

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.012

## 两河口水电站级配料开采爆破 孔间延时优选的试验研究\*

余良松<sup>1</sup>,周龙杰<sup>1</sup>,胡英国<sup>2</sup>,胡伟<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电第十二工程局有限公司,杭州 310004;

2. 长江水利委员会长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室,武汉 430010)

**摘要:** 水电工程领域,开采的堆石坝级配料合格与否直接关系到大坝的填筑质量和坝体运行期的安全,需引起足够重视。以两河口水电站堆石坝开采为工程背景,开展了精确毫秒延时条件下孔间延迟时间对爆破级配影响的试验研究。首先从理论角度阐述了孔间延时对爆破块度影响的力学原理,进而结合料场开采设计了12种试验工况开展对比研究,从级配分布、不同粒径区间以及平均块度等多方面分析了孔间延迟时间对爆破块度影响特性,试验结果表明:不同的孔间延迟时间对爆破级配的影响明显,且孔间延迟时间对粒径的影响具有明显的分区特性,对于10 mm以下粒径,延迟时间的影响并不明显,对于10~80 mm粒径的块度,其分布变化具有明显的波动特征和周期性规律,与不同延迟时间下的应力波叠加密切相关,对于80 mm以上的粒径块度,孔间延时的影响逐渐减小,岩体的天然结构面切割起主要作用。孔间延迟时间对平均块度的影响明显,随着延迟时间的增加,平均块度先减小后增大,在10 ms时取得最小值,表明此时的破碎效果最好,但从水工级配料包络线的级配最优角度,通过比较与包络线中线的误差率,孔间延迟时间为20 ms时最优,印证了水工堆石坝级配料开采与矿山开采存在区别,破碎程度不是唯一指标,应当是通过合理的设置孔间延时,使炸药能量合理的破碎岩石并形成特定的不均匀级配。

**关键词:** 爆破; 延迟时间; 应力波; 级配; 优化

**中图分类号:** TU746.6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-487X(2021)04-0081-08

## Experimental Study on Delay Optimization between Blasting Holes in Grade Batching Mining of Lianghekou Hydropower Station

YU Liang-song<sup>1</sup>, ZHOU Long-jie<sup>1</sup>, HU Ying-guo<sup>2</sup>, HU Wei<sup>2</sup>

(1. Sinohydro Twelfth Engineering Bureau Co., Ltd., Hangzhou 310004, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources,  
Yangtze River Science Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** In the field of hydropower engineering, whether the grade of rockfill dam ingredients is qualified or not is directly related to the filling quality of the dam and the safety of the dam body during operation period, which should be paid enough attention to. Taking the mining of rockfill dam of Lianghekou Hydropower Station as the engineering background, this paper carried out the experimental research on the influence of delay time between holes on blasting grading under the condition of precise millisecond delay. Firstly, the mechanical principle of the influence of delay time between holes on blasting fragmentation is expounded theoretically. Then, 12 kinds of test conditions are designed to carry out comparative study combining with the mining field. The influence characteristics of delay time between holes on blasting fragmentation are analyzed from grading distribution, different particle size range and average fragmentation. The effect of delay time between holes on blasting gradation is obvious, and the effect of delay time between holes on particle size has obvious zoning characteristic. For the particle size which is less than 10 mm, the effect of delay time is not obvious. But for the particle size of 10~80 mm, the distribution change has obvious wave

characteristic and periodic rule, which is closely related to the superposition of stress waves under different delay time. For the particle size which is above 80 mm, the effect of time delay between holes gradually decreases, and the cutting of natural structural plane is the main role. Meanwhile, the effect of delay time between holes on average fragmentation is obvious. With the increase of delay time, the average fragmentation first decreases and then increases, and the minimum value is obtained at 10 ms, which indicates that the crushing effect is the best at this time. However, from the perspective of optimal gradation of hydraulic grade proportioning envelope, by comparing the error rate with the centerline of envelope, it is the best when the delay time between holes is 20 ms, it is verified that there is a difference between hydraulic rockfill dam grade proportioning mining and mine mining. The crushing degree is not the only index. It should be reasonable to set the delay between holes to make the explosive energy reasonable to crush the rock and form a specific uneven gradation.

**Key words:** blast; delay time; stress wave; blasting fragmentation; optimization

随着近年来国家对于水利水电行业的大力建设,工程爆破技术作为目前水利水电石料开采的主要手段,在其中发挥了关键作用。岩石爆破块度作为评价爆破效果的主要指标,直接影响到水利水电工程后续的建设目标和建设成本。目前,水利水电堆石坝级配料普遍采用深孔台阶爆破技术进行开采,而在爆破开采过程中,提高爆破效率和质量,满足良好的级配曲线以及粒料不均匀系数和曲率系数等评价指标的同时尽量减少对自然环境的扰动破坏,对水利水电堆石坝级配料的开采具有重要意义。

