

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.02.012

# 台阶爆破逐孔起爆网路的设计与应用\*

李 峰

中铁十二局集团第二工程有限公司(山西太原,030024)

[摘 要] 将导爆管雷管用于逐孔起爆网路设计中,结合雷管段别设置和延期误差,确定出 25 ms (MS2)、50 ms (MS3)作为炮孔的最佳延期时间;利用正态分布概率模型进行定量分析,得到该延期时间能够提高地震波干扰降振的概率,避免多孔齐发、后排先爆现象的发生;结合 Visual Basic 编程语言和计算机辅助设计(CAD),开发了台阶爆破逐孔起爆网路设计系统,实现延时爆破网路设计的可视化和智能化。经实践表明:该系统设计的起爆网路,爆后岩石块度均匀,大块率低,爆破振动明显降低,无飞石、滚石侵限的发生,爆破效果良好。

[关键词] 台阶爆破;逐孔起爆;起爆网路设计;最佳延期时间;导爆管雷管

[分类号] O389

## Design and Application of Hole-by-Hole Initiation Network in Bench Blasting

LI Feng

No. 2 Engineering Co., Ltd., China Railway 12th Bureau Group (Shanxi Taiyuan, 030024)

[ABSTRACT] Nonel detonator was used in the design of the hole-by-hole detonation network. Combined with the detonator segment setting and delay error, 25 ms (MS2) and 50 ms (MS3) were determined as the best delay time of blast holes. Normal distribution probability model was used for quantitative analysis, which shows that the delay time mentioned above can improve the probability of vibration reduction by interference of seismic wave, avoiding the occurrence of multi-hole initiation and back-row advanced initiation. Visual Basic programming language and powerful drawing function of CAD were adopted to develop the network design system of bench blasting which can realize the visualization and intelligence of the millisecond blasting network design. The blasting network designed by this system was applied in bench blasting. It shows that the rock block degree is uniform, the block rate is low and the blasting vibration is reduced obviously. There is no flying stone or rolling rock into the limit. The blasting outcome is good.

[KEYWORDS] bench blasting; hole-by-hole initiation; initiation network design; best delay time; nonel detonator

## 引言

逐孔起爆技术广泛地应用于土石方爆破、露天煤矿爆破等台阶爆破中,在延期爆破中,可通过合理使用雷管段别,进而控制炮孔的延期时间,达到逐孔起爆的效果。于江浩等<sup>[1]</sup>以神华北电胜利露天矿为研究对象进行分析,得出逐孔起爆可以创造更多的自由面、缩短最小抵抗线、减弱岩石的夹制作用,可有效改善露天矿台阶爆破的破碎效果,提高露天矿开采的生产效益;王生楠<sup>[2]</sup>通过爆破机理分析,得出逐孔起爆可以有效改善爆破效果,达到对爆破块度、爆破振动、爆破飞石等爆破危害进行有效控

制的目的。在逐孔起爆中,爆破效果直接受延期时间的影响。最佳延期时间是起爆网路设计中的关键参数。周文海等<sup>[3]</sup>利用 LS-DYNA 建立了 0、17、25、42 ms 4 种不同延期下的台阶爆破模型,通过数值模拟和现场测振试验,得到最佳降振微差时间为 42 ms;长沙矿冶研究院通过爆破理论研究,得出后爆药包利用先爆药包产生的爆轰气体及应力场作用达到二次破碎效果,给出最佳延期时间为 25 ~ 50 ms<sup>[4]</sup>;韩亮等<sup>[5]</sup>以叠加波形的振速幅值为标准进行分析,得到不同距离测点处的最优微差时间。由此可见,选择合理的延期时间,既能够减振、降振,降低爆破危害,又可以充分利用爆破产生的能量,节约成本,提高效益。

