

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.02.004

涉水边坡预裂爆破参数优化试验研究*

钟冬望^{1,2}, 陶好好¹, 李琳娜¹, 李腾飞¹, 何理^{1,2}, 司剑峰^{1,2,3}, 万佳伟¹, 高晗¹

(1. 武汉科技大学理学院, 武汉 430065; 2. 湖北省智能爆破工程技术研究中心, 武汉 430065;

3. 中铁四院集团工程运维有限责任公司, 武汉 430061)

摘要: 边坡预裂爆破在河道边坡一次成型开挖中有着广泛的应用, 可有效减小边坡面保留岩体损伤, 降低爆破振动强度, 研究涉水边坡预裂爆破的合理参数对河道涉水爆破开挖工程具有重要意义。基于相似原理中的几何相似、物理相似与动力学相似设计了涉水边坡预裂爆破的试验模型, 决定采用混凝土替代红砂岩、采用雷管替代乳化炸药进行试验; 并对不同工况下的预裂缝成缝质量、边坡坡面成型质量、保留岩体损伤进行监测, 结果发现孔径由0.8 cm增加至1.2 cm, 预裂缝的成缝质量以及边坡成型质量有明显提升, 保留岩体的损伤降低24.86%; 现场试验结果表明: 在涉水边坡预裂爆破工程实践中, 当地质条件为中硬岩石时, 采用115 mm的预裂孔孔径以及80 cm的预裂孔孔距, 可取得较好的爆破效果。研究结果可为类似工程项目的预裂孔参数优化提供参考依据。

关键词: 涉水边坡; 预裂爆破; 预裂孔参数优化; 岩体损伤; 模型试验

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)02-0031-13

Experimental Study on Optimization of Presplitting Blasting Parameters for Water-adjacent Slopes

ZHONG Dong-wang^{1,2}, TAO Hao-hao¹, LI Lin-na¹, LI Teng-fei¹,
HE Li^{1,2}, SI Jian-feng^{1,2,3}, WAN Jia-wei¹, GAO Han¹

(1. College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

2. Hubei Intelligent Blasting Engineering Technology Research Center, Wuhan 430065, China;

3. China Railway Fourth Institute Group Engineering Operation and Maintenance Limited
Liability Company, Wuhan 430061, China)

Abstract: Pre-splitting blasting has been widely employed in river channel slope excavation to effectively mitigate damage to the retained rock mass, reduce blast-induced vibrations, and optimize blasting parameters for water-saturated slopes. Investigation of reasonable parameters for pre-splitting blasting in such conditions is important for river channel excavation projects. Based on geometric, physical, and dynamic similarity principles, an experimental

收稿日期 (Date of reception): 2024-11-28

网络首发日期 (Published online): 2025-03-26

作者简介: 钟冬望 (1963-), 男, 教授、博士生导师, 主要从事工程爆破、控制爆破方面研究, (E-mail) zhongdw123@wust.edu.cn.

通讯作者: 陶好好 (2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事爆破过程中数字化施工管理及孪生模型构建的研究, (E-mail) taohaohao@wust.edu.cn.

基金项目: 湖北省重点研发计划项目 (2020BCA084); 国家自然科学基金 (52274136); 湖北省自然科学基金项目 (2022CFB594); 武汉科技大学研究生创新创业基金 (JCX2021064)

About the author: ZHONG Dong-wang (1963-), male, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in engineering blasting and controlled blasting research, (E-mail) zhongdw123@wust.edu.cn.

Corresponding author: TAO Hao-hao (2000-), male, master candidate, mainly engaged in gas diffusion, explosion and structural blast resistance in urban comprehensive pipeline corridors research, (E-mail) taohaohao@wust.edu.cn.

Fund Programs: National key research and development program of Hubei province (2020BCA084), National Natural Science Foundation of China (52274136), Natural Science Foundation of Hubei Province (2022CFB594), Graduate Student Innovation and Entrepreneurship Foundation of Wuhan University of Science and Technology (JCX2021064)

model for pre-splitting blasting water-saturated slopes was designed, utilizing concrete as a substitute for red sandstone and detonators instead of emulsified explosives. The quality of pre-split crack formation, slope face shaping, and retained rock mass damage were evaluated under various conditions. The results showed that the pre-split crack formation quality and slope shaping quality significantly improved. The damage to the retained rock mass was reduced by 24.86% when the hole diameter increased from 0.8 cm to 1.2 cm. Field test results indicated that the optimal blasting effect can be achieved with a pre-split hole diameter of 115 mm and a hole spacing of 80 cm in a practical application of pre-splitting blasting for water-saturated slopes when the geological conditions involve medium-hard rocks.

Key words: water-adjacent slopes; pre-splitting blasting; parameter optimization; rock mass damage; model test

涉水边坡预裂爆破在河道开挖工程中能够形成较好的边坡面,研究涉水边坡预裂爆破的合理参数对河道水下爆破开挖工程具有重要意义。预裂爆破是指在爆破主爆区后方钻设一排大密度、大孔径、小装药量的预裂孔,并在主炮孔起爆前进行起爆形成一条预裂缝的爆破施工工艺^[1]。预裂爆破可缓冲和反射主爆区产生的爆破应力波,达到降低对周边待保留岩体的破坏以及周边待保护建(构)筑物爆破振动的目的;并且通过合理的设计预裂爆破的爆破参数,可在预裂面上形成较为完整的开挖剖面^[2]。

影响预裂爆破开挖效果的主要参数有预裂孔孔距^[3,4]、孔径^[4,5]、不耦合系数^[6-8]、装药结构等。陆上预裂爆破的参数优化得到了众多学者的广泛研究^[9],如:陈俊桦等提出了基于岩石爆破损伤理论的预裂爆破参数设计^[10],弥补了经验类比法无理论依据的缺陷,通过现场试验验证了该理论的有效性,为后续预裂爆破工程提供了爆破参数理论计算公式;叶海旺等提出将时序控制方法运用于预裂爆破中^[11],在现场试验验证中证明该方法可有效降低钻孔工作量和装药量,降低保留岩体损伤;刘连生等研究了基于工程地质分区的预裂爆破参数优化^[12],根据不同的工程地质情况采用不同的线装药密度,可有效提高预裂爆破半孔率,降低大块率。上述学者的研究为进行预裂爆破的孔网参数优化提供了方向。此外,预裂爆破待保留建构筑物的损伤与振动也是评价预裂爆破效果的重要指标。陈星良通过声波测井信号实现对爆后保留岩体的损伤监测^[13],进而通过分析得出了不同孔深对应的线装药密度;饶宇等通过对现场试验获取的爆破振动信号进行分析^[14],研究发现预裂缝能够有效的阻挡主爆孔的爆破能量的传播,并存在高频滤波效应;李祥龙等对现场试验获取的爆破振动信号进行分析^[15],采用预裂爆破的施工方案能够使爆破振动峰值降低 38.5%。上述研究说明通过合理的设置预裂爆破的孔网参数能够有效降低待保留岩体的损伤与周边建(构)筑物的爆破振动。

目前学者对涉水边坡预裂爆破的研究还比较少,已有研究主要集中在水下垂直钻孔爆破,如:彭鑫等通过 LS-DYNA 软件研究了水介质下不耦合装药的预裂缝成缝情况^[16];于建新等研究了不同装药位置和多孔起爆下水下深孔爆破的岩石裂纹扩展和损伤规律^[17];卫豪通过 LS-DYNA 有限元模拟了不同起爆方式、水深条件、孔网参数下的爆破岩石响应^[18],并通过机器学习得到了最优的爆破孔网参数及起爆方法。此外,在涉水预裂爆破的减振效果方面,张兵文等通过现场试验的爆破振动进行分析表明^[19],涉水预裂爆破同样可以有效降低待保护建构筑物的爆破振动。上述学者的研究为进行涉水边坡预裂爆破预裂孔参数优化研究和爆破效果评价提供了理论指导和参考。

以广西平陆运河工程为背景,通过进行涉水边坡预裂爆破模型实验对预裂孔参数进行优化设计,并通过现场试验验证优化后的预裂孔参数的合理性,可为后续涉水边坡预裂爆破的爆破参数取值提供一定的参考。

1 涉水边坡预裂爆破破岩机理

炸药爆炸是一个瞬态高能的过程,其产生的爆炸冲击波是造成炮孔周边岩石破碎区的主要原因。冲击波的传播示意图如图 1 所示,其中 D 为冲击波在介质中的传播速度, P_0 、 ρ_0 、 E_0 、 μ_0 为冲击波波阵面前的介质的压力、密度、内能、质点运动速度, P_1 、 ρ_1 、 E_1 、 μ_1 为冲击波波阵面后的介质的压力、密度、内能、质点运动速度。

无论是陆上钻孔爆破还是水下钻孔爆破,其冲击波传播规律均满足相同的守恒方程,分别为

质量守恒

$$\rho_0(D - \mu_0) = \rho_1(D - \mu_1) \quad (1)$$

动量守恒

$$P_1 - P_0 = \rho_0(D - \mu_0)(\mu_1 - \mu_0) \quad (2)$$

能量守恒

$$(E_1 - E_0) + \frac{1}{2}(\mu_1^2 - \mu_0^2) = \frac{P_1\mu_1 - P_0\mu_0}{\rho_0(D - \mu_0)} \quad (3)$$

