

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.01.004

## 高原高寒区露天矿不同不耦合介质装药 爆破效应试验研究

费鸿禄<sup>1</sup>,荆广杰<sup>1</sup>,甄帅<sup>2</sup>,贾宏宇<sup>3</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 爆破技术研究院,阜新 123000;2. 东北大学 资源与土木工程学院,沈阳 110819;  
3. 阜新市自然资源事务服务中心,阜新 123000)

**摘要:** 高原高寒区露天矿钻爆开采时,常会出现炮孔内部涌水或冰冻现象,该现象会导致炮孔内装药结构变为水、冰介质不耦合装药,药包在不同不耦合介质条件下爆破效果及爆炸破岩机理会发生改变,为此开展了高原高寒区露天矿不同不耦合介质装药爆破效应的试验研究。论文以西藏甲玛露天矿为工程依托,开展了高原高寒区爆破漏斗试验,测定了爆破漏斗的几何参数,分析了高原高寒区3种不耦合介质装药条件下的爆破效果。采用利文斯顿曲线对测试参数进行拟合,根据拟合结果优化了爆破参数,并应用于现场工程爆破。研究表明:在爆破漏斗试验中,当埋深1.09~1.49 m时,漏斗可见体积与破碎体积差异大,埋深1.49~1.69 m时,漏斗可见体积与破碎体积几乎不变;相对于空气不耦合装药爆破,水、冰介质不耦合装药爆破振动速度峰值分别降低了25.33%和11.24%;3种不耦合介质下,药包埋置临界深度各不相同,其中水介质的临界深度最深,冰介质的临界深度次之,空气介质的临界深度最浅,且水、冰介质不耦合装药相对于空气不耦合装药,装药量降低18.9%;在现场群孔台阶爆破中,水、冰介质不耦合装药相对于空气不耦合装药单耗减少18.2%,大块率由8.9%降低到4.3%,且水、冰不耦合介质,使炸药能量分布更加均匀。

**关键词:** 高原高寒区;爆破漏斗;能量利用;爆破振动;不耦合装药

中图分类号: TD235 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)01-0026-11

## Experimental Study on Open-pit Blast Effects with Various Decoupled Charge Mediums in High and Cold Regions

FEI Hong-lu<sup>1</sup>, JING Guang-jie<sup>1</sup>, ZHEN Shuai<sup>2</sup>, JIA Hong-yu<sup>3</sup>

(1. Institute of Blasting Technology Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;  
2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;  
3. Fuxin City Natural Resources Service Centre, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** During drilling and blasting of open-pit mining in high and cold regions, water inrush or freezing often occurs on the borehole inside. This phenomenon creates a decoupled charge structure with water and ice, affecting the blasting effect and the rock-breaking mechanism under decoupled conditions. To determine the geometric parameters of the blasting crater and analyze the blasting effect under three types of decoupling medium in the high-cold area, a series of tests were conducted on the blasting effects of different decoupling charges in the Karma open-pit mining in Tibet. Based on the Livingston curve fitting results, the blasting parameters were optimized and applied to on-site en-

收稿日期 (Date of reception): 2024-04-26

网络首发日期 (Published online): 2025-03-15

作者简介: 费鸿禄(1963-),男,山东省日照市,博士、教授,从事工程爆破和地下工程方面的科研与教学工作, (E-mail) feihonglu@163.com。

通讯作者: 荆广杰(2000-),男,山东省日照市,硕士研究生,从事工程爆破方向研究, (E-mail) m13468364850@163.com。

**About the author:** FEI Hong-lu(1963-), male, born in Rizhao city, Shandong province, Ph. D, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in engineering blasting and underground engineering research and teaching work, (E-mail) feihonglu@163.com.

**Corresponding author:** JING Guang-jie(2000-), male, born in Rizhao city, Shandong province, master candidate, mainly engaged in engineering blasting research, (E-mail) m13468364850@163.com.

gineering blasting. The results indicated significant differences between the visible volumes of the blasting crater and the crushed funnel at burial depths of 1.09 ~ 1.49 m. However, these volumes resembled burial depths of 1.49 ~ 1.69 m. Compared to the air-deck decoupling, the peak particle velocities under water and ice decoupling were reduced by 25.33% and 11.24%, respectively. The critical charge depths varied among the three decoupling materials, with water decoupling having the most significant critical depth, ice decoupling charge, and air-deck decoupling having the shallowest. The charge weights required for water and ice decoupling and ice decoupling were 18.9% less than those for air-deck decoupling. In multi-hole bench blasting, the explosive factor for water and ice decoupling was reduced by 18.2% compared to air-deck decoupling, and the rate of large fragments decreased from 8.9% to 4.3%. This indicated that water and ice decoupling charges made the energy distribution of explosives more uniform.

**Key words:** high and cold region; blasting crater; energy utilization; blasting vibration; decoupled charge

在高原高寒区露天矿开采时,受到海拔、季节、气候、温差及地质条件的多重影响,导致炮孔内常年出现涌水(渗水)或涌水冰冻现象。由于炸药在不同介质条件下爆破效应往往不同<sup>[1-3]</sup>。如能够精准掌握炸药在不同介质条件下的爆破效应,可对类似工程中所存在的炸药能量利用率低、爆破效果不佳等一系列问题提供指导及借鉴意义,进而降低露天矿在爆破开采过程中的时间成本和经济成本<sup>[4-6]</sup>。

1956年W Livingston首次提出以能量转换效率为衡量准则的爆破漏斗理论。该理论认为炸药在岩体内爆破时传给岩石能量的多少和速度的快慢,取决于岩石性质、炸药性能、药包质量、炸药埋置深度和起爆方式等因素。爆破漏斗的几何参数反映了炸药对岩石的破坏能力,当单位质量炸药破碎岩石体积最大时,其埋置深度为最佳深度,最佳深度的确定对爆破设计具有重要的理论及指导意义。

对于不同不耦合介质的爆破效应,国内外爆破专家开展了相关内容的研究。费鸿禄等人通过试验与数值模拟研究<sup>[7]</sup>,得到了最优的水介质间隔装药结构,并发现水介质间隔装药结构爆破可以显著提高孔壁压力,改善岩石破碎效果。郭东明等人基于焦散线理论<sup>[8]</sup>,开展了不耦合系数下水耦合及空气耦合定向爆破试验研究。陈啸林等人对双向等围压荷载下不同不耦合系数岩石爆破的裂纹扩展进行了数值模拟研究<sup>[9]</sup>。刘江超等人利用Starfield法<sup>[10,11]</sup>,考虑应力波的衰减和叠加,推导了水间隔装药孔壁应力分布理论公式,并基于小波阈值去噪和HHT变换,分析水间隔装药能量分布。徐颖等人利用相似材料<sup>[12]</sup>,开展双向等荷载下爆破相似模型试验。田浩等人对以空气和聚苯乙烯(EPS)泡沫作为介质的径向不耦合装药结构的炸药能量利用率进行了对比研究<sup>[13]</sup>。岳中文等人利用实验室实验以及数值模拟的方法<sup>[14]</sup>,对不同不耦合系数装药下炸药在混凝土模型中爆炸所产生的爆破漏斗进行了对比分析。叶志伟等人基于弹性波动理论<sup>[15]</sup>,得出水