\* 收稿日期:2020-11-15

第一作者:李峰(1981-),男,高级工程师,主要从事土建、道路桥梁的研究。E-mail:39721073@qq.com

在现代化爆破中,数码电子雷管具有延时精度高、段别设置不受限制的优点,可实现逐孔起爆;但由于其造价高昂,多用于城市隧道爆破中<sup>[6]</sup>。而矿山开挖、土石方爆破多采用传统导爆管雷管。传统导爆管雷管段别固定,延期时间误差大,爆破过程中可能出现多孔齐发、后排先爆等现象。在探索使用导爆管雷管实现逐孔起爆方面,许红涛等<sup>[7]</sup>研究发现,导爆管雷管通常存在延期误差,不能准确按设计的延期时间起爆,导致各分段爆破产生的振动可能发生叠加,引起质点振速超标。

计算机编程语言的引入已成为一种行业趋势,通常涉及起爆网路设计、爆破振动预测、爆破效果评价等多方面,达到智能爆破的目的。施建俊等<sup>[8]</sup>基于 Matlab 和 Visual Basic (VB) 编程语言,开发了爆破振动预测系统,在实际工程中预测精度高,人机交互界面良好;张小军等<sup>[9]</sup>利用 VB 编程语言,开发了立井爆破软件设计系统,达到爆破参数设计、炮孔设计智能化的目的。

本文中,综合前人的研究成果,创造性地将导爆管雷管用于逐孔起爆中,并结合雷管的段别设置和延期误差,合理选择炮孔的最佳延期时间。引入正态分布概率模型,定量分析,得到该延期时间能提高地震波干扰降振的概率。利用 VB 编程语言<sup>[10]</sup>和计算机辅助设计(CAD)强大的绘图功能,开发了台阶爆破逐孔起爆网路设计系统,经实践检验,利用该系统进行爆破设计能降低爆破危害,提高经济效益。

### 1 设计原理

在逐孔起爆网路设计中,欲达到节约成本、连线网路简单的目的,雷管使用的段别种类越少越好。设计过程中最少采用3种段别的雷管,涉及到孔间延

期  $t_1$ 、排间延期  $t_2$ 、孔内延期  $t_3$ ,除此之外,还有炮孔排数  $n_1$ 、每排孔数  $n_2$ 、最佳延期时间  $t$ ,共 6 个变量。

#### 1.1 确定最佳延期时间

在众多爆破教材中,逐孔起爆网路多采用图 1 所示的设计。雷管采用毫秒延期导爆管雷管,孔间微差为 MS3( $t_1 = 50$  ms)、排间微差为 MS5( $t_2 = 110$  ms)、孔内微差为 MS9( $t_3 = 310$  ms)。图 1 中,无任何两炮孔起爆时间重叠,为严格意义上的逐孔起爆。但其孔间延期时间为 10 ms。在 TB10313—2019《铁路工程爆破振动安全技术规范》中规定,爆破振动安全核算时,宜将延期时间小于 15 ms 的起爆药包按同段累加计算单段爆炸药量。除此之外,由于导爆管雷管本身所存在的误差(如表 1 所示),MS9 雷管延期时间为  $(310 \pm 30)$  ms,误差可达 60 ms(远大于 10 ms),炮孔起爆后地震波干扰降振概率大大减少,很容易造双孔起爆或者多孔起爆。

长沙矿冶研究院通过对大冶铁矿进行逐孔起爆试验研究,得出孔间延期时间的经验公式<sup>[4]</sup>:

$$t = (1 \sim 2)Q^{\frac{1}{3}} + \left(\frac{10.2\gamma_e D}{\gamma_r C_r} - 1.78\right)Q^{\frac{1}{3}} + \frac{S}{v} \quad (1)$$

式中: $t$  为孔间延期时间,ms; $Q$  为炮孔的平均装药量,140 ~ 480 kg; $\gamma_e$  为炸药的密度,0.95 ~ 1.28 g/cm<sup>3</sup>; $\gamma_r$  为岩石的密度,2.9 g/cm<sup>3</sup>; $D$  为炸药爆速,3 600 ~ 3 800 m/s; $C_r$  为岩石纵波波速,5 000 m/s; $S$  为岩石移动距离,10 mm; $v$  为岩块平均移动速度,2~5 mm/ms。