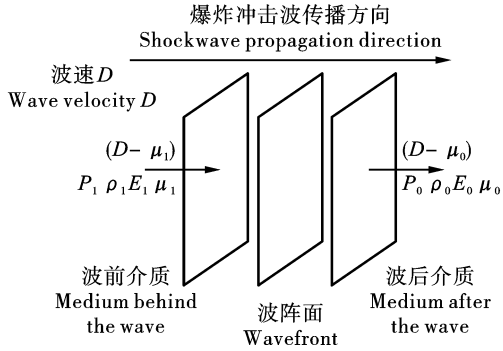


图 1 爆炸冲击波传播规律

Fig. 1 Shock wave propagation from explosion

联立公式(1)、公式(2)可得

$$D = \sqrt{\frac{\rho_1(P_1 - P_0)}{\rho_0(\rho_1 - \rho_0)}} \quad (4)$$

$$\mu_1 - \mu_0 = \sqrt{\frac{(P_1 - P_0)(\rho_1 - \rho_0)}{\rho_0\rho_1}} \quad (5)$$

$$E_1 - E_0 = \frac{(P_1 + P_0)(\rho_1 - \rho_0)}{2\rho_0\rho_1} \quad (6)$$

对于陆上爆破或浅水域爆破,通常介质的压力远小于爆破冲击波的压力,因此可将冲击波波阵面前的介质压力忽略。此时,可将公式(4)化简为

$$D = \sqrt{\frac{\rho_1 P_1}{\rho_0(\rho_1 - \rho_0)}} \quad (7)$$

$$\mu_1 - \mu_0 = \sqrt{\frac{P_1(\rho_1 - \rho_0)}{\rho_0\rho_1}} \quad (8)$$

$$E_1 - E_0 = \frac{P_1(\rho_1 - \rho_0)}{2\rho_0\rho_1} \quad (9)$$

此时,若能知道介质压力与密度之间的关系,则可以计算出爆破冲击波传播到某一点的波速、质点运动速度以及内能的变化量。但涉水爆破与陆上爆破对岩石的破坏作用效果不同,主要表现在涉水爆破时炮孔内部为水耦合装药,并且周边岩体处在富水环境中,这会加强爆炸冲击波对周边岩体的破坏。造成这种情况的主要原因是水耦合装药时,爆破冲击波在水-岩石交界面上的耗散更小。爆炸冲击波在介质交界面上的透反射如图 2 所示。

入射波、透射波、反射波之间的关系如公式(10)所示。

$$\begin{cases} \sigma_R = \frac{\rho_b(C_p)_b - \rho_a(C_p)_a}{\rho_b(C_p)_b + \rho_a(C_p)_a} \sigma_I \\ \sigma_T = \frac{2\rho_b(C_p)_b}{\rho_b(C_p)_b + \rho_a(C_p)_a} \sigma_I \end{cases} \quad (10)$$

式中: σ_I 为入射应力波,MPa; σ_R 为反射应力波,MPa; σ_T 为透射应力波,MPa; ρ_a 为入射波介质的密度,kg/m³; $(C_p)_a$ 为入射波介质的纵波波速,m/s;

ρ_b 为透射波介质的密度,kg/m³; $(C_p)_b$ 为透射波介质的纵波波速,m/s。由式(10)不难看出,在入射应力波的强度以及透射波介质的密度和纵波波速的恒定的情况下,入射波介质的密度和纵波波速越大,反射应力波和透射应力波的强度越小。水的密度和纵波波速均大于空气,因此在进行涉水边坡预裂爆破的试验时,预裂孔的药量不同于陆上边坡预裂爆破的药量。

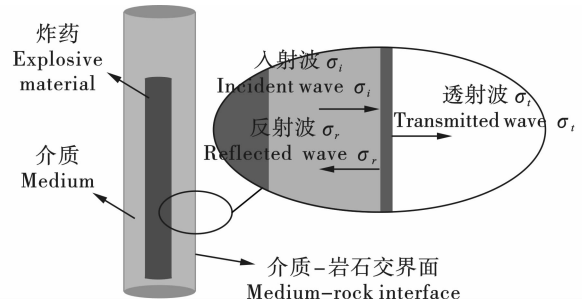


图 2 爆炸冲击波在岩石界面上的透反射

Fig. 2 Transmission and reflection of explosive shock waves at rock interfaces

2 模型试验

2.1 试验设计

模型试验对标广西平陆运河涉水边坡预裂爆破工程项目,该边坡台阶高度 10 m,边坡比 1:2,工程地质主要为红砂岩。因此,基于相似原理进行爆破工程现场的模型试验的设计^[20]。对于爆炸动力学模型试验,其需要考虑的相似原理主要包括几何相似、物理相似以及动力学相似。

(1) 几何相似

涉水边坡预裂爆破爆破通过在 10 m 高的台阶上通过预裂爆破形成一个边坡比为 1:2 的边坡,边坡坡面角为 27°。模型试验为满足几何相似,将现场爆破施工的尺寸进行放缩,得到模型试验所需的几何模型,如图 3 所示。

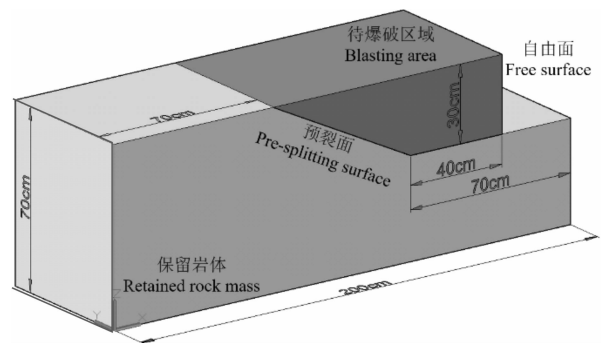


图 3 边坡预裂爆破模型试验试件尺寸

Fig. 3 Test specimen sizes for pre-splitting blasting model

模型试验台阶高度 30 cm,预裂孔孔深为 32 cm,其中超深 2 cm,其他详细参数如图 4 所示。

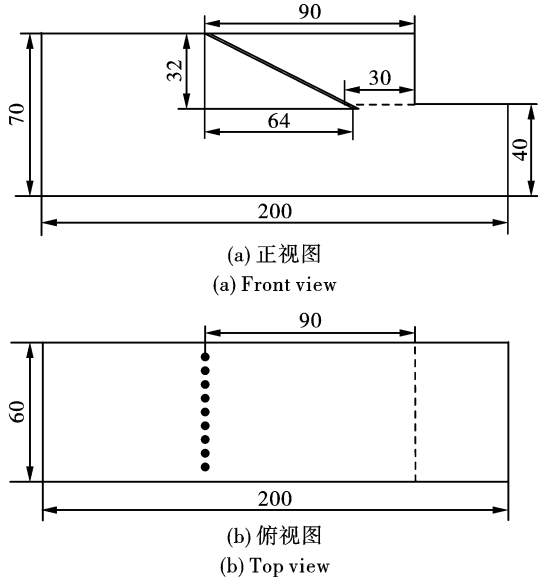


图4 预裂孔示意图(单位:cm)

Fig. 4 Schematic diagram of pre-splitting hole(unit:cm)

现场雷管直径约为6 mm,故取预裂孔直径为8 mm、10 mm、12 mm 三种工况。根据《水运工程爆破技术规范》(JTS 204—2023)^[21],炮孔间距可取孔径的8倍~12倍,硬岩取大值,软岩取小值,红砂岩为中硬岩,可取较大值;且预裂孔深度应略大于主炮孔。故当孔径为8 mm、10 mm 等2种工况时,预裂孔孔距取4.5 cm、6.0 cm、8.0 cm 等3种工况;当孔径为12 mm 时,预裂孔孔距取4.5 cm、6.0 cm、8.0 cm、10.0 cm 等4种工况。雷管采用逐孔装药与隔孔装药两种装药方式,当采用逐孔装药时每个孔装1~2发雷管;当采用隔孔装药时装药孔装1发雷管,间隔孔作为导向空孔不装雷管^[22]。3种装药结构如图5所示。

