

基于软岩爆破电子雷管延时优选与预测振速

谭成驰, 程贵海, 李修贤, 梁陆佳

(广西大学 资源环境与材料学院, 南宁 530004)

摘要:为了有效控制软岩隧道爆破振动并精准预测振动强度,根据现场的实际条件,采用高精度的数码雷管和运用波形叠加干扰原理来开展精准的延时爆破实验,使用线性分析计算出软岩中的 k 、 α 值从而预测振动。研究表明:通过实验优化电子雷管延时时间,使爆破地震波之间相互干扰从而减少振动的强度,达到干扰减震的效果;单段电子雷管延时优化后振动峰值最大降低了 36.5%(优化后的电子雷管延时为 55 ms,普通电子雷管延时为 25 ms);以实测振动数据及客观的地质环境为依据,利用萨道夫斯基公式和线性回归分析理论分析了符合现场地质条件的萨道夫斯基振动衰减公式($\alpha=1.8066, k=389.01$),为更精准地预测振动提供可靠工具;预测数据与实际数据存在一定的误差,经过分析可知引起误差的原因是存在高差和特殊软岩。

关键词:电子雷管;精准延时;波形干扰;线性分析;软岩爆破;预测振动

中图分类号:TD235 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)01-0284-04

近几十年来,为了满足国家经济的发展,交通也不断得到提升,其中铁路的建设是重要的组成部分。但在铁路施工时必然会使用爆破,然而爆破振动是最主要的危害。在复杂软岩地质情况下隧道掘进时,若爆破稍微不注意时将会造成附近的建筑(构)物出现裂缝、损伤,严重时会造成隧道塌方或者大变形等现象。因此,国内外大量工作者绕着相关的方面做了大量的研究和试验,总结了许多相应的爆破降振措施:一方面研究软岩隧道施工中遇到的问题以及解决的办法^[1-4],另一方面运用干扰的原理解决大规模起爆和振动控制安全的问题^[5-8]。随着建设的进步,国内逐渐实现爆破降振技术,主要分为三大微差起爆技术,分别为孔内微差起爆技术、大区微差爆破技术、等间隔微差起爆技术^[9]。陈士海等分析了孔内不同的延时对干扰的不同影响^[10]。

邱贤阳等对比了数码雷管和普通雷管的抑制振动效果,结果表明数码雷管比普通雷管抑制振动效果高 30%~50%^[11];何理等通过地震波频率和线性叠加方法优选出电子雷管的延时时间,摆脱了传统方法仅能估算特定监测点处最优延时的限制^[12]。

虽然在这方面各专家做了大量的研究,但存在一定的缺陷:一方面是只停留在理论上并没有结合实际情况进行施工,另一方面只是在现场做实验,

并没有进行理论模拟或者进行仿真。故本文结合已有文献和实际施工经验进行总结,从而得出理论结合实际成果,解决了单一的问题,真正地解决了理论结合实际施工的问题。以国内某软岩隧道掘进爆破为例,开展对电子雷管延时优化爆破振动监测试验,通过试爆找出主振频谱的演变规律;基于地震波的线性干扰原理,结合主频建立电子雷管延期时间的确定,从而达到减振的效果。最后通过萨道夫斯基公式结合线性回归分析理论建立符合现场地质情况的萨道夫斯基振动衰减公式,从而能够在软岩隧道爆破中预测振速。研究的成果可以在软岩隧道爆破开挖中作为参考。

1 爆破实验前期准备

1.1 爆破环境概括

爆破振动试验在某软岩隧道开挖时进行,由于大部分工作面紧邻机场、国道、光缆和一家加油站(开工时停止使用),因此爆破有害作为重点防护,尤其是对爆破振动要严格控制。

1.2 爆破参数与测振方案

根据实际的爆破施工情况,炮孔直径为 $\phi 42$ mm,使用连续装药结构,孔内底部采用单发电子雷管反向起爆,填塞长度灵活运用。试爆时单段电子雷管延时设置为 25 ms,爆破深度为 1.1 m,单孔装药 0.6 kg,填塞长度为 0.7 m,单段总药量控制

