云南某小倾角露天靠帮边坡预裂爆破参数研究*

刘浩[1],赵泽虎[2],吕增在[1],严硕[1],高镜明[1]

(1.云南地矿建设工程有限责任公司, 云南 昆明 650200;
2.昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要:云南某露天采场当前在靠帮边坡施工中未采用预裂爆破技术,导致边坡成型效果不理想。为提升该采场内小倾角靠帮边坡的成型质量与设计符合率,针对靠帮55°缓边坡开展预裂爆破试验研究。采用控制变量法,以预裂孔孔距、线装药密度、孔径为变量开展现场对照试验。试验结果表明:在该爆破区域内采用预裂爆破方法实现55°小倾角靠帮缓边坡的成型是可行的,爆破后边坡质量得到显著改善,设计符合率较高;当孔距为1.3 m、孔径为115 mm、线装药密度为0.8 kg/m时,该试验区域取得最佳爆破效果,炮孔残留孔痕率约为80%。

关键词:缓倾角边坡;预裂爆破;残留孔痕率;爆破参数

中图分类号:TD854.6 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)02-0092-07

Study on Pre-Splitting Blasting Parameters of a Small-Dip Open-Pit Bench Slope in Yunnan

LIU Hao[1], *ZHAO Zehu*[2], *LYU Zengzai*[1], *YAN Shuo*[1], *GAO Jingming*[1]

(1.Yunnan Geological and Mineral Construction Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650200, China;
2.Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

Abstract: At present, pre-splitting blasting technology is not used in the construction of bench slope in an open-pit in Yunnan, which leads to unsatisfactory slope forming effect. In order to improve the forming quality and design coincidence rate of the bench slope with small-dip in the stope, the pre-splitting blasting test was carried out for the 55° gentle slope. Using the control variable method, the field control test was carried out with the pre-splitting hole spacing, line charge density and hole diameter as variables. The test results show that it is feasible to use the pre-splitting blasting method to realize the forming of the gentle bench slope with a small-dip of 55° in the blasting area. The quality of the slope is significantly improved after blasting, and the design coincidence rate is high. When the hole spacing is 1.3 m, the hole diameter is 115 mm, and the linear charge density is 0.8 kg/m, the test area achieves the best blasting effect, and the residual hole mark rate of the blast hole is about 80%.

Key words: Gently inclined slope, Pre-splitting blasting, Residual hole mark rate, Blasting parameter

0 引言

预裂爆破是指在主爆区爆破前先起爆,以形成一定宽度的预裂缝,而这条预裂缝能够减少爆炸应力波向需要保留的围岩传播,从而降低对边坡保留围岩的损伤[1]。在预裂爆破工程实践中,如何合理选择爆破参数(如孔距、线装药密度)一直是技术人员和科研者关注的问题,对地质条件复杂的矿山开采条件,爆破参数的合理选择尤为重要[2]。

近年来,学者们通过数值模拟和相似模型试验及现场试验,在预裂爆破成缝机理及工程应用方面取得了诸多研究成果。例如,MA等[3]利用爆破理论及经验公式,计算得到孔距、装药不耦合系数、线装药密度等参数,将其应用于爆破工程中,取得了良好的爆破效果。李祥龙等[4]为了得到合理的预裂爆破参数,利用相似模型试验,采用极差及方差分析法对预裂爆破参数的敏感系数进行分析,得到最佳的不耦合系数及延期时间。唐毅等[5]以漳州核电一期工程为研究背景,通过设计合理的爆破参数并在现场应用,取得良好的爆破效果。宗琦等[6]利用数值仿真及经验公式对不耦合系数、孔距等参数进行分析,得出不耦合系数为4.06、孔距为2.5 m时,爆破

* **收稿日期**:2025-02-25
基金项目:国家自然科学基金项目(52274083)
作者简介:刘浩(1997—),男,云南宣威人,工程师,主要从事爆破工程及矿山管理工作。E-mail:15927198429@163.com
通信作者:赵泽虎(1994—),男,贵州毕节人,博士研究生,主要从事岩石破碎及工程爆破研究工作。E-mail:zhaojp0417@163.com