通过调整预裂孔的孔距、孔径、单孔装药量,涉水边坡预裂爆破模型试验共有15种工况,每种工况的预裂孔孔网参数设计值如表1所示。

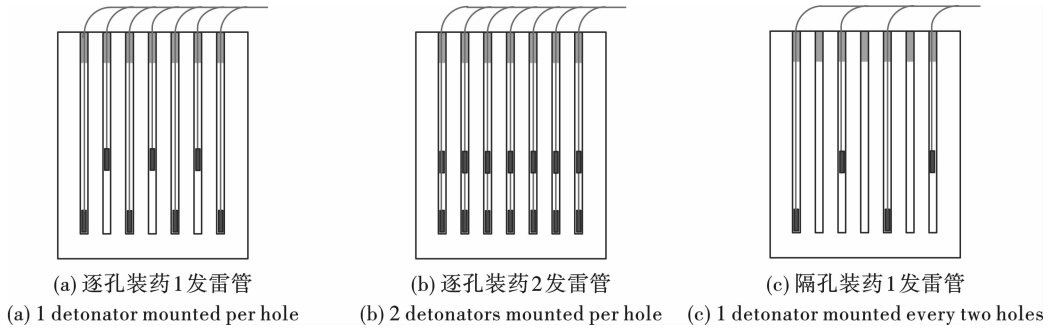


图5 装药结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of charging structure

表1 试验工况汇总表

Table 1 Summary of model test conditions

工况 (Working conditions)	预裂孔参数(Pre-splitting hole parameters)				
	孔径 (Diameter) D/mm	孔距 (Spacing) a/cm	孔数 (Number) $m/个$	平均单孔雷管数 (Average number of detonators per hole) $n/发$	雷管总数 (Total number of detonators) $n_{sum}/发$
1	0.8	4.5	12	1	12
2	0.8	6.0	9	1	10
3	0.8	8.0	6	1	6
4	1.0	4.5	12	2	24
5	1.0	4.5	12	1	12
6	1.0	4.5	12	0.5	6
7	1.0	6.0	9	1	9
8	1.0	6.0	9	0.5	5
9	1.0	8.0	6	1	6
10	1.2	4.5	12	1	12
11	1.2	4.5	12	0.5	6
12	1.2	6.0	9	1	9
13	1.2	6.0	9	0.5	5
14	1.2	8.0	6	1	6
15	1.2	10.0	5	2	10

(2)物理相似

试验模型采用与现场涉水边坡预裂爆破岩层主

要成分红砂岩物理力学性质极为相似的 C30 混凝土,

红砂岩与 C30 混凝土物理力学性质如表 2 所示。

表 2 红砂岩与 C30 混凝土物理力学性质对照表

Table 2 Comparison of physical and mechanical properties of red sandstone and C30 concrete

材料 (Material)	密度 (Density) $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 (Poisson's ratio) γ	弹性模量 (Elastic modulus) E / GPa	抗拉强度 (Tensile strength) f_c / MPa
红砂岩 (Red sandstone)	2459	0.18	28.6	1.9
C30 混凝土 (C30 concrete)	2350	0.21	30.0	2.0

(3)动力学相似

动力学相似是进行爆炸动力学模型试验最重要的相似率,一般的等效试验如落锤试验,无法有效的模拟结构在炸药爆炸时的反应速度快、作用时间短、应力峰值高的特点。因此,本次模型试验采用雷管

代替乳化炸药进行试验,可保证模型实验与工程现场施工具有动力学相似。

2.2 试验流程

涉水边坡预裂爆破模型试验试件的浇筑流程如图 6 所示。

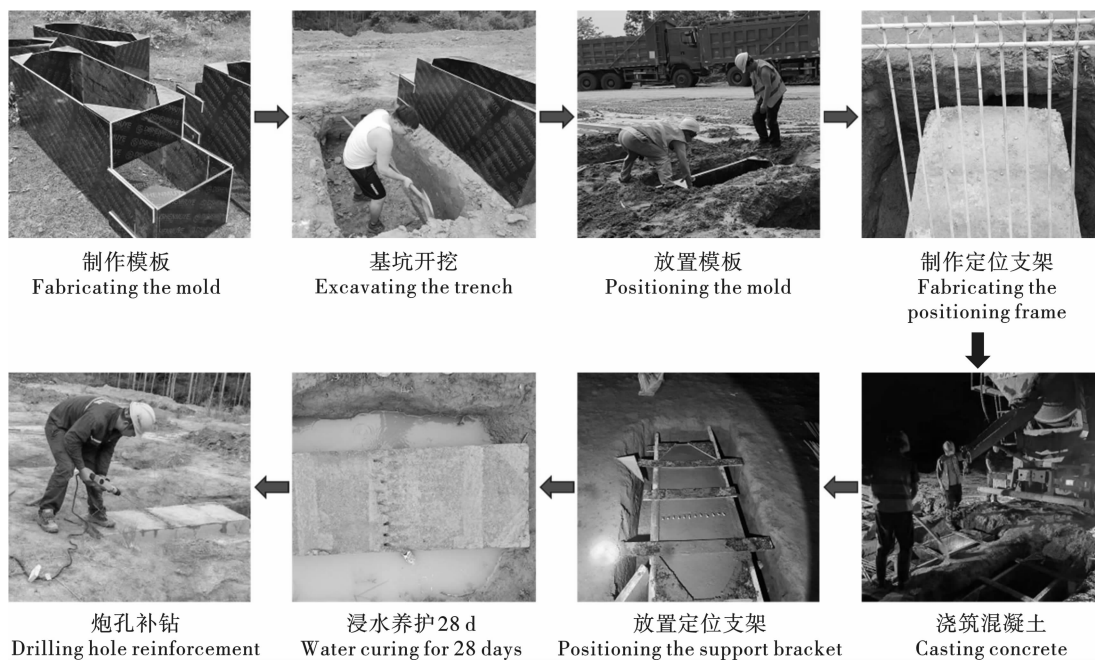


图 6 模型试验试件浇筑流程

Fig. 6 Process of casting model test specimens

在进行涉水边坡预裂爆破模型试验时,需保证模型试验与施工现场具有基本相同的水环境与边界条件,如图 7(a)所示。对混凝土试件进行周围进行回填,保证具有与现场涉水边坡预裂爆破相同的边界条件;采用钢尺对水位进行测量,保证各个试件具有相同的水深条件。完成后,将 8#工业数码电子雷管置于预制炮孔中,并使用炮泥进行堵塞。在进行预裂孔爆破之后,对预裂孔前端的岩体采用爆破和人工机械破碎混合施工的方式进行清除。并将残留的碎石冲刷干净,留出破碎后的边坡表面便于观察

与统计爆破效果指标。试件预裂孔爆破后的效果如图 7(b)所示。

2.3 模型试验结果

共对 15 个模型试件进行涉水边坡预裂爆破测试,有 12 个模型试件呈现完整的预裂缝,有 4 个模型(3#工况、8#~9#工况、14#工况)未出现预裂缝。呈现出完整预裂缝的模型的边坡坡面效果如图 8 所示。

