	单孔药量/kg
内侧炮孔	9	115	1.5	4.8	3.2	1.0	10	3.5	0.36	55.2
边坡侧炮孔	9	115	1.5	4.8	3.2	1.0	10	5.5	0.25	38.2

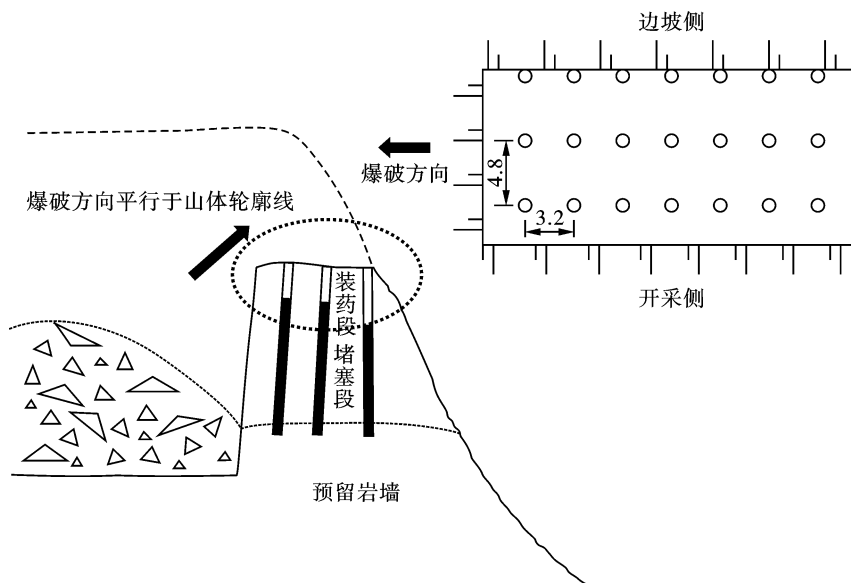


图 4 预留岩墙爆破开挖及炮孔布置图

Fig. 4 Preserved dike blasting excavation and blast hole pattern

爆破作业完成之后,采用挖掘机对剩余岩墙进行开挖,同时加强现场指挥和控制警戒,防止在此过程中产生滚石危害。

此外,进行孔网参数优化,如采用梅花形炮孔布置可以有效防止爆破过程产生大尺寸块石、减小滚石块度,从而降低滚石危害。保证堵塞质量、确保堵塞长度适中、使炸药尽量沿全长均匀分布、提前清除爆破台阶上和原边坡岩体上松石和浮石,也有利于防止滚石灾害发生。

3.2 拦截滚石

拦截法是针对落石范围大、数量多、坡型条件复杂等情况提出的一种在滚石运动途中对其进行拦截的有效防护措施^[15]。工程中常用的措施包括挡石墙、拦石网、截石沟、防护棚等,为防止高速运动的滚石进入截石沟后弹跳至防护区域造成安全威胁,一般可在截石沟内设置如碎石、砂、土类的缓冲材料;也可以在截石沟外侧设置挡石墙、拦石网等以增加其对滚石的拦截能力。在进行方案选择与设计时,一般需要对滚石的块度尺寸和运动特性(包括运动速度、运动路径、弹跳高度、运动距离等)有明确的认识。

根据本工程滚石运动特性、地形特点和防护要求,在矿山外围边坡坡脚设置截石沟,实现爆破滚石的有效拦截;在靠近民房、农田、公路等重点防护区域,采用挡石墙和截石沟相结合的滚石拦截措施,更大程度地减少爆破开采落石对周边环境的影响,示意图如图5所示。其中,截石沟设置在近坡脚的位置,并在沟底铺设厚度为30~50 cm的碎石和砂垫层用以缓冲,降低滚石的反弹速度和弹跳高度;截石沟采用梯形断面,宽度和深度不应小于4.0 m,内外侧边坡坡比相同,取1:1.0~1:1.5。在重点防护区域,可根据需求可在截石沟外侧设置3.0~5.0 m高的挡石墙以增强拦截效果,减小对周边环境的影响与威胁。考虑到本工程中滚石的体量较大,挡石墙采用钢筋混凝土结构。