效果最佳,并在工程中得到了应用。雷晓军等[7]以银江水电站为研究背景,在现场进行了试验,在排间延期时间与孔间延时分别为 60 ms、17 ms 时取得最好的效果。陈啸林等[8]进行数值模拟及模型试验,在孔距为 9 倍孔径、延期时间为 12 ms 时,取得的预裂爆破效果最佳。李杰等[9]对露天矿山进行预裂爆破,建立了导向空孔模型,通过计算得到预裂爆破参数,当导向孔直径为 120 mm、不耦合系数为 1.5、孔距为 2.2 m 时,预裂爆破效果最佳。杜远云等[10]为了提高高边坡的稳定,采用了预裂爆破技术,通过从孔距、起爆方式及装药结构等方面进行优化,最终通过现场验证获得最佳参数。吴求忠[11]研究发现,采用大孔径预裂爆破技术能够较好地控制边坡的稳定性。王亚强等[12]结合岩石的物理力学参数,通过理论计算得到线装药密度,并通过数值仿真,得出预裂缝宽度与线装药密度间的关系。王子琛等[13]通过正交试验设计,确定了最佳预裂爆破的孔距、延期时间等参数。

以上研究从理论分析、现场试验及数值仿真等方面对预裂爆破技术进行了研究,丰富和完善了预裂爆破的理论基础及在复杂地质条件下的现场应用。目前,预裂孔的倾角大多大于 65°。然而对于岩体较为发育、地质条件复杂的露天采场进行预裂爆破,台阶坡面角为 55°的预裂爆破工程试验仍鲜有报道。因此,本文以云南某破碎岩体露天采场爆破为背景,开展小倾角预裂爆破试验,旨在提高边坡的稳定性并减轻对围岩的损伤,也可为类似爆破工程提供一定的实际参考。

1 工程概况

1.1 工程地质条件

试验区域岩性为泥质灰岩,岩体完整性、均质性较差,节理裂隙发育,局部区域含软弱夹层,爆破难度中等。爆区的岩石力学参数见表 1。

表 1 试验区域岩石力学参数

Table 1 Mechanics parameters of rock in the test area

岩性	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	f 值
泥质灰岩	60.5	4.19	33.8	0.33	4～6

1.2 台阶参数

试验矿区采用露天开采方式,台阶高度为 15 m,安全平台宽度为 5 m,清扫平台宽度为 8 m,台阶坡面角为 45°～60°。试验边坡位于采场西南部的 1 805～1 790 m 区域,属于永久性靠帮边坡,坡面角为 55°,穿爆作业平台实际标高为 1 808 m。

1.3 周边环境

保护对象主要集中于试验区西侧、西北侧,包含一般民用建筑、工业和商业建筑物、公共道路、输变电线路及设备等,其中最近者距离试验区域约 200 m。试验区位置及周边环境如图 1 所示。



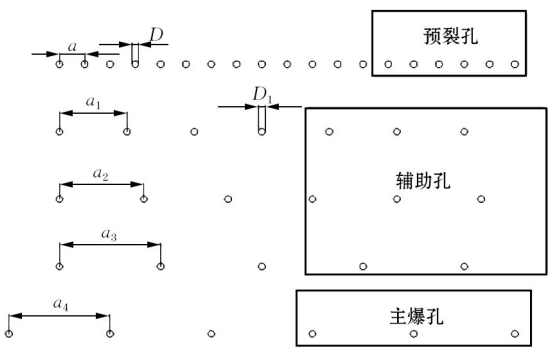
图 1 试验区位置及周边环境示意

Fig.1 Schematic of location and surrounding environment of the test area

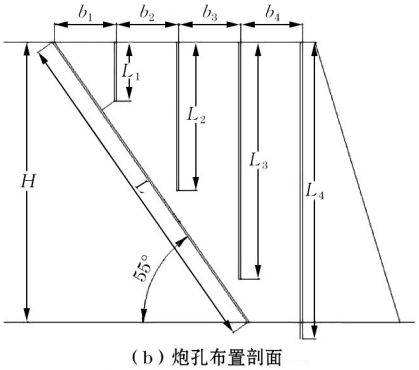
2 预裂爆破试验方案

2.1 布孔方式

预裂爆破试验的布孔方式为:在同一爆区同时布置预裂孔、辅助孔和主爆孔。其中,预裂孔为斜孔,穿孔角度与台阶坡面角相同,辅助孔与主爆孔均布置为垂直孔。由于本次试验区域边坡坡面平距达 12.6 m,为确保坡面以上三角形区域岩石充分破碎,需布置三排辅助孔。炮孔布置如图 2 所示。