2.4 爆破效果指标统计

对爆后试件的预裂缝成缝、边坡面质量以及保

留岩体损伤进行统计。目前,在预裂爆破效果评价指标选择中,裂缝宽度已不再强调,只要裂开成缝就行。边坡坡面质量采用预裂面半孔率 η 以及不平

整度 ω 进行表征。保留岩体损伤通过监测保留岩体爆前及爆后的压电陶瓷信号峰值衰减量进行表征。

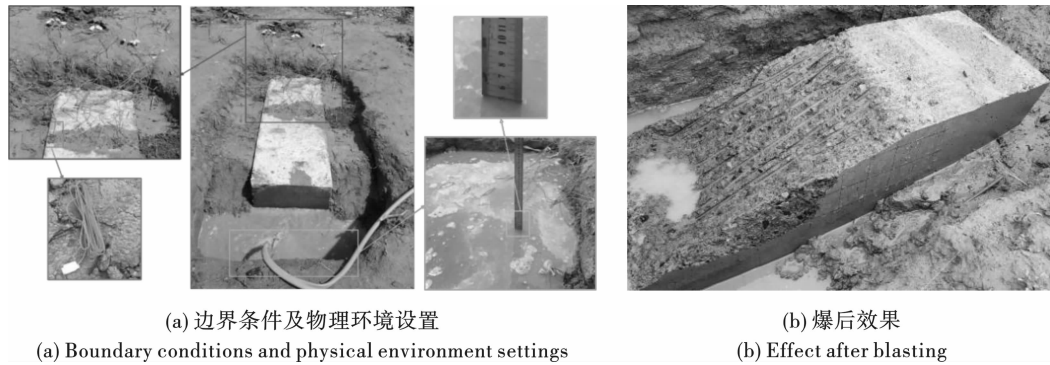


图7 预裂爆破模型试验
Fig. 7 Pre-splitting blasting model tests

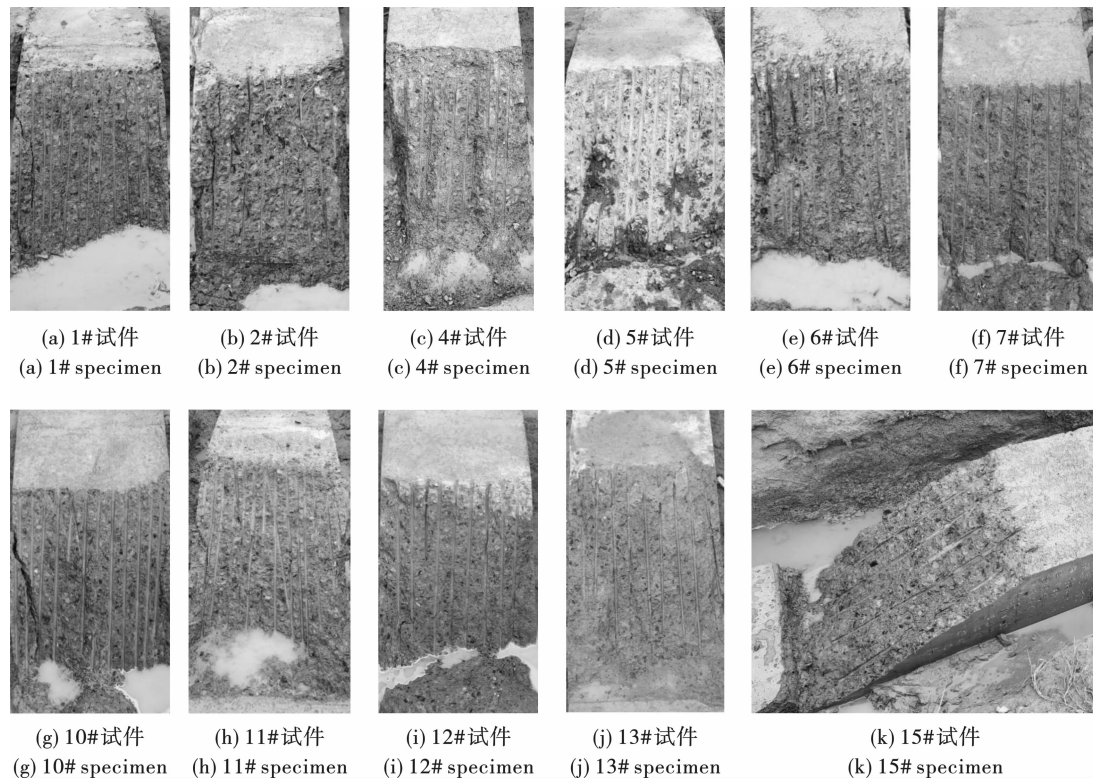


图8 涉水边坡预裂爆破边坡坡面爆破效果图

Fig. 8 Very slow wading slope pre-splitting blasting slope blasting effect of the slope surface

由于爆破现场无激光扫描设备,且采用钢尺对坡面平整度进行统计难度较大,因此,预裂爆破形成的预裂面的平整度采用人工定性的统计方法,共分为5级,标准如表3所示。

对各个工况涉水边坡预裂爆破所形成的预裂面的半孔率进行统计,预裂面上的炮孔连续、孔痕清晰且长度超过炮孔总长度的3/4则记为一个半孔;并对预裂面的平整度按照边坡预裂面平整度分级表进行分级。其中,由于3#工况、8#工况~9#工况、14#工

况未形成完整预裂缝,不符合预裂爆破效果要求,故不对其进行边坡坡面质量统计。

监测得到的预裂缝宽度 l 、预裂缝高度 h 、半孔率 η 以及边坡坡面的平整度分级数据如表4所示。

在进行涉水边坡预裂爆破模型试验保留岩体的压电信号监测前,先在混凝土试件的两侧用红色记号笔画上便于压电传感器定位的方格,压电信号采集测点位置如图9所示。

表 3 预裂面平整度分级表
Table 3 Pre-split surface flatness grading scale

等级 Level	评价标准 Evaluation criteria
1 级 1 level	未形成预裂缝,未达到预裂爆破基本要求 Failure to form pre-cracks, failure to meet the basic requirements of pre-splitting and blasting
2 级 2 level	超挖与欠挖控制不当,有明显超欠挖,试件不完整 Improper control of over-excavation and under-excavation, with obvious over-and under-excavation and incomplete specimens
3 级 3 level	超挖与欠挖控制比较得当,半孔率较高,但试件边缘开裂 Over-excavation and under-excavation were relatively well controlled, and the half-hole rate was high, but the edges of the specimens cracked
4 级 4 level	超挖与欠挖控制比较得当,半孔率较高,坡面比较美观 Over-excavation and under-excavation are more properly controlled, with higher semi-perforation rates and more aesthetically pleasing slopes
5 级 5 level	超挖与欠挖控制得当,半孔率高,坡面美观 Proper control of over-excavation and under-excavation, high half-hole rate, and beautiful slopes

表 4 预裂缝成缝指标数据与坡面平整度指标数据汇总表
Table 4 Summary of pre-splitting seam formation indicator data and slope flatness indicator data

试件号 Specimen number	坡面平整度指标 (Slope surface smoothness index)	
	半孔率 (Half-hole rate) $\eta/\%$	平整度分级 (Smoothness grading)
1#	100	3
2#	70	2
3#	0	1
4#	75	2
5#	75	2
6#	67	2
7#	89	3
8#	0	1
9#	0	1
10#	83	3
11#	67	2
12#	89	5
13#	67	2
14#	0	1
15#	100	3

在进行信号监测时将压电信号传感器与混凝土试件之间涂上耦合剂,从而降低压电信号在发射与接收过程中的能量损失。压电信号采集设备如图 10 所示。

压电信号采集获取的典型波形如图 11 所示。在进行预裂爆破后,对同一点所监测的压电信号的峰值及主频均有下降,说明在进行爆破过程中保留岩体受爆炸应力波作用下,保留岩体内部发生了损伤。

对所有试件的所有测点所监测的爆前和爆后的压电信号峰值的衰减量进行统计,以此表征不同预裂孔参数下岩体内部的损伤,统计结果如表 5 所示。

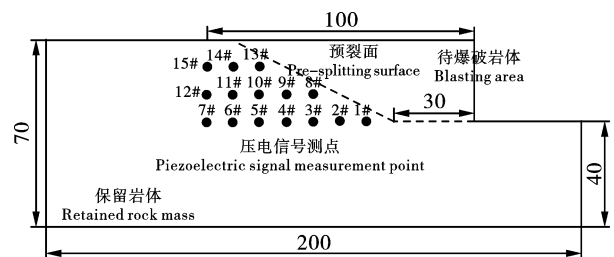


图 9 压电信号采集测点位置示意图(单位:cm)
Fig. 9 Schematic diagram of piezoelectric signal acquisition measurement point locations (unit: cm)

3 模型试验结果分析

3.1 边坡坡面成型质量分析

不同孔径、孔距下逐孔装药与隔孔装药的涉水边坡预裂爆破模型试验的边坡坡面成型情况如图 12 所示。

由于设置导向空孔对提高涉水边坡预裂爆破装药孔的裂纹拓展效果有限,因此由图 12 可以看到逐孔装药的半孔率以及平整度分级均明显高于间隔装药。对于逐孔装药,在小孔距(孔距为 4.5 cm)的情况下,小孔径(孔径为 0.8 cm)的半孔率及边坡平整度较好;而在大孔距(孔距为 6.0 cm)的情况下,大孔径(孔径为 1.2 cm)工况的半孔率及边坡平整度较好。这与陆上边坡预裂爆破设计过程中依据孔径的大小设计不同的孔距的规律具有一致性。因此,在涉水边坡预裂爆破工程实践中,建议对于小孔径