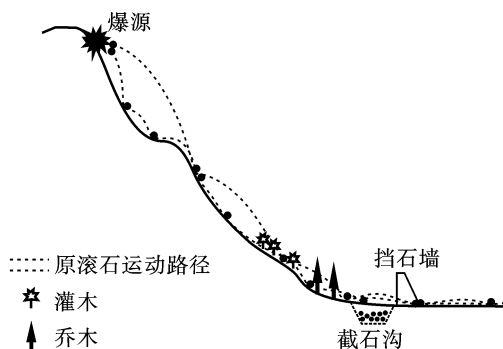


图5 滚石拦截控制示意图

Fig. 5 Rockfall intercept control

3.3 合理警戒

本工程在前期试生产过程中,爆破后大块石滚落至坡底,运动停止点距坡脚达150 m之远,对当地民众正常的生产生活带来了极大威胁。根据2.2节的计算预测,理论上滚石停止点距坡脚的最大距离可达160 m。因此,在爆破作业进行时,应设置300 m的警戒范围,如图6所示。对矿权线300 m警戒范围内民房、农田、公路等应采取迁移政策,以更大程度地保证矿区周边居民的生命财产安全。

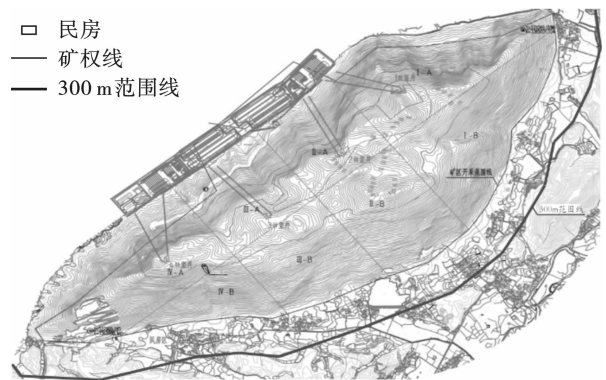


图6 矿区爆破警戒范围

Fig. 6 Blasting warning range in mining area

4 结论

(1)长九神山灰岩矿区由于边坡高差大,开采规模大,爆破过程中滚石运动距离较远,影响范围较广,若不加以控制,很可能对周边设备设施、民房民田及农村公路带来较大的危害。因此,需采取一定措施从源头和运动过程两个方面对可能发生的滚石灾害进行控制。

(2)在源头上采取预留挡墙的微差松动爆破方案,减少石块抛掷;同时优化炮孔布置和孔网参数,加强炮孔堵塞质量,以控制爆破后岩石的块度,避免出现体积较大的块石、增加危害。

(3)在滚石运动过程中采用截石沟和防护墙结合的双重措施进行拦截。在靠近坡脚处设置截石沟并铺设砂垫层进行控制,在重点防护区域根据需求在外侧增设挡石墙加强防护。

(4)矿区外围300 m范围内设置警戒区,该区域内民房全部搬迁,且在爆破作业进行过程中要对该区域进行严格警戒防范。

参考文献 (References)

- [1] 袁双文. 高陡边坡爆破滚石的控制及防护技术[J]. 露天采矿技术, 2019, 34(6): 32-34.