介质不耦合装药爆炸冲击波对炮孔壁压力峰值的简化模型。李书萱等人研究了水耦合装药条件下不同不耦合系数对爆破效果的影响<sup>[16]</sup>,并利用PMMA试件孔周围的断裂行为来对比爆破作用效果。刘博等人开展了冻融环境下矿岩的单孔和双孔同段爆破漏斗试验<sup>[17]</sup>,测定了爆破漏斗几何参数和块度分布,采用拟合方法确定了爆破设计的合理参数,并分析了不同岩性条件下的爆破漏斗参数变化。Itoh等人利用高速摄影技术<sup>[18]</sup>,并通过特征线来描述爆炸冲击波在水下的衰减过程。MA Tian-hui等人采用数值模拟方法<sup>[19]</sup>,通过改变不耦合系数,分析了爆破过程中孔壁压力、能量演化和裂纹扩展,并拟合出相关公式。DING Xiao-hua等人从水介质的力学特性出发<sup>[20]</sup>,分析了水介质在爆破过程中的传递效应、换能效应和气泡脉动现象。XIA Wen-jun等人基于理论和数值模拟讨论了水面爆破对破碎能的影响<sup>[21]</sup>,并进行了三次爆破试验来测量花岗岩场地的实际破碎能。综上所述,国内外学者对不同不耦合介质装药技术已经进行了一些工作,但对高原高寒区不同不耦合介质装药,特别是冰介质不耦合装药爆破效应有待研究。

因此,本文通过空气、水和冰3种不耦合介质装药的爆破漏斗试验、现场台阶爆破试验,开展了高原高寒区露天矿空气、水和冰3种不耦合介质下装药爆破效应试验研究,这对高原高寒区矿山开采效率的提高具有重要的理论及工程意义。

## 1 工程背景

西藏甲玛铜矿位于西藏拉萨市墨竹工卡县境内<sup>[22,23]</sup>,属于多金属矿区总面积约106 km<sup>2</sup>,年均温7.1℃,最低温度可达-20℃,海拔5000 m以上。6~9月降雨极其严重,占全年降雨量的84.1%~96.3%。该矿区炮孔由于受海拔高度、气象条件等综合因素影响,使得在成孔后出现涌水(渗水)或涌水冰冻现象。矿区工作平台如图1所示。



图1 矿区工作平台

Fig. 1 Working platform of mining area

目前该露天矿爆破开采过程中,会遇到炮孔因冰冻堵塞造成无法装药的问题,其主要解决方法是钻机二次透孔后装药;但对于二次透孔的炮孔,再次装药后渗流水仍可能会沿孔壁渗入炮孔底部,在孔内由低温效应及时间的影响下产生冰介质不耦合爆破作用。水孔成孔后炮孔内部状态如图2所示。

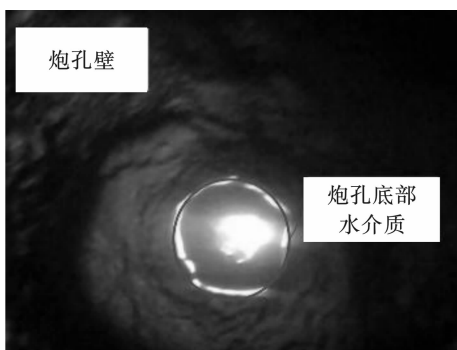


图2 炮孔为水孔

Fig. 2 Blast hole with water

## 2 高原高寒区露天矿爆破漏斗试验

### 2.1 试验方案

为研究高原高寒区露天矿不同不耦合介质装药爆破效应,设计了炸药品种和质量相同条件下,不耦合介质、不耦合系数和埋埋深度不同的爆破漏斗试验,利用爆破漏斗体积、振动速度峰值和利文斯顿曲线拟合结果,分析研究各组试验的爆破效应。试验的具体设计如图3所示。

选用2 kg 密度为  $1.18 \text{ g/cm}^3$  的2#乳化炸药,以空气、水和冰作为不耦合介质,钻孔直径为120 mm。选取不同直径的PVC管(试验中不考虑PVC管对爆破效应的影响),得到不同的不耦合系数,并按图3的设计参数进行爆破漏斗试验。其中现场PVC管预制样本1尺寸如图4所示。

因为爆破漏斗试验钻孔深度较浅,无法自然形成裂隙水或冻冰,所以采用人工构建试验环境来开

展试验。具体操作为:

(1)将聚乙烯气囊置于炮孔内,且使其与炮孔壁紧密贴合的。此种做法是为了避免水介质通过岩石裂隙流失,改变实验环境。

(2)将炸药置于炮孔底部,随后以人工注水的方式使孔内水平面至炸药顶部齐平,构建水介质不耦合装药环境。

(3)在炸药与填充物之间设置间隔,防止填充物渗流进不耦合区域,对试验结果造成影响。

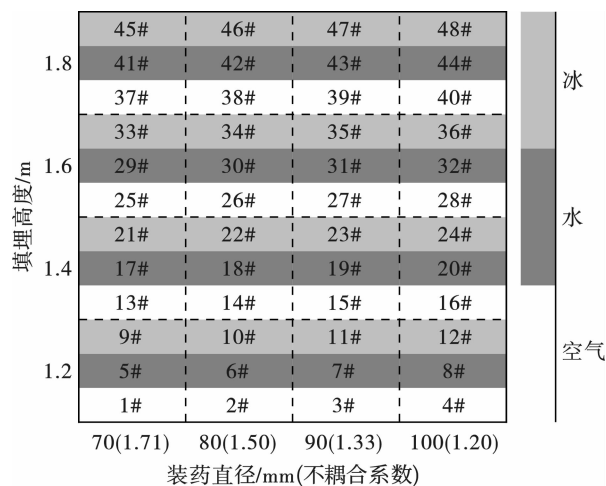


图3 试验设计

Fig. 3 Experimental design

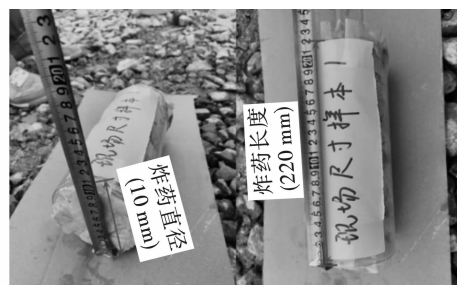


图4 PVC模具样本规格

Fig. 4 Sample specification of PVC mold

装药结构示意图如图5所示,现场操作过程如图6所示。

### 2.2 爆破振动测试方案

为研究高原高寒区不耦合介质装药爆破振动信号的特征,设计如下爆破试验与振动测试方案:

基于相同装药高度及不耦合系数,以爆破振动峰值速度为衡量指标,使用TC-4850 爆破测振仪按等距离原则,对爆破漏斗试验的振动数据进行采集,进而研究3种不耦合介质下爆破产生的地震波能量耗散情况。考虑到每次试验场地及试验孔数无法保证完全一致,试验孔的分布与TC-4850 爆破测振仪放置位置也各不相同,因此选择环状布孔方式,并将TC-4850 爆破测振仪置于试验孔环形中心位置,确

保每个试验孔与 TC-4850 爆破测振仪之间水平距离为 10 m,且试验孔间的延期时间 1000 ms。环状布孔振动监测布局如图 7 所示。

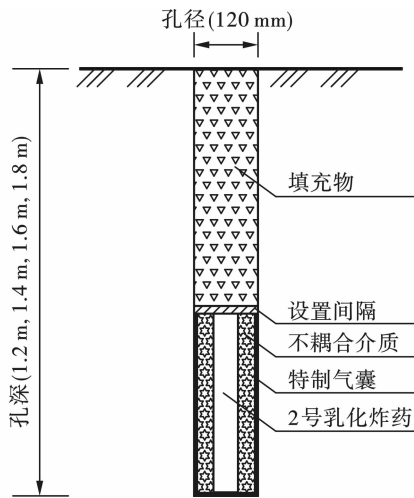
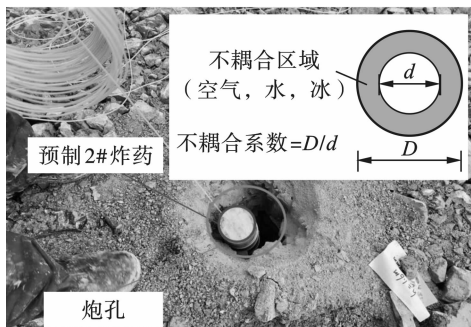


图 5 装药结构

Fig. 5 Charge structure



(a) 空气不耦合装药  
(a) Air uncoupled charges



(b) 不耦合介质填充  
(b) Uncoupled medium filling

图 6 现场试验准备

Fig. 6 Preparation for on-site testing

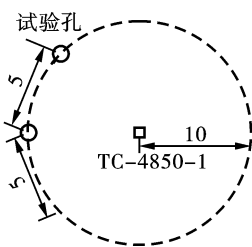


图 7 环状布孔振动监测(单位:m)

Fig. 7 Vibration monitoring of annular borehole(unim;m)

(1)3 种不耦合介质的爆破漏斗试验中,发现漏斗可见体积与破碎体积之间存在非线性关系,根据 W Livingston 理论将可见体积与破碎体积分三种情况。第一种情况,炸药埋深小于过渡深度时,炸药产生的能量破碎近自由面方向的岩石后大量流失于空气中,由于更多的能量用于岩石的抛掷以及耗散,漏斗可见体积与破碎体积基本相等;第二种情况,随

### 2.3 爆破漏斗参数测量

爆破漏斗试验中,可见体积是指炸药起爆后自然形成漏斗的体积,破碎体积则是破碎区的岩石经人工或挖机清理后形成的体积。同样,漏斗的可见深度和破碎深度也按此定义。待每组爆破漏斗试验结束后,首先根据测量的平均值确定漏斗半径,然后测量可见深度、可见体积、爆破块度等参数,接着通过人工或挖机清理漏斗内部破碎块,以测量漏斗破碎深度和破碎体积。爆破漏斗参数测量如图 8 所示。试验爆破漏斗的几何参数统计如表 1 所示。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 爆破漏斗可见体积分析

根据爆破漏斗试验爆破后的几何参数统计结果,绘制 3 种不耦合介质在相同不耦合系数下药包埋埋深度对应的漏斗可见体积对比,如图 9 所示。

由 48 个爆破漏斗几何参数及漏斗可见体积对比图可发现:

着炸药埋深的增加(小于临界深度),更多的能量用于破碎岩石,对岩石抛掷的能量明显减弱,漏斗可见体积与破碎体积差异较大;第三种情况,炸药埋深继续增加(大于临界深度),炸药产生的能量全部被岩体所吸收产生药包的内部作用,岩石质点只产生弹性变形,爆破后地表岩石又恢复原状,漏斗可见体积与破碎体积基本相同。