但是爆破过程是一个复杂的非线性过程。炸药特性、装药结构、爆破参数、岩石的物理力学性质和内部节理等因素均会对最终的爆破效果产生巨大影响<sup>[1-3]</sup>。不同爆破设计、爆破参数组合都会产生不同的爆破块度分布。我们需要不断对参数进行优化,找出其中最佳的参数组合,达到最佳爆破效果<sup>[4,5]</sup>。在当前电子雷管大幅推广的条件下,精确毫秒延时的微差爆破被越来越广泛的应用,群孔起爆延迟时间对爆破效果的影响是爆破设计优化研究的重点方面之一。

长期以来国内外科研工作者针对微差爆破延期时间开展了大量的研究工作。赵根根据实际水利水电工程料场的深孔台阶爆破<sup>[6]</sup>,对实测的爆破震动波形进行分析,提出深孔台阶爆破精确起爆的设计建议值为15~20 ms。钟东望通过对爆破振动持时分析及微差爆破延期时间优选提出了合理孔间延期时间往往不是某一具体值,而是一个或多个时间区

间<sup>[7]</sup>;不同爆心距处合理延期时间值不同。施健俊以破碎块度和降低爆破振动为目的,分析了逐孔微差起爆机理,探讨了抵抗线对延时时间影响<sup>[8]</sup>。Katsabanis P D的研究结果表明<sup>[9]</sup>:延迟时间对大块度组分影响显著,而对小块度组分几乎没有影响。短延期时间对块度分布的影响有效,而长延期时间将产生不良块度。P Schimek通过统计平均裂纹密度与其交叉裂纹密度发现,岩石损伤程度与延期时间成正比<sup>[10]</sup>。F Ouchterlony在亚兰达通过开展爆破试验,评估了电子延期雷管对爆破效果的影响并分析了块度曲线的变化特征<sup>[11]</sup>。李迎通过正交试验<sup>[12]</sup>,得出了微差时间对爆破破碎块度影响由大到小依次是排间、孔间、孔内微差。

已有的研究表明:延迟时间对爆破效果具有明显的影响,但相关研究大多关注矿山开采爆破的破碎程度以及大区爆破的减震等方面,由于水工堆石坝级配料开采的要求具有其特殊性,需要形成特定的非均匀级配,然而这方面的研究并不多见。因此本文以国家重大工程两河口水电站的大坝级配料开采为背景,通过开展不同延迟时间条件下的爆破试验,确定延迟时间对爆破块度空间分布的影响特性,进而研究延迟时间对不同粒径块度、平均块度以及误差率等多个指标的影响,确定延迟时间对特定爆破石料级配形成的影响规律,为水电工程堆石坝的级配料开采提供参考。

## 1 微差时间对爆破块度的影响理论研究

微差爆破在目前的矿岩爆破中已广泛应用,但人们对微差爆破的破岩机理还没有统一的认识,国内外至今也没有一个严密公认的微差爆破理论。因此,各国研究者提出的各种观点暂时还只能认为是一种假说或推断。对微差爆破理论的研究目前可认为主要存在以下几个方面的假说。

收稿日期:2021-07-05

作者简介:余良松(1976-),男,山东高密人,工学学士,从事水电工程建设与管理方面的研究,(E-mail)179171228@qq.com。

通讯作者:胡英国(1987-),男,安徽安庆人,长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室,教授级高级工程师、博士,主要从事工程爆破设计、科研、安全评估及技术咨询等工作,(E-mail)huyingguo@mail.crsri.cn。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52079009);中央科研业务费项目(CKSF2019477/YT)

### (1) 应力波叠加理论

该理论认为,如果使相邻的两药包间隔一定时间起爆,即当先爆药包在岩体内激起压缩波,并从自由面反射成拉伸波后,再引爆后续药包,会增大该区域内的应力,改善破碎块度。

20世纪80年代,前苏联波克洛夫斯基通过大量实验研究叠加理论进行了修正补充<sup>[13]</sup>,提出爆破产生自由面的岩石之所以有较大位移和变形时由于先爆药包产生的冲击波和应力波的气楔作用,当应力波减弱时,爆轰气体破坏还未成为主要破坏形式时,炮孔内膨胀压力随之减弱,孔壁产生反向拉伸波,此时为最佳起爆后爆药包时间,据此,给出最佳延期时间半经验数学公式为

$$\Delta t = \frac{a}{c_p} + 5 \times 10^{-4} \sqrt[3]{Q} \quad (1)$$

式中: $a$ 为炮孔间距,m; $c_p$ 为压应力波传播速度,m/s; $Q$ 为单孔药量,kg。

### (2) 爆生新自由面理论

新自由面假说认为,在大爆区采用微差爆破能够大大改善岩石的破碎质量,是由于先爆药包已经在岩体内造成了某种程度的破坏,在爆区周围形成了一定宽度的裂隙和附加自由面,为后续药包爆破创造良好的自由面条件。

