

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.014

复杂环境下高陡边坡危岩体 控制爆破排险技术研究

张健¹, 姚宁², 黎勇³, 安荣杰³, 卢世佳⁴

(1. 南宁汉鼎爆破工程公司, 南宁 530005; 2. 北京市科学技术研究院 城市安全与环境科学研究所, 北京 100054;
3. 南宁市工程爆破协会, 南宁 530003; 4. 南宁市上林县自然资源局, 南宁 530599)

摘要: 作为典型的地质灾害, 岩体崩塌具有突发性强、破坏力大等特点, 严重威胁周边区域人民群众的生命与财产安全。目前, 对可能发生崩塌的危岩体实施爆破处理是一种广泛采用的防治手段。以广西南宁市上林县龙贵村后背山危岩体为研究对象, 采用孔网参数为 $0.35\text{ m} \times 0.40\text{ m}$ 的高密度钻孔布置, 共施炮孔350余个, 将爆破碎石块度严格控制在单体体积不大于 0.0429 m^3 ; 通过空气间隔装药结合导爆索串联技术, 延长爆炸压力对孔壁的作用时间, 形成“准静态压力”效应, 有效避免冲击粉碎和远距离飞石; 将总装药量462 kg分为6段, 按“由外向内”的顺序起爆, 段间延时20 ms, 最大段药量控制在79.2 kg, 借助岩块碰撞实现二次破碎, 进一步降低碎石块度。爆破最终形成“碎石瀑布”式塌落, 成功完成爆破排险作业。本工程为山区交通干线、民用建筑等设施邻近区域临空危岩体的爆破排险提供了可靠的技术路径与实践参考。

关键词: 山体危岩; 复杂环境; 爆破排险; 密集孔与隔离装药

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2026)01-0130-08

Study on Controlled Blasting Techniques for Hazard Mitigation of Unstable Rock Masses on High and Steep Slopes under Complex Environmental Conditions

ZHANG Jian¹, YAO Ning², LI Yong³, AN Rong-jie³, LU Shi-jia⁴

(1. Nanning Handing Blasting Engineering Company, Nanning 530005, China; 2. Institute of Urban Safety and Environmental Science, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing 100054, China; 3. Nanning Engineering Blasting Association, Nanning 530003, China; 4. Natural Resources Bureau of Shanglin County, Nanning 530599, China)

Abstract: Rock collapse, as a typical geological hazard, exhibits sudden occurrence and high destructive potential, severely threatening lives and infrastructure in adjacent areas. Currently, control blasting has become a prevalent mitigation measure for unstable rock masses susceptible to collapse. This study investigates the unstable rock mass on the back hill of Longgui Village, Shanglin County, Nanning City, Guangxi, utilizing a high-density drilling configuration with a hole network parameter of $0.35\text{ m} \times 0.40\text{ m}$, involving over 350 blast holes. The blasted debris fragmenta-

收稿日期 (Date of reception): 2025-06-02

网络首发日期 (Published online): 2025-10-20

作者简介: 张健 (1955-) 男, 本科、高级工程师 (爆破作业许可证 高级/A)、高级经济师, 主要从事工程爆破设计、爆破危害预防研究及爆破项目经济技术论证工作, (E-mail) 1152015288@qq.com。

通信作者: 姚宁 (1987-) 女, 助理研究员、博士, 主要从事安全技术和爆炸安全研究, (E-mail) yaoning41@163.com。

About the author: ZHANG Jian (1955-), male, undergraduate, senior engineer (with a blasting operation license-Senior/A), senior economist, primarily engages in engineering blasting design, research on blasting hazard prevention and economic and technical evaluation of blasting projects, (E-mail) 1152015288@qq.com.

Corresponding author: YAO Ning (1987-), female, Ph. D, mainly engaged in security technology research and explosion safety research, (E-mail) yaoning41@163.com.

tion size was precisely controlled with a maximum volume of 0.0429 m^3 . By applying air-deck charging in combination with detonating cord series connection technology, the explosive pressure duration on borehole walls was prolonged, generating a quasi-static pressure effect that successfully mitigated impact crushing and minimized long-distance flyrock hazards. A total explosive charge of 462 kg was strategically divided into six segments with sequential outward-to-inward initiation using 20 ms inter-segment delays, maintaining a maximum charge of 79.2 kg per delay interval. This design promoted rock-to-rock collisions for secondary fragmentation, resulting in enhanced size reduction. The blast successfully generated a controlled "rock debris waterfall" collapse pattern, completing the hazard mitigation operation. This project establishes a technically viable approach for the removal of overhanging rock masses near critical infrastructure, including mountain transportation corridors and civilian structures.