通过式(1)可以计算得到:采用乳化炸药时,最佳延期时间为 17 ~ 65 ms;采用铵油炸药时,最佳延期时间为 15 ~ 47 ms。

在露天煤矿台阶爆破过程中,最小抵抗线初步设计为 6 ~ 10 m 时,不同种类岩石要选择的最佳延

孔间微差MS3 (50ms), 排间微差MS5 (110ms), 孔内微差MS9 (310ms)

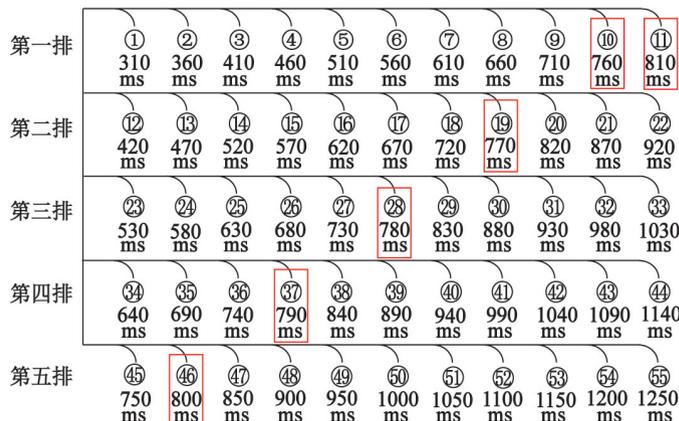


图 1 爆破教材常用的起爆网路

Fig. 1 Blasting network diagram commonly used in blasting textbook

表1 导爆管雷管段别延期表

Tab.1 Segment and delay time of nonel detonator

段别	延期时间/ms	段别	延期时间/ms
MS1	0 <13	MS11	460 ± 40
MS2	25 ± 10	MS12	550 ± 40
MS3	50 ± 10	MS13	650 ± 40
MS4	75 ± 10(15)	MS14	760 ± 55
MS5	110 ± 15	MS15	880 ± 60
MS6	150 ± 20	MS16	1 020 ± 70
MS7	200 ± 20(15)	MS17	1 200 ± 90
MS8	250 ± 25	MS18	1 400 ± 100
MS9	310 ± 30	MS19	1 700 ± 130
MS10	380 ± 35	MS20	2 000 ± 150

表2 MS1~MS17 雷管延期时间及误差

Tab.2 Delay time and error of MS1-MS17 detonator

段别	样本数	名义延期时间/ms	延期均值μ/ms	延期误差	标准差σ
MS1		0			
MS2	160	25 ± 10	25.78	0.78	2.80
MS3	160	50 ± 10	49.06	-0.94	3.65
MS4	100	75 ± 10(15)	78.76	3.76	3.61
MS5	160	110 ± 15	111.20	1.20	4.29
MS6	100	150 ± 20	147.97	-2.03	6.63
MS7	100	200 ± 20(15)	202.05	2.05	8.71
MS8	100	250 ± 25	246.48	-3.52	8.09
MS9	100	310 ± 30	309.14	-0.86	9.38
MS10	100	380 ± 35	373.21	-6.79	9.90
MS11	100	460 ± 40	449.71	-10.29	11.70
MS12	100	550 ± 40	547.14	-2.86	11.00
MS13	100	650 ± 40	652.40	2.40	18.75
MS14	100	760 ± 55	763.04	3.04	15.23
MS15	100	880 ± 60	882.50	2.50	15.56
MS16		1 020 ± 70	1 023.07	3.07	17.71
MS17		1 200 ± 90	1 023.07	3.07	18.84

期时间为:花岗岩、橄榄石、辉长石、闪长岩、石英岩等较坚硬岩石的延期时间为 15 ~ 30 ms;蛇纹岩、坚硬石灰岩、玢岩、砂岩等中性岩石最佳延期时间为 20 ~ 46 ms;菱镁矿、石膏、泥灰岩等较软岩石的延期时间为 50 ~ 70 ms<sup>[4]</sup>。

综合前人研究成果,最佳延期时间为:若抵抗线较大、岩石硬度较小、地质构造突出、结构面破碎,则确定 50 ms(MS3)为炮孔最佳延期时间;相反,若抵抗线较小、岩石硬度较大、地质构造不显著、结构面比较完整,则确定为 25 ms(MS2)。