(a) 炮孔布置平面



(b) 炮孔布置剖面

图 2 炮孔布置

Fig.2 Borehole layout

2.2 爆破参数设计

(1) 预裂孔孔径的确定。综合考虑矿山现有穿孔设备,选取预裂孔孔径 D 为 115 mm 和 140 mm,作为一组对照变量。相关研究指出,装药不耦合系数在 2～5 范围内较为适宜[14]。

(2) 预裂孔孔距的确定。预裂孔孔距 a 一般以预裂孔孔径 D 的倍数表示。一般取穿孔直径的 8～12 倍可取得较好的成缝效果[15]。考虑本次试验为初次试验,取预裂孔孔距 a 为 1.3 m 和 1.5 m,作为一组对照变量。

(3) 预裂孔长度的确定。预裂孔长度 L 可根据式(1)计算[16],也可在绘图软件中制图量测确定。最终计算得预裂孔长度 $L=22$ m。

$$L=\frac{H}{\sin\alpha}+h \tag{1}$$

式中:L 为预裂孔长度;H 为台阶高度;α 为预裂孔穿孔角度,取 55°;h 为超深,取 0。

(4) 排距的确定。炮孔排距 b 的设计主要是针对辅助孔和主爆孔,目前尚无固定取值或统一计算方法。布置辅助孔、主爆孔时,应确保爆后坡面外侧岩体充分破碎。可将辅助孔、主爆孔均匀布置于主爆区岩体中,以获得良好破碎效果。通过炮孔剖面设计图的调整与优化,确定本次试验中 $b_1=b_2=b_3=b_4=4$ m(见图 2)。

(5) 辅助孔、主爆孔孔径均取 140 mm。

(6) 辅助孔、主爆孔深度的确定。辅助孔孔深的确定应保证其孔底与预裂面之间保持不小于 1～1.5 m 的垂直安全距离 $D_{安}$。可采用三角函数计算法或绘图量测法确定孔深,其中绘图量测法较为便捷,适用于爆前的室内设计;三角函数计算法则更适用于现场临时布置炮孔时的孔深计算[17]。辅助孔孔深计算公式如下:

$$L_{辅}=b_{辅}\tan\theta-\frac{D_{安}}{\cos\theta} \tag{2}$$

式中:$L_{辅}$ 为待计算的辅助孔深度;$b_{辅}$ 为预裂孔距该排辅助孔的垂直距离;$D_{安}$ 为辅助孔孔底与预裂面的垂直安全距离,一般取 1～1.5 m;θ 为台阶破面角。

经计算,取图 2 中 $L_1=4$ m,$L_2=9.7$ m,$L_3=15.4$ m,主爆孔深度取台阶高度 H 加 1 m 超深,即 $L_4=19$ m。

(7) 辅助孔及主爆孔孔距的确定。辅助孔孔距可参照常规松动爆破区域的爆破参数选取。以试验矿区为例,孔深 7 m 以下时一般取孔距 4 m,孔深 8 m 及以上可取 6 m。本次试验设计 $a_1=4$ m,$a_2=a_3=a_4=6$ m,见图 2。

(8) 线装药密度的确定。根据前期调研及岩石的动静态力学特性,为避免爆破后无法形成预裂缝而增加处理难度,并结合以往爆破工程经验,确定初次试验线装药密度为 0.8 kg/m。后续根据试验效果进行调整,计划以 0.8 kg/m、0.7 kg/m、0.6 kg/m 为一组对照变量。

(9)装药结构及填塞长度的确定。采用径向不耦合装药结构,炸药规格选用 Φ90 mm、Φ32 mm 两种。其中 Φ90 mm 炸药用于底部加强装药。孔内装药分为加强装药段、正常装药段和减弱装药段,各段长度、装药量占比、装药量见表 2。装药结构示意如图 3 所示。