Key words: unstable rock mass on mountain slopes; complex environment; blasting for risk removal; dense drilling and isolated charging

广西南宁市上林县境内是以大量的石灰岩山体为主要特征的喀斯特地质地貌。距县城西南方向 57 km 的镇圩乡上曹屯的后背山体有一危岩体,约 1320 m^3 。地点周围非常复杂:危岩体居高临下,坐东北朝西南,为西北至东南横走向的连续山体;山体的西南方向为村屯,危岩体距山下村屯民宅最低垂

直高度 93 m,最短水平距离 60 m。以往一直有多次零星的碎石下坠、滚落,近期一段时间,发生的次数频繁,引起村民和当地政府的高度重视。由于围岩体量大,且所处山体陡峭,一旦大面积塌方,形成滚石、飞石、震动等地质灾害,必将造成村民的生命与财产重大损失。危岩体地形环境见图 1。

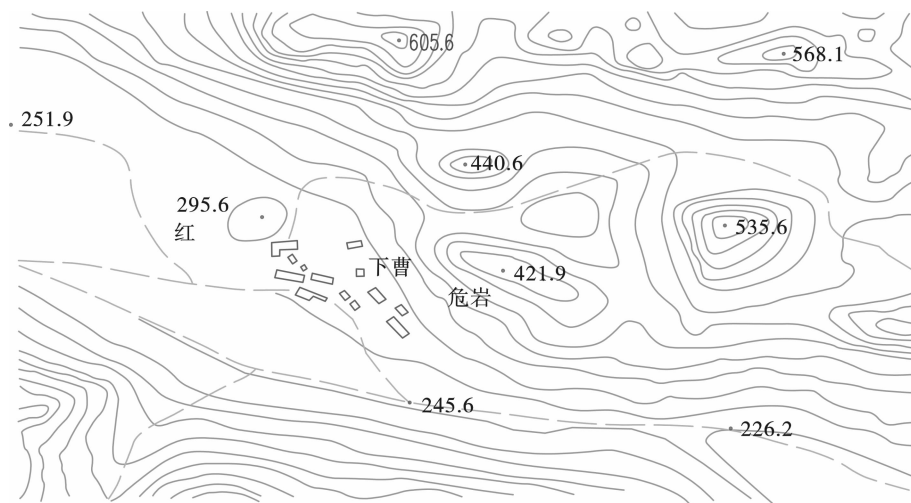


图1 危岩区域平面图(含落石警戒范围)

Fig. 1 Map of a hazardous rock area(including the rockfall warning zone)

1 工程概况

龙贵村下曹屯后背山体(山顶高程 421.9)的一危岩发育充分,具极大的安全隐患。政府原计划采用锚杆支护技术。但高空施工难度极大、施工工期长、成本高、稳固安全期不确定、存续期间还需长期监测与维护。后经政府及专家经济技术论证,决定采用爆破法清除危岩。

危岩在屯后背山上部,危岩体积尺寸:高 22 m,宽 15 m,厚 4 m 不等,宽面朝西南。约 1320 m^3 ,石质为石灰岩,中等密度 2.55,普氏硬度 7~9。危岩体裂隙发育充分,其裂缝毫无规律、宽窄不一、纵横交错。危岩体坡面朝西南向,其中最危险、最大的一

岩体见图 2。

西南方向的山体呈陡坡延伸至村屯民宅,分为两段:下段坡面起点从民宅基础起,以 30° 水平夹角向坡上延伸,此下段坡面长度 40.4 m;在坡面垂直高度为 $\pm 20.2 \text{ m}$ 处开始陡峭,形成上坡面,其以 70° 水平夹角继续向上延伸,至标高 93 m 处危岩体下缘,上段坡面长度 77.47 m。危岩体距离地面的平均高度为: $93 \text{ m} + 22 \text{ m} / 2 = 104 \text{ m}$ 。危岩体南北向纵断面剖面图,见图 3。