### 1.2 建立数学模型

鉴于上述设计,在考虑雷管延期误差的基础上,引入正态分布概率模型,定量分析最佳延期时间的不同对逐孔起爆地震波干扰降振的影响。

导爆管雷管段别延期误差可看成随机变量,当某段雷管同一批次数量足够大时,可假设雷管段别和延期符合正态分布  $N(\mu, \sigma^2)$ ,  $\mu$  为延期均值,  $\sigma$  为样本标准差。采用文献[5]中的同一批次抽样实测 MS1 ~ MS15 雷管延期时间,数据如表 2 所示。

由于雷管段别与样本标准差大致呈正相关,可建立线性回归方程计算 MS16、MS17 的标准差,通过 Origin 软件进行线性拟合,拟合后的趋势线如图 2 所示,拟合后的回归方程为

$$\sigma = 1.13571N - 0.46571. \quad (2)$$

式中:  $\sigma$  为标准差,  $N$  为雷管段别。拟合后,  $R^2 = 0.91941$ , 拟合程度较高。

通过式(2)计算,得到 MS16 和 MS17 标准差分别为 17.71、18.84;延期误差均值采用 MS1 ~ MS15 延期误差绝对值的平均值,计算结果如表 2 所示。

### 1.3 分析结果

以MS13段雷管为例,建立正态分布数学模型,

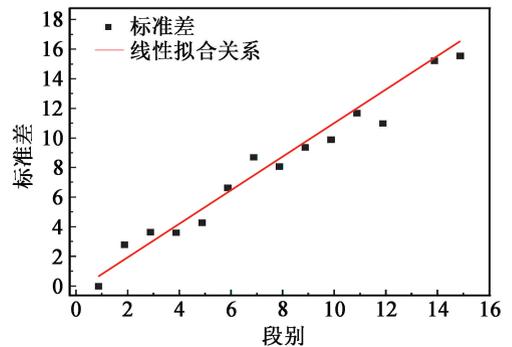


图2 MS1 ~ MS15 雷管段别与样本标准差拟合曲线

Fig.2 Fitting curves of MS1-MS15 detonator segment and sample standard deviation

如图 3 所示。

设母体服从  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$  的正态分布,来自  $X$  的子样为  $X_1, X_2, \dots, X_n$ ,用子样平均值  $\bar{X}$  来估计  $\mu$ ,故  $\bar{X}$  服从正态分布

$$\bar{X} \sim N(\mu, \frac{\sigma_0^2}{n}). \quad (3)$$

因此,有  $U$  服从标准正态分布

$$U = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}} \sim N(0, 1). \quad (4)$$

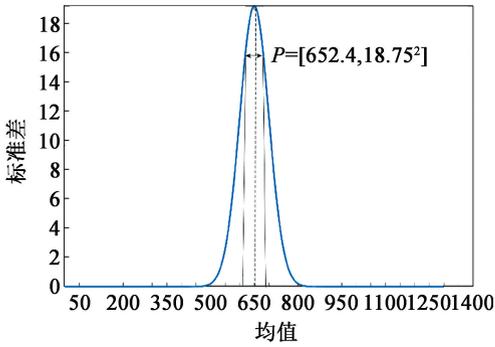


图3 MS13雷管的正态分布模型

Fig. 3 Normal distribution model of MS13 detonator

给定置信概率为  $1 - \alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ), MS13 雷管子样  $1 - \alpha$  的概率全部属于区间  $[610, 690]$ , 则有

$$P\left\{\bar{X} - u_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + u_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}\right\} = 1 - \alpha. \quad (5)$$

故  $\mu$  的置信区间为

$$\left[\bar{X} - u_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}, \bar{X} + u_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}\right] = [610, 690]. \quad (6)$$

式中:  $u_{\frac{\alpha}{2}}$  为在  $\alpha/2$  概率处的分应点, 可以通过标准正态分布函数表直接读取出来。

设 MS13 雷管样本总数  $n = 100$ , 样本平均值  $\bar{X} = 652.4$  ms, 标准差  $\sigma = 18.75$ , 置信概率  $1 - \alpha$ , 有

$$\mu \in \left[\bar{X} - u_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{X} + u_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right] = [610, 690]. \quad (7)$$