爆破设计,可适当考虑减小预裂孔孔距,而对于大孔 径爆破设计,则需要适当增加预裂孔孔距。

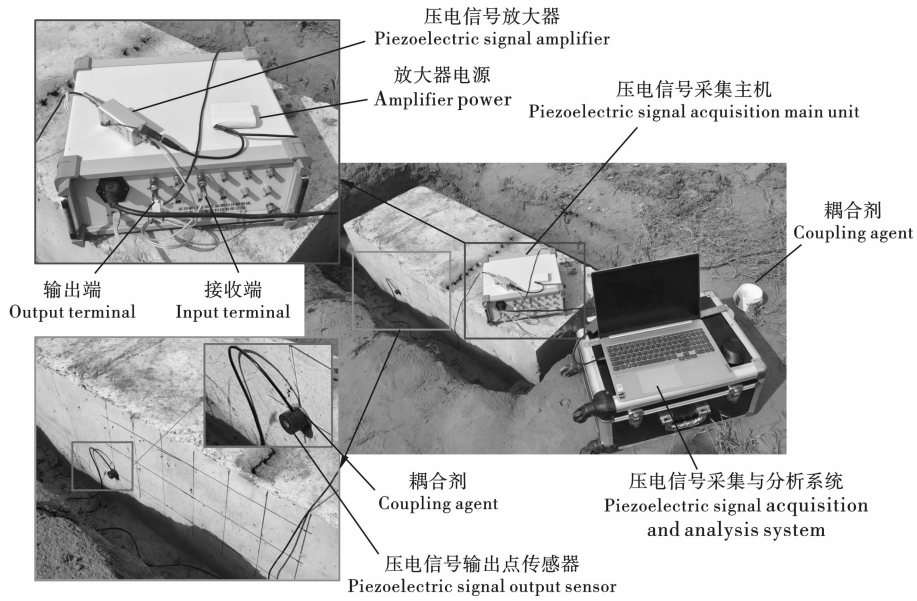


图 10 压电信号采集设备布置

Fig. 10 Piezoelectric signal acquisition equipment arrangement

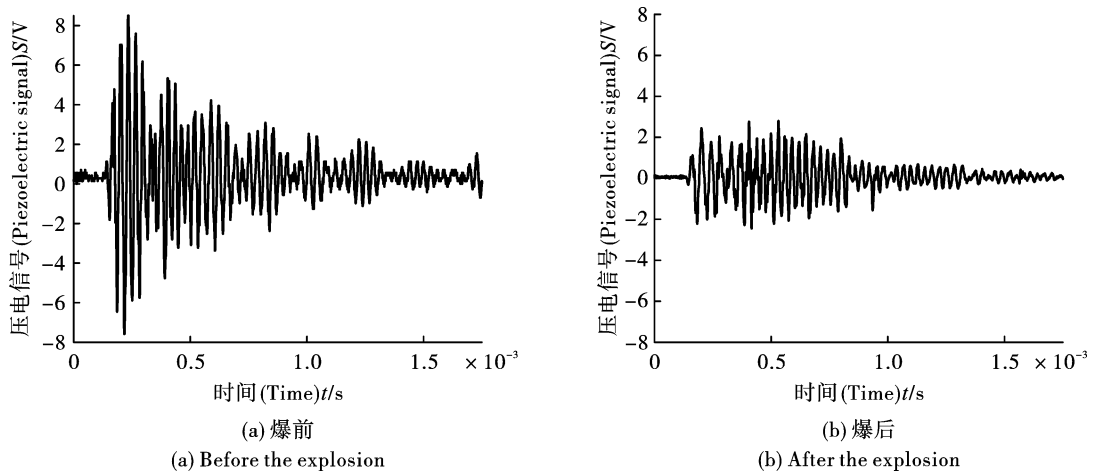


图 11 典型压电陶瓷信号

Fig. 11 Typical piezo ceramic signals

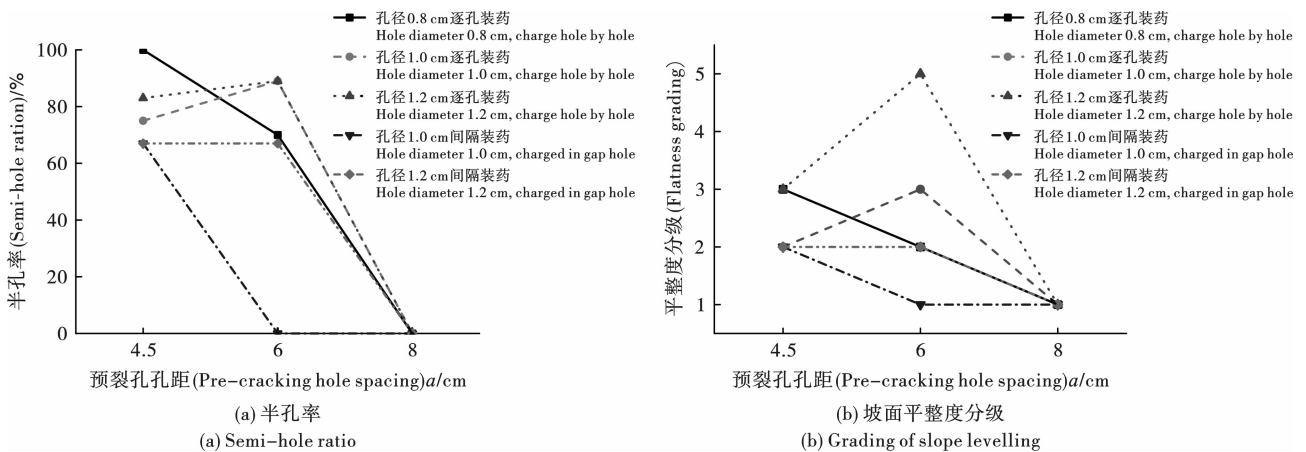


图 12 边坡坡面成型质量

Fig. 12 Quality of slope formation

表5 压电信号峰值衰减量数据汇总表
Table 5 Piezoelectric signal peak attenuation data summary table

试件 (Specimen)	压电信号峰值衰减量(Peak attenuation of piezoelectric signal)AOP/V														
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#	13#	14#	15#
1#	4.49	1.88	1.04	0.69	0.73	0.54	0.39	0.95	0.48	0.25	0.20	0.19	0.15	0.13	0.10
2#	4.33	1.88	1.01	0.65	0.53	0.40	0.29	0.81	0.32	0.26	0.17	0.12	0.20	0.15	0.09
3#	2.81	1.07	0.59	0.44	0.32	0.30	0.21	0.69	0.31	0.17	0.13	0.11	0.11	0.08	0.07
4#	6.16	2.58	1.27	0.98	0.84	0.53	0.48	6.89	3.19	1.63	0.90	0.78	1.96	1.12	0.85
5#	4.47	1.66	0.87	0.69	0.54	0.45	0.36	0.98	0.40	0.30	0.25	0.20	0.18	0.14	0.12
6#	1.98	0.81	0.44	0.32	0.23	0.16	0.14	0.53	0.27	0.14	0.09	0.08	0.08	0.06	0.04
7#	3.95	1.64	0.76	0.73	0.40	0.31	0.34	0.95	0.30	0.19	0.18	0.17	0.13	0.14	0.10
8#	1.99	0.67	0.44	0.32	0.25	0.11	0.17	0.44	0.19	0.14	0.09	0.07	0.08	0.05	0.04
9#	2.47	0.97	0.51	0.37	0.29	0.26	0.17	0.55	0.18	0.13	0.09	0.07	0.08	0.06	0.06
10#	3.62	1.59	1.01	0.55	0.56	0.49	0.36	0.69	0.34	0.24	0.17	0.12	0.15	0.12	0.09
11#	1.67	0.68	0.47	0.29	0.26	0.20	0.21	0.46	0.18	0.13	0.08	0.06	0.08	0.07	0.05
12#	3.69	1.56	0.79	0.61	0.44	0.38	0.32	0.80	0.37	0.23	0.16	0.12	0.11	0.10	0.07
13#	1.86	0.73	0.47	0.32	0.21	0.14	0.17	0.38	0.16	0.10	0.07	0.06	0.10	0.09	0.06
14#	2.25	0.84	0.54	0.38	0.25	0.23	0.17	0.45	0.14	0.10	0.07	0.07	0.09	0.07	0.05
15#	5.28	1.77	1.16	0.79	0.68	0.51	0.37	5.61	2.49	1.29	0.88	0.78	2.80	0.99	0.43

当孔距较小时,在炸药的作用下能够使炮孔之间的裂纹贯通从而形成较好的半孔率;但随着孔距的减小,总装药量也相应的增多,这会对坡面上的保留岩体造成损伤。因此,当孔距取4.5 cm时,虽然半孔率普遍较高,但坡面平整度分级却普遍小于6 cm的工况。

3.2 保留岩体损伤分析

将不同工况下各测点的爆前爆后的压电信号峰值的衰减量进行统计,如图13所示。

由图13可以看到,由于炸药爆炸对保留岩体的损伤作用有限,因此,随着测点距预裂孔的水平距离增加,压电信号峰值衰减量逐渐减小。并且这种衰减呈现出一种指数函数的性质,即当测点距预裂孔的距离较小时,这种衰减非常明显;当测点距预裂孔距离逐渐增大时,这种衰减逐渐减弱。由于4#工况与15#工况为每孔2发雷管的间隔装药,预裂孔中部的雷管爆炸导致这两种工况下的第二排、第三排压电信号峰值衰减量明显大于其他工况。

由于预裂爆破预裂孔的装药量对保留岩体的损伤影响较大,因此由图13(a)不难看出,采用隔孔装药的6#工况、8#工况、11#工况、13#工况压电信号峰值衰减量明显小于逐孔装药工况。同样的,对于逐孔装药,随着预裂孔的孔距增加,预裂孔的孔数将减少,总装药量也随之减少,因此保留岩体的损伤也将减少。这种现象当孔距为8.0 cm时较为明显,孔距为8.0 cm的3#工况、9#工况、14#工况相对于孔距

为6.0 cm的2#工况、7#工况、12#工况的1#测点的压电信号峰值衰减量分别减少了54.30%、59.80%、64.12%。

随着预裂孔孔径增加之后,不耦合度也随着增加,此时炸药爆炸产生的应力波作用在岩石上导致的裂隙区半径减小,因此保留岩体的损伤将减小。其中预裂孔孔径为1.2 cm的10#工况、12#工况、14#工况相对于预裂孔孔径为0.8 cm的1#工况、2#工况、3#工况的压电信号峰值衰减量分别减少了24.08%、17.39%、24.86%。可以看到,各工况的第二排、第三排压电信号峰值衰减量的变化与第一排具有较为一致规律,但由于第三排测点距预裂孔内的雷管的距离较远,压电信号衰减量普遍较小,受杂波作用明显,因此在小药量工况下,压电信号的衰减量变化无明显规律。