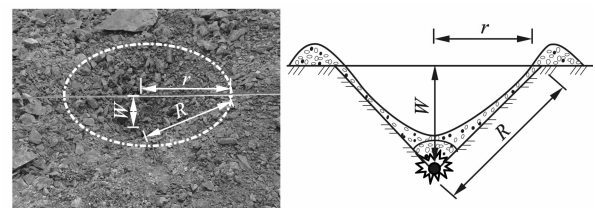


图 8 爆破漏斗参数测量

Fig. 8 Measurement of blasting crater parameters

表1 爆破漏斗试验几何参数

Table 1 Geometric parameters of blasting crater test

炮孔 序号	不耦合 介质	炮孔 深度/m	不耦合 系数	药包中心 埋深/m	漏斗 半径/m	可见 深度/m	破碎 深度/m	可见 体积/m <sup>3</sup>	破碎 体积/m <sup>3</sup>	单耗/ (kg·m <sup>-3</sup> )
1#			1.20	1.09	1.87	0.61	1.68	2.23	6.15	0.33
2#		1.2	1.33	1.07	1.94	0.58	1.54	2.29	6.07	0.33
3#			1.50	1.03	1.96	0.55	1.57	2.21	6.32	0.32
4#			1.71	0.98	1.73	0.61	1.44	1.91	4.51	0.44
5#			1.20	1.29	2.14	1.02	1.88	4.89	9.02	0.22
6#		1.4	1.33	1.27	2.24	0.95	1.74	4.99	9.14	0.22
7#			1.50	1.23	1.94	1.12	1.86	4.41	7.33	0.27
8#	空气		1.71	1.18	1.84	0.92	1.94	3.26	6.88	0.29
9#			1.20	1.49	1.93	1.36	1.38	5.30	5.38	0.37
10#		1.6	1.33	1.47	1.90	1.31	1.31	4.95	4.95	0.40
11#			1.50	1.43	1.84	1.24	1.26	4.40	4.47	0.45
12#			1.71	1.38	1.86	1.28	1.30	4.64	4.71	0.42
13#			1.20	1.69	1.72	1.21	1.28	3.75	3.97	0.50
14#		1.8	1.33	1.67	1.68	1.13	1.13	3.34	3.34	0.60
15#			1.50	1.63	1.64	1.16	1.16	3.27	3.27	0.61
16#			1.71	1.58	1.54	1.04	1.04	2.58	2.58	0.77
17#			1.20	1.09	2.12	0.69	1.62	3.25	7.62	0.26
18#		1.2	1.33	1.07	2.20	0.74	1.68	3.76	8.51	0.23
19#			1.50	1.03	2.01	0.64	1.61	2.71	6.81	0.29
20#			1.71	0.98	1.91	0.63	1.54	2.41	5.88	0.34
21#			1.20	1.29	2.31	1.16	1.76	6.48	9.83	0.20
22#		1.4	1.33	1.27	2.33	1.13	1.79	6.42	10.18	0.20
23#			1.50	1.23	2.18	1.02	1.72	5.08	8.56	0.23
24#	水		1.71	1.18	1.98	0.98	1.73	4.02	7.10	0.28
25#			1.20	1.49	2.16	1.42	1.49	6.94	7.28	0.27
26#		1.6	1.33	1.47	2.12	1.44	1.44	6.78	6.78	0.30
27#			1.50	1.43	2.06	1.35	1.37	6.00	6.09	0.33
28#			1.71	1.38	1.97	1.33	1.33	5.41	5.41	0.37
29#			1.20	1.69	1.92	1.32	1.32	5.10	5.10	0.39
30#		1.8	1.33	1.67	1.95	1.40	1.40	5.57	5.57	0.36
31#			1.50	1.63	1.76	1.26	1.28	4.09	4.15	0.48
32#			1.71	1.58	1.67	1.18	1.18	3.45	3.45	0.58
33#			1.20	1.09	2.03	0.73	1.71	3.15	7.38	0.27
34#		1.2	1.33	1.07	2.17	0.75	1.64	3.70	8.09	0.25
35#			1.50	1.03	1.94	0.61	1.77	2.40	6.98	0.29
36#			1.71	0.98	1.86	0.67	1.58	2.43	5.72	0.35
37#			1.20	1.29	2.27	1.31	1.84	7.07	9.93	0.20
38#		1.4	1.33	1.27	2.23	1.20	1.85	6.25	9.63	0.21
39#			1.50	1.23	2.10	1.14	1.79	5.26	8.27	0.24
40#	冰		1.71	1.18	1.93	1.16	1.64	4.52	6.40	0.31
41#			1.20	1.49	2.07	1.35	1.42	6.06	6.37	0.31
42#		1.6	1.33	1.47	2.05	1.50	1.50	6.60	6.60	0.30
43#			1.50	1.43	1.93	1.42	1.42	5.54	5.54	0.36
44#			1.71	1.38	1.94	1.26	1.28	4.97	5.04	0.40
45#			1.20	1.69	2.04	1.29	1.32	5.62	5.75	0.35
46#		1.8	1.33	1.67	1.89	1.45	1.45	5.42	5.42	0.37
47#			1.50	1.63	1.69	1.31	1.31	3.92	3.92	0.51
48#			1.71	1.58	1.61	1.13	1.16	3.07	3.15	0.64

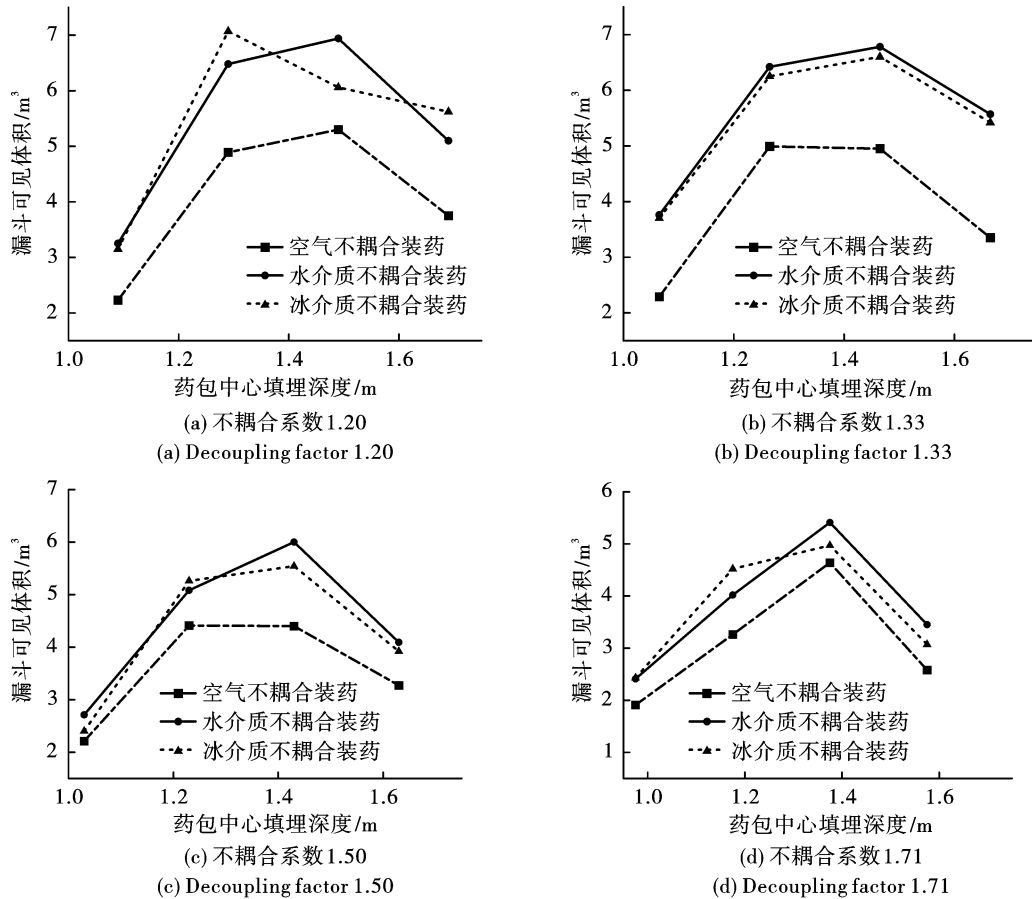


图 9 不同介质漏斗体积对比

Fig. 9 Comparison of crater volumes for different mediums

依据上述三种情况对试验数据进行分析,药包中心埋深在 1.09 ~ 1.69 m 时,处于第二种情况。当药包埋深在 1.09 ~ 1.49 m 时,爆破后形成的爆破漏斗张开角过大,导致被抛掷的岩石又回落到漏斗中,使漏斗可见体积变小,所以此时漏斗可见体积与破碎体积差异较大;当药包埋深在 1.49 ~ 1.69 m 时,炸药埋深超过最佳深度,形成的漏斗可见体积与破碎体积均减小,且此时药包埋深处于临界深度附近,岩石处于弹性变形带,近似认为将漏斗可见体积与破碎体积相等。