通过式 (7) 计算, 得到  $\alpha = 0.000\,000\,01$ , 有 99.999 999% 置信概率, 认为 MS13 雷管在  $[610, 690]$  区间内起爆。

若雷管最佳延期时间  $t = 25$  ms, 那么置信区间为  $[625, 675]$ , 则有

$$\mu \in \left[\bar{X} - u_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{X} + u_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right] = [625, 675]. \quad (8)$$

将  $\bar{X}$ 、 $\sigma$ 、 $n$  代入式 (8), 计算得到  $u_{\frac{\alpha}{2}}$ , 置信概率为 92.8%, 即最佳延期时间取 25 ms, 各炮孔地震波干扰降振概率为 92.8%。若雷管最佳延期时间  $t = 10$  ms, 置信区间为  $[630, 650]$ , 通过分析得到置信概率为 47.78%, 即最佳延期时间取 10 ms, 该概率仅为 47.78%。

按照本文中所提出的最佳延期时间进行起爆网络的设计, 并将其与传统设计进行对比, 得到台阶爆破各炮孔干扰降振的概率明显提高, 对比分析如图 4 所示。

由正态分布概率模型分析得到的对比 (图 4) 可知, 随着段别的增加, 改进前台阶爆破炮孔干扰降振的概率逐渐降低, MS17 概率仅为 22.82%; 起爆网

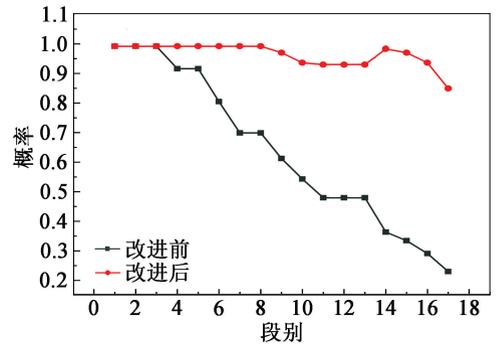


图4 起爆网络改进前、后炮孔干扰降振概率对比

Fig. 4 Comparison of the probability of vibration reduction by interference of blast hole before and after the improvement of the blasting network

路改进后, 除了 MS17 概率为 84.72%, 其余概率都保持在 92.80% 以上。这说明选择 25 ms (MS2)、50 ms (MS3) 作为炮孔的最佳延期时间, 能有效地避免多孔起爆、后排先爆现象的发生。

#### 1.4 其他延期时间的关系

为保证起爆网络的设计符合实际情况, 排间延期  $t_2$  必须大于孔间延期  $t_1$ , 即  $t_2 > t_1 = t$ ; 为确保炮孔起爆时不会对后续网路产生影响, 孔内延期需使用大延期雷管, 4 种延期时间满足  $t_3 > t_2 > t_1 = t$ 。

## 2 基于 VB 的起爆网路系统开发

### 2.1 VB 简介

VB 源自 Basic 编程语言, 拥有图形用户界面 (GUI) 和快速应用程序开发 (RAD) 系统, 可以轻易地使用 DAO、RDO、ADO 连接数据库, 并轻松地创建 ActiveX 控件, 该控件是遵循 ActiveX 规范的可执行代码, 可作为开发和运行的部分代码, 建立新的应用程序。

### 2.2 起爆网路系统的开发

#### 2.2.1 可视化界面设计

1) 系统登录界面。系统登录界面作为该系统的第二个界面, 通过计时控件与初始界面链接。该界面设计包括 2 个命令按钮控件、2 个文本框控件、3 个标签控件。由标题、说明、用户名、密码以及登录与退出按钮组成。如图 5 所示。

2) 毫秒延期导爆管雷管起爆网路设计输入界面。该模块界面设计由 3 个标签控件、2 个文本框控件和 3 个命令按钮控件组成。文本框控件中输入台阶炮孔排数、每排炮孔数等参数值。见图 6。