收稿日期:2021-09-25

作者简介:谭成驰(1995—),男,广西北海人,广西大学资源环境与材料学院,硕士研究生,研究方向为爆破工程;通信作者程贵海(1963—),男,贵州桐梓人,广西大学资源环境与材料学院,副教授,研究方向为爆破工程。

在 5 kg 以内。

为了真实地反映在软岩地质条件下隧道爆破开挖爆破振动的信号,需要监测试爆的数据^[13],然后再进行研究。分别距爆心距 111、138、155、213 m、共布置 4 个测振点,每个测点放置一台中国科学院成都中科测控公司的 TC-4850 爆破测振仪,4 个振动监测点分别在隧道的两侧,目的是尽可能减少因地质差异引起误差,如图 1 所示。根据实际情况,在试爆中选择单段的延时时间为 25 ms,采用数码雷管进行起爆。试爆完后收集 4 个测点的监测指标(主频、振动峰值),若其中一指标之间的误差较大,则需要重复进行试爆,直至爆破监测的数据趋于平稳。试爆数据见表 1。

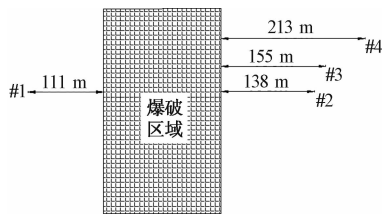


图 1 测点位置

表 1 试爆各数据

测点	距离/m	主频/Hz	振动峰值/(cm/s)
#1	111	102.5	0.299
#2	138	44.9	0.184
#3	155	36.6	0.155
#4	213	35.7	0.087

2 波形叠加干扰原理

若前后爆破微差延时选择合理,则前一次爆破与后一次爆破的地震波会使波谷与波峰相遇,由波形叠加的线性原理可知,叠加后的总振幅和振动明显降低,以此来降低爆破振动对周围环境的影响。

当两列波错相相遇时,虽然波形在介质传播中是随机波形,但是可以借鉴和参考正弦函数进行分析。假设在爆破时产生的两列波的振幅 B 和频率 ω 相同,其相位角不同但传播的方向一致^[14]。

分别设这两列波为 $y_1 = B\sin(\omega t - \beta)$, $y_2 = B\sin(\omega t - \mu)$ 。

两列波在爆破后在同一方向上进行叠加,即

$$Y = y_1 + y_2 = B\sin(\omega t - \beta) + B\sin(\omega t - \mu)$$
 (1)

式中: Y 为叠加振幅; y_1 、 y_2 为子振幅; β 、 μ 为相位角; t 为时刻。

将式(1)化简得

$$Y = 2B\sin\left(\omega t - \frac{\beta + \mu}{2}\right)\cos\left(\frac{\mu - \beta}{2}\right)$$
 (2)

由式(2)知叠加振幅的大小由相位角决定,当相位角满足一定条件时两列波有明显的相互干扰现象,即满足

$$\left|\cos\left(\frac{\mu - \beta}{2}\right)\right| < \frac{1}{2}$$
 (3)

从式(3)推出

$$4n\pi + \frac{2\pi}{3} < \mu - \beta < 4n\pi + \frac{4\pi}{3}$$
 (4)

令 Δt 为由两列波的相位角到达监测点的时间差,即

$$\mu - \beta = \omega\Delta t = \frac{2\pi\Delta t}{T}$$
 (5)

将式(2)~式(5)代入式(4)化简后得

$$2nT + \frac{T}{3} < \Delta t < 2nT + \frac{2T}{3}, n = 0, 1, 2, \dots$$
 (6)

此时理论上两列波能够满足此条件,即可实现叠加错相干扰降低振动。但是在实际的爆破施工中影响振动效应的是主振动区域的振动最为关键,而在主振动区域波形叠加效果主要集中在 1~2 振幅内,后面的振幅对振动的影响会越来越小。因此,能够达到波形叠加干扰减振效果的关键在于初始振幅的产生,即

$$\frac{T}{3} < \Delta t < \frac{2T}{3}$$
 (7)

3 电子雷管延时的优选方法

使用电子雷管起爆网络来分析爆破干扰降振实验,当电子雷管延时时间满足 Δt 时,则可使波形叠加相互干扰理论转变为现实,最终能够实现在同等条件下爆破振动有所降低。通过试爆实验,总结出主频演化规律,并根据式(7)求出电子雷管的延时。