(2)当固定装药的不耦合系数时,3 种不耦合介质条件下,爆破所产生的破碎漏斗可见体积各不相同。具体来说,在试验的 4 种不耦合系数中,水介质不耦合装药的漏斗可见体积与冰介质产生的漏斗可见体积相差不大。相比之下,空气介质不耦合装药的漏斗可见体积均小于水、冰不耦合介质漏斗可见体积。当不耦合系数为 1.2 时,水、冰介质漏斗可见体积相对空气介质平均提高 21.66%、20.02%,平均单耗减小 17.80%、16.68%;当不耦合系数为 1.33 时,水、冰介质漏斗可见体积相对空气介质平

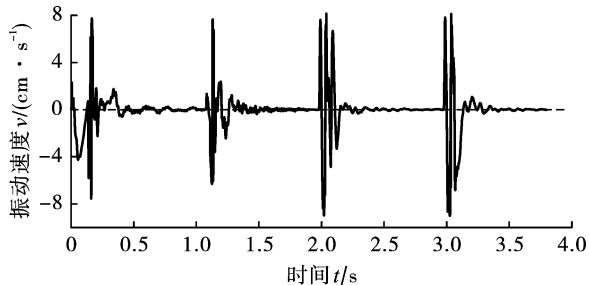
均提高 32.09%、26.55%,平均单耗减小 24.29%、20.98%;当不耦合系数为 1.50 时,水、冰介质漏斗可见体积相对空气介质平均提高 19.73%、15.52%,平均单耗减小 16.48%、13.44%;当不耦合系数为 1.71 时,水、冰介质漏斗可见体积相对空气介质平均提高 16.91%、8.73%,平均单耗减小 14.47%、8.03%。

### 3.2 振动速度峰值分析

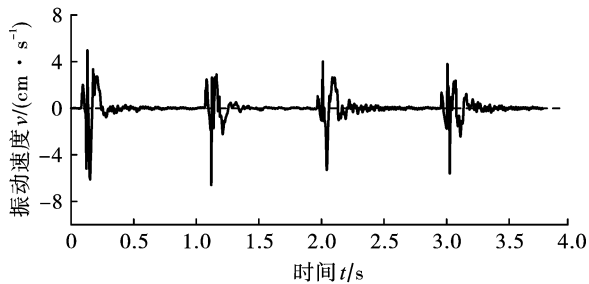
在不考虑炸药起爆后热化学能损失的情况下,炸药能量除了用于破碎岩石、抛掷岩石、分离岩石以外,还会有一部分能量用于爆破地震波的传递。第一组振动监测试验选择 1#炮孔 ~ 4#炮孔,均为空气不耦合装药;第二组振动监测试验选择 17#炮孔 ~ 20#炮孔,均为水介质不耦合装药;第三组振动监测试验选择 33#炮孔 ~ 36#炮孔,均为冰介质不耦合装药。由于在一般情况下竖直方向的爆破振动速度峰值更大,因此只对竖直方向爆破振动速度进行分析。爆破振动速度波形如图 10 所示。

由图 10 可以发现:第一组(1#炮孔 ~ 4#炮孔)空气不耦合装药爆破振动速度峰值为 9.16 cm/s;

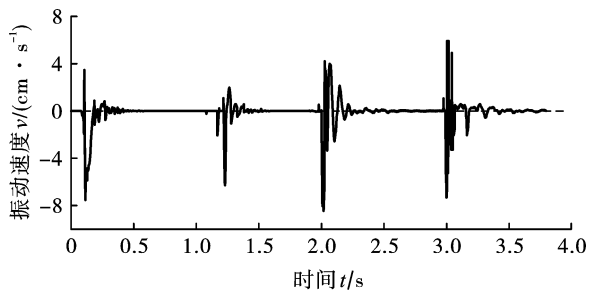
第二组(17#炮孔~20#炮孔)水介质不耦合装药爆破振动速度峰值为6.84 cm/s;第三组(33#炮孔~36#炮孔)冰介质不耦合装药爆破振动速度峰值为8.13 cm/s。相比空气不耦合装药爆破,水和冰介质不耦合装药爆破振动速度峰值分别降低了25.33%和11.24%。其主要机理是水介质不耦合装药爆破延长了能量在炮孔内的作用时间,提高了能量利用率,导致以振动波形式传播的能量减少<sup>[24,25]</sup>,从而爆破振动速度峰值减小。同样,冰介质不耦合装药爆破在爆破瞬间的一部分冰介质会吸收少量能量融化为水介质,延长了能量在炮孔内的作用时间,但由于融化后的水较少,能量利用率提高不明显。另一部分冰会被直接破碎,无法提高能量利用率。所以冰介质对于爆破振动速度峰值的降低有一定作用,但不如水介质效果好。



(a) 空气不耦合装药爆破振动监测  
(a) Vibration monitoring of airborne decoupled charge blasting



(b) 水介质不耦合装药爆破振动监测  
(b) Vibration monitoring of blasting with decoupled charges in aqueous medium



(c) 冰介质不耦合装药爆破振动监测  
(c) Vibration monitoring of blasts with decoupled charges in ice medium

图10 3种不耦合介质爆破振动

Fig. 10 Blast vibration of different decoupled mediums

### 3.3 爆破漏斗最大破岩体积分析

由于不同的不耦合介质在不同的不耦合系数条件下的最佳装药深度是不同的。因此,本节固定不耦合系数为1.33,在上述试验的基础上,增加12组试验,埋深分别为1.3 m、1.5 m、1.7 m、1.9 m。如表2所示。

表2 补充试验

Table 2 Supplementary test

试验序号	不耦合介质	炮孔深度/m	药包中心埋深/m	漏斗可见体积/m <sup>3</sup>	单耗/(kg·m <sup>-3</sup> )
1#	空气	1.3	1.17	4.38	0.46
2#		1.5	1.37	5.55	0.36
3#		1.7	1.57	4.53	0.44
4#		1.9	1.77	2.21	0.90
5#	水	1.3	1.17	5.72	0.35
6#		1.5	1.37	6.58	0.30
7#		1.7	1.57	5.94	0.34
8#		1.9	1.77	4.18	0.48
9#	冰	1.3	1.17	4.92	0.41
10#		1.5	1.37	6.66	0.30
11#		1.7	1.57	5.88	0.34
12#		1.9	1.77	4.22	0.47