#### 2.2.2 关键技术实现

1) 起爆网路方案的设计。该模块是整个系统设



图 5 系统登陆界面

Fig. 5 Login interface of the system

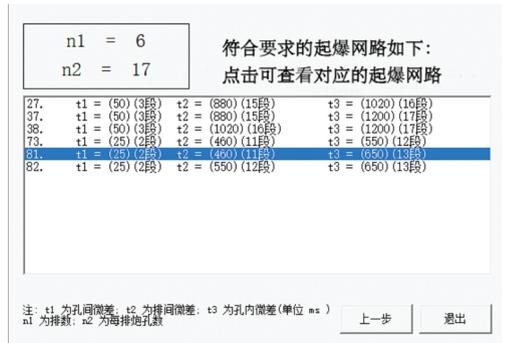


图 7 起爆网路设计组合界面

Fig. 7 Combination interface of initiation network design



图 6 起爆网路设计输入界面

Fig. 6 Input interface of the designed initiation network



图 8 施工现场起爆网路的炮孔布置

Fig. 8 Blasthole layout of initiation network at the site

计的关键环节。在设计之前,将排数、每排孔数、孔间微差、孔内微差、排间微差、最佳延期时间六者之间的关系以集合的方式形成 Access 数据库,通过 ADO 控件连接数据源。ADO 控件是通过 Microsoft ActiveX 数据对象(ADO)来快速建立数据源连接的数据绑定控件。之后,用户输入台阶炮孔排数、每排炮孔数等设计值后,系统会根据输入的参数,自行设计、搜索、计算,生成符合要求的起爆网路设计组合,如图 7 所示。

2)起爆网路示意图的自动生成。系统在设计中,调用 AutoCAD 程序,采用 VB 中的 ActiveX Automation 控件实现两个软件的连接,合理使用 Shape 控件和 Line 控件形成示意图模板,将变量(排数、每排孔数、孔间微差、孔内微差、排间微差)以代码的形式输入,最终形成完整的参数式起爆网路示意图。

### 3 工程应用

在渝涪二线 1 标 ZDK19 + 800 ~ ZDK24 + 008 段紧邻既有线扩堑开挖工程中,爆破区域紧邻工区油库储存罐(爆破距离 15 m 左右),大部分扩堑开挖边线距离既有线中心不超过 10 m,爆破环境复杂且施工难度巨大。鉴于飞石、滚石、爆破振动等众多安全影响因素,采用逐孔起爆技术成为必然选择。

图 8 为施工现场台阶爆破的炮孔布置图,共布

置 3 排,每排 12 个炮孔。

台阶爆破逐孔起爆网路设计系统中,输入  $n_1 = 3$ 、 $n_2 = 12$  后,选取其中 1 种连线方式,孔间延期  $t_1 = 25 \text{ ms}$  (MS2)、排间延期  $t_2 = 310 \text{ ms}$  (MS9)、孔内延期  $t_3 = 460 \text{ ms}$  (MS11),如图 9 所示。

将该起爆网路用到现场施工中,图 10 是使用该爆破网路与之前 V 型起爆网路的爆后效果对比图。

由图 10 对比可以看出,使用新型起爆网路后,爆后岩石块度均匀,爆堆良好,爆破过程中无飞石、滚石侵限,无多孔齐发、后排先爆现象,爆破效果良好。在土石方清运过程中,对大块(最大边长大于 2.5 m 的岩石)进行测量和统计,用米尺及参照物丁字架进行测量。其中,丁字架大小为 1.0 m × 1.0 m。通过统计分析发现,使用 V 型起爆网路,大块率为 0.41%;使用新型起爆网路后,大块率为 0.19%;大块率明显降低。使用 TC-4850 测振仪对重要设施进行振动监测发现,爆破振动严格控制在振速安全允许值之内,且降振率在 26% 以上,大部分集中在 40% ~ 60% 之间。具体监测结果如表 3 所示。