在缓坡面上段靠近陡坡脚的结合部有较多分散的碎石块;缓坡面灌木丛生、坡面凹凸不平,且其间有生根石分布,一直延伸到村民宅的边缘。不规则的生根石多为上细下粗,一般高度 0.5 m 左右,底部

直径约0.5~0.6 m不等。为测算分类,按体积、形态、尺寸归纳划分为两类:1)类似矩形矮柱:①边长0.35 m×边长0.35 m×高0.35 m、体积为0.0429 m³;②边长0.5 m×边长0.5 m×高0.5 m=0.125 m³;2)类似石笋:底部直径0.5 m、高0.5 m、体积为0.0327 m³。生根石与地表下巨石连接,不可撼动。数量多、分布广,可起到缓冲、拦截塌落石滚动的作用。缓坡表面障碍物现地见图4。



图2 危岩体局部放大图(从西南向山体排险处拍照)

Fig. 2 Partial enlarged view of the dangerous rock mass (photographed from the southwest towards the mountain's hazard mitigation area)

2 爆破方案与安全测算

采用爆破法对危岩进行松动爆破可以彻底排除危岩隐患,对爆破的技术设计要求比较高,通常采用密集钻孔或中深孔松动爆破法^[1,2]。对本此危岩体的具体情况,并结合环境因素,方案的核心有两点:①松动爆破,不能有石块飞散,爆破石块应顺山体陡坡滑落^[3];②高密集布孔,严控爆破碎石的块度,以降低爆破石块落地后的动能。因此决定采取:爆破危岩体整体采用凿岩钻密集钻孔、空气间隔炸药、孔内药卷导爆索串联、混联毫秒延时起爆线路一次性起爆等爆破施工技术。

危岩体上搭建竹排架工作平台,其特点:可确保钻孔作业安全、缩短工程准备时间、利于提高爆破岩体的钻孔密度和钻孔质量。因为一次性起爆规模较大,容易产生大量的爆破滚石。因此,孔网密度越大,产生大块岩石的概率越低;岩石破碎的效果越好,落石产生的破坏能力就越弱。可见,本次高空危岩爆破排险的技术安全核心:重点确定控制爆破岩石的块度尺寸,主动降低爆破落石着地后的破坏能量,作为本次危岩体爆破排险的第一位技术措施。

危岩与村庄民宅的关系位置见图5。

2.1 不同尺寸危岩爆块落地后的动能

垂直悬崖上危岩体积1320 m³,按爆破后松散率20%,估计碎石体积1584 m³。下落平均高度104(93+22/2)m,形成瞬间大规模塌落石块,其中如有体积大的塌方石块必然形成滚石。经陡坡、缓坡坡面,对坡底的民宅直接构成威胁。采用密集孔的爆破方式,从技术上严格把控爆破产生爆块的体积。但同时不排除有意外的可能,如危岩边缘形状不规则的突出部分,会产生大块形成滚石。这需要考虑这些不同尺寸的滚落石在多少范围内,对民宅不会形成威胁。明确这一点,皆可以有效控制高空凿岩钻孔工作量,以减少人员高空作业施工风险。

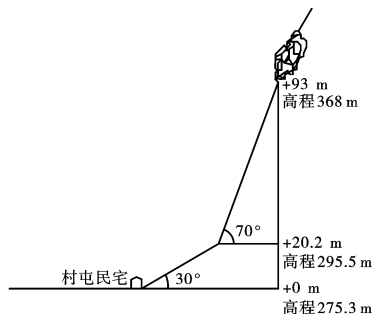


图3 危岩山体纵断面剖视图(南向↔北向)

Fig. 3 Longitudinal sectional view of the dangerous rock mass (South to North)



图4 危岩下缓坡面的灌木植被及生根石地貌

Fig. 4 Shrub vegetation and root-bearing stone landform on the gentle slope below the dangerous rock

不同尺寸的塌方石块,在完全不考虑塌落滚动过程中的摩擦系数、滚动阻力(包括灌木丛、凹凸不平的坡面,以及各类生根石的拦挡作用)达到民宅处所具有的能量,其势能 E_p 全部转为动能 E_k , $E_p = mgh$, g 取9.8。对应的动能如表1所示。