试爆实验得出主频为 55 Hz,计算出电子雷管延时时间为 38~76 ms,最后进行实验得单段电子雷管延时设置为 55 ms 时在软岩隧道爆破干扰降振效果最好。

4 爆破振动分析

依据中华人民共和国国家标准《爆破安全规程》以及国内外的研究可知,当前计算振速时普遍运用萨道夫斯基公式,即

$$V = k \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^\alpha$$
 (8)

式中: R 为爆心距,m; V 为监测点振速,cm/s; Q 为最大单段炸药量,kg; k 、 α 为爆破区域以及附近地形、地质等条件有关的系数和衰减系数。

4.1 建立线性模型

根据试验后爆破所得的振动数据,利用最小二乘法将萨道夫斯基公式进行线性分析,将式(8)等号两边取对数可得^[15]

$$\ln V = \ln k + \alpha \ln \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right) \tag{9}$$

令 $x = \ln \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)$, $a = \alpha$, $b = \ln k$, $y = \ln V$, 则有线性方程为

$$y = ax + b \tag{10}$$

式中:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, a = \alpha, b = \bar{y} - a\bar{x}。$$

将现场实测 4 组数据的 R 、 V 、 Q 代入式(10)中,采用最小二乘法计算出 $a = 1.806\ 6$, $b = 2.59$, $\alpha = 1.806\ 6$, $k = 389.01$ 。根据相关系数建立预测模型:

$$V = 389.01 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.806\ 6} \tag{11}$$

通过表 2 的误差计算可知: #1、#4 号监测点的误差率为正值,该两点的监测振速均没有超过预测振速; #2、#3 号监测点的误差率为负值,该两点的监测振速均超过预测振速,其中 #2 监测点误差率最大,达到 15.1%。对其误差进行分析:

1) 爆破区域的环境和地质条件复杂,测振仪所处方位各不相同,所以地震波在传播到监测点的过程中经历不同的介质,从而造成地震波在传播过程的衰减有较大的差异。

2) 萨道夫斯基公式没有将高程差的影响因素考虑进去^[16],在复杂的地质条件下爆破区域会因高程差影响预测振速的精度(高差 30 m 左右),从而造成了实测振速与预测振速有较大的差异。

表 2 实测振速与预测振速误差

最大单段药量 Q/kg	测点	实测振速 V/(cm/s)	预测振速 V/(cm/s)	误差率/%
5	#1	0.19	0.206	7.7
	#2	0.16	0.139	-15.1
	#3	0.12	0.112	-7.1
	#4	0.06	0.063	4.7

4.2 效果分析

从以上的数据可知,在同等条件下使用波形叠加干扰原理有明显的降振效果,爆破实验的振动数据相对于试爆振动数据最大降低了 36.5%,监测点 #1 降低 36.5%,监测点 #2 降低 22.3%,监测点

#3 降低 13.04%,监测点 #4 降低 31.03%。各爆速对照如图 2 所示。

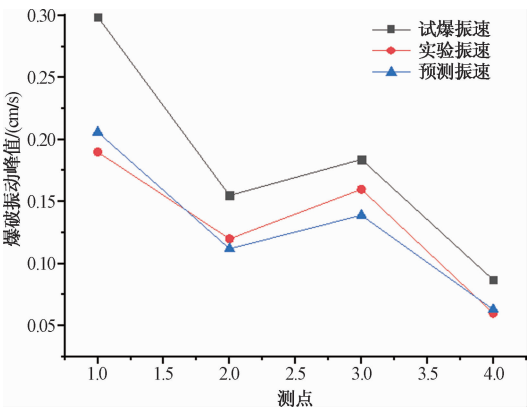


图 2 各爆速对照

5 结论

实验表明,通过设置合理的孔内延时时间,采用电子雷管网络起爆,在一定的程度上能实现波形间错相干扰,降低了爆破振动。

1) 在软岩隧道进行爆破时单段电子雷管延时设置为 75 ms 时,可以将波形错相干扰的理论实现达到降低爆破振动的效果,在同等的条件下爆破实验后的振动数据相对于试爆振动数据最大降低了 36.5%。

2) 根据实际的地质情况,利用萨道夫斯基公式和线性回归分析理论将实验得到的振动数据进行分析可知 $\alpha = 1.806\ 6$ (1.8~2.0) 在国家的规定范围内,但 $k = 389.01$ (250~350) 不在国家的范围内。通过建立萨道夫斯基公式模型预测出爆破振速,根据预测的数据调整爆破的参数,降低振动对地表各建筑(构)物的影响。

参考文献

[1] 尹留阳. 断面软岩隧道施工风险微震监测与预警技术研究[D]. 北京:北方工业大学,2018.