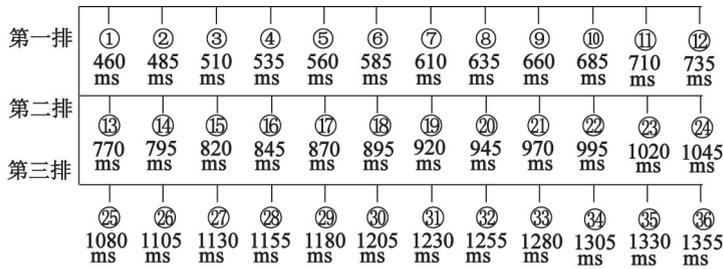


图9 通过软件设计起爆网路

Fig. 9 Initiation network designed by software



(a) 改进前 (b) 改进后

图10 起爆网路改进前、后爆破效果对比

Fig. 10 Comparison of blasting outcome before and after the improvement of the initiation network

表3 起爆网路改进前、后爆破振动现场监测数据对比

Tab. 3 Comparison of field monitoring data of blasting vibration before and after the improvement of the initiation network

监测点	方向	改进前		改进后		降振率/ %
		振速/ (cm · s <sup>-1</sup> )	主 频/ Hz	振速/ (cm · s <sup>-1</sup> )	主 频/ Hz	
路基	x	3.855 9	28.1	1.873 9	24.5	51.40
	y	2.055 3	41.4	1.110 1	70.3	45.99
	z	3.602 5	50.5	0.892 3	40.9	75.23
接触网	x	1.820 3	39.2	1.339 0	44.8	26.44
	y	1.176 4	27.8	0.638 2	29.8	45.75
	z	1.864 2	42.6	0.754 5	53.1	59.53
民房	x	1.167 5	29.1	0.683 4	55.9	41.46
	y	0.603 5	23.9	0.344 7	49.0	42.88
	z	1.096 2	71.1	0.592 4	63.7	45.96

## 4 结论

1) 确定 25 ms (MS2)、50 ms (MS3) 作为炮孔的最佳延期时间,若抵抗线较大、岩石硬度较小、地质构造突出、结构面破碎,最佳延期时间确定为 50 ms (MS3);相反,则是 25 ms (MS2)。由正态分布概率模型分析可知,该延期时间可使炮孔间地震波干扰降振概率保持在较高水平。

2) 基于 VB 编程语言,开发了台阶爆破逐孔起爆网路设计系统。该系统结合 VB 的友好界面和计算机辅助设计 (CAD) 强大绘图功能,实现了起爆网路设计的可视化和智能化。

3) 将该系统应用于渝涪二线 1 标工程中的台阶爆破起爆网路设计中。经实践检验,爆后大块率明显降低,爆破降振率大幅提高,无飞石、滚石侵限,无多孔齐发、后排先爆现象发生,爆破效果良好。

## 参考文献

[1] 于江浩,宋子岭. 逐孔起爆技术在露天煤矿深孔爆破中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2015, 34(4): 438-441.  
YU J H, SONG Z L. Application of deep hole blasting in open-pit coal mine with hole-by-hole blasting technique [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2015, 34 (4): 438-441.

[2] 王生楠. 浅谈公路工程石方逐孔起爆爆破施工技术[J]. 中国标准化, 2019(2): 128-129.

[3] 周文海,梁瑞,陈金林,等. 时程稳定性系数确定的边坡逐孔起爆孔间微差降振时间[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(8): 180-188.  
ZHOU W H, LIANG R, CHEN J L, et al. Millisecond time for reducing vibration between two holes for slope blasting determined by stability coefficient of time history [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39 (8): 180-188.

[4] 于江浩. 逐孔起爆技术在胜利露天煤矿中的应用研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015.  
YU J H. Research on hole-by-hole detonation technology applied in Shengli Open-pit Coal Mine [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2015.

[5] 韩亮,李红江,刘殿书,等. 雷管延期误差对地震波叠加降振的概率分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(3): 96-101, 124.  
HAN L, LI H J, LIU D S, et al. Probability analysis for influence of time-delay error of detonators on superposed

seismic wave vibration reduction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38 (3) : 96-101,124.

[6] 田振农,孟祥栋,王国欣. 城区隧道电子雷管起爆错相减震机理分析[J]. 振动与冲击,2012,31(21):108-111.

TIAN Z N, MENG X D, WANG G X. Mechanism analysis of fault-phase vibration reduction for tunnel blasting initiated by electronic detonators in city area[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012,31(21): 108-111.