按照以往多次山体危岩排险的实际情况表明,破碎岩石落在山脚下的坡面多数形成扇形分布。危岩体爆破后下落在悬崖底部近范围内多为碎石块,而体积比较大的石块形成向外扩张滚动,这是一个

普遍现象。因为体积比较大的石块具有足够的下落势能转为动能继续滚动。因此,爆破设计能否有效控制危岩形成爆碎后的单体体积不宜过大至关重要。以便灌木丛、生根石对下落的滚石起到拦阻的作用。



图 5 危岩与民宅的关系位置(在危岩上向南崖下拍照)
Fig. 5 The relative position of the dangerous rock and the residential house(photographed from the cliff above the dangerous rock towards south)

2.2 危岩体破碎后拟在下落斜坡面上被灌木丛拦阻后对生根石冲击的能量测算

垂直悬崖上危岩体积 1320 m³,测算爆破后碎石体积约 1584 m³,形成体积大小不等的塌方滚石。如果较大体积的爆破滚石在缓坡的滚动过程中遇到生根石、灌木丛拦挡,将大大降低爆破滚石对村庄的危害。在本次爆破排险中仅采取人员、动产转移的情况下,这表明控制爆破产生滚石的体积,是保护民宅安全的唯一、根本性措施。按广西南宁地区的中等石灰岩石测试:单轴抗压强度:50~80 MPa。本案取值:60 MPa。

实际爆破后,危岩体破碎形成大小不等体积的石块,从悬崖上自由落体经陡坡、缓坡滚动、下落,其下落的垂直平均高度 104 m。其中较大尺寸的爆破石块(简称滚石)下落过程中撞击缓坡坡面的生根石,同时有灌木丛拦挡,其过程中损耗了大量的动能,速度大为降低^[4]。这里缓坡坡面的生根石+灌木丛,等效树木对滚石的拦挡。最大降幅可为撞击前速度的 55%,动能为 30%。

表 1 不同尺寸危岩爆块下落的主要数值排序表

Table 1 Main numerical sorting table for the falling of dangerous rock blocks of different sizes

平均高度 Average height	爆块边长 Block size	体积 Volume	岩石密度 Rock density/(kg·m ⁻³)	质量 Mass	E _k 落地动能 Impact kinetic energy
(93+22/2)	0.35	0.0429	2550	109.331	1.114302×10 ⁵
	0.40	0.0640		163.200	1.663334×10 ⁵
	0.45	0.0911		232.369	2.368305×10 ⁵

爆破落石坠落、滚动中考虑阻力、摩擦系数等影响(实际取样试验与计算)^[5,6],落石撞击坡下生根

石的速度已经下降为:v=10 m/s,不同尺寸爆破落石撞击坡下生根石产生的破坏情况表 2 所示。

表 2 爆破后不同尺寸下滚石撞击生根石破坏情况预测数值表

Table 2 Predictive value table of damage caused by rolling stones with different sizes colliding rooted stones after blasting

滚石边长 Rock side length/m	质量 Mass/kg	落地动能 Impact kinetic Energy/J	滚石 Detached rock mmass	矩形柱状生根石边长 Prismatic rooted rock dimension 0.40 m/0.45 m/0.50 m	锥状生根石底部直径 Conical rooted rock base diameter φ 0.5 m
0.35	109.331	1.114302×10 ⁵	整体崩解 Disintegration	表面或内部受损 Surface degradation	表面或内部受损 Internal fracturing
0.40	163.200	1.663334×10 ⁵	整体崩解 Disintegration	/	/
0.45	232.369	2.368305×10 ⁵	整体崩解 Disintegration	表面或内部受损 Surface degradation	表面或内部受损 Internal fracturing

现按孔网 0.35 m×0.35 m 布孔,选择爆破形成的塌方滚石对边长 0.45 m 柱状生根石撞击做测算、对比,实现滚石破碎、生根石表面或内部受损的计算结果。计算过程与分析如下^[7,8]