因此,如果采用排间微差起爆,每个炮孔只有一个侧向自由面;而如果采用孔间微差爆破,如果微差时间合理,当前段炮孔爆破后,除了在矿岩中产生径向裂隙和环向裂隙之外,还可以使自由面一侧爆破漏斗内的岩石与原岩脱离,这样就为后爆炮孔创造了一个新的侧向自由面,并且将使最小抵抗线的方向发生改变。于是后起爆炮孔产生的应力波将在自由面的反射叠加作用增强,夹制作用减少,而且逐孔起爆能够减小岩石的抛掷距离和爆堆宽度,并能充分利用岩块动能,在运动过程中引起相互碰撞,很好地改善了破碎质量。前苏联哈努卡耶夫认为合理的间隔时间应该是先爆炮孔刚好形成爆破漏斗<sup>[14]</sup>,并且爆落岩石脱离岩体,形成宽的贯穿裂缝,创造新的自由面的时间,于是,合理微差时间应该由下式确定

$$\Delta t = t_1 + t_2 + t_3 = \frac{2W}{c_p} + \frac{R}{V_t} + \frac{S}{V_a} \quad (2)$$

式中: $t_1$ 为弹性应力波传至自由面并返回所经历的时间; $t_2$ 为形成裂缝的时间; $t_3$ 为破碎的岩石离开岩体距离的时间; $W$ 为最小抵抗线长度,m; $c_p$ 为岩体中声波速度,m/s; $R$ 为裂缝长度,可近似取 $R = W$ ; $V_t$ 为裂缝扩展速度,m/s, $V_t = 0.05c_p$ ; $S$ 为形成裂缝的要求宽度,可取 $S = 0.01$  m; $V_a$ 为岩石运动平均速度,m/s。

除了上述理论,还有其他关于微差时间对爆破块度影响的理论学说,介于篇幅原因,就不一一列举了。

## 2 两河口水电站延时的比选试验

### 2.1 试验概况

两河口水电站位于四川省甘孜州雅江县境内雅砻江干流与支流庆大河的汇河口下游,是雅砻江中下游的“龙头”水库,是雅砻江干流中游规划建设规划的7座梯级电站中装机规模最大的水电站,也是我国藏区开工建设综合规模最大的水电站工程。两河口水电站拦河大坝为砾石土心墙堆石坝,坝顶高程2875.00 m,坝顶宽度16.0 m,最大坝高295.0 m。大坝坝体共分为防渗体、反滤层、过渡层和坝壳四大区。本工程坝体堆石料、过渡料和围堰堆石料、人工骨料毛料、砌石护坡所需石料、心墙掺和石料以及部分反滤料掺配料毛料均需从石料场开采。本工程共有两个石料场,分别为两河口石料场(如图1所示)和瓦支沟石料场。



图1 两河口料场无人机扫描全景

Fig. 1 Panoramic view of two UAVs scanning in Lianghekou

为确定在水工级配料开采中的合理延迟时间,两河口和瓦支沟料场均开展了针对性试验。试验中采用数码雷管实现不同工况的精确延时。

### 2.2 试验设计

为充分探究延迟时间对爆破石料级配的影响,在两河口水电站的两河口料场和瓦支沟料场分别开展爆破试验,两种料场的岩性有所差别,同时也可以对比不同岩体强度条件下延迟时间对爆破级配分布的影响敏感程度。表1给出了详细的爆破试验参数,试验过程中主要针对孔间延时变量进行研究。

由于本次试验主要研究延迟时间对爆破级配的影响,需要对爆破后的石料进行筛分,试验中主要采用人工筛分和基于WipFrag的块度扫描的方法。人工筛分法通过采集爆破后破碎岩石样本,使用一系列不同尺寸的筛盘,计算每个筛盘上岩石的质量和体积,从而获得破碎岩石的块度分布。筛分法得出的结果具有较好的一致性,虽工作量较大,但由于筛分法的工作流程容易控制,筛分的精度也是目前认为最高的,本次试验中,有6次试验的爆破级配确定采用人

工筛分法。随着计算机图像处理技术的进步和相关分析工具的开发,图像分析技术已经成为爆破破碎块度评价较为有效的方法。本次试验中有6种工况采

用的是基于 WipFrag 的爆破级配分析技术,先采用高精度摄影技术对爆破级配进行拍摄,然后采用 WipFrag 程序对块度进行分析确定,如图2所示。

表1 爆破试验工况

Table 1 Blasting test conditions

试验序号	试验区域	孔间间隔时间/ms	孔距/m	排距/m	孔深/m	堵塞长度/(kg·m <sup>-3</sup> )	爆破总方量/m <sup>3</sup>	钻孔角度/°	筛分方法
1		0	4.5	3.5	11.0	3.5	1600	90	人工
2	两河口料场 (砂板岩,强度较低)	5	4.5	3.5	10.0	3.5	4700	90	人工
3		10	4.5	3.5	12.0	3.5	2700	90	人工
4		20	4.5	3.5	8.0	3.5	5000	90	WipFrag
5		30	4.5	3.5	12.0	3.5	4200	90	WipFrag
6		50	4.5	3.5	14.0	4.0	4000	90	WipFrag
7		0	4.0	3.0	14.0	3.2	3800	90	人工
8	瓦支沟料场 (砂岩,强度较高)	5	4.0	3.0	10.0	3.2	4200	90	人工
9		10	4.0	3.0	12.0	3.2	4510	90	人工
10		20	4.0	3.0	12.0	3.2	3505	90	WipFrag
11		30	4.0	3.0	15.0	4.0	3600	90	WipFrag
12		50	4.0	3.0	13.0	3.5	3420	90	WipFrag