[2] 汤志立,刘晓丽,李超毅,等. 深埋 TBM 隧道施工微震监测规律[J]. 清华大学学报(自然科学版),2018,58(5): 461-468.

[3] 李凤翔. 深埋软弱围岩隧道施工时空效应及大变形控制研究[D]. 长沙:中南大学,2012.

[4] 王旭. 浅层采空区稳定性微震监测技术与应用研究[D]. 长沙:矿山研究院,2017.

[5] 林大能,陈寿如,刘优平,等. 某露天采场爆破震动特性及减震技术研究[J]. 中国工程科学,2006,8(6):73-77.

[6] 苏波,高可帅,宋瑞富. 毫秒延时爆破振动叠加作用的数值模拟研究[J]. 工程爆破,2012,18(3):12-16.

[7] 郭学彬,张继春,刘泉,等. 微差爆破的波形叠加作用分析[J]. 爆破,2006,23(2):4-8.

[8] 李瑞涛. 爆破地震波叠加规律实验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.

[9] 邢光武, 郑炳旭, 魏晓林, 等. 延时起爆干扰减震爆破技术的发展与创新[J]. 矿业研究与开发, 2009 (4): 95-97.

[10] 陈士海, 燕永峰, 戚桂峰, 等. 微差爆破降震效果影响因素分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3003-3008.

[11] 邱贤阳, 史秀志, 周健, 等. 基于 HHT 能量谱的高精度雷管短微差爆破降振效果分析[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(1): 107-113.

[12] 何理, 谢先启, 韩传伟, 等. 基于地震波频谱分析与线性叠加的电子雷管延时优选[J/OL]. 金属矿山: 1-14[2021-10-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20210601.1622.004.html>.

[13] 黄柳云, 李俊, 韦思达, 等. 浅埋超大断面隧道爆破施工引起的支护结构振动监测分析[J]. 广西科技大学学报, 2021: 13-17.

[14] 张光雄, 杨军, 卢红卫, 等. 毫秒延时爆破干扰降振作用研究[J]. 工程爆破, 2009, 15(3): 17-21.

[15] 张天军, 马锐, 乔宝明, 等. 爆破震动中萨道夫斯基拓展式的回归分析[J]. 湖南科技大学学报, 2012(5): 12-16.

[16] 张勤彬. 考虑高程及岩体损伤的爆破振动传播规律及其控制技术研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.

Delay Optimization and Vibration Velocity Prediction of Electronic
Detonator Based on Soft Rock Blasting

TAN Chengchi, CHENG Guihai, LI Xiuxian, LIANG Lujia

(School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to effectively control the soft rock tunnel blasting vibration and accurate prediction of vibration intensity, according to the actual conditions of the site, the high precision digital detonator and the principle of waveform superposition interference are used to carry out accurate delay blasting experiment. The linear analysis is used to calculate the k and α values in the soft rock to predict the vibration. Research results show that: The delay time of the electronic detonator is optimized through experiments to make the blasting seismic waves interfere with each other so as to reduce the intensity of vibration and achieve the effect of interference shock absorption. The vibration peak value of the single stage electronic detonator is reduced by 36.5% after the delay optimization. The delay time of the optimized electronic detonator is 55 ms, and the delay time of the ordinary electronic detonator is 25 ms. Based on the measured vibration data and the objective geological environment, the Sadovsky vibration attenuation formula which is in line with the field geological conditions is analyzed by using Sadovsky formula and linear regression analysis theory($\alpha=1.8066$, $k=389.01$), which provide a reliable tool for more accurate vibration prediction. There is a certain error between the predicted data and the actual data. Through analysis, it can be known that the error is caused by the elevation difference and special soft rock.

Keywords: electronic detonator; accurate delay; waveform interference; linear analysis; soft rock burst; vibration prediction