表 2 预裂孔各段装药长度及炸药量分配

Table 2 Charge length and explosive quantity distribution for each segment of the presplit hole

装药段名称	装药段长度占比/%	装药段药量占比/%	不同线装药密度下炸药分配/kg		
			0.8 kg/m	0.7 kg/m	0.6 kg/m
加强装药段	20	50	9.0	7.5	6.6
正常装药段	50	30	5.4	4.5	3.9
减弱装药段	30	20	3.6	3.3	2.7
合计	100	100	18.0	15.3	13.2

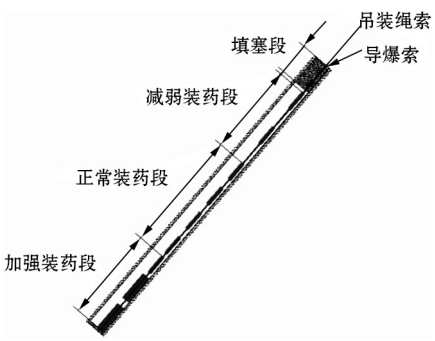


图 3 预裂孔装药结构示意

Fig.3 Schematic of charge structure of presplit hole

结合工程经验并考虑爆破安全要求,本次试验确定预裂孔的填塞长度为 2 m。

(10) 起爆网络的确定。在预裂爆破中,预裂孔需先于主爆区炮孔起爆。本次试验设定两者起爆时间差为 100 ms。此外,尽可能设置多的预裂孔同时起爆有利于预裂缝的形成和壁面整齐,但由于试验区距离居民聚居区距离最近处仅 200 m,需校核最大单响药量。校核采用萨道夫斯基公式[18]:

$$Q_{max}=R^3\left(\frac{V}{K}\right)^{\frac{3}{\beta}} \tag{3}$$

式中:Q_{max}为允许最大齐发药量,kg;R 为被保护对象与爆源的距离,取 200 m;V 为被保护对象所在地安全允许质点振速,按土坯房要求取 0.5 cm/s;K,β 分别为与地质地形条件相关的系数和衰减指数,针对试验处,K 值取 200,β 值取 1.7。

根据公式(3)计算得到的最大齐发药量及最大齐发预裂孔数见表 3。

表 3 最大单响药量及最多同时起爆孔数

Table 3 Maximum single-delay charge and maximum number of holes initiated simultaneously

最大齐发药量/kg	同时起爆的孔数/个		
	0.8 kg/m 线装药密度	0.7 kg/m 线装药密度	0.6 kg/m 线装药密度
204	11	13	15

注:不同线装药密度单孔装药量见表 2。

2.3 对照试验设计

开展 3 次试验,第二、三次试验中又以不同的预裂爆破参数进行分组设计,各次试验的具体参数设计见表 4。

表 4 对照试验设计

Table 4 Controlled test design

试验序号	组炮孔数/孔	线装药密度/(kg/m)	孔距/m	孔径/mm
11	20	0.8	1.5	115
21	10	0.8	1.3	115
22	10	0.7	1.3	115
23	10	0.6	1.3	115
31	10	0.8	1.5	140
32	10	0.8	1.3	140

注:11 表示第一次试验第一组炮孔,21 表示第二次试验第一组炮孔,22 表示第二次试验第二组炮孔,以此类推。则 11 与 12、31 与 32 是以孔距为变量的对照组;21、22、23 是以线装药密度为变量的对照组;11 与 31、21 与 32 是以孔径为变量的对照组。

3 预裂爆破施工

3.1 穿孔施工

3.1.1 穿孔设备选型

国内类似试验矿区缓边坡条件下的预裂爆破工程实践较少,因此,本次试验的另一个重要目的是验证 55°缓边坡采用预裂爆破施工的可行性。本次预裂爆破试验预裂孔穿孔作业选用分体式潜孔钻,即 JK580 型履带式液压潜孔钻,钻孔直径为 90～165 mm,换杆长度为 3.5 m,最大穿孔深度为 40 m,工作风压为 0.7～2.4 MPa。