①计算撞击时的动能
撞击石的动能

KE = (1/2)mv²

已知 m=109.331 kg,v=10 m/s

②撞击过程中的力

撞击是一个瞬态过程,涉及冲击力。可以用动量定理或能量方法估算冲击力。

假设撞击时间很短(Δt),冲击力 F 可以通过动量变化估算: $F\Delta t = \Delta p = m\Delta v$,但 Δt 未知,直接计算应力更合适。

③接触面积和应力

假设撞击是正面碰撞,接触面积为撞击石的一个面(边长 0.35 m 的正方形):接触面积 $A = 0.35 \times 0.35 = 0.1225 \text{ m}^2$

撞击石的动量: $p = mv = 109.331 \times 10 = 1093.31 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$

冲击力 F 的估算:

假设撞击时间 $\Delta t \approx 0.01 \text{ s}$ (典型碰撞时间):
 $F = \Delta p / \Delta t = 1093.31 / 0.01 = 1.09331 \times 10^5 \text{ N}$

冲击应力: $\delta = F/A = 1.09331 \times 10^5 / 0.1225 \approx 892\,498 \text{ Pa} \approx 0.89 \text{ MPa}$

远小于抗压强度 60 MPa,似乎不会损坏。但这种方法可能低估应力,因为实际接触面积可能更小(非完全平面接触)。

④能量方法

撞击石的动能: $KE = (1/2) \times 109.331 \times 10^2 = 5466.55 \text{ J} = 5.46655 \times 10^3 \text{ J}$

假设能量完全转化为两块石的弹性变形能:应力与应变关系 $\delta = E \epsilon$

应变能密度: $u = (1/2) \delta \epsilon = \delta^2 / 2E$

石灰石的弹性模量 $E \approx 50 \text{ GPa}$ (典型值)

总应变能: $U = u \times V = (\delta^2 / 2E) \times V$

假设能量完全转化为应变能

$$5.46655 \times 10^3 = (\delta^2 / 2 \times 50 \times 10^9) \times (0.0429 + 0.0911)$$

$$5.46655 \times 10^3 = (\delta^2 / 100 \times 10^9) \times 0.134$$

$$\delta^2 = (5466.55 \times 100 \times 10^9) / 0.134 \approx 4.08 \times 10^{15}$$

$$\delta = 6.39 \times 10^7 \text{ Pa} \approx 63.9 \text{ MPa}$$

这与抗压强度 60 MPa 接近,可能发生损坏。

⑤材料破坏判断

石灰石单轴抗压强度为 60 MPa,因此:

1) 滚石:接触区域的瞬时应力远超抗压强度,导致局部碎裂或整体崩解。

2) 生根石:尽管体积更大且固定于地下,但接触应力同样超材料极限,表面或内部结构将受损。

据以上测算,为在排险施工过程中,要严格执行规范彻底排除危岩体^[9],以确保民宅安全。经反复研究、多次异地试炮,在设计爆破方案中主要从爆破技术方面把控四个重点:合理选择孔网尺寸;炸药单耗;装药形式与堵塞;起爆网路与微差起爆优化。

3 爆破参数的确定

3.1 孔网布置

通常山体危岩爆破排险工程中,主要考虑的因素就是危岩体在确保起爆形成垮塌后,不对需要保护的目标造成二次灾害。这就应严格控制爆破碎岩块大小,使其下落、滚动中没有足够的能量对临近构筑物造成破坏。按岩石块度对崖下的冲击能量测算,危岩爆破块度控制在 0.0429 m^3 。孔距、排距: $0.35 \sim 0.4 \text{ m}$,炮孔排数、孔数应根据岩体的裂隙间距情况临时调整。

3.2 炸药消耗量

同时,为了进一步确保该村屯群众的生命财产安全,严格控制最小抵抗线,并采取高密度钻孔、孔内分节装药工艺^[10,11],使危岩体在低单耗药量、均衡爆能的作用下形成小块而松散垮塌。

单耗炸药: 0.35 kg/m^3 (据危岩体裂隙情况,取松动爆破单耗标准 0.5 kg/m^3 的 70%)