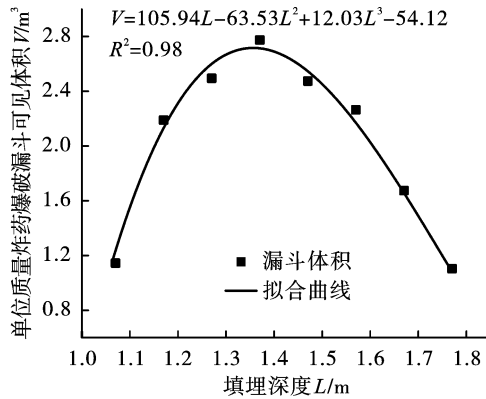
在本次补充试验中主要研究3种不耦合介质单位药量下的最大破岩体积,因此拟合了基于利文斯顿曲线的埋深与单位质量炸药爆破漏斗体积的关系,如图11所示,通过拟合得到的利文斯顿曲线计算得到最佳深度 $L_j$ (爆破漏斗体积最大时的药包埋深)和临界深度 $L_c$ (爆破作用只限于岩体内部,爆破后地表岩石不引起破坏,炸药的全部能量被岩石所吸收,岩石质点只产生弹性变形,爆破后岩石又恢复原状时的药包埋深)。

由图11可见:

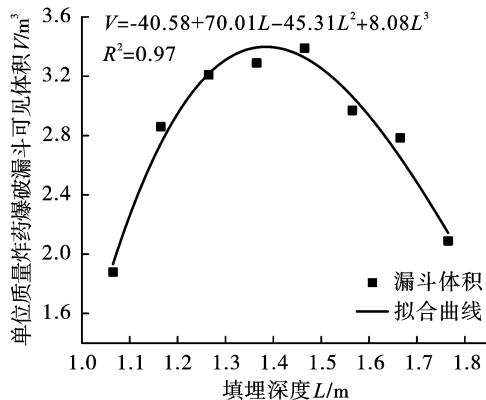
(1)空气不耦合装药单位质量炸药爆破漏斗体积拟合曲线为: $V = 105.94L - 63.53L^2 + 12.03L^3 - 54.12$ ,水介质不耦合装药单位质量炸药爆破漏斗体积拟合曲线为: $V = 70.01L - 45.31L^2 + 8.08L^3 - 40.58$ ,冰介质不耦合装药单位质量炸药爆破漏斗体积拟合曲线为: $V = 61.13L - 32.33L^2 + 5.03L^3 - 32.70$ 。

(2)通过计算多项式拟合曲线极值点和零点,得到空气介质不耦合装药的最佳深度 $L_j$ 为1.35 m,临界深度 $L_c$ 为1.97 m,单位药量最大破岩体积为2.71 m<sup>3</sup>,最佳埋深比为0.69,消耗单耗0.37 kg/m<sup>3</sup>;水介质不耦合装药的最佳深度 $L_j$ 为1.39 m,临界深

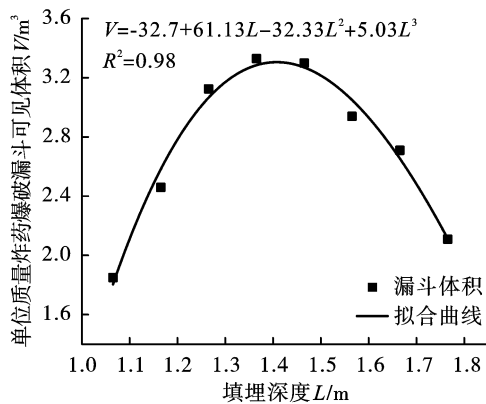
度  $L_c$  为 2.18 m,单位药量最大破岩体积为  $3.38 \text{ m}^3$ ,最佳埋深比为 0.64,消耗单耗  $0.30 \text{ kg/m}^3$ ;冰介质不耦合装药的最佳深度  $L_j$  为 1.41 m,临界深度  $L_c$  为 2.06 m,单位药量最大破岩体积为  $3.32 \text{ m}^3$ ,最佳埋深比为 0.68,消耗单耗  $0.30 \text{ kg/m}^3$ 。3 种不耦合介质下,药包埋深的临界位置各不相同,其中水介质的临界深度最深,表明其能量传递效率最高。



(a) 空气不耦合装药  
(a) Air decoupled charges



(b) 水介质不耦合装药  
(b) Decoupled charges for aqueous media



(c) 冰介质不耦合装药  
(c) Decoupled charge with ice

图 11 填埋埋深与单位质量炸药爆破漏斗体积关系  
Fig. 11 Relationship between landfill burial depth and blast funnel volume per unit mass of charge

(3)根据爆破漏斗试验结果,对比 3 种不耦合介质在最佳埋深时的爆破单耗可发现,不耦合介质为水或冰的单耗相对于空气可降低 18.9%。

## 4 现场应用

### 4.1 场地背景

试验地点位于拉萨市甲玛露天矿的 5090 平台,该平台西南侧区域多为干孔;而东南侧多为水孔和冰冻炮孔。在原设计方案中,并未考虑水介质及冰介质不耦合装药对爆破效果的影响。依据爆破作业相关设计规范<sup>[26]</sup>,分别对 5090 平台西南侧和东南侧两个爆区进行爆破。其中,西南侧爆区使用原设计方案,东南侧爆区根据试验结果进行减药爆破,最后对比两个爆区的爆破效果。方案对比如表 3 所示。

西南侧爆区共计 95 个炮孔,采用导爆管雷管引爆,起爆方式为毫秒微差起爆,微差延时分别为 0 ms、75 ms、110 ms、350 ms;东南侧爆区共计 30 个炮孔,采用导爆管雷管引爆,起爆方式为毫秒微差起爆,微差延时分别为 0 ms、75 ms、110 ms、350 ms。西南侧爆区孔网布置如图 12 所示,东南侧爆区孔网布置如图 13 所示。

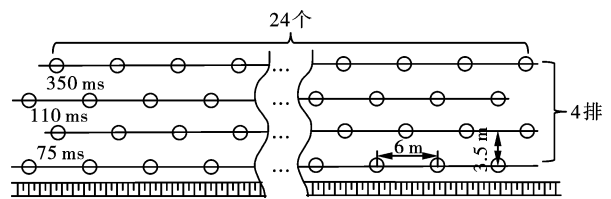


图 12 西南侧爆区孔网布置

Fig. 12 Arrangement of holes in the blast area on the south-west side

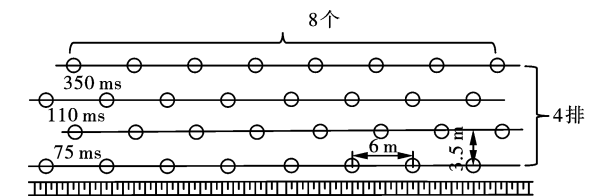


图 13 东南侧爆区孔网布置

Fig. 13 Blast hole layout at the southeast side of the explosive zone

### 4.2 爆破效果评价

由现场统计结果,西南侧爆区爆破方量为  $24\ 156.1 \text{ m}^3$ ,其单耗为  $0.44 \text{ kg/m}^3$ ;东南侧爆破方量为  $7360.3 \text{ m}^3$ ,其单耗为  $0.36 \text{ kg/m}^3$ 。根据现场爆破作业要求,当岩石块度大于 80 cm 视为大块。将现场爆破块度照片导入 Split-Desktop64 爆破块度识别系统,系统通过自动识别与手动优化的方式对爆