3.1.2 质量控制措施

(1) 做好预裂孔穿孔作业面松渣清理。由于穿孔角度较缓,若孔口松渣过厚,易导致孔口位置偏移或松渣落入孔内堵塞炮孔,应确保预裂孔开孔位置位于坚硬基岩上,表面松渣厚度不宜超过 10 cm;若为岩粉状或碎屑状松渣,厚度应控制在 10 cm 以内;块石状松渣则应全部清除[19]。

(2) 预裂孔、定向点位置要布设准确,误差不得超过 5 cm。

(3) 应选择技术水平较高、具有预裂孔穿孔经验的操作人员进行预裂孔穿凿。

(4) 炮孔角度控制采用专用坡度尺,方向控制需布设定向点,预裂孔孔位与定向点连线方向即为穿孔方向,炮孔定向示意如图 4 所示。穿孔过程中应严格执行“一孔三检”制度,即在开孔时、孔深 1 m 处、孔深 3 m 处分别对炮孔角度与炮孔方向进行校核。

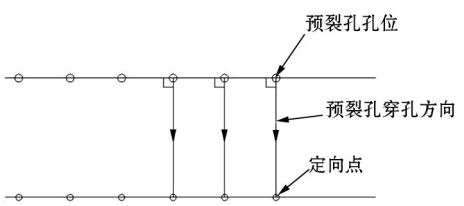


图 4 预裂孔定向示意

Fig.4 Orientation schematic of the presplit hole

3.1.3 炮孔检验

预裂孔穿凿完成后需检验炮孔质量,目视检验内容包括:观察所有预裂孔孔口位置是否处于一条直线上;使用强光手电筒照射孔内,观察孔壁面是否光滑,以及炮孔延伸方向有无弯曲或偏移等。测量检验则主要测量穿孔深度和穿孔角度:深度使用皮尺测量,允许误差为±20 cm,超出即为不合格;角度测量时,将长直杆靠于炮孔内壁,再用坡度尺测量,允许偏差为±2°,超出即为不合格。试验区域炮孔目视检验合格率约 90%(个别炮孔孔位存在少量位移),穿孔深度合格率 100%,穿孔角度合格率 85%。

3.2 爆破施工

预裂爆破装药施工一般工序繁琐,耗时较长。本次试验中,通过一系列施工优化改进措施,使得预裂孔施工效率大幅提升,施工进度在试验矿区可做到与常规爆破区域同时起爆,不影响施工进度。装药施工优化改进措施如下。

(1) 取消常规预裂爆破中为隔离炸药与孔壁而捆绑竹片、PVC 管等做法,改为将捆绑好的炸药集束直接装入孔内。

(2) 采用自锁式尼龙扎带作为药卷捆绑固定器材,大幅提升药卷捆绑速度,如图 5 所示。



图 5 药卷捆绑固定方法

Fig.5 Cartridge binding and fixing method

(3) 针对预裂孔药串分段多(达 20～30 段)、各段点位、捆绑药量要求精确的特点,改为由工程技术人员按装药结构预先制作一条标准药串模板,平铺于地面。施工人员随后截取相同长度导爆索、吊装绳索集束,自下而上参照模板在对应位置捆绑规定药量,即可完成药串加工。