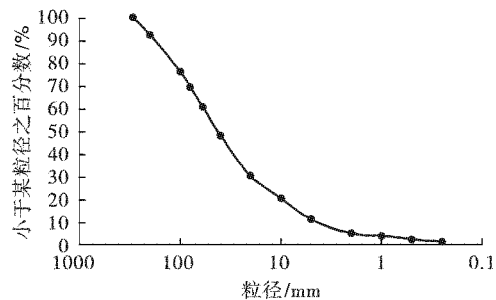
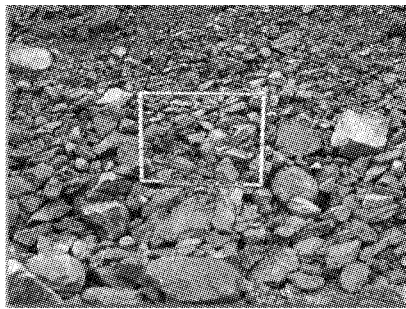


图2 WipFrag扫描确定爆破块度

Fig. 2 Determination of blasting fragmentation by Wipfrag scanning

### 2.3 试验结果

在两个石料开采场地中,均结合堆石料的生产开展试验。为保证试验结果的精确性,试验中对每一个施工环节进行严密控制,图3给出了试验过程与爆破后爆堆形态的照片。

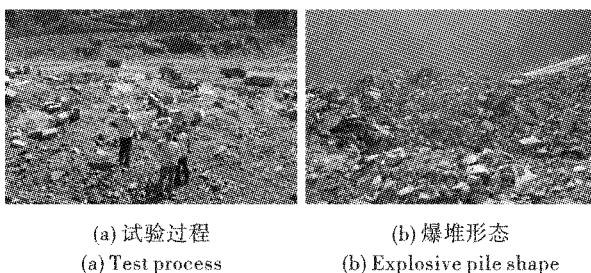


图3 现场试验操作与爆堆形态

Fig. 3 Field test operation and burst configuration

爆破后采用前文提到的筛分方法确定爆破块度

的分布特征,针对不同工况,在对比爆破级配分布的同时,也分析其是否满足两河口水电站堆石料的上下包络线要求。图4和图5给出了延迟时间为10ms的爆破级配分布图,图6和图7给出了所有工况的爆破块度分布对比。

从图6~图7中可以看出,孔间延迟时间对爆破块度具有明显的影响:对于两河口料场的试验结果而言,当孔间延迟时间在10ms、20ms与30ms时,爆破块度的级配曲线在包络线范围以内;对于瓦支沟料场而言,当孔间延迟时间在5ms、10ms与20ms时,爆破块度的级配曲线在包络线范围以内。这表明在其余爆破参数不变的条件下,通过优化孔间起爆延迟时间,将显著改善爆破效果。

另一方面,从图中看出,随着孔间延迟时间的增加,从0ms增加至50ms的过程中,爆破效果变化并不是呈固定的方向发展,总体可以分为两个阶段,

从 0 ms 到 20 ms,爆破效果往优化的方向发展,从 20 ms 到 50 ms,爆破效果则逐渐变差。

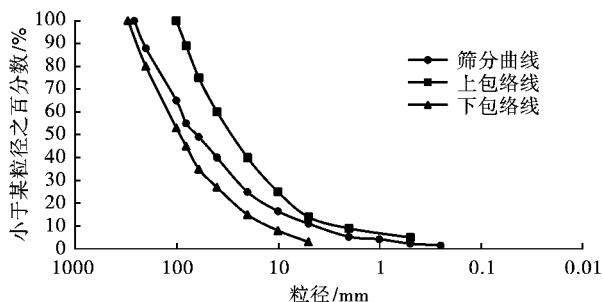


图4 两河口料场延时 10 ms 的筛分结果  
Fig. 4 Screening results of Lianghekou stockyard with 10 ms delay

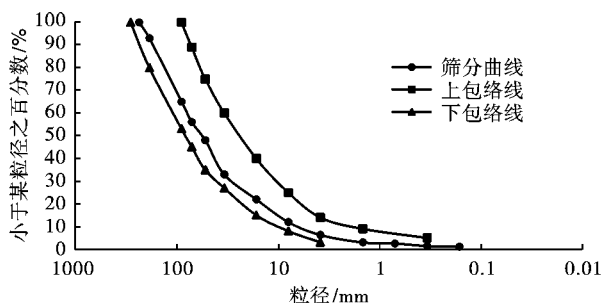


图5 瓦支沟料场延时 10 ms 的筛分结果  
Fig. 5 Screening results of Wazhigou stockyard with 10 ms delay