3.3 最优预裂孔参数分析

对预裂缝成缝质量、边坡坡面成型质量以及保留岩体损伤进行综合分析,建立综合评价模型,如公式(11)所示。

$$G = \alpha_1 Q_{pc} + \alpha_2 Q_{sf} + \alpha_3 Q_{rd} \quad (11)$$

式中: G 为不同工况下的预裂爆破效果综合评价得分; Q_{pc} 、 Q_{sf} 、 Q_{rd} 分别为不同工况下的预裂缝成缝、边坡坡面成型质量以及保留岩体损伤的归一化评分; α_1 、 α_2 、 α_3 分别为对应的权重系数。通过3.1~3.2节分析不难看出,间隔孔装药相对于逐孔装药在预裂缝成缝质量、边坡坡面成型质量上没有明显的优势,

因此最优预裂孔的参数分析仅针对逐孔装药的工况下的爆破效果评分如图 14 所示。取 $\alpha_1 = 0.3$ 、 $\alpha_2 = 0.5$ 、 $\alpha_3 = 0.2$ ，得到的不同工

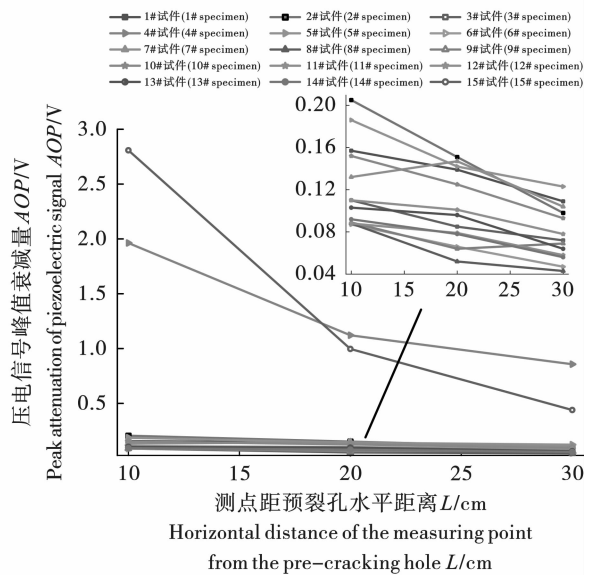
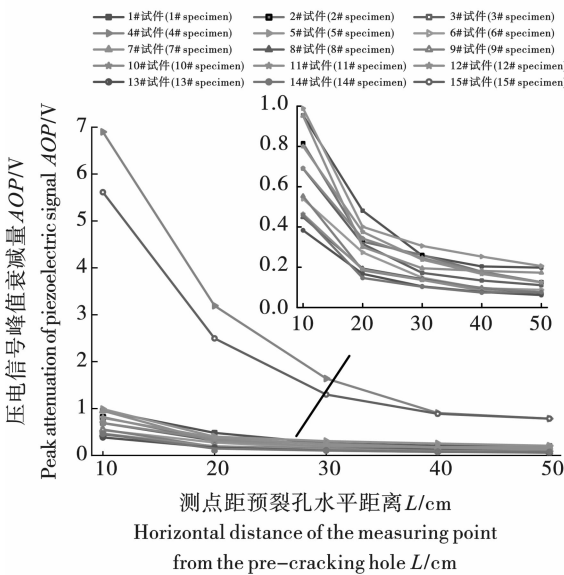
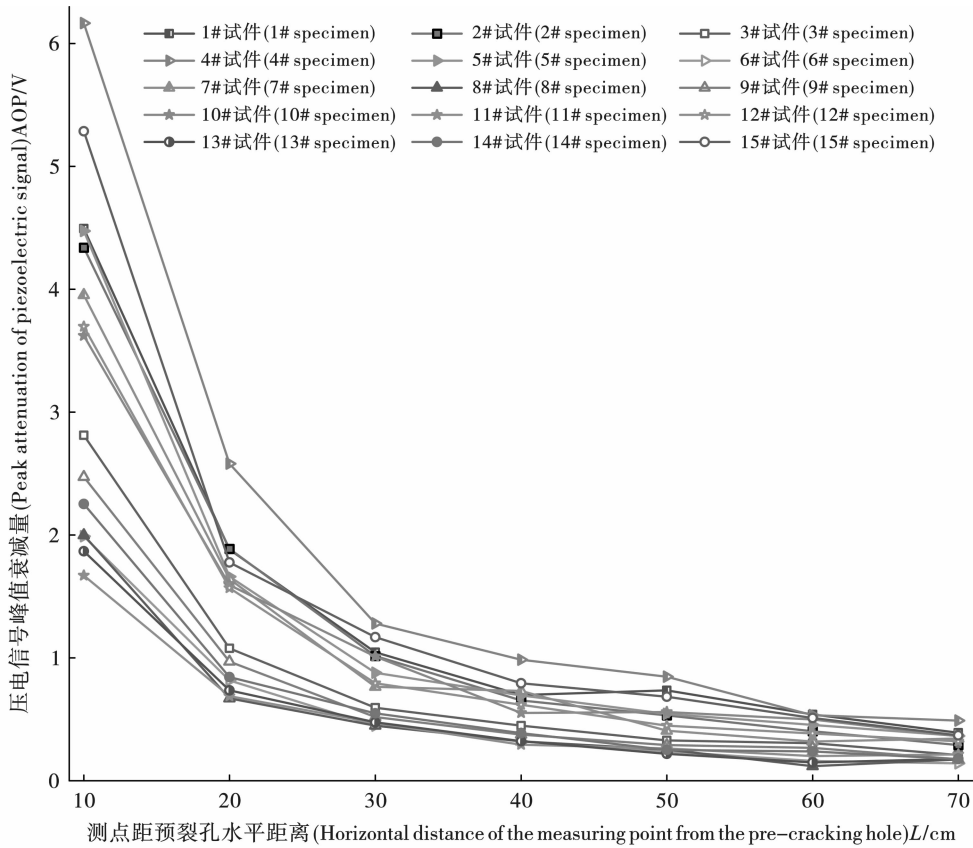


图 13 压电信号峰值衰减量

Fig. 13 Piezoelectric signal peak attenuation

由图 14 不难看出,当预裂孔孔径取 1.2 cm,预裂孔孔距取 6 cm 左右时,爆破效果最好。此时预裂

孔的孔径为较大的工况,并且预裂孔孔距约为孔径的 5~7 倍。在实际预裂爆破施工中预裂孔孔径通

常由 90 mm 与 115 mm 两种钻头可供选择,根据模型试验的结果选择较大的炮孔孔径(115 mm),预裂孔孔距为孔径的 5~7 倍,可取 80 cm。

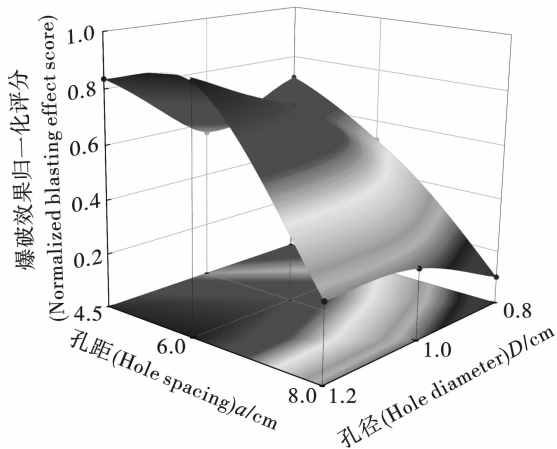


图 14 爆破效果综合评分图
Fig. 14 Blasting effect evaluation

4 数值模拟

4.1 模型建立

采用 LS-DYNA 显示动力学软件按照模型试验的试件尺寸建立有限元模型,如图 15 所示。其中堵塞长度设置为 6 cm;单个雷管装药段长度 8 cm,圆柱半径 0.3 cm,装药量 1.2 g。岩石模型除上端及前端自由面外,其他部分均施加固定约束的边界条件。为了避免反射波的影响,在水及岩石模型的底部和周围设置无反射边界条件,上表面为自由边界。岩石采用 Lagrange 算法,空气、炸药采用欧拉算法,固体材料及流体材料之间采用流固耦合算法,计算时间设置为 100 μs 。

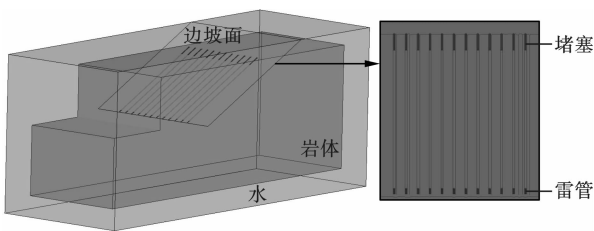


图 15 有限元模型
Fig. 15 Finite element modelling

4.2 损伤演化分析

以孔距为 4.5 cm,孔径为 0.8 cm,逐孔装药 1 发工况的混凝土试件的损伤演化过程进行损伤演化分析。混凝土试件的损伤演化过程如图 16 所示。

雷管在 5 μs 时起爆,炮孔周边的岩石开始出现损伤。由于雷管为柱状装药,雷管爆炸产生的冲击

波为椭球形的冲击波,因此在 5~25 μs 时刻内,岩石的演化过程为在炸药附近以椭球形逐渐向外扩散。可以看到,由于孔空效应,虽然在 20 μs 时,炸药附近的岩石损伤还没有扩展到两个炸药之间的空孔位置,但此时空孔附近已经开始出现了损伤。到 25 μs 时,两个炸药之间的岩石的损伤开始出现贯通。直到 40 μs ,炸药对岩体的损伤不仅在炸药的附近以椭球形发展,并且开始逐渐沿着边坡面发展。如 80 μs 时所示,上部的炸药对岩石的损伤向下方发展,下部的炸药对岩石的损伤向上方发展,并在 100 μs 时贯通,此时岩石的损伤基本演化完成。此外,由于上部的炸药接近上方的临空面,因此在上部炮孔的前方形成了垂直于临空面的裂缝,这与模型试验过程中的现象具有一致性。