4 试验效果评价

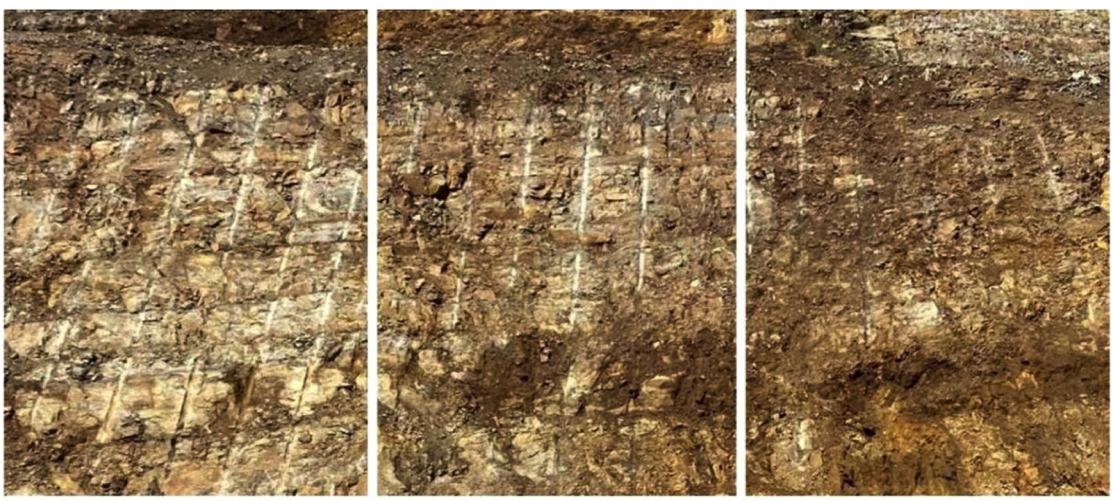
(1) 评价指标。本试验的预裂爆破效果评价采用炮孔留痕率和坡面观感质量两个指标。其中,坡面观感质量分级标准为:较好(坡面整体平整,无明显凹陷或突起,无挂帮浮石);一般(坡面整体平整,但局部有凹陷或凸起,有少量挂帮浮石);较差(坡面不平整,凹凸明显,挂帮破碎浮石较多)。

(2) 不同线装药密度下的爆破效果对比见表 5 和图 6,预裂孔的孔径为 115 mm,孔距为 1.3 m。

表 5 不同线装药密度下的爆破效果对比

Table 5 Comparison of blasting effects under different linear charge densities

线装药密度/(kg/m)	炮孔残留孔痕率/%	坡面观感质量
0.8	70～80	较好
0.7	40～50	一般
0.6	20～30	较差



(a) 0.8 kg/m (b) 0.7 kg/m (c) 0.6 kg/m

图 6 不同线装药密度的爆破效果

Fig.6 Blasting effects under different linear charge densities

结合表 5 中的三组试验数据及图 6 中的爆破效果,可得出结论:在试验区域的具体地质条件下,线装药密度为 0.8 kg/m 时,预裂爆破效果较优。

(3) 不同预裂孔孔距与孔径组合下的爆破效果对比,见表 6 及图 7 至图 10,线装药密度均为 0.8 kg/m。

表 6 不同孔距与孔径组合下的爆破效果对比

Table 6 Comparison of blasting effects under different combinations of hole spacing and diameter

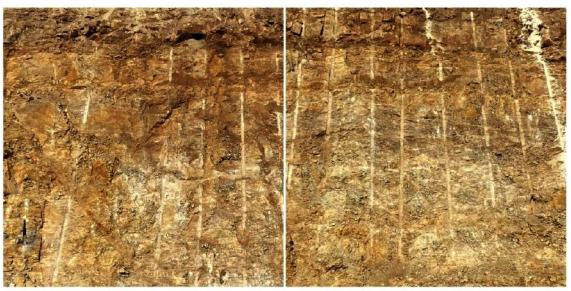
数据编号	孔径/mm	孔距/m	炮孔残留孔痕率/%	坡面观感质量
①	115	1.5	50～60	一般
②	115	1.3	70～80	较好
③	140	1.5	40～50	一般
④	140	1.3	60～70	较好



（a）孔距 1.5 m　　（b）孔距 1.3 m

图 7　孔距为对照变量时的爆破效果对比(孔径 115 mm)

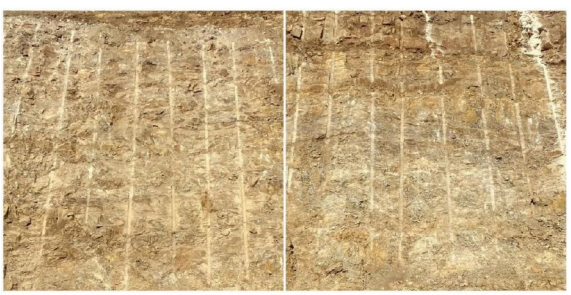
Fig.7　Comparison of blasting effects with hole spacing as the control variable (hole diameter: 115 mm)