- [1] YUAN Shuang-wen. Controlling and protecting technology for blasting rolling rocks in high steep slope[J]. *Open-cast Mining Technology*, 2019, 34(6): 32-34. (in Chinese)
- [2] 黄润秋,刘卫华. 滚石在平台上的运动特征分析[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(5): 517-523.
- [2] HUANG Run-qiu, LIU Wei-hua. Study on the movement characteristic of rolling rock blocks on platform[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(5): 517-523. (in Chinese)
- [3] 张亚辉,张孟喜,陈强,等. 典型松散体边坡滚石运动距离的运动学分析[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2017, 23(6): 949-960.
- [3] ZHANG Ya-hui, ZHANG Meng-xi, CHEN Qiang, et al. Kinematics analysis of the moving distance of typical loose rock slopes[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2017, 23(6): 949-960. (in Chinese)
- [4] 吕庆,孙红月,翟三扣,等. 边坡滚石运动的计算模型[J]. *自然灾害学报*, 2003(2): 79-84.
- [4] LV Qing, SUN Yue-hong, ZHAI San-kou, et al. Evaluation models of rockfall trajectory[J]. *Journal of Nature Disasters*, 2003, 12(2): 79-84. (in Chinese)
- [5] 李新翰. 高陡山坡上露天台阶松动控制爆破落石安全的研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2015.
- [5] LI Xin-han. Study on the safety of falling rocks by loose controlled blasting on open steps of high and steep slopes[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [6] PICHLER B, HELLMICH C, MANG H A. Impact of rocks onto gravel design and evaluation of experiments[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(5): 559-578.
- [7] 王星,周天跃,师江涛,等. 基于自由落体的落石冲击土层的理论及LS-DYNA模拟研究[J]. *北京交通大学学报*, 2019, 43(4): 9-17.
- [7] WANG Xing, ZHOU Tian-yue, SHI Jiang-tao, et al. Theoretical and LS-DYNA simulation study of based on the theory of free-fall rockfall's impact on soil layer[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2019, 43(4): 9-17. (in Chinese)
- [8] 冉永华. 基于重庆某高速公路的岩崩落石数值模拟与防护研究[J]. *地质灾害与环境保护*, 2019, 30(2): 52-57.
- [8] RAN Yong-hua. Study on numerical simulation and protection of rock caving based on an expressway in Chongqing[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment preservation*, 2019, 30(2): 52-57. (in Chinese)
- [9] 陶志刚,朱淳,何满潮,等. 基于正交设计的露天矿V形槽结构滚石防护试验[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(9): 2307-2315.
- [9] TAO Zhi-gang, ZHU Chun, HE Man-chao, et al. Test of V shaped groove structure against rockfall based on orthogonal design[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(9): 2307-2315. (in Chinese)
- [10] ZHU C, WANG D, XIA X, et al. The effects of gravel cushion particle size and thickness on the coefficient of restitution in rockfall impacts[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18(6): 1811-1823.
- [11] 蒲超. 滚石冲击力试验研究及其计算方法浅析[J]. *路基工程*, 2015(6): 110-115.
- [11] PU Chao. Brief analysis of the rolling Stone impact force test and its calculation method[J]. *Subgrade Engineering*, 2015(6): 110-115. (in Chinese)
- [12] 叶四桥,巩尚卿. 落石碰撞法向恢复系数的模型试验研究[J]. *中国铁道科学*, 2015, 36(4): 13-19.
- [12] YE Si-qiao, GONG Shang-qing. Research on normal restitution coefficient of rockfall collision by model tests[J]. *China Railway Science*, 2015, 36(4): 13-19. (in Chinese)
- [13] 徐世强,折学森,王思长. 高速公路坡面滚石自由飞落分析模型[J]. *交通运输工程学报*, 2011, 11(2): 14-17.
- [13] XU Shi-qiang, SHE Xue-sen, WANG Si-chang. Free rolling model of stone on expressway slope[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2011, 11(2): 14-17. (in Chinese)
- [14] 黄润秋,刘卫华,龚满福,等. 树木对滚石阻挡效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(S1): 2895-2901.
- [14] HUANG Run-qiu, LIU Wei-hua, GONG Man-fu, et al. Study of trees resistance effect test on rolling rock blocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(S1): 2896-2901. (in Chinese)
- [15] 张中俭,张路青. 滚石灾害防治方法浅析[J]. *工程地质学报*, 2006, 15(5): 712-717.
- [15] ZHANG Zhong-jian, ZHANG Lu-qing. Preliminary analysis of prevention and mitigation measures for rockfall hazards[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2007, 15(5): 712-717. (in Chinese)
- [16] 杨琳,史雅语,梁锡武. 预留岩墙的深孔控制爆破开挖技术[J]. *工程爆破*, 2010, 16(4): 30-32, 12.
- [16] YANG Lin, SHI Ya-yu, LIANG Xi-wu. Deep-hole controlled blasting excavating technique of the preserved dike[J]. *Engineering Blasting*, 2010, 16(4): 30-32, 12. (in Chinese)