总药量测算: $1320 \text{ m}^3 \times 0.35 \text{ kg/m}^3 = 462 \text{ kg}$

3.3 装药与堵塞

1) 最小抵抗线^[12,13]: $W \leq 0.5 \text{ m}$;根据危岩体最厚边缘宽度调整

2) 孔径: $40 \sim 42 \text{ mm}$;使用 Y-20 凿岩机高密度钻孔

3) 孔深:一般控制在 $2 \sim 3 \text{ m}$,有个别 1 m 、 4 m (注:主要根据危岩体的厚度调整),见表 3。

表 3 孔内装药主要参数表

Table 3 Main parameters of charges in holes

炮孔深度 Drill hole depth/m	装药总量 Total charge weight/g	药卷总长度 Charge length/m	装药节数 Charge Number of charge segments/个	装药间隔 Decking/m	堵塞长度 Stemming length/m
1	100	0.1	2	1×0.5	0.4
2	200	0.2	2	1×1.0	0.8
3	300	0.3	3	2×1.0	0.7

不规则的危岩体,高高的附靠在悬崖山体上。从方量上、形状上、从凌空状态的工作面上,实际打孔操作中都难于达到设计的数值标准。因此,在爆破方案设计的基础上,均给出一个可根据具体情况调整参数的范围限制。危岩上炮孔实际分布见图6。



图6 危岩上炮孔实际分布

Fig. 6 Actual distribution of blast holes on the dangerous rock

4 起爆网路

爆破采用导爆雷管混联网路形式^[14]。分段的起爆顺序,对被爆危岩体按总起爆药量,设计平均分为6个段位起爆:①每个段位形成闭环圈联接,闭环圈之间的段位差之间为20 ms;②先安排起爆第1段位爆破危岩体外圈炮孔,再依次安排2~5分段顺

序爆破危岩体的内圈、最后第6段爆破靠近基岩的危岩连接部;③每个闭环圈连接的炮孔装药插入同段一枚导爆雷管,同段簇联。

为确保起爆网路的安全、可靠性,以及插入装药的导爆雷管、间隔炸药卷与导爆索之间的稳定性连接,全部孔内装药采用薄竹条固定捆绑。杜绝因个别哑炮造成局部大块石头。

设计起爆网路分6个段位,每个段位内同段簇联,保证同段炮孔装药有足够的爆炸能量使危岩体瞬间整体破碎。同时6个段位差之间为20 ms,可避免同段起爆药量过大,产生爆破抛掷。并且确保爆破石块由外至内逐层破碎、垮塌。根据危岩的形状,实际最大段位起爆药量为79.2 kg。

5 安全防护措施

5.1 爆破地震

岩土爆破产生的震动主要来自炸药爆破通过岩土传给建筑物基础的震动。

根据最大允许振速^[15],利用下式计算允许的一次齐发最大炸药量 Q 允

$$Q_{允} = R^3 (V/K)^{3/a} \text{ kg}$$

式中: R 为爆破地震安全距离,m; Q 为炸药量,kg; V 为地震安全速度,取2 cm/s(一般砖房); K 、 a 为与爆破地形、地质条件有关系数和衰减指数,取 $k=150$, $a=2$ 。

本次爆破使用炸药总量为462 kg,分6段设计,其中最大一段齐爆药量79.2 kg,详见表4。

表4 爆破地震距离与齐爆药量对照表

Table 4 Comparison table of blasting seismic distance and explosive quantity

爆点水平距离 Blast-to-structure distance/m	30	37.19	55	100	150
齐爆药量 Simultaneous charge weight/kg	41.57	79.2	256.15	1540	5197.5

5.2 爆破飞石

爆破个别飞石的安全距离计算

$$R_f = 20K_f n^2 W = 20 \times 1.5 \times 0.75^2 \times 1.0 = 16.88 \text{ m}$$

式中: K_f 为安全系数,取1.5; n 为爆破作用指数按松动爆破取值为0.75; W 为最小抵抗线1.0 m。

在 $R_f=16.88$ m的情况下,人员撤离在200 m外,可以保证安全。

6 高空作业安全措施

(1)危岩位于高大山体上端,体裂隙多、稳定性差。为确保施工钻爆过程中不发生意外坍塌,施工

准备期间先在危岩体周围搭建竹脚手架^[16,17];原岩体上钻孔-设置固定桩,并用钢丝绳拦捆固定;危岩体与原岩体已分离有约1 m宽的大裂缝,在其间架设竹木跳板过桥。