（a）孔距 1.5 m　　（b）孔距 1.3 m

图 8　孔距为对照变量时的爆破效果对比(孔径 140 mm)

Fig.8　Comparison of blasting effects with hole spacing as the control variable (hole diameter: 140 mm)



（a）孔径 115 mm　　（b）孔径 140 mm

图 9　孔径为对照变量时的爆破效果对比(孔距 1.3 m)

Fig.9　Comparison of blasting effects with hole diameter as the control variable (hole spacing: 1.3 m)



（a）孔径 115 mm　　（b）孔径 140 mm

图 10　孔径为对照变量时的爆破效果对比(孔距 1.5 m)

Fig.10　Comparison of blasting effects with hole diameter as the control variable (hole spacing: 1.5 m)

表 6 中，①②两组与③④两组数据、图 7 和图 8 均以孔距为变量时的爆破效果对比。通过分析可知，预裂孔孔距是影响预裂爆破效果的重要因素，孔距越小，预裂爆破效果越好，具体表现为炮孔残留孔痕率越高、坡面越平整。对于本试验区地质条件，孔距 1.3 m 为较优取值。

表 6 中，①③两组与②④两组数据、图 9 和图 10 均以孔径为变量时的爆破效果对比。通过分析可知，在试验区地质条件下，预裂孔孔径 115 mm 的预裂爆破效果略优于孔径 140 mm 的爆破效果，但两者无显著差异。

5　结论

针对云南某露天采场节理裂隙发育、台阶坡面角较小的开采条件，当用梯度爆破时，针对二次修坡时费钱费力的情况，本文提出使用小倾角预裂爆破的方法，通过理论计算及现场预裂爆破试验，对比分析了相同线装药密度下，不同孔距、孔径时的爆破效果；相同孔距、孔径条件下，不同线装药密度时的爆破效果，得出以下结论。

（1）对于该矿山岩体节理裂隙发育及台阶坡面角较小的边坡工程，使用小倾角预裂爆破能达到工程要求。

（2）当线装药密度、孔距及孔径分别为 0.8 kg/m、1.3 m 及 115 mm 时，预裂爆破效果最好，残留孔痕率为 70%～80%。

参考文献(References)：

[1]　陈啸林，彭磊.爆破参数对预裂爆破裂纹扩展规律的影响研究[J].有色金属(矿山部分)，20023，75(4)：97-106.
CHEN Xiaolin，PENG Lei. Influence of blasting parameters on the crack propagation law of presplitting blasting[J]. Nonferrous Metals(Mining Section)，2023，75(4)：97-106.

[2]　MA Jun，LI Xianglong，WANG Jianguo，et al. Numerical simulation on selection of optimal delay time for precise delay blasting[J].Shock and Vibration，2021(1)：4593221.

[3]　MA Jun，LI Xianglong，WANG Jianguo，et al. Experimental study on vibration reduction technology of hole-by-hole presplitting blasting [J]. Geofluids，2021(10)：5403969.

[4]　李祥龙，杨长辉，王建国，等.基于模型试验的预裂孔爆破参数优选[J].高压物理学报，2022，36(2)：190-196.
LI Xianglong，YANG Changhui，WANG Jianguo，et al. Parameter optimization of presplitting blasting based on model test[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics，2022，36(2)：190-196.

[5] 唐毅,孙飞,李广洲,等.复杂工况下高边坡预裂爆破技术及施工工艺研究[J].爆破 2020,37(1):87-93.
TANG Yi, SUN Fei, LI Guangzhou, et al. Research on pre-splitting blasting technology and construction process for high slope under complicated conditions[J]. Blasting, 2020, 37(1):87-93.

[6] 宗琦,鲁智成,汪海波,等.露天矿山大孔径预裂爆破参数研究与应用[J].煤矿爆破,2024,42(2):1-5+16.
ZONG Qi, LU Zhicheng, WANG Haibo, et al. Research and application of large aperture pre-splitting blasting parameters in open-pit mines[J]. Coal Mine Blasting, 2024, 42(2):1-5+16.