破块度分布进行统计,块度识别与统计如图 14 所示。

表 3 方案对比

Table 3 Comparison of programmes

方案	钻孔直径/ mm	孔距/m	排距/m	孔深/m	超深/m	布孔方式	最大单孔 药量/kg	总装 药量/kg
原设计	120	6	3.5	15	1.5	三角形布孔	108.0	10 032.8
减药设计	120	6	3.5	15	1.5	三角形布孔	87.6	2661.0



图 14 块度识别与统计

Fig. 14 Fragment identification and statistics

图 14(c) 显示,水和冰介质试验孔在减少炸药后,爆破质量并未出现降低。从爆破块度进行评价,西南侧爆区块度集中分布在 20 ~ 60 cm,且块度 < 20 cm 占比过多,大块率也高于减小药量后,说明炸药产生能量分布不均匀,而减小药量后块度集中分布在 20 ~ 80 cm 区间内,且大块率明显降低,说明当不耦合介质为水和冰介质时,炸药产生能量分布更加均匀。从炸药单耗方面进行评价,西南侧爆区单耗为 0.44 kg/m<sup>3</sup>,东南侧爆区单耗为 0.36 kg/m<sup>3</sup>,在现场爆破方案中,水、冰介质不耦合装药的爆破可降低单耗 18.2%,说明当不耦合介质为水和冰介质时,炸药的能量利用率更高。该试验结果可为类似极端环境爆破作业提供参考。

## 5 结论

以西藏甲玛露天矿为背景,通过爆破漏斗试验和现场台阶爆破试验,系统地分析了高原高寒区 3 种不耦合介质装药爆破效应,同时提出符合该项目爆破参数优化方案。具体研究成果如下:

(1) 3 种不耦合介质的爆破漏斗试验中,发现漏斗可见体积与破碎体积之间存在非线性关系,根据 W Livingston 理论将可见体积与破碎体积关系分为三种情况。第一种情况,炸药埋深小于过渡深度时,漏斗可见体积与破碎体积基本相等;第二种情况,随着炸药埋深的增加(小于临界深度),漏斗可见体积

与破碎体积差异较大;第三种情况,炸药埋深继续增加(大于临界深度),漏斗可见体积与破碎体积基本相同。

(2) 4 种不耦合系数的试验中,水介质不耦合装药的漏斗可见体积与冰介质产生的漏斗可见体积相差不大。但空气介质不耦合装药的漏斗可见体积均小于水、冰不耦合介质。

(3) 现场试验结果表明,与空气不耦合装药相比,水介质不耦合装药爆破振动峰值速度可降低 25.33%;而冰介质不耦合装药爆破振动峰值速度可降低 11.24%。冰和水介质装药爆破都可以延长了能量在炮孔内的作用时间,提高能量利用率,降低爆破振动速度峰值。

(4) 3 种不耦合介质下,药包埋深的临界位置各不相同,其中水介质的临界深度最深,冰介质的临界深度次之,空气介质的临界深度最浅。即爆破能量利用率:水 > 冰 > 空气。

(5) 将研究结果应用于现场大块率由 8.9% 降低到 4.3%,爆破效果优于原爆破方案。且当不耦合介质为水和冰介质时,炸药产生能量分布更加均匀。

## 参考文献 (References)

- [1] 廖崇超,王雁冰. 不同耦合介质下脆性材料断裂行为研究[J]. 工程爆破,2022,28(5):44-51.  
[1] LIAO Chong-chao, WANG Yang-bing. Study on the frac-

- ture behavior of brittle materials under different coupled media[J]. *Engineering Blasting*, 2022, 28(5):44-51. (in Chinese)
- [2] ZUO Jin-jing, YANG Ren-shu, GONG Min, et al. Effect of different filling media between explosive and blast-hole wall on rock blasting[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(8):5705-5717.
- [3] 费鸿禄. 爆破理论及其应用[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2017.
- [3] FEI Hong-lu. *Explosion theory and its applications*[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2017. (in Chinese)
- [4] LI Tong, CHEN Ming, WEI Dong, et al. Disturbance effect of blasting stress wave on crack of rock mass in water-coupled blasting[J]. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 2022, 26(6):2939-2951.
- [5] LI Xu-dong, LIU Ke-wei, SHA Yan-yan, et al. Numerical investigation on rock fragmentation under decoupled charge blasting[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 157:1-28.
- [6] 倪文婧. 径向不耦合装药爆破效果的数值研究[J]. *工程爆破*, 2019, 25(3):12-16.
- [6] NI Wen-qian. Numerical studies on blasting effects under the radial decoupling charge[J]. *Engineering Blasting*, 2019, 25(3):12-16. (in Chinese)
- [7] 费鸿禄, 纪海楠, 山杰. 露天台阶水介质间隔装药结构优选及对比试验研究[J]. *黄金科学技术*, 2023, 31(6):930-943.
- [7] FEI Hong-lu, JI Hai-nan, SHAN Jie. Optimization and comparative experimental study of charge structure of water medium interval on open-air step[J]. *Gold Science and Technology*, 2023, 31(6):930-943. (in Chinese)
- [8] 郭东明, 李杨, 宋耀, 等. 水耦合介质定向断裂爆破裂纹动态扩展机理研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2024, 41(1):134-141.
- [8] GUO Dong-ming, LI Yang, SONG Yao, et al. Dynamic crack propagation mechanisms of water-coupling charge under directional fracture blasting[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2024, 41(1):134-141. (in Chinese)
- [9] 陈啸林, 张智宇, 王凯, 等. 深部岩石爆破裂纹扩展与不耦合装药系数的关系[J]. *高压物理学报*, 2023, 37(5):137-150.
- [9] CHEN Xiao-lin, ZHANG Zhi-yu, WANG Kai, et al. Relation between crack propagation and decoupling charging coefficient in deep rock blasting[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(5):137-150. (in Chinese)
- [10] 刘江超, 高文学, 张声辉, 等. 水间隔装药孔壁爆炸应力分布规律[J]. *兵工学报*, 2021, 42(12):2646-2654.
- [10] LIU Jiang-chao, GAO Wen-xue, ZHANG Sheng-hui, et al. Distribution law of explosion stress on hole wall of water interval charge[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(12):2646-2654. (in Chinese)
- [11] LIU Jiang-chao, GAO Wen-xue. Vibration signal analysis of water seal blasting based on wavelet threshold denoising and HHT transformation[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020:1-14.
- [12] 徐颖, 顾柯柯, 葛进进, 等. 装药不耦合系数对初始地应力下岩石爆破裂纹扩展影响的试验研究[J]. *爆破*, 2022, 39(4):1-9.
- [12] XU Ying, GU Ke-ke, GE Jin-jin, et al. Experimental study on effect of charge decoupling coefficient on crack propagation in rock by blasting under initial in-situ stress[J]. *Blasting*, 2022, 39(4):1-9. (in Chinese)
- [13] 田浩, 张义平, 王彬, 等. 不耦合装药对混凝土爆破效果的影响试验研究[J]. *爆破*, 2019, 36(3):25-30, 42.
- [13] TIAN Hao, ZHANG Yi-ping, WANG Bin, et al. Experimental study on effect of decoupling charge on concrete blasting[J]. *Blasting*, 2019, 36(3):25-30, 42. (in Chinese)
- [14] 岳中文, 胡晓冰, 陈志远, 等. 不耦合装药对炸药能量利用率影响的实验研究[J]. *爆破*, 2020, 37(3):34-39.
- [14] YUE Zhong-wen, HU Xiao-bing, CHEN Zhi-yuan, et al. Experimental study of effect of uncoupled charge on energy utilization efficiency of explosives[J]. *Blasting*, 2020, 37(3):34-39. (in Chinese)
- [15] 叶志伟, 陈明, 李桐, 等. 一种水耦合轮廓爆破孔壁压力峰值的简化计算方法[J]. *岩土力学*, 2021, 42(10):2808-2818.
- [15] YE Zhi-wei, CHEN Ming, LI Tong, et al. A simplified method for calculating peak pressure of borehole wall under water-coupling contour blasting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(10):2808-2818. (in Chinese)
- [16] 李书萱, 王雁冰, 王宝珠, 等. 水耦合装药不耦合系数对爆破效果的影响研究[J]. *爆破*, 2021, 38(3):6-9, 18.
- [16] LI Shu-xuan, WANG Yan-bing, WANG Bao-zhu, et al. Influence of decoupling coefficient of water-coupled charge on blasting effect[J]. *Blasting*, 2021, 38(3):6-9, 18. (in Chinese)
- [17] 刘博, 苟永刚, 叶明珠, 等. 高寒区冻融环境下岩体爆破漏斗试验研究[J/OL]. *爆破*:1-15. [2024-06-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20240306.0958.006.html>.
- [17] LIU Bo, GOU Yong-gang, YE Ming-zhu, et al. Experi-

- mental study on blasting crater of rock mass under freeze-thaw environment in high cold region[J/OL]. *Blasting*; 1-15. [2024-06-25]. (in Chinese)
- [18] ITO S, KIRA A, KUBOTA S, et al. Optical study of underwater explosion of high explosive; Suichu bakugo gensho no kogakuteki kansoku ni tsuite [J]. *Kayaku Gakkaishi (Journal of the Japan Explosives Society)*, 1995, 56; 181-187.
- [19] MA Tian-hui, LI Fu-jie, YANG Yu-hao, et al. Study on energy evolution and crack propagation of rock mass under single hole uncoupled charge blasting [J]. *Applications in Engineering Science*, 2022, 11; 1-13.
- [20] DING Xiao-hua, LIU Xin, AO Zhong-chen, et al. Research on blasting mechanism and blasting effect of aqueous media in open pit coal mines [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1); 19140-19140.
- [21] XIA Wen-jun, LU Wen-bo, LI Rui-ze, et al. Effect of water-decked blasting on rock fragmentation energy [J]. *Shock and Vibration*, 2020, 2020; 1-11.
- [22] 费鸿禄, 甄 帅, 李文焱, 等. 高原多年含水冻岩爆破炮孔温度-水分场耦合分析 [J]. *爆破*, 2022, 39(4); 32-43.
- [22] FEI Hong-lu, ZHEN Shuai, LI Wen-yan, et al. Coupling analysis of temperature and water field of blast hole for multi-year water-bearing frozen rock burst in plateau [J]. *Blasting*, 2022, 39(4); 32-43. (in Chinese)
- [23] 龚 剑. 高海拔矿山掘进面粉尘运移规律及通风除尘系统优化 [D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- [23] GONG Jian. Research on the movement regularities of dust and ventilation system optimization in excavation face of high-altitude mine [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017. (in Chinese)
- [24] 王立川, 张学民, 马明正, 等. 隧道爆破水介质轴向不耦合装药振动规律三维数值模拟研究 [J]. *现代隧道技术*, 2018, 55(2); 96-102.
- [24] WANG Li-chuan, ZHANG Xue-min, MA Ming-zheng, et al. 3D numerical simulation of tunnel blasting vibration laws under axial uncoupled charge with water medium [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2018, 55(2); 96-102. (in Chinese)
- [25] 陈 磊, 吴 磊, 李银霞, 等. 炮孔底部水介质在台阶爆破中的作用 [J]. *金属矿山*, 2013(5); 41-44.
- [25] CHEN Lei, WU Lei, LI Yin-xia, et al. The effect of bottom water media of blast-hole on bench blasting [J]. *Metal Mine*, 2013(5); 41-44. (in Chinese)
- [26] GB6722—2014 爆破安全规程 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [26] GB6722—2014 Safety regulations for blasting [S]. Beijing: China Standard Press, 2015. (in Chinese)

(上接第 25 页)

- [9] 周 辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 深埋硬岩隧洞岩爆的结构面作用机制分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(4); 720-727.
- [9] ZHOU Hui, MENG Fan-zhen, ZHANG Chuan-qing, et al. Effect of structural plane on rockburst in deep hard rock tunnels [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(4); 720-727. (in Chinese)
- [10] 周 辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 结构面剪切破坏特性及其在滑移型岩爆研究中的应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(9); 1729-1738.
- [10] ZHOU Hui, MENG Fan-zhen, ZHANG Chuan-qing, et al. Characteristics of shear failure of structural plane and slip rockburst [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(9); 1729-1738. (in Chinese)
- [11] 谢和平. 岩石、混凝土损伤力学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.
- [11] XIE He-ping. Damage mechanics of rock and concrete [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1990. (in Chinese)
- [12] 李露露, 高永涛, 周 喻, 等. 单轴压缩条件下含三叉裂隙类岩石试样力学特性的细观研究 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(10); 3668-3676.
- [12] LI Lu-lu, GAO Yong-tao, ZHOU Yu, et al. Meso-scale modelling mechanical properties of rock-like material containing trident cracks under uniaxial compression [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(10); 3668-3676. (in Chinese)
- [13] 黄明利, 黄凯珠. 三维表面裂纹相互作用扩展贯通机制试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007(9); 1794-1799.
- [13] HUANG Ming-li, HUANG Kai-zhu. Experimental study on propagation and coalescence mechanisms of 3D surface cracks [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007(9); 1794-1799. (in Chinese)
- [14] DAUGMAN J. New methods in iris recognition [J]. *IEEE Trans Syst Man Cybern B Cybern*, 2007, 37(5); 1167-1175.
- [15] CANNY J F. A computational approach to edge detection [J]. *Readings in Computer Vision*, 1987; 184-203.