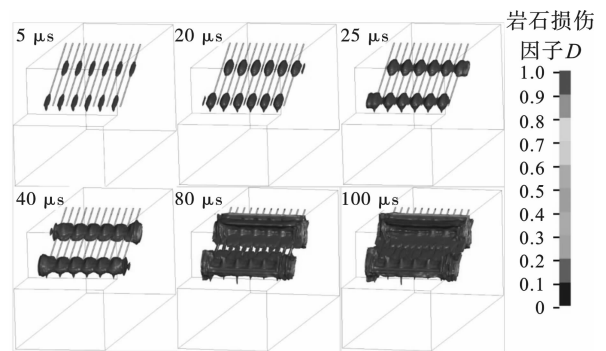


图 16 损伤演化过程
Fig. 16 Damage evolution process

4.3 边坡坡面效果分析

通过模型试验可知,采用隔孔装药时,大部分工况无法形成有效的预裂面;而采用逐孔装药两发雷管时,对保留岩体的损伤过高。因此,在数值模拟部分只选用逐孔装药一发的工况研究不同孔距、孔径下的边坡坡面效果。不同孔距、孔径下的边坡坡面效果如图 17 所示。

将图 17 进行纵向对比来看,随着孔距的增大,由于雷管爆炸产生的能量有限,边坡坡面上的损伤由孔距为 4.5 cm 时的能够产生完全的损伤贯通,到孔距为 6.0 cm 时的能够产生比较明显的损伤贯通,再到孔距为 8.0 cm 时的损伤无法在预裂面上贯通。该结果与模型试验中的工况 3#、工况 8#、工况 14# 无法形成预裂面具有一致性。将图 17 横向对比来看,随着不耦合系数的增大,炸药在爆炸过程中的对岩体造成的粉碎区范围将减小,因此边坡面上雷管周围岩石的损伤有明显的下降;但是,在整个预裂面上的损伤范围变化不大。因此,随着预裂孔孔径的增加,预裂面上的保留岩体的损伤将会更小,边坡半

孔率与平整度也随之增加。

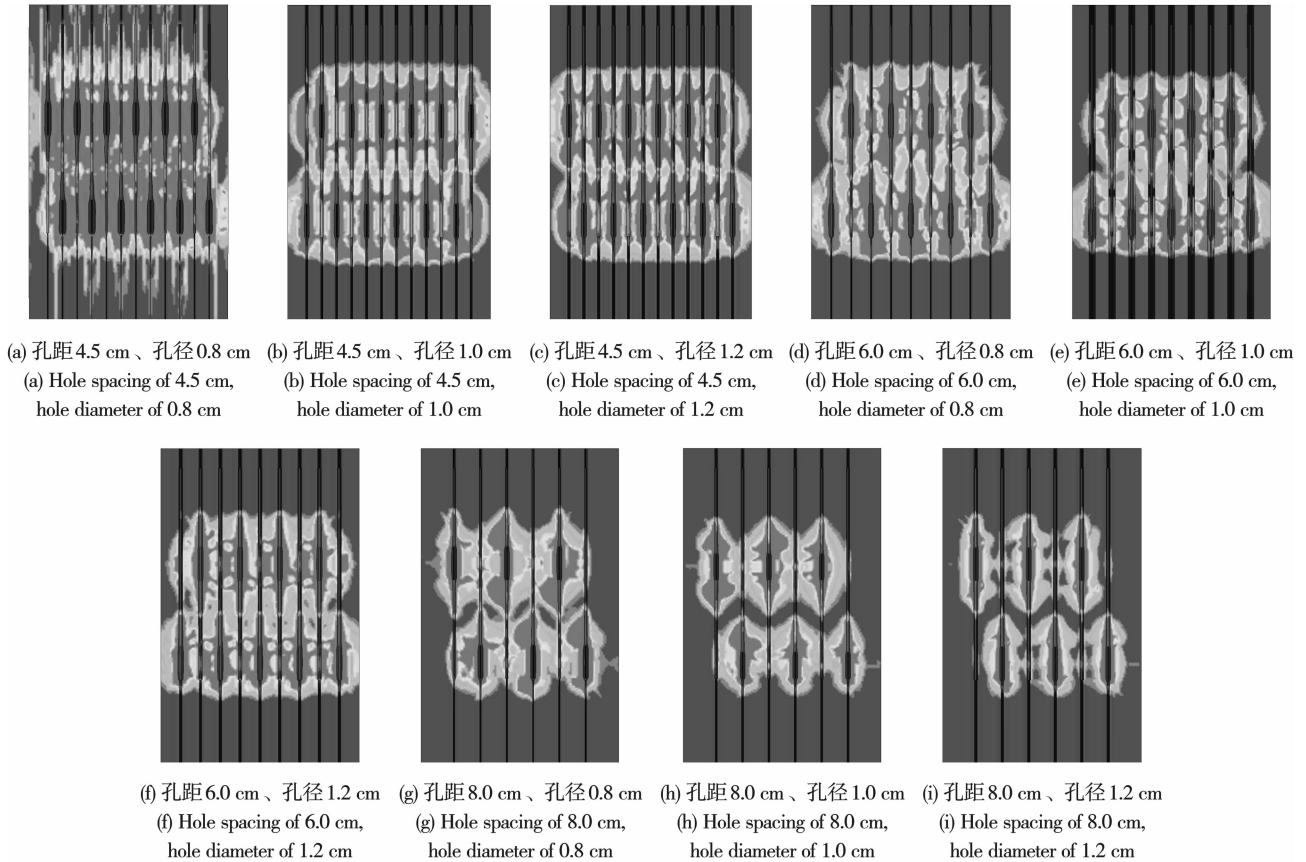


图 17 不同孔距、孔径下的边坡坡面效果图

Fig. 17 Effect of slope surface with different hole spacing and hole diameter

5 工程运用

基于模型试验和数值模拟研究结果,确定以 115 mm 的预裂爆破炮孔孔径和 80 cm 的预裂爆破炮孔孔距开展现场试验,验证参数优化效果。该工程实例为平陆运河项目第七标段某一级坡(涉水边坡)爆破成型工程。该一级坡边坡比为 1:2,边坡高度 10 m,在进行爆破施工时约有 8 m 位于水平面以下,属于涉水边坡。预裂爆破现场试验段总长度 8 m,预裂孔个数 10 个。图 18 为爆破后预裂面爆破效果,可以看到预裂面具有较好的平整度,并且半孔率达到了 80%。

6 结论

由平陆运河涉水边坡预裂爆破工程,依据相似准则设计涉水边坡预裂爆破模型试验。通过监测、分析不同预裂孔孔径、孔距、装药方式下的预裂缝成缝质量、边坡坡面成型质量、保留岩体损伤情况以及工程现场的实际运用,得出如下结论:

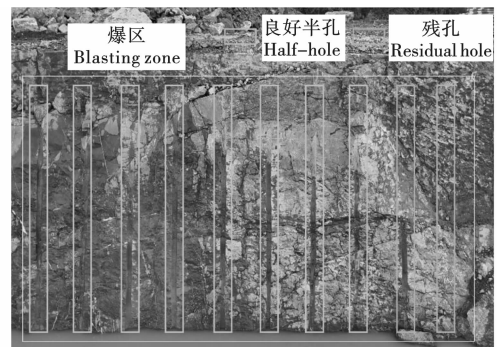


图 18 预裂爆破坡面效果图

Fig. 18 Pre-splitting blasting slope effect

(1) 逐孔装药下的预裂缝成缝质量明显高于隔孔装药,在一定范围内,可通过提高预裂孔孔径从而提升预裂缝成缝质量。

(2) 逐孔装药下的边坡坡面成型质量明显高于隔孔装药;当孔径较小(0.8 cm)时,应采用小孔距(4.5 cm),当孔径较大(1.2 cm)时,应当采用较大孔距(6.0 cm),从而提高边坡坡面成型效果。

(3) 保留岩体的损伤随着距预裂面的距离增加

成指数衰减。提高预裂孔孔径或孔距均可有效降低保留岩体损伤。

(4)在涉水边坡预裂爆破工程实践中,当地质条件为中硬岩石时,采用115 mm的预裂孔孔径、0.8 m的预裂孔孔距的工况下,预裂面具有较好的平整度,半孔率可达80%。