(2)施工人员进入攀登危岩体作业时,必须系安全保险绳,且保险绳一端必须固定在原岩体的固定桩上。

(3)设有专职安全员,旁站监督;检查、落实安全规定;排除作业面附近的易塌方悬石;悬石、浮石排除后施工人员方可钻孔作业。

(4)对不易清除的悬石、浮石,做好标志别上小

细竹签,定时观察其松动情况。

(5)所有排险施工作业均在白天进行。

7 爆破效果

前后共计 29 d 的艰苦施工,共钻炮孔 350 余个,使用炸药总量 462 kg,在悬崖峭壁上爆破排除危岩石方量 1320 m³,实现了预定的排险目标。起爆后,危岩瞬间形成碎石“大瀑布”直接向山下倾泄,没有石块飞散。见图 7。

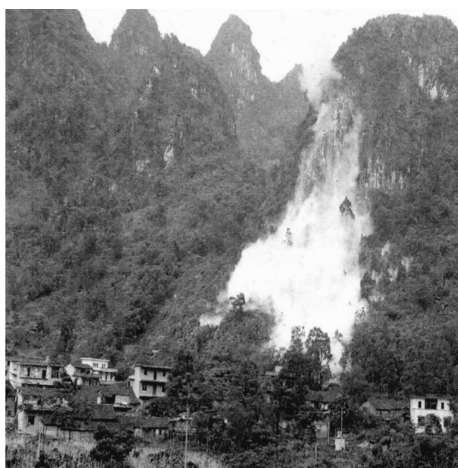


图 7 起爆后瞬间危岩体崩塌形成碎石流
(从东南向山体排险处拍照)

Fig. 7 Formation of a waterfall with the collapse of the unstable rock immediately after detonation (photographed from the southeast towards the mountain's evacuation area)

爆破后最大碎石块体积没有超过 0.0429 m³。经现场检查,下斜坡面的灌木林、生根石被碎石覆盖。村民住宅没有任何损害,未发生任何安全事故。碎石瀑布流的最前端,停止在距离民宅仅不足 4 m 处。当地政府及安监局给予了高度的评价。爆后危岩体排除。见图 8。

8 结论

对危岩排险来说,基本上都没有足够的下落安全空间。这就不得不在排险过程中,要考虑如何让危岩充分解体,形成完全没有足够冲击能量的碎石块。这样才能够确保在整个塌落过程中而不造成破坏;

(1)炸而不飞,控制炸药单耗非常重要。通常岩石松动爆破炸药单耗在 0.4~0.6 kg/m³。但在本次危岩排险爆破中,按炸药单耗在 0.5 g/m³ 取值后取 70%,实际炸药单耗为 0.35 kg/m³。

(2)炸药单耗降低了,但又要保证危岩被炸碎。因此,钻密集炮孔,这样可使炸药能量作用均匀。而实际把石头炸开的每立方岩石体积的装填炸药总量并没有降低,而是体现了更均匀分配爆炸能量。其中,采取单一炮孔内的隔离装药之间有导爆索的联接,就进一步提高炸药的均衡破碎效果。要确保隔离装药之间导爆索的连接必须牢固。



图 8 爆后危岩排除后效果(从东南向山体排险处拍照)

Fig. 8 The effect of removing dangerous rocks after the explosion (photographed from the southeast towards the mountain area of risk relief)

(3)密集段位的设计有利于弱装药的情况下,抑制后起爆形成的飞散。

(4)起爆后,被爆危岩被炸成碎石块,并下落形成塌方“碎石瀑布”,是本次危岩排险工程呈现出的最理想效果。

参考文献 (References)

- [1] 王青屏. 复杂环境条件下危岩处理爆破[J]. 爆破, 2006, 23(1): 58-60, 65.
- [1] WANG Qing-ping. Blasting for treating a dangerous rock in complicated surroundings[J]. Blasting, 2006, 23(1): 58-60, 65. (in Chinese)
- [2] 施富强. 复杂地质条件下危岩的爆破排险[J]. 工程爆破, 2006, 12(1): 58-60, 65.
- [2] SHI Fu-qiang. Blasting obviation of dangerous cliff under complicated geological condition[J]. Engineering Blasting, 2006, 12(1): 58-60, 65. (in Chinese)
- [3] 樊永强, 冯俊斌, 焦卫宁, 等. 复杂山体削坡爆破控制飞石方向的工程实践[J]. 爆破, 2022, 39(1): 95-100.