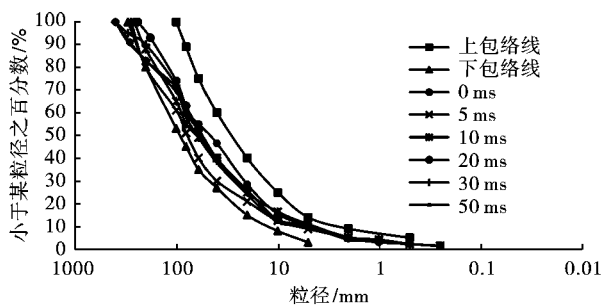


图6 两河口料场所有试验工况的筛分结果  
Fig. 6 Screening results of Lianghekou quarry under all test conditions

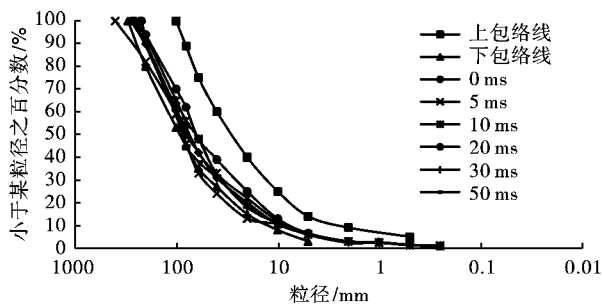


图7 瓦支沟料场所有试验工况的筛分结果  
Fig. 7 Screening results of Wazhigou quarry under all test conditions

从应力波传播的角度,出现以上现象可采用如下解释:在精确毫秒延时条件下,不同时段起爆的爆破孔产生的应力波在不同时间节点和空间位置发生叠加,根据波动理论的周期性,应力波叠加的加强与减弱点必然也具有波动和周期性的特点,以上试验现象充分反映了应力波的叠加特性在毫秒延时起爆条件下将是影响爆破效果的重要方面。以上是针对爆破试验中体现的总体规律的解释,下文将针对孔间延迟时间对爆破块度分布的影响进行深入分析。

### 3 延迟时间爆破级配的影响分析

#### 3.1 孔间延时与爆破级配的关系

由于本次试验中对每一工况的爆破块度级配进行了筛分确定,这为研究孔间延迟时间对爆破块度影响提供了便利条件。另一方面,堆石坝的石料开采有其特殊性,与矿山的均匀性块度要求不同,水工堆石坝石料开采要求具有不均匀的级配,其不同尺寸区间的级配均有严格要求,因此下文将分 0 ~ 10 mm、10 ~ 80 mm 以 80 mm 以上三个区间进行讨论。

##### (1) 10 mm 以下级配

图8给出了 10 mm 以下级配随孔间延迟时间的变化关系。

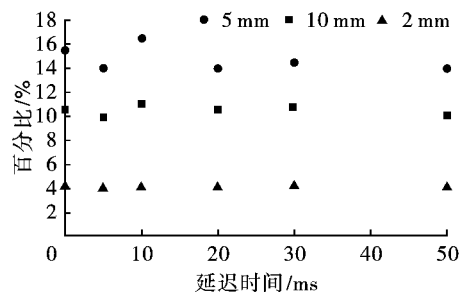


图8 10 mm 以下块度与孔间延时的关系  
Fig. 8 Relationship between block size below 10 mm and inter hole delay

从图8中可以看出,对于 10 mm 以下的级配,孔间延迟时间对变化对其所占百分比的影响不大。对于 10 mm 级配,不同延迟时间,误差在 8% 以内,这表明对于小粒径料(类似粉碎区),孔间延迟时间的影响并不明显。从爆破破碎机理的角度,这种现象应该是合乎情理的,爆破过程中,小粒径料或者粉碎区的产生是由于爆破冲击波的瞬间高压,此时的压力远高于岩体的动抗压强度。孔间延迟时间影响的是应力波的叠加,此时的应力波峰值已经快速衰减,不足以压碎岩石,因此决定 10 mm 以下块度所占比例的核心要素是爆破孔本身的装药结构、爆轰

压力以及岩体强度,与孔间延迟时间的关联不明显。

这一现象对水工级配料的开采爆破优化设计具有重要意义。由于P5(5 mm以下块度料)料通常在工程中有严格要求,在爆破设计中,提高小粒径料的主要手段应是调整爆破孔的装药结构以提高爆轰压力,孔间延时的影响并不明显。

### (2) 20~80 mm 级配

图9给出了20~80 mm级配区间范围的块度随孔间延迟时间的变化曲线。

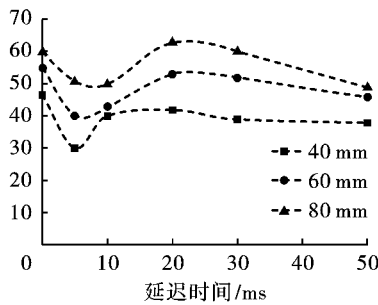


图9 20~80 mm级配与孔间延时的关系  
Fig. 9 Relationship between 20~80 mm grading and inter hole delay

从图9中可以看出,对于20~80 mm区间内的爆破块度分布,孔间延迟时间的影响是明显的。针对40 mm、60 mm以及80 mm等不同级配,其所占百分比与孔间延时的变化关系非常相似的,均随着孔间延迟时间的变化呈现波动的变化。在此次试验中,5 ms时,这些级配的百分比达到最小值,进而随着延迟时间的增加,百分比增大,在20 ms时达到一个波峰,然后又呈现下降的趋势。

上述现象论证了一个观点,即在精确毫秒延时条件下,不同时段起爆产生的应力波将产生叠加,明显影响了20~80 mm粒径岩体块度的生成。这些粒径的岩块所占比例的变化规律与应力波的叠加效果一样,呈现波峰与波谷交替出现的波动形状。在此次试验中,对应于两河口水电站的岩性,在 $4.5 \times 3.5$ 的孔间排距下,当延迟时间为5 ms时,40~80 mm粒径的块度最少。

### (3) 80 mm 以上级配

图10给出了80 mm以上粒径的块度随孔间延迟时间的变化规律。

从图10中可以看出,当粒径块度为100 mm以上时,不同粒径随延迟时间的变化规律有一定的相似性,但无明显的相关规律。这表明该区间的粒径块度的形成中孔间延迟时间起到的作用比重较小。已有的研究表明,对于这种大粒径块度的形成,岩体中自然的结构面切割起到主要作用,爆破产生的应力波在

该区域已经衰减至一定程度,无法切割岩体,因此,在这种情况下,孔间延迟时间并不能产生明显影响。

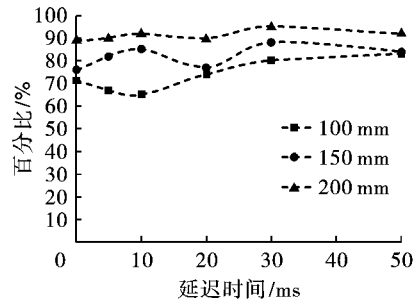


图10 80 mm以上级配与孔间延时的关系  
Fig. 10 Relationship between grading above 80 mm and delay time between holes

## 3.2 孔间延时对爆破效果的影响分析

### (1) 平均块度与孔间延时的关系

衡量一个爆破破碎程度的重要特征量是岩体的平均块度。图11给了此次试验中两个料场的平均块度与孔间延迟时间的对应关系。

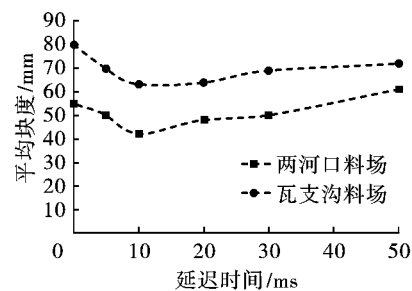


图11 平均块度与孔间延时的关系  
Fig. 11 Relationship between average block size and inter hole delay

从图11中可以看出,两个料场的这项指标体现了高度相似的规律。从变化趋势看,随着孔间延迟时间的增加,平均块度的尺寸先减小后增大,在延迟时间为10 ms时取得最小值,表明此时的爆破破碎程度最深。曲线的走势再次印证了应力波的叠加作用是岩体中形成了强弱不同的应力场,通过合理的设置孔间延时,可以显著增加岩体的破碎效果。因此,在此次试验的各项参数下,如果要使石料爆破的更细,则应当将孔间延迟时间设为10 ms。但需要指出的是,在水工堆石坝级配料的开采中,由于需要开采不均匀的石料,爆破破碎程度并不是核心的控制指标。

### (2) 误差率与孔间延时的关系

相比于平均块度的分布规律,误差率可能更适合反映水工堆石坝级配料的开采效果好坏。这里的误差率计算方法为先计算某一块度筛分的百分比与

其对应的上、下包络线平均值的差值,进而求差值与上、下包络线平均值的比值。图12和图13给出了此次试验中两个料场不同孔间延时条件下的误差率变化情况。

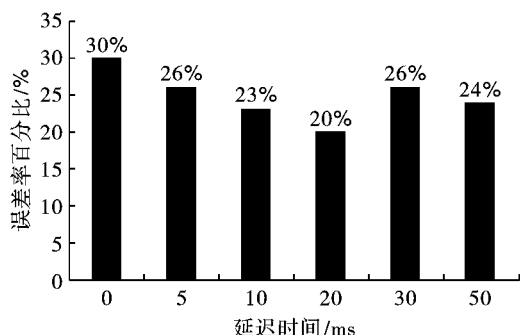


图12 两河口料场误差率与孔间延时的关系

Fig. 12 Relationship between error rate of Lianghekou stockyard and delay time between holes

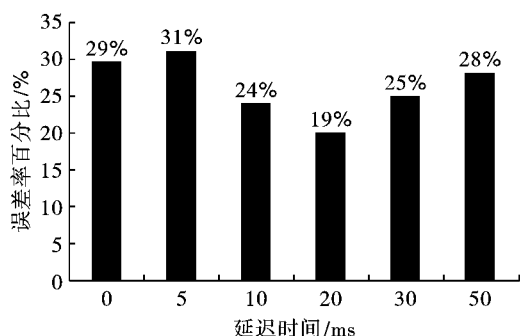


图13 瓦支沟料场误差率与孔间延时的关系

Fig. 13 Relationship between error rate of Wazhigou stockyard and delay time between holes

从图12~图13中可以看出,与平均块度分布的规律比较相似,两个料场中误差率随孔间延时的变化规律具有较强的一致性。从变化趋势看,随着孔间延迟时间的增加,误差率先减小后增大,在延迟时间为20ms时取得最小值,表明此时的爆破石料的级配分布最接近于上、下包络线的中线。但从试验结果同样可看出,常规的矿山中关注的爆破破碎程度与水工堆石坝开采的效果具有一定区别。当孔间延迟时间为10ms时,平均块度最小,岩体的破碎程度最强,但并不意味这是最优的级配;当延迟时间为20ms时,此时岩体的破碎程度可能并不是最强,但合理的破碎使爆破石料形成了最合适的级配。对于水工级配料开采而言,在此次试验的各项参数下,最合理的延迟时间为20ms。

#### 4 结语

本文通过在两河口水电站开展不同延迟时间条

件下的爆破试验,确定了延迟时间对爆破块度空间分布的影响特性,进而研究了水工堆石坝石料开采中延迟时间对级配分布的影响规律,得到的结论如下:

(1)总体而言,孔间延迟时间对爆破级配分布有明显影响,通过合理的设置孔间延时,可以显著改善爆破石料的级配,以满足堆石坝填筑的要求。

(2)孔间延迟时间对爆破块度的影响具有明显的分区特性,对于10mm以下的粒径,孔间延时的影响并不明显;对于20~80mm粒径,孔间延时的影响最为明显,其中应力波的叠加可能是主要原因;当粒径块度超过100mm,孔间延时的影响逐渐变弱,此时岩体结构面的原始切割可能其主要作用。

(3)此次试验中,从加强岩体破碎的角度,最优的孔间延迟时间为10ms;如果以误差率反映开采效果的好坏,最优的孔间延迟时间为20ms。试验结果充分体现了矿山开采与水工堆石坝级配料开采的差异性,水工级配料开采中,岩体的破碎程度可能并不是最强,其追求的合理利用爆破能量破碎岩石使之形成特定的非均匀级配分布。

需要说明的是此次试验的工况有限,得到试验成果规律性有限,接下来将通过开展更多工况的试验或数值仿真,对本文的论点进一步论证和改进。

#### 参考文献 (References)

- [1] 冯叔瑜. 爆破工程[M]. 北京:铁道出版社,1980.
- [2] 李夕兵,古德生. 岩石在不同加载波条件下能量耗散的理论探讨[J]. 爆炸与冲击,1994,14(2):129-139.
- [2] LI Xi-bing, GU De-sheng. Theoretical discussion on energy dissipation of rock under different load in wave conditions[J]. Explosion and Shock, 1994, 14(2): 129-139. (in Chinese)
- [3] BRIKMAN J R. Fracture mechanism of separating shock wave and gas expansion[C]//Proceedings of the second International Conference on rock breaking by blasting, 1990:1-8.
- [4] 吴新霞,彭朝晖,张正宇. 面板堆石坝级配料开采爆破块度预报模型及爆破设计参数优化研究[J]. 工程爆破,1996(4):95-100.
- [4] WU Xin-xia, PENG Zhao-hui, ZHANG Zheng-yu. Prediction model of blasting fragmentation and optimization of blasting design parameters for concrete face rockfill dam grade batching mining [J]. Engineering Blasting, 1996(4):95-100. (in Chinese)
- [5] 李战军,郑炳旭. 台阶爆破效果预测方法及其应用[J]. 有色金属(矿山部分),2009,61(1):50-55.
- [5] LI Zhan-jun, ZHENG Bing-xu. Prediction method of bench blasting effect and its application[J]. Nonferrous Metals (Mining), 2009, 61(1): 50-55. (in Chinese)
- [6] 赵根. 台阶爆破精确起爆振动特性研究[J]. 爆破,

- 2010,27(2):14-17,35.
- [6] ZHAO Gen. Study on vibration characteristics of precise initiation in bench blasting [J]. *Blasting*, 2010, 27(2): 14-17,35. (in Chinese)
- [7] 钟冬望,何理,操鹏,等. 爆破振动持时分析及微差爆破延期时间优选[J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(5): 703-7.
- [7] ZHONG Dong-wang, HE Li, CAO Peng, et al. Duration analysis of blasting vibration and optimization of delay time of millisecond blasting [J]. *Explosion and Impact*, 2016, 36(5):703-709. (in Chinese)
- [8] 施建俊,汪旭光,魏华,等. 逐孔起爆技术及其应用[J]. *黄金*, 2006(4):25-28.
- [8] SHI Jian-jun, WANG Xu-guang, WEI Hua, et al. Hole by hole initiation technology and its application [J]. *Huangjin*, 2006(4):25-28. (in Chinese)
- [9] KATSABANIS P D, OMIDI O. The effect of delay time on fragmentation distribution through small-and medium-scale testing and analysis [C] // 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Sydney: [SN], 2015:715-720.
- [10] OUCHTERLONY F, NYBERG U, OLSSON M, et al. Effects of specific charge and electronic delay detonators on fragmentation in an aggregate quarry: building fragmentation model design curves [C] // 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Sydney: [SN], 2015:727-740.
- [11] P SCHIMEK, OUCHTERLONY F, MOSER P. Influence of blast-hole delay times on fragmentation as well as characteristics of and blast damage behind a remaining bench face through model-scale blasting [C] // 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Sydney: [SN], 2015:257-266.
- [12] 李迎,池恩安,赵明生,等. 利用正交法探究三种微差爆破技术与块度的影响[J]. *矿业研究与开发*, 2015, 35(8):27-30.
- [12] LI Ying, CHI En-an, ZHAO Ming-sheng, et al. Using orthogonal method to explore the influence of three kinds of millisecond blasting technology and fragmentation [J]. *Mining Research and Development*, 2015, 35(8):27-30. (in Chinese)
- [13] 张志呈. 爆破基础理论与设计施工技术 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1994:153-169.
- [14] A H 哈努卡耶夫. 矿岩爆破物理过程 [M]. 刘殿中, 译. 北京冶金工业出版社, 1980:156-160.

英文编辑:陈东方

(上接第51页)

- [12] 林琛,徐建军,杨晋伟,等. 基于HJC模型的钢筋混凝土侵彻仿真失效准则与参数[J]. *探测与控制学报*, 2017, 39(2):100-105.
- [12] LIN Chen, XU Jian-jun, YANG Jin-wei, et al. Failure criteria and parameters of reinforced concrete penetration simulation based on HJC model [J]. *Journal of Detection And Control*, 2017, 39(2):100-105. (in Chinese)
- [13] SHI Yan-chao, LI Zhong-xian, HAO Hong. Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(11):1213-1227.
- [14] 张文华,张云升,陈振宇. 超高性能混凝土抗缩比钻地弹侵彻试验及数值仿真[J]. *工程力学*, 2018, 35(7):167-175,186.
- [14] ZHANG Wen-hua, ZHANG Yun-sheng, CHEN Zhen-yu. Penetration test and numerical simulation of high performance concrete anti shrinkage ground penetrating projectile [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(7):167-175,186. (in Chinese)
- [15] 任根茂,吴昊,方秦,等. 普通混凝土HJC本构模型参数确定[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(18):9-16.
- [15] REN Gen-mao, WU Hao, FANG Qin, et al. Parameter determination of HJC constitutive model for ordinary concrete [J]. *Vibration and Impact*, 2016, 35(18):9-16. (in Chinese)
- [16] 段晓瑜,崔庆忠,郭学永,等. 炸药在空气中爆炸冲击波的地面反射超压试验研究[J]. *兵工学报*, 2016, 37(12):2277-2283.
- [16] DUAN Xiao-yu, CUI Qing-zhong, GUO Xue-yong, et al. Experimental study on ground reflection overpressure of explosive shock wave in air [J]. *Acta Ordnance Engineering Sinica*, 2016, 37(12):2277-2283. (in Chinese)
- [17] 蔡路军,刘令,陈少杰,等. 钢纤维高强混凝土板抗爆细观数值模拟及试验研究[J]. *爆破*, 2020, 37(4):145-154.
- [17] CAI Lu-jun, LIU Ling, CHEN Shao-jie, et al. Meso numerical simulation and experimental study on blast resistance of steel fiber reinforced high strength concrete slabs [J]. *Blasting*, 2020, 37(4):145-154. (in Chinese)
- [18] 孙远翔,田俊宏,张之凡,等. 含铝炸药近场水下爆炸冲击波的试验及数值模拟[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(14):171-178,193.
- [18] SUN Yuan-xiang, TIAN Jun-hong, ZHANG Zhi-fan, et al. Experiment and numerical simulation of shock wave of near-field underwater explosion of aluminized explosive [J]. *Vibration and Shock*, 2020, 39(14):171-178, 193. (in Chinese)

英文编辑:黄刚