参考文献 (References)

- [1] 刘昭桃. 岩石爆破技术的现状与发展浅谈[C]//中国铁道学会工程分会. 爆破工程技术交流论文集. 北京, 中国铁道出版社, 2018: 85-87.
- [1] LIU Zhao-tao. Present situation and development of rock blasting technology [C] // China Railway Society Engineering Branch. Proceedings of the Exchange of Blasting Engineering Technology. Beijing, China Railway Press, 2018: 85-87. (in Chinese)
- [2] 陈明, 张俊, 郑炳旭, 等. 基于现场混装的宽孔距空气间隔预裂爆破技术[J]. 爆破, 2016, 33(3): 1-4, 30.
- [2] CHEN Ming, ZHANG Jun, ZHENG Bing-xu, et al. Wide-spaced air-spaced precracking blasting technology based on field mixing [J]. Blasting, 2016, 33(3): 1-4, 30. (in Chinese)
- [3] 高斌. 预裂爆破炮孔间距与孔径倍数关系的数值模拟与优化[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022.
- [3] GAO Bin. Numerical simulation and optimization of the relationship between pre-splitting blasting hole spacing and hole diameter multiplier [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [4] 徐晓东, 杜文秀. 高台阶分段预裂爆破半隔孔导向爆破技术研究[J]. 金属矿山, 2023(11): 154-160.
- [4] XU Xiao-dong, DU Wen-xiu. Study on high bench parallel section presplitting blasting with half separated hole guided blasting technique [J]. Metal Mine, 2023(11): 154-160. (in Chinese)
- [5] 吴成双, 孙吉坤, 璩世杰. 露天矿边坡大孔径预裂爆破研究与实践[J]. 工程爆破, 2011, 17(1): 28-30.
- [5] WU Cheng-shuang, SUN Ji-kun, QU Shi-jie. Research and practice of large aperture pre-splitting blasting on slope of open pit mine [J]. Engineering Blasting, 2011, 17(1): 28-30. (in Chinese)
- [6] 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.
- [6] CHEN Xiao-lin, ZHANG Zhi-yu, WANG Kai, et al. Optimization and experimental study of pre-splitting blasting parameters in an open pit mine [J]. Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(6): 181-194. (in Chinese)
- [7] 田文高, 蒲传金, 陈晓玲. 偏心不耦合装药爆破参数理论分析[J]. 爆破, 2008, 25(2): 19-20, 25.
- [7] TIAN Wen-gao, PU Chuan-jin, CHEN Xiao-ling. Theoretical analysis on the parameters of eccentric decouple charge blasting [J]. Blasting, 2008, 25(2): 19-20, 25. (in Chinese)
- [8] 张想, 李启月, 曾海登, 等. 偏/同心不耦合非装药段孔壁压力分布规律研究[J]. 工程爆破, 2023, 29(4): 18-23.
- [8] ZHANG Xiang, LI Qi-yue, ZENG Hai-deng, et al. Study on the distribution of borehole pressure in uncoupled eccentric/concentric noncharged section [J]. Engineering Blasting, 2023, 29(4): 18-23. (in Chinese)
- [9] 陈小飞. 装药结构对预裂爆破效果影响的工程应用研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2021.
- [9] CHEN Xiao-fei. Engineering application research on the influence of charging structure on the effect of pre-splitting blasting [D]. Wuhan: Wuhan University of Engineering, 2021. (in Chinese)
- [10] 陈俊桦, 张家生, 李新平. 基于岩石爆破损伤理论的预裂爆破参数研究及应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1441-1450.
- [10] CHEN Jun-hua, ZHANG Jia-sheng, LI Xin-ping. Research and application of pre-splitting blasting parameters based on rock blasting damage theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(5): 1441-1450. (in Chinese)
- [11] 叶海旺, 唐可, 万涛, 等. 时序控制预裂爆破参数优化及应用[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(3): 502-509.
- [11] YE Hai-wang, TANG Ke, WAN Tao, et al. Optimization and application of timing-controlled precracking blasting parameters [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(3): 502-509. (in Chinese)
- [12] 刘连生, 夏胜明, 曾鹏, 等. 基于工程地质分区的某钨矿爆破参数优化[J]. 工程爆破, 2024, 30(4): 42-50.
- [12] LIU Lian-sheng, XIA Sheng-ming, ZENG Peng, et al. Optimization of blasting parameters of a tungsten mine based on engineering geological zoning [J]. Engineering Blasting, 2024, 30(4): 42-50. (in Chinese)
- [13] 陈星良, 关富傑, 付兆凯, 等. 裂隙发育岩体水电工程地下洞室预裂爆破试验研究[J]. 爆破, 2024, 41(2): 67-74.
- [13] CHEN Xing-gen, GUAN Fu-li, FU Zhao-kai, et al. Experimental study on pre-splitting and blasting of underground caverns in fractured rock masses [J]. Blasting, 2024, 41(2): 67-74. (in Chinese)

- [18] 陈锐林,李康,董琪,等. CFRP 加固钢筋混凝土板爆炸冲击作用下动力响应分析的数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(6):1517-1527.
- [18] CHEN Rui-lin, LI Kang, DONG Qi, et al. Numerical simulation of dynamic response analysis of reinforced concrete slabs strengthened with CFRP under blast load [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(6):1517-1527. (in Chinese)
- [19] URGESSA G S, MAJI A K. Dynamic response of retrofitted masonry walls for blast loading[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(7):858-864.
- [20] HE Qing-feng, LI Jiang, YUE Lei-yang et al. Numerical simulation on impact test of CFRP strengthened reinforced concrete beams[J]. Frontiers in Materials, 2020, 7:252.
- [21] 李腾飞. 城市综合管廊燃气爆炸动力响应试验研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2022.
- [21] LI Teng-fei. Experimental study on dynamic response of gas explosion in urban pipe gallery[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [22] 许嘉赓. PZT 基压电陶瓷的力电性能及其在混凝土动态应力检测中的应用研究[D]. 成都:西华大学,2020.
- [22] XU Jia-geng. Study on the electromechanical properties of PZT-based piezoelectric ceramics and its application in dynamic stress detection of concrete[D]. Chengdu: Xihua University, 2020. (in Chinese)

(上接第 43 页)

- [14] 饶宇,夏元友,胡英国,等. 预裂缝对爆破振动频谱分布特征的影响[J]. 振动与冲击,2017,36(7):191-198.
- [14] RAO Yu, XIA Yuan-you, HU Ying-guo, et al. Influence of pre-splitting on blasting vibration spectral distribution characteristics [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(7):191-198. (in Chinese)
- [15] 李祥龙,余林,黄原明,等. 基于 VMD-HHT 的井下预裂爆破振动效应分析[J]. 黄金科学技术,2024,32(3):501-510.
- [15] LI Xiang-long, YU Lin, HUANG Yuan-ming, et al. Analysis of vibration effect of downhole pre-fracture blasting based on VMD-HHT[J]. Gold Science and Technology, 2024, 32(3):501-510. (in Chinese)
- [16] 彭鑫,李祥龙,李旺,等. 水不耦合径向装药对预裂成缝效果影响分析[J]. 有色金属工程,2023,13(5):103-113.
- [16] PENG Xin, LI Xiang-long, LI Wang, et al. Analysis of the effect of water-uncoupled radial loading on the effect of pre-splitting into seams[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(5):103-113. (in Chinese)
- [17] 于建新,李真珍,高帅杰,等. 水下深孔爆破岩石裂纹扩展及损伤规律[J]. 科学技术与工程,2022,22(7):2907-2913.
- [17] YU Jian-xin, LI Zhen-zhen, GAO Shuai-jie, et al. Crack extension and damage law of rock by underwater deep hole blasting[J]. Science, Technology and Engineering, 2022, 22(7):2907-2913. (in Chinese)
- [18] 卫豪. 水下钻孔爆破参数优化模拟研究[D]. 赣州:江西理工大学,2022.
- [18] WEI Hao. Simulation research on optimization of underwater drilling and blasting parameters [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [19] 张兵文,张文扬,吴暖,等. 预裂爆破与气泡帷幕技术在水下爆破中的应用[J]. 工程爆破,2015,21(5):6-9.
- [19] ZHANG Bing-wen, ZHANG Wen-yang, WU Nuan, et al. Application of precracking blasting and bubble curtain technology in underwater blasting[J]. Engineering Blasting, 2015, 21(5):6-9. (in Chinese)
- [20] 徐挺. 相似方法及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
- [20] XU T. Similarity methods and their applications [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [21] JTS 204—2008 水运工程爆破技术规范[S].
- [21] JTS 204—2008 Technical specification for blasting in water transportation projects[S]. (in Chinese)
- [22] 张召冉,左进京,郭义先. 爆炸载荷下空孔及其缺陷对裂纹扩展影响机理研究[J]. 振动与冲击,2019,38(18):115-121.
- [22] ZHANG Zhao-ran, ZUO Jin-jing, GUO Yi-xian. Research on the mechanism of the influence of hollow holes and their defects on crack extension under explosive load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(18):115-121. (in Chinese)