[7] 许红涛,卢文波,陈明,等. 雷管延期误差引起爆破震动叠加问题的遗传算法研究[J]. 岩土力学,2008,29(7):1900-1904.

XU H T, LU W B, CHEN M, et al. Study on superposition effect of blasting vibration induced by delay error of detonators using genetic algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008,29(7): 1900-1904.

[8] 施建俊,李庆亚,张琪,等. 基于 Matlab 和 BP 神经网络的爆破振动预测系统[J]. 爆炸与冲击,2017,37(6):

1087-1092.

SHI J J, LI Q Y, ZHANG Q, et al. Forecast system for blasting vibration velocity peak based on Matlab and BP neural network [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(6) : 1087-1092.

[9] 张小军,袁绍国,王晓,等. 基于 VB 技术的立井爆破软件的设计与实现[J]. 煤炭技术,2016,35(6):206-208.

ZHANG X J, YUAN S G, WANG X, et al. Design of vertical tunnel blast software based on VB [J]. Coal Technology, 2016,35(6) : 206-208.

[10] 李玉芹,郭恩栋,于天洋,等. 基于 VB 6.0 的供水管网震害预测方法和软件[J]. 自然灾害学报,2020,29(1):72-78.

LI Y Q, GUO E D, YU T Y, et al. Earthquake damage prediction method and software for water supply pipeline network based on VB 6.0 [J]. Journal of Natural Disasters, 2020,29 (1) : 72-78.

(上接第 57 页)

2) 爆炸钢桶技术能够显著控制爆炸危害效应。由于在爆炸钢桶内进行雷管销毁,筒体上端泄爆口较小(∅300 mm),加上严格控制一次引爆雷管数量,爆炸冲击波、爆炸振动、雷管破片等有害效应能够得到有效的控制。

3) 爆炸钢桶技术能够显著提高销毁工作效率。不同于沙堆覆盖、开挖爆炸坑等方式,爆炸钢桶技术减少了爆炸坑道的开挖数量和次数,可节约资源、降低劳动成本、提高工作效率。

### 参 考 文 献

[1] 王新建. 爆炸物品爆炸燃烧销毁研究[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2012, 18(3):39-42.

[2] 郑耀勇. 水下爆炸法销毁废旧炮弹技术研究[J]. 工程爆破, 2019, 25(1):74-79.

ZHENG Y Y. Research on technology of destroying waste cannonballs by underwater explosion [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(1):74-79.

[3] 肖明甫. 废弃爆炸物品销毁处置及风险控制研究[J]. 采矿技术, 2018, 18(5):222-224.

[4] 李金明,雷彬,丁玉奎. 通用弹药销毁处理技术[M]. 北京:国防工业出版社,2012.

[5] 汪泉,郭子如,黄文尧. 浅谈民用爆破器材的销毁

[J]. 爆破, 2004, 21(4) : 89-90,99.

WANG Q, GUO Z R, HUANG W Y. Preliminary discussion on the destruction of the civil explosive materials [J]. Blasting, 2004,21(4):89-90,99.

[6] 民用爆炸物品工程设计安全标准:GB50089—2018 [S]. 北京:中华人民共和国国家标准,2018.

[7] 国家安全生产监督管理局. 爆破安全规程:GB6722—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.

State Administration of Work Safety. Safety regulations for blasting:GB6722—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China,2014.

[8] 娄建武,龙源. 废弃火炸药和常规弹药的处置与销毁技术[M]. 北京:国防工业出版社,2007.

[9] 民用爆炸物品安全管理条例[Z]. 北京:中华人民共和国国务院,2006.

[10] 公安部治安管理局. 爆炸物品安全监管执法手册 [M]. 北京:群众出版社,2014.

[11] 朱顺官,牟景艳,吴幼成. 雷管侧向殉爆效应特点研究[J]. 火工品,2004(2):33-35.

ZHU S G, MU J Y, WU Y C. Studies on characteristics of side sympathetic explosion of detonators [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2004(2):33-35.

[12] 汪泉,汤有富,郭子如,等. 一种民用爆炸物品销毁装置及销毁方法:CN 201610466025. X [P]. 2016-10-12.