

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.01.027

数码电子雷管在泄洪排沙洞爆破中的 减振特性研究*

王晨光^{1,2}, 杜新国², 王可用¹, 孙永¹, 胡忠经³, 王令玉¹, 孙迪¹

(1. 山东科技大学 资源学院, 泰安 271000; 2. 中铁十四局集团 第二工程有限公司, 泰安 271000;
3. 山东科技大学 安全学院, 青岛 266510)

摘要: 为了降低爆破振动强度、控制爆破振动危害, 根据爆破形成振动波的相互干扰叠加, 在施工场地进行爆破振动试验。采用数码电子雷管, 选用普通导爆管雷管作为对照组, 在距掌子面 15 m、30 m、45 m、60 m 处布置监测点, 进行了四组不同方案的振动速度变化规律的研究。利用数码电子雷管的精确延时特性, 通过前三个组合的现场试验研究, 取得泄洪排沙洞使用数码电子雷管洞挖爆破相对最佳的孔间、排间延时间隔时间组合为第二组合的成果: 掏槽孔从上到下对称两孔同时起爆, 上下孔孔间延时 8 ms; 其余主爆孔对称安排 (从隧洞断面中间向外侧) 逐孔从上到下 (顶拱从左到右) 起爆, 孔间延时 16 ms; 所有排间延时间隔均为 100 ms; 边顶拱光爆孔和底板光爆孔间隔 100 ms, 并实现了波峰错相叠加的减振效果。试验结果表明: 爆破参数是降低爆破振动强度的关键; 在距爆源距离相同的情况下, 采用数码电子雷管的质点振动速度峰值明显小于普通雷管, 采用数码雷管的主频高于采用普通雷管; 数码雷管可大幅度降低爆破振动强度、提高爆破振动的主频。该工程技术在河南洛宁抽水蓄能电站泄洪排沙洞爆破施工中取得了显著的减振效果。

关键词: 数码电子雷管; 普通导爆管雷管; 振动速度; 减振效果

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)01-0205-08

Blasting Vibration Damping Characteristics of Digital Electronic Detonators in Flood Drainage Channel

WANG Chen-guang^{1,2}, DU Xin-guo², WANG Ke-yong¹, SUN Yong¹,
HU Zhong-jing³, WANG Ling-yu¹, SUN Di¹

(1. School of Resources, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271000, China;
2. China Railway 14th Bureau Group Second Engineering Co., Ltd., Tai'an, 271000, China;
3. School of Security, Shandong University of Science and Technology, Qing'dao 266510, China)

Abstract: Field tests of blast vibrations were conducted based on the concept of interference between blast-induced seismic waves for the purpose of reducing blasting vibration intensity and controlling blasting vibration hazards. Three different blast schemes were realized by using electronic detonators, and nonel detonators were used for the fourth blast scheme as comparison. Monitoring points were arranged at the locations of 15 m, 30 m, 45 m and 60 m away from the working face. By studying variation law of the blasting vibration velocity, the optimal delay intervals between holes and rows were selected as those of the third scheme based on the characteristics of accurate timing of electronic detonators. In the third scheme, the cut holes were initiated every two holes from top to bottom with an

收稿日期: 2022-10-17

作者简介: 王晨光 (1977-), 男, 高级工程师、学士学位, 主要从事爆炸效应及其防护工程、岩土工程施工等方面的工作, (E-mail) 348402217@qq.com。

通讯作者: 王可用 (1973-), 男, 教授、学士学位, 主要从事教学和岩土工程施工科学研究工作, (E-mail) skd996607@sdust.edu.cn。

基金项目: 中铁十四局集团 2021 年度科技开发项目 (913700001630559891202112); 国家自然科学基金面上项目 (52278359)

inter-hole delay of 8 ms. The slashing holes were arranged symmetrically along the center of the working face, and initiated hole by hole with an inter-hole delay of 16 ms and inter-row delay of 100 ms. In addition, the roof holes and bottom holes were initiated with a delay interval of 100ms. This scheme was used to obtain a vibration reduction effect by wave destruction interference. The test results show that the blast parameters are the key to reduce the blast vibration intensity. With the same distance to the blast source, the peak particle velocity when electronic detonators are used is much smaller than that when nonel detonators are used. At the same time, the dominant frequency of electronic detonators is higher than that of the nonel detonators. This engineering technology has achieved significant vibration reduction effect in the blasting construction of the flood discharge tunnel of Luoning pumped-storage power station in Henan Province.

Key words: digital electronic detonator; nonel detonator; vibration velocity; vibration reduction effect

对于隧洞爆破而言,降低爆破振动强度非常重要,目前在水电水利工程的大部分地下工程开挖施工中,均是利用炸药爆炸产生的化学能对隧洞岩石进行爆破开挖。但在如此复杂环境下进行大范围隧洞爆破时,除了必须满足该工程的设计要求外,同时还必须保证其周围的人和隧洞本身及相关设施的安全,难度较大。

数码电子雷管延期精度高、安全可靠、可检测性好、可追溯性强,起爆性能良好,在爆破工程中得到广泛应用^[1,2];孙鹏昌等针对赤湾山高边坡爆破振动响应问题^[3],开展了爆破振动实测数据分析和动力有限元数值模拟,分析了单薄山体岩质高边坡的爆破振动响应特征;郭鹏杰等通过对比数码电子雷管与电塑料导爆管雷管在爆破工程中的实际应用效果^[4],在降低大块率、降低爆破振动与降低炸药单耗等方面取得了显著效果;林飞为了控制爆破振动强度^[5],降低爆破振动对建筑物的危害,基于数码电子雷管对爆破网路孔、排间采用四组)的微差时间进行控制爆破对比试验,得出其中一组的微差时间达到良好降振效果;丁伟捷等针对爆破质点峰值振速预测模型研究得出^[6],监测点距离与质点峰值振速为负相关关系,总药量、最小排距、平均装药高度与最大孔距则与质点峰值振速呈正相关关系;何理等设计开展毫秒延时爆破试验^[7],建立群孔齐发爆破振速的计算模型,研究并构建炮孔数目对齐发爆破等效药量影响及其取值方法,并基于单孔爆破回归分析结果,提出修正的质点峰值振速与比例距离关系公式;任登富等利用数码电子雷管起爆精准授时特点^[8],基于错相减振原理优化各炮孔之间的微差时间,控制孔间振动波主振相错开约半个周期,实现降低爆破振速的目的;刘文胜等以国家重点推广数码雷管为契机^[9],在和尚桥铁矿开展了不同高精度延时的现场爆破试验,对比分析了延时间隔对爆破振动的影响规律,并分析了爆破块度分布特征;

朱明等以青岛地铁某线施工为背景^[10],采用多段爆破的爆破方式,设置多个监测点记录爆破振速,对比分析不同爆破振速预测模型效果和适用性,并在此基础上进行模型优化;司小昆等为进一步分析隧道爆破对既有村庄带来的振动影响^[11],引入反映高程的影响因子,通过量纲分析的方法建立反映高程影响的质点峰值振动速度的预测模型;刘翔宇等研究电子雷管延期误差对多孔延时爆破叠加振动的影响^[12],得出叠加最大振速随电子雷管延期精度变化大致符合线性增长的规律。

上述研究主要是在基于普通导爆管雷管情形下,设立三组不同电子数码雷管试验进行研究,利用数码电子雷管的精确延时特性,隧洞开挖爆破减振效果做出对比。对于减振效果,数码电子雷管优势明显,效果较好。数码电子雷管已在河南洛宁抽水蓄能电站的开挖爆破施工中成功地运用,其显著降低爆破振动效果的优势已得到体现。

1 工程概况

河南洛宁抽水蓄能电站位于河南省洛宁县涧口乡境内。泄洪排沙洞布置在电站下游水库内,设置在库尾拦沙坝上游河道右岸山体中,由进水口、隧洞段和出水口构成,进水口底板高程 655.00 m,爆破试验段实际开挖断面为 8.76 m × 10.675 m(宽 × 高),其中直边墙高 7.998 m,顶拱高 2.677 m,顶拱半径 4.921 m。洞身长度 1575.00 m,隧洞底板两级斜坡,坡度分别为 12.5%、8%。该隧洞穿越的地层岩性为燕山晚期斑状花岗岩,洞室围岩质量以 II ~ III 类为主,局部有少量 IV 类或 V 类围岩。

电站下水库距洛宁县城约 17 km,洛宁县有高速公路通往洛阳市和郑州市,直线距离分别为 80 km 和 201 km。为减少泄洪排沙洞爆破(图 1)的工作量和时间,又不影响泄洪排洞的正常爆破开挖施工,需要针对工程段进行控制爆破。

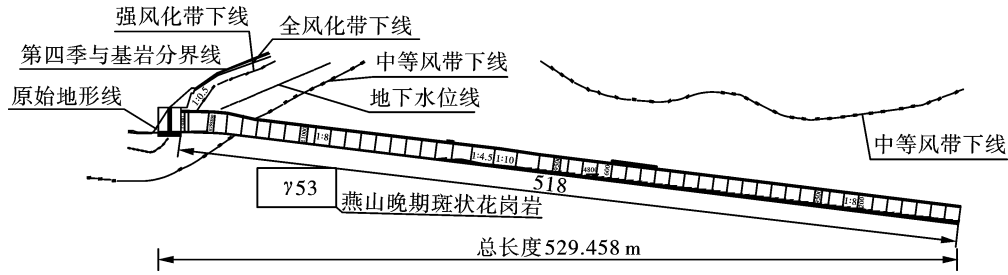


图 1 泄洪排沙洞现场位置图(单位:m)

Fig. 1 Site location map of the flood discharge tunnel(unit:m)

2 控制试验方案

2.1 试验钻爆参数

(1)第一组合至第三组合的钻爆参数:

隧洞采用全断面开挖,光面爆破,楔型掏槽。钻孔类型为掏槽孔、主爆孔和光爆孔。所述光爆孔为间隔不耦合装药,导爆索引爆,剩余孔采用连续装药,数码电子雷管引爆。根据工程需要设计了光爆药卷尺寸和起爆网路形式,炸药选用 2#岩石乳化炸药,直径为 32 mm;钻机采用常规的手风钻,钻头直径为 42 mm;总钻孔数为 170 个;总装药孔数为 168 个(边墙与顶拱交汇处钻空孔 2 个);总装药量:283.2 kg;爆破总方量 302.75 m³;爆破单耗:0.94 kg/m³;周边孔线装药密度为:边顶拱 260 g/m,底板孔 350 g/m;掏槽孔单孔药量为 3.0 kg、主爆孔单孔药量 1.2~2.7 kg 不等、周边孔(边、顶拱)单孔

药量 0.9 kg、周边孔(底板孔)单孔药量 1.35 kg;爆破最大单响药量为 6.0 kg(为掏槽孔)。

(2)第四组合的钻爆参数:

使用普通导爆管雷管引爆。导爆管雷管段位为 MS1~MS15 的 8 个奇数段雷管,爆破最大单响药量为 49.7 kg(为主爆孔 MS9)。其余的爆破孔网参数与第 1 组合~第 3 组合完全一样。

2.2 试验方案设置

为减少爆破试验的工作量和时间,又不影响泄洪排沙洞的正常爆破开挖施工,在爆破作业中使用数码电子雷管,完成不同爆破参数下的爆破设计。在洞挖形状及面积、围岩特性及其它爆破参数不变的前提下,单独设置爆破孔间和排间的延时间隔,在保证掏槽和光爆效果的前提下,研究其在不同延迟时间间隔上的减振效果。具体试验组合如表 1 所示。

表 1 数码电子雷管爆破参数

Table 1 Blasting parameters with digital electronic detonator

	掏槽孔爆破孔 间延时/ms	主爆孔爆破孔 间延时/ms	排间延时 间隔/ms	边顶拱、底板 光爆孔间隔/ms	边墙及顶拱光爆孔 同时起爆孔数	底板光爆孔 同时起爆孔数	段间延时/ ms
第一组	4	8	50	50	6 孔一段	4 孔一段	8
第二组	8	16	100	100	6 孔一段	6 孔一段	16
第三组	12	24	150	150	6 孔一段	6 孔一段	24

爆破试验中,掏槽孔从上到下对称两孔同时起爆,其余主爆孔对称布设(从隧洞断面中间向外侧)逐孔从上到下(图 2)逐孔起爆,上下孔设有爆破孔间延时,且设有排间延时间隔及边顶拱、底板光爆孔延时间隔。考虑到光爆孔对爆破质量的要求和光爆孔采用间隔装药,导爆索起爆的实际情况,且不突破掏槽孔形成的爆破最大单响药量,光爆孔采用分段起爆并设有段间延时。

第四组合使用普通导爆管雷管,按常规施工的爆破设计进行。目的是通过对比得出数码电子雷管与导爆管雷管的减振量化成果和求出该隧洞爆破开

挖质点振动速度公式中的 K 、 α 值,进而得出质点振动速度公式,用于指导泄洪排沙洞爆破设计、施工。

将质点振动速度 V 、最大单响药量 Q 、爆心距 R 分别代入计算,进行回归分析计算,即可得到 K 、 α 值。

系数 K 、指数 α 也可按规范要求选取,爆区不同岩性的 K 、 α 值,如表 2 所示。

3 爆破振动监测方案

通过河南洛宁抽水蓄能电站泄洪排沙洞爆破开挖中,运用数码电子雷管的爆破试验,选取数码电子雷管孔间、排间不同的时间延时间隔,利用测振仪测

出距离隧洞开挖掌子面不同距离的质点振动速度值,进行监测:

(1)该隧洞爆破时减振效果相对最优的孔间和排间的延时。

(2)对数码电子雷管减振效果与国产导爆管雷管的试验结果作比较和分析,获得了两者的减振效果。

(3)运用距离爆破掌子面不同距离的多次质点振动速度的实测成果,通过最小二乘法得出该隧洞爆破开挖质点振动速度公式中的 K 、 α 值,代入质点振动速度公式。

$$V = K(\sqrt[3]{Q}/R)^\alpha$$

根据试验方案布置及各孔间位置特点,试验在不同距离爆源处由近至远依次布置爆破振动监测点,各试验方案如表3所示。

表2 爆区不同岩性的 K 、 α 值
Table 2 K and α values of different lithologies in the blast area

岩石	K	α
坚硬岩石	50 ~ 150	1.3 ~ 1.5
中硬岩石	150 ~ 250	1.5 ~ 1.8
软弱岩石	250 ~ 350	1.8 ~ 2.0

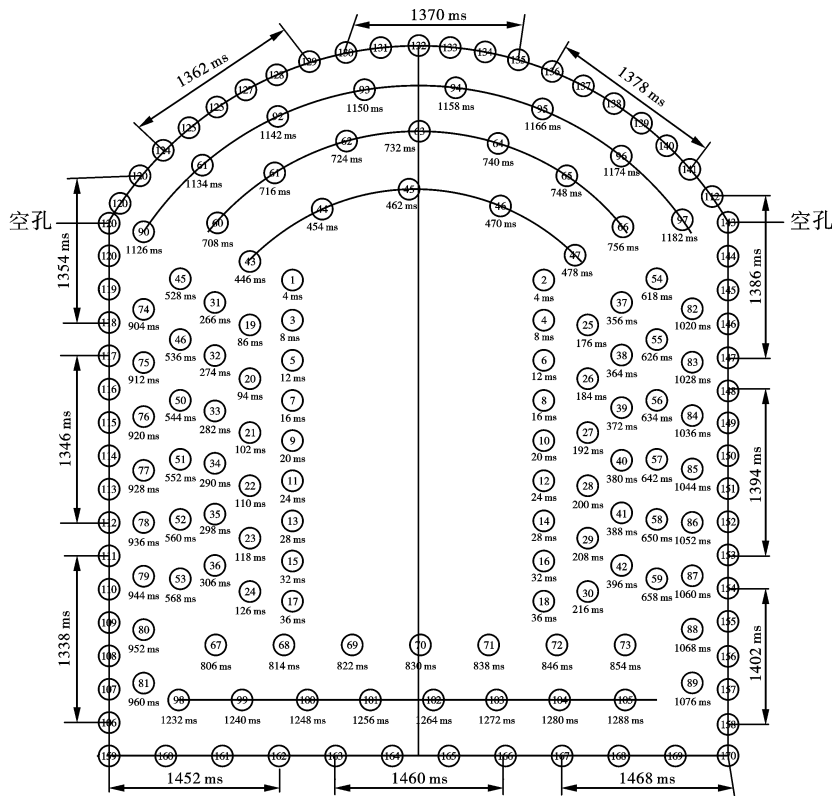


图2 巷道掘进断面炮孔布置图

Fig. 2 Layout of blast holes in the tunnel excavation section

表3 爆破试验方案汇总

Table 3 Summary of the blast test schemes

组合编号	爆源间距/m	雷管数/个	装药孔数/个	上下孔间延时/ms	总药量/kg	爆破量/ m^3
一	15,30,45	-	168	4	283.2	302.75
二	30,45,60	-	168	8	283.2	302.75
三	30,45,60	-	168	12	283.2	302.75
四	15,30,45	8	168	-	283.2	302.75

4 试验结果及分析

提取爆破振动监测仪器的监测数据,分析并绘出爆破振动速度与距离的关系曲线。

4.1 试验结果

4.1.1 第一组合

在泄洪排沙洞底板基岩上布置3个监测点。各点距爆破掌子面距离为15 m、30 m、45 m。测得的

爆破振动波形,见图 3,根据距爆破掌子面 15 m 测点的振动波形分析,在前 20 ms 时段的振动波产生了波峰与波谷的干扰叠加,其振动峰值大于单孔爆破振动峰值;根据距爆破掌子面 30 m 测点的振动波

形分析,在前 10 ms 时段的振动峰值远远小于单孔爆破振动峰值;根据距爆破掌子面 45 m 测点的振动波形分析,在前 15 ms 时段的振动波产生了波峰与波谷的干扰叠加。

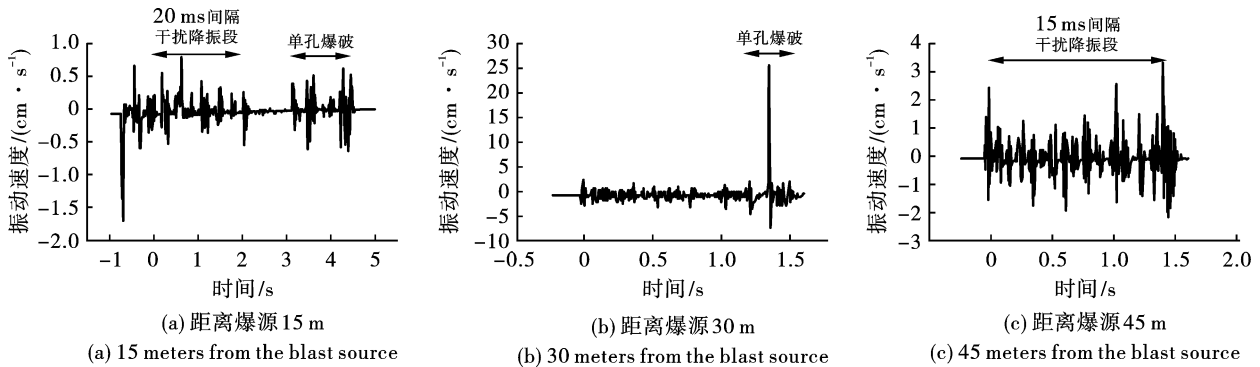


图 3 第一试验监测原始波形曲线图

Fig. 3 The original waveform monitored in the first test

4.1.2 第二组合

在泄洪排沙洞底板基岩上布置 3 个监测点。各点距爆破掌子面距离为 30 m、45 m、60 m。测得的爆破振动波形,见图 4,根据距爆破掌子面 30 m 测点的振动波形分析,在前 20 ms 时段的振动波产生了波峰与波谷的干扰叠加,其振动峰值大于单孔

爆破振动峰值;根据距爆破掌子面 45 m 测点的振动波形分析,在前 20 ms 时段的振动峰值与单孔爆破振动峰值相等;根据距爆破掌子面 60 m 测点的振动波形分析,在前 20 ms 时段的振动波产生了波峰与波谷的干扰叠加,其振动峰值大于单孔

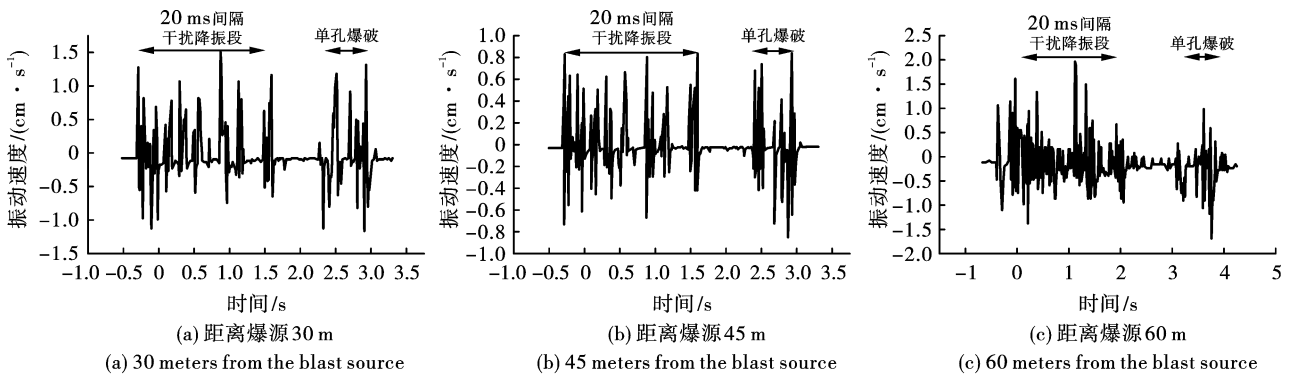


图 4 第二试验监测原始波形曲线图

Fig. 4 The original waveform monitored in the second test

4.1.3 第三组合

在泄洪排沙洞底板基岩上布置 3 个监测点。各点距爆破掌子面距离为 30 m、45 m、60 m。测得的爆破振动波形,见图 5,根据距爆破掌子面 30 m 测点的振动波形分析,在前 25 ms 时段的振动波产生了波峰与波谷的干扰叠加,其振动峰值小于单孔爆破振动峰值;根据距爆破掌子面 45 m 测点的振动波形分析,在前 25 ms 时段的振动峰值大于单孔爆破振动峰值;根据距爆破掌子面 60 m 测点的振动波形分析,在前 15 ms 时段的振动波产生了波峰与波谷的干扰叠加,其振动峰值略小于单孔爆破振动峰值。

4.1.4 第四组合

在泄洪排沙洞底板基岩上布置 3 个监测点。各点距爆破掌子面距离为 15 m、30 m、45 m。测得的爆破振动波形,见图 6,第四组使用的是普通导爆管雷管,与前三组有明显区别,波峰和波谷的扰动叠加不显著,所以利用电子雷管精确延时的功能,群炮孔爆破振动波率先在较短距离实现波峰与波谷的扰动叠加,对于减小爆破振动具有非常重要的作用。

4.1.5 试验监测结果

将各组合的试验监测结果汇总于表 4。

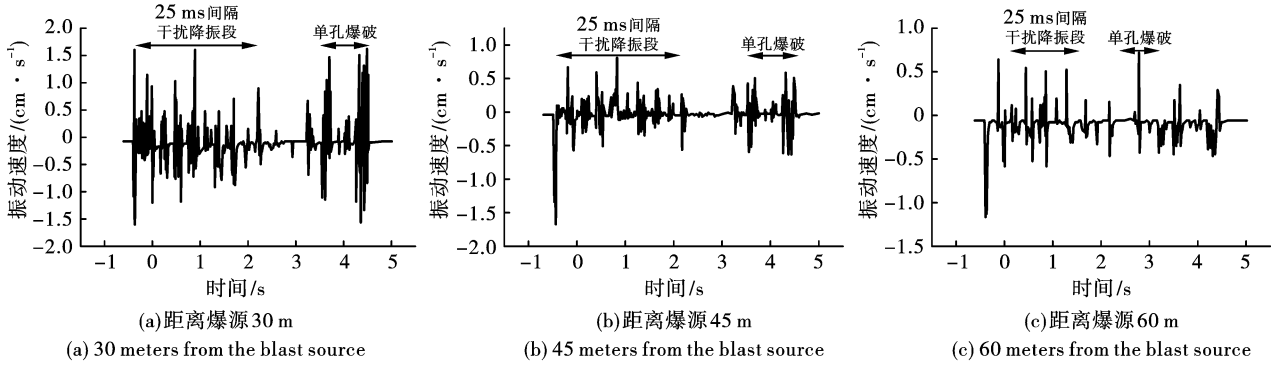


图5 第三试验监测原始波形曲线图

Fig. 5 The original waveform monitored in the third test

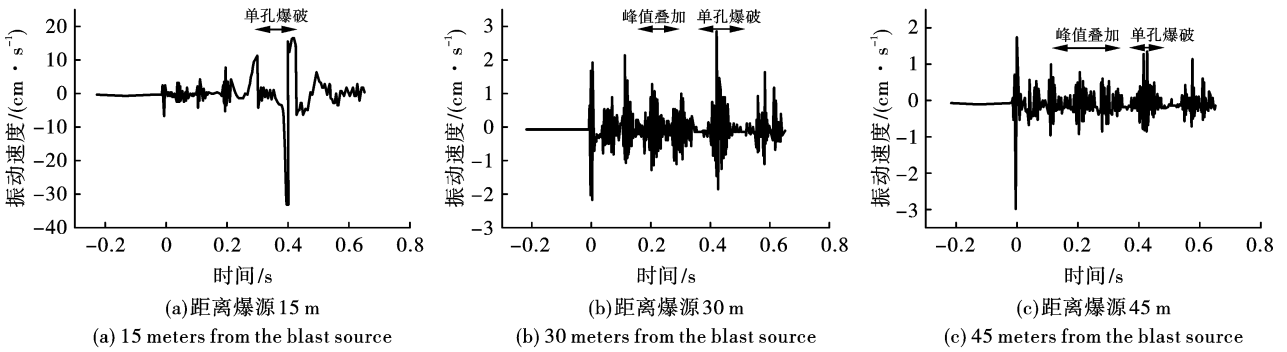


图6 第四试验监测原始波形曲线图

Fig. 6 The original waveform monitored in the fourth test

表4 各组合试验监测结果汇总表

Table 4 The monitored results of each scheme

组合	距离爆源/m	最大振速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	主振频率/ Hz	监测方向	延时时间/ms	备注
1	15	15.510	913.391	Z	掏槽孔间 4 ms	使用数码电子雷管
	30	5.330	8.240	X	主爆孔间及光爆孔间 8 ms	
	45	3.433	224.915	X	排间 50 ms	
2	30	1.887	206.299	X	掏槽孔间 8 ms	使用数码电子雷管
	45	1.328	198.975	Y	主爆孔间及光爆孔间 16 ms	
	60	2.837	260.315	Y	排间 100 ms	
3	30	3.517	261.230	X	掏槽孔间 12 ms	使用数码电子雷管
	45	2.358	166.931	X	主爆孔间及光爆孔间 24 ms	
	60	1.937	166.931	X	排间 150 ms	
4	15	11.249	10.986	X	普通导爆管雷管 ms1 ~ ms15 奇数段位	使用普通导爆管雷管
	30	5.126	131.836	X		
	45	3.410	300.293	X		

4.2 试验监测结果分析

从试验监测结果可以看出:数码电子雷管爆破形成的振动波的相互干扰叠加,对爆破质点振动速度的影响较为明显。借助数码电子雷管延时

间隔小,延时误差小,及其它优良的性能,设计孔、排间不同的延时时间,形成不同振动波的相互干扰叠加,可以找出爆破质点振动速度相对小的延时时间参数。

表5 不同爆源处质点速度值

Table 5 Particle velocity at different distances from the blast source

爆源距离/m	第一组合质点振速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	第二组合质点振速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	第三组合质点振速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	第四组合质点振速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
30	5.330	1.887	3.517	5.126
45	3.433	1.328	2.358	3.410
60	-	2.837	1.937	-

从图3中(a)、(b)、(c)原始振动波形曲线可以看出,质点振动速度最大值均远离36 ms。据此判断该最大值的形成是爆破形成的振动波的相互干扰叠加的结果。

由图3、图6可见,在距爆源距离相同的情况下,采用数码电子雷管的质点振动速度峰值明显小于普通雷管。

由表4可得出,在距爆源距离相同的情况下,采用数码雷管的主频高于采用普通雷管。

由表5可得出,在离爆源30 m处,监测出第2组合质点振动速度最小;在离爆源45 m处,监测出第2组合质点振动速度还是最小;在离爆源60 m处,监测出第2组合质点振动速度比第3组合大。

爆破采用3.0 kg(掏槽孔)和1.2~2.7 kg(主爆孔)单孔药量、8 ms(掏槽孔爆破)和16 ms(主爆孔爆破)孔间延时、100 ms排间延时间隔、100 ms边顶拱光爆孔和底板光爆孔间隔,为后续逐孔起爆创造了良好临空面,减震效果较好。

5 结论

在泄洪排沙洞同步采用数码电子雷管与普通导爆管雷管进行爆破,对两者的减振效果进行对比分析,得出如下结论和建议:

(1)采用数码电子雷管的减振效果,受地质条件和人文条件、距爆源距离、掏槽孔数量、单孔装药量、孔间延时等多个因素的影响,当条件一定时,爆破参数是影响爆破振动强度的关键所在。

(2)在隧洞爆破中采用三种数码电子雷管进行爆破,研究发现,距离爆炸源较近的区域,振动速度衰减更加明显,距离爆炸源越远,所有监测点的振动速度减小的幅度越小。

(3)通过数据对比发现,高精度的数码雷管可大幅度降低爆破振动强度、提高爆破振动的主频,也可将其做为本工程其它相似的隧洞开挖爆破设计的参考。

(4)由对照试验得出,第2组合作为泄洪排沙洞爆破开挖数码电子雷管爆破网络孔间及排间相对

最佳延期间隔时间,该组合的延时时间参数也可作为类似隧洞开挖爆破设计的参考。

参考文献 (References)

- [1] 刘翔宇,龚敏,吴昊骏,等.多因素耦合影响下隧道电子雷管爆破参数的计算与实践[J].振动与冲击,2021,40(5):24-32.
- [1] LIU Xiang-yu,GONG Min,WU Hao-jun,et al. Calculation and practice of tunnel electronic detonator blasting parameters under the influence of multi-factor coupling[J]. Vibration and Shock,2021,40(5):24-32. (in Chinese)
- [2] 程贵海,王毅,覃翔.数码电子雷管在爆破工程中的应用与展望[J].化工矿物与加工,2020,49(7):19-22.
- [2] CHENG Gui-hai,WANG Yi,QIN Xiang. Application and prospect of digital electronic detonator in blasting engineering[J]. Chemical Minerals and Processing,2020,49(7):19-22. (in Chinese)
- [3] 孙鹏昌,卢文波,雷振,等.单薄山体岩质高边坡爆破振动响应分析及安全控制[J].岩土工程学报,2021,43(5):877-885.
- [3] SUN Peng-chang,LU Wen-bo,LEI Zhen,et al. Analysis of blasting vibration response and safety control of single thin mountain rocky high side slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(5):877-885. (in Chinese)
- [4] 郭鹏杰.数码电子雷管在峨口铁矿爆破中的应用[J].爆破,2021,38(4):129-132.
- [4] GUO Peng-jie. Application of digital electronic detonator in blasting of Ekou iron mine[J]. Blasting,2021,38(4):129-132. (in Chinese)
- [5] 林飞.复杂环境下爆破降振的微差时间优选[J].金属矿山,2021(4):59-63.
- [5] LIN Fei. Preferred micro-difference time for blasting vibration reduction in complex environment[J]. Metal Mining,2021(4):59-63. (in Chinese)
- [6] 丁捷捷,刘殿书.露天矿数码电子雷管逐孔起爆条件下质点峰值振速预测[J/OL].地球科学:1-14. [2022-07-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220425.1425.008.html>.
- [6] DING Wei-jie,LIU Dian-shu. Prediction of particle peak

- vibration velocity under the condition of hole-by-hole initiation of digital electronic detonator in open pit mine [J/OL]. *Earth Science*: 1-14. [2022-07-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220425.1425.008.html>. (in Chinese)
- [7] 何理, 杨仁树, 钟东望, 等. 毫秒延时爆破等效单响药量计算及振速预测[J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(9): 132-144.
- [7] HE Li, YANG Ren-shu, ZHONG Dong-wang, et al. Calculation of equivalent single-ring charge and prediction of vibrational velocity for millisecond delayed blasting[J]. *Explosion and Impact*, 2021, 41(9): 132-144. (in Chinese)
- [8] 任登富, 简中飞, 孟祥栋, 等. 数码雷管错相减震爆破技术在地铁隧道施工中的应用[J]. *爆破*, 2020, 37(2): 53-59.
- [8] REN Deng-fu, JIAN Zhong-fei, MENG Xiang-dong, et al. Application of digital detonator staggered shock absorption blasting technology in subway tunnel construction[J]. *Blasting*, 2020, 37(2): 53-59. (in Chinese)
- [9] 刘文胜, 陈能革, 朱末琳, 等. 数码雷管高精度延时对爆破振动影响试验研究[J]. *金属矿山*, 2021(9): 37-43.
- [9] LIU Wen-sheng, CHEN Neng-ge, ZHU Mo-lin, et al. Experimental study on the effect of digital detonator high-precision delay on blasting vibration[J]. *Metal Mining*, 2021(9): 37-43. (in Chinese)
- [10] 朱明, 胡鑫涛, 冯志威, 等. 土岩复合地层条件下爆破振速衰减模型优选[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(10): 4211-4218.
- [10] ZHU Ming, HU Xin-tao, FENG Zhi-wei, et al. Preferred model for blast vibration decay under soil-rock composite stratigraphic conditions[J]. *Science and Technology and Engineering*, 2021, 21(10): 4211-4218. (in Chinese)
- [11] 司小昆, 郭明, 赵岩. 下穿隧道爆破振动测试及能量分布特征分析[J/OL]. *中国测试*: 1-8. [2022-11-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20221006.1737.002.html>.
- [11] SI Xiao-kun, GUO Ming, ZHAO Yan. Blasting vibration testing and energy distribution characteristics analysis of underpass tunnels[J/OL]. *China Testing*: 1-8. [2022-11-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20221006.1737.002.html>. (in Chinese)
- [12] 刘翔宇, 吴昊骏, 吴晓东, 等. 考虑电子雷管延期误差的隧道爆破叠加振动研究[J]. *爆破*, 2021, 38(4): 143-148.
- [12] LIU Xiang-yu, WU Hao-jun, WU Xiao-dong, et al. Research on superimposed vibration of tunnel blasting considering delay error of electronic detonator[J]. *Blasting*, 2021, 38(4): 143-148. (in Chinese)

英文编辑: 李立峰

(上接第 159 页)

- [16] 郭素芬. 危岩体的分类及危险性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
- [16] GUO Su-fen. Classification and risk assessment of dangerous rock mass[D]. Chengdu: Chongqing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [17] 黄小刚. 危岩体发展破坏机理与防治措施的可靠性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- [17] HUANG Xiao-gang. Study on the development failure mechanism of dangerous rock mass and the reliability of prevention and control measures[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [18] 姜永玲. 重庆某高速铁路沿线危岩体发育特征及防治措施研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- [18] JIANG Yong-ling. Study on the development characteristics and prevention measures of dangerous rock mass along a high-speed railway in Chongqing[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [19] 秦鑫. 危岩三维稳定性分析方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [19] QIN Xin. Study on three dimensional stability analysis method of dangerous rock mass[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [20] 重庆市地方标准. DB50/T143-2018 地质灾害防治工程勘查规范[S].
- [21] 李洪涛. 基于能量原理的爆破地震效应研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2007.
- [21] LI Hong-tao. Study on blasting seismic effect based on energy principle[D]. Wuhan: Wuhan University, 2007. (in Chinese)
- [22] WANG Han-bin, ZHANG Bin, MEI Gang, et al. A statistics-based discrete element modeling method coupled with the strength reduction method for the stability analysis of jointed rock slopes[J]. *Engineering Geology*, 2020, 264: 105247-105247.
- [23] 谢兴博, 钟明寿, 陈勇, 等. 爆破振动速度与加速度的等效换算研究[J]. *爆破器材*, 2015, 44(5): 51-55.
- [23] XIE Xing-bo, ZHONG Ming-shou, CHEN Yong, et al. Research on the equivalent conversion of blasting vibration velocity and acceleration[J]. *Explosive Materials*, 2015, 44(5): 51-55. (in Chinese)

英文编辑: 陈东方