[7] 雷晓军,马元军,李斌,等.银江水电站右岸高陡边坡控制爆破技术[J].工程爆破,2024,30(2):73-77.
LEI Xiaojun, MA Yuanjun, LI Bin, et al. Controlled blasting technology for high and steep slope on the right bank of Yinjiang hydropower station [J]. Engineering Blasting, 2024, 30(2):73-77.

[8] 陈啸林,张智宇,王凯,等.某露天矿山预裂爆破参数优选与试验研究[J].高压物理学报,2023,37(6):181-194.
CHEN Xiaolin, ZHANG Zhiyu, WANG Kai, et al. Optimization and experimental study of pre-splitting blasting parameters in a certain open-pit mine[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(6):181-194.

[9] 李杰,赵明生,杜炼.露天矿山边坡预裂爆破导向空孔技术研究及应用[J].矿业研究与开发,2022,42(9):14-21.
LI Jie, ZHAO Mingsheng, DU Lian. Research and application of guided empty hole technology for presplitting blasting in open-pit slope [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(9):14-21.

[10] 杜远云,张永.露天矿山高陡边坡预裂爆破技术应用与实践[J].矿业工程,2024,22(2):8-11.
DU Yuanyun, ZHANG Yong. Application and practice of pre-splitting blasting technology for high-and-steep slopes in open-pit mines[J]. Mining Engineering, 2024, 22(2):8-11.

[11] 吴求忠.大孔径垂直预裂爆破施工技术在欧山石灰岩矿靠帮边坡中的应用实践[J].煤矿爆破,2022,40(1):29-31.
WU Qiuzhong. Application of large aperture vertical pre-splitting blasting technology in the side slope of Oushan limestone mine[J]. Coal Mine Blasting, 2022, 40(1):29-31.

[12] 王亚强,杨海涛,李晨,等.预裂爆破成缝宽度与线装药密度关系试验研究[J].金属矿山,2021(7):89-95.
WANG Yaqiang, YANG Haitao, LI Chen, et al. Experimental study on the relationship between the width of pre-split blasting joints and the density of line charges[J]. Metal Mines, 2021(7):89-95.

[13] 王子琛,李祥龙,王惠芬,等.基于正交设计模拟实验的预裂爆破参数优化方法研究[J].有色金属工程,2021,11(5):96-101.
WANG Zichen, LI Xianglong, WANG Huifen, et al. Study on optimization method of pre-splitting blasting parameters based on orthogonal design simulation experiment [J]. Nonferrous Metal Engineering, 2021, 11(5):96-101.

[14] 杨跃宗,邵珠山,熊小锋,等.岩石爆破中径向和轴向不耦合装药的对比分析[J].爆破,2018,35(4):26-33+146.
YANG Yuezong, SHAO Zhushan, XIONG Xiaofeng, et al. Comparison of radial and axial uncoupled charge in rock blasting[J]. Blasting, 2018, 35(4):26-33+146.

[15] ZHANG Baisheng, YANG Zhinping, YANG Xuming, et al. Presplit blasting technique in treating hard overlying strata: from numerical simulation to field practice [J]. Advances in Civil Engineering, 2021:5558538.

[16] 刘为洲.复杂含水岩体预裂爆破参数试验研究[J].金属矿山,2020(2):169-176.
LIU Weizhou. Test study on pre-split blasting parameters of complex water-bearing rock mass[J]. Metal Mine, 2020(2): 169-176.

[17] XIAO Shuanghuang, WANG Hongsheng, DONG Guowei. A preliminary study on the design method for large-diameter deep-hole presplit blasting and its vibration-isolation effect [J]. Shock and Vibration, 2019:2038578.

[18] 王玉杰.爆破工程[M].武汉:武汉理工大学出版社,2018.
WANG Yujie. Blasting engineering[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2018.

[19] 杨超.预裂爆破在白马铁矿边坡靠帮中的应用[J].工程爆破,2019,25(1):32-37.
YANG Chao. The application of pre-splitting blasting in the siding slope of Baima Iron Mine[J]. Engineering Blasting, 2019, 25(1):32-37.

[20] RAINA A K. Influence of joint conditions and blast design on presplit blasting using response surface analysis[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(10):4057-4070.