- [3] FAN Yong-qiang, FENG Jun-bin, JIAO Wei-ning, et al. Engineering practice of controlling fly rock direction in complex mountain slope cut blasting[J]. *Blasting*, 2022, 39(1):95-100. (in Chinese)
- [4] 黄润秋,刘卫华,龚满福,周江平. 树木对滚石阻挡效应研究[J]. *岩土力学与工程学报*, 2010, 29(S1): 2895-2901.
- [4] HUANG Run-qiu, LIU Wei-hua, GONG Man-fu, ZHOU Jiang-ping. Study of trees resistance effect test on rolling rock blocks[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2010, 29(S1): 2895-2901. (in Chinese)
- [5] 蔡美峰,何满潮,刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 2版. 北京:科学出版社,2013.
- [5] CAI Mei-feng, HE Man-chao, LIU Dong-yan. *Rock mechanics and engineering* [M]. Second Edition. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [6] 王礼立. 工程冲击动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [6] WANG Li-li. *Engineering impact dynamics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [7] 郑颖人,陈祖煜. 边坡工程—设计·监测·鉴定与加固[M]. 北京:中国水利水电出版社,2018.
- [7] ZHENG Ying-ren, CHEN Zu-yu. *Slope engineering—design, monitoring, identification, and reinforcement* [M]. Beijing: China Water Power Press, 2018. (in Chinese)
- [8] 殷跃平. 滑坡崩塌滚石灾害防治工程手册[M]. 北京:科学出版社,2021
- [8] YIN Yue-ping. *Handbook of landslide, collapse and rolling stone disaster prevention and control engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)
- [9] 自然资源部. DZ/T 0218—2020 滑坡防治工程勘查规范[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
- [9] Ministry of Natural Resources. DZ/T 0218—2020 Specification for investigation of landslide prevention and control engineering[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [10] 汪旭光. 爆破手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.
- [10] WANG Xu-guang. *Blasting manual* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [11] 杨文澜. 工程爆破常用数据手册[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
- [11] YANG Wen-lan. *Handbook of common data for engineering blasting* [M]. Beijing: People's Communications Press, 2002. (in Chinese)
- [12] 叶海旺,康强,赵明生,等. 节理裂隙岩体空气间隔装药爆破试验研究[J]. *爆破*, 2012, 29(2): 26-30, 37.
- [12] YE Hai-wang, KANG Qiang, ZHAO Ming-sheng, et al. Experimental study on air-decking charging explosion in jointed and fractured rock mass [J]. *Blasting*, 2012, 29(2): 26-30, 37. (in Chinese)
- [13] 周后友,池恩安,张修玉,等. $\phi 42$ mm 炮孔空气间隔装药爆破对岩体破碎效果的影响研究[J]. *爆破*, 2018, 35(4): 63-68.
- [13] ZHOU Hou-you, Chi En-an, ZHANG Xiu-yu, et al. Influence of air-decking charge blasting with $\phi 42$ mm blast hole on rock fragmentation [J]. *Blasting*, 2018, 35(4): 63-68. (in Chinese)
- [14] 张奇,杨永琦,于滨. 岩石爆破破碎时间及微差起爆延时优化[J]. *爆炸与冲击*, 1998, 18(3): 268-271. (in Chinese)
- [14] ZHANG Qi, YANG Yong-qi, YU Bin. Rock breaking time by blasting and optimization optimization of delaying time of successive blasting [J]. *Explosion and Shock*, 1998, 18(3): 268-271. (in Chinese)
- [15] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
- [15] WANG Xu-guang. *Blasting design and construction* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [16] 张健,冯强,何国欢. 在悬崖峭壁上爆破劈削单壁路堑的快速施工[J]. *公路交通技术*, 2003, 43(5): 26-27.
- [16] ZHANG Jian, FENG Qiang, HE Guo-huang. Rapid construction of blasting and splitting single wall road cutting on cliff and escarpment [J]. *Highway Traffic Technology*, 2003, 43(5): 26-27. (in Chinese)
- [17] 江正荣. 简明施工手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [17] JIANG Zheng-rong. *Concise construction manual* [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese)