

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.03.023

爆破振动强度、波形与频谱研究综述： 预测及主动控制*

何理^{1,2}, 殷琳¹, 钟冬望¹, 张鑫玥¹, 赵永明¹, 熊海涛¹, 陈莎莎¹, NJAMBA Bruno¹

(1. 武汉科技大学 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室, 武汉 430065;

2. 江汉大学 爆破工程湖北省重点实验室, 武汉 430056)

摘要: 岩石钻孔爆破不可避免地会产生爆破振动效应及危害, 准确预测爆破振动效应并进行主动控制具有极大的现实意义。论文综述了近40年来, 国内外研究人员在爆破振动预测及主动控制方面取得的研究成果。在爆破振动速度峰值(PPV)预测方面, 经验模型预测方法体现出了较大的便捷性, 但预测精度与效果较差, 将概率统计理论引入经验模型预测方法, 提高了PPV预测精度; 而基波叠加预测方法可实现对振速、频率和持续时间的综合预测, 但是该方法对振动基波的测试精度要求较高, 同时亟须在行业内建立对爆破振动采集设备的定期标定与校核机制; 人工智能预测方法极大提高了PPV预测精度, 同时为多因素影响下的爆破振动效应预测提供了新思路, 但需要建立在海量真实有效实测数据的基础上, 目前还缺乏充实的振动测试样本数据库; PPV预测理论模型及数值模拟预测法对理论与专业知识、数值模拟技术等要求高, 限制了两种方法在工程的普遍应用。在爆破振动速度主动控制上, 可以确定合理的延期时间, 采用毫秒延迟干扰减振法来降低PPV, 但目前多为单一防护对象所提出的延期时间建议值; 从调整爆破振动频谱结构的角度, 通过主动改变延期时间调控爆破振动频率成分, 可避开建(构)筑物自振频带, 减小爆破振动危害, 然而目前仅仅停留在理论层面或模型试验尺度条件下, 缺乏大规模的现场应用实例。最后, 对未来爆破振动预测及控制方面重点研究内容进行了展望。

关键词: 爆破振动; 基波叠加; 干扰减振; 频谱控制; 延期时间

中图分类号: O389; O383.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2024)03-0189-16

Research Review on Blast Vibration Intensity, Waveform and Spectrum: Prediction and Active Control

HE Li^{1,2}, YIN Lin¹, ZHONG Dong-wang¹, ZHANG Xin-yue¹, ZHAO Yong-ming¹,
XIONG Hai-tao¹, CHEN Sha-sha¹, NJAMBA Bruno¹

(1. Hubei Province Key Laboratory of Systems Science in Metallurgical Process,

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

2. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering, Jiangnan University, Wuhan 430056, China)

收稿日期 (Date of reception): 2023-10-14

网络首发日期 (Published online): 2024-01-03

作者简介: 何理 (1986-), 男, 博士, 副教授, 从事工程爆破方面的研究, (E-mail) emp-heli@hotmail.com。

通讯作者: 殷琳 (1999-), 女, 硕士研究生, 从事振动预测方面的研究, (E-mail) YLinlin@outlook.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52274136, 51904210); 爆破工程湖北省重点实验室基金项目 (BL2021-11); 湖北省重点研发计划项目 (2020BCA084)

About the author: HE Li (1986-), male, Ph. D, associate professor, engaged in research on engineering blasting, (E-mail) emp-heli@hotmail.com.

Corresponding author: YIN Lin (1999-), female, master's degree student, engaged in research on vibration prediction, (E-mail) YLinlin@outlook.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (52274136, 51904210), Key Laboratory Fund Program of Blasting Engineering in Hubei Province (BL2021-11), Hubei Provincial Key R&D Program Projects (2020BCA084)

Abstract: Rock drilling and blasting inevitably produce blasting vibration effects and hazards. The accurate analysis and prediction of blasting vibrations and effective active control methods are thus of great practical significance. This paper summarises the achievements in the prediction and active control of blast vibration velocities over the past 40 years. In terms of predicting the peak value of the blasting vibration velocity (PPV), empirical model prediction methods are very convenient, but their prediction accuracy and effectiveness are poor. By introducing probability and statistical theory into empirical model prediction methods, the accuracy of PPV predictions can be improved. The fundamental wave superposition prediction method can comprehensively predict the vibration velocity, frequency, and duration. However, this method requires high testing accuracy for fundamental vibration waves, which requires the establishment of a regular calibration and verification mechanism for blasting vibration data acquisition devices in the blasting industry. Artificial intelligence prediction methods can significantly improve the accuracy of PPV predictions and provide new ideas for predicting blasting vibration effects under the influence of multiple factors. However, these methods are all based on massive amounts of real and effective measured data, and a substantial database of vibration testing data samples is currently lacking. Theoretical PPV prediction models and numerical simulation prediction methods have also been proposed. However, the widespread application of these methods in engineering practice is limited owing to the requirements for professional knowledge and numerical simulation technology. In terms of the active control of blasting vibration velocity, reasonable delay time determination methods for reducing the PPV are first discussed based on the superposition interference effect of vibration waveforms. However, the recommended delay time values proposed by most current methods are only suitable for protecting a single target structure. Then, a method for actively changing the delay time to regulate the frequency components of blasting vibration is discussed from the perspective of adjusting the spectral structure of blasting vibration, which can avoid the natural vibration frequency band and reduce blast vibration hazards to buildings (structures). However, this method currently remains at the theoretical level or under model experimental-scale conditions and lacks large-scale on-site application examples for verification. Finally, several key future research directions for the prediction and control of blasting vibrations are discussed.

Key words: blasting vibration; fundamental waveform superposition; vibration reduction through waveform interference; vibration spectrum control; delay time interval

40多年来,随着我国各项建设事业的蓬勃发展,在矿山开采、水电工程施工、建筑(构筑物)拆除、城市地下空间开发利用和水下炸礁清淤等领域,工程爆破技术作为一种经济高效的破岩手段被广泛应用,是国民经济建设发展必不可少的支撑技术。然而在爆破破岩过程中,难以避免产生爆破有害效应,例如爆破振动、飞石、冲击波、噪音及毒气等,调查研究表明,爆破振动、爆破飞石和噪声消耗炸药爆炸总能量的80%,仅仅20%左右能量用于岩石爆破破碎^[1]。在这些次生灾害中,爆破振动被公认为最严重的爆破有害效应,如果控制不当,会对周围建筑结构造成一定程度的影响,严重的还会引起结构物的失稳和破坏,进而引起重大的安全事故。质点峰值振动速度(PPV)和爆破振动频率是建(构)筑物振动响应特征的主要影响因素,如果仅仅将PPV作为衡量爆破振动对建(构)筑物影响的唯一标准,则难以准确评估爆破振动危害。当爆破振动频率与建筑物固有频率接近或相同时,共振现象可能发生,从而导致建筑结构产生较大振动响应或严重损坏^[2]。目前,世界各地倾向于将PPV和频率作为爆破振动安全控制标准。

为确保公民人身财产及邻近建(构)筑物安全,

设计合理的爆破施工方案,并选择合适的爆破参数,从而有效控制PPV水平尤为重要。然而,目前我国现行爆破设计规范中对PPV影响因素的指南有限,研究人员分析了各种因素对PPV的影响,以提高PPV预测的准确性,同时已经提出了各种不同形式的PPV经验模型公式,但均是只考虑了少数参数的影响。此外,所提出的经验模型公式不统一,适用范围极为有限,导致预测结果与实际结果存在较大偏差。同时,鉴于振动频率是衡量爆破振动危害不可忽视的因素,研究人员建立了大量振动主频与主要影响因素间的经验方程,然而由于振动频率具有极大离散性^[3],因此相较于PPV研究而言,频率预测及控制研究成果相对较少。本文主要从爆破振动强度预测及爆破振动主动控制两方面,对工程爆破理论及技术进行总结,并对未来亟需重点研究的内容进行了展望,以期进一步促进工程爆破科学技术发展,推动工程爆破行业向着更为绿色、安全、智能、高效的方向迈进。

1 爆破振动强度预测

国内外大量研究与实践表明^[4],爆破振动的峰值速度与建筑物的受损程度具有最高的相关性。因

此,通常采用爆破振动的峰值速度 (Peak Particle Velocity, PPV) 作为评判建筑物安全的控制指标。针对爆破振动强度的预测主要包括经验模型预测法、智能预测法、基波叠加预测法及其他方法。

1.1 经验模型预测法

爆破振动强度与炸药量、爆心距及传播介质力学性质等因素密切相关,爆破振动强度计算的经验模型可统一表示为

$$A = kQ^m R^n \tag{1}$$

式中: A 为描述爆破振动强度的物理量; Q 为炸药质量,kg; R 为爆心距,m; k 、 m 、 n 为与爆破方式、场地及地质条件相关的系数。

世界各国研究人员结合爆破开挖方式、主要装药结构及地质条件等影响因素,提出了一系列 PPV 经验预测模型,如表 1 所示。

表 1 各国学者采用的振速预测经验模型

Table 1 Empirical models of vibration velocity prediction adopted by various countries

学者	经验公式	公式说明
DUVALL et al ^[5]	$PPV = k(R/\sqrt{Q})^{-\alpha}$	其中 R 为爆心距; Q 为单响药量; K 为与岩石性质和地质结构相关的系数; α 为地震波衰减系数。
Langefors et al ^[6]	$PPV = k(\sqrt{Q/R^{2/3}})^{\alpha}$	式中符号意义同前。
汪旭光等 ^[7]	$PPV = k(\sqrt[3]{Q}/R)^{\alpha}$	式中符号意义同前。
Indian Standard Institute ^[8]	$PPV = k(Q/R^{2/3})^{\alpha}$	式中符号意义同前。
Ghosh et al ^[9]	$PPV = k(R/\sqrt{Q})^{-\alpha} e^{-\beta R}$ $PPV = k(R/\sqrt[3]{Q})^{-\alpha} e^{-\beta R}$	考虑地震波传播过程中能量的非弹性衰减,提出 PPV 以指数形式衰减。其中 β 为地震波非弹性衰减因子。
Gupta et al ^[10]	$PPV = k(R/\sqrt{Q})^{-\alpha} e^{-\beta(R/Q)}$	式中符号意义同前。
Bilgin et al ^[11]	$PPV = k(R/\sqrt{Q})^{-\alpha} B^{\beta}$	考虑抵抗线大小对振动速度的影响。其中 B 为抵抗线,其余符号意义同前。
Murmu et al ^[12]	$PPV = k(R/Q^{2/5})^{-\alpha} e^{\beta(R/\sqrt{B})}$	式中符号意义同前。
Roy et al ^[13]	$PPV = n + k(R/\sqrt{Q})^{-1}$	在考虑地震波的弹性衰减和非弹性衰减的情况下,式中符号意义同前。
Yilmaz et al ^[14]	$PPV = k(\sqrt[4]{R}/\sqrt[6]{Q})^{-\alpha} e^{\beta(R/\sqrt{Q})}$	通过对振动监测数据进行多元线性回归分析,可以得到相关方程。式中符号意义同前。

然而表 1 中经验模型仅仅涵盖了炸药量与爆心距对 PPV 的影响,并未充分考虑地形地貌差异造成的振速突变问题。相关学者结合特定施工环境,通过量纲分析理论或爆破振动实测数据回归分析,提

出了系列考虑高程差因素的 PPV 预测模型^[15-20],大幅提高了存在极大正负高程地形时的振动速度预测精度,如表 2 所示。

表 2 考虑高程差因素的 PPV 预测模型

Table 2 PPV prediction models considering elevation difference

学者	经验公式	公式说明
周同岭等 ^[15]	$PPV = k(\sqrt[3]{Q}/R)^{\alpha} H^{\beta}$	结合现场多次爆破振动实测资料提出,可反映正、负高程差对振速的影响。其中 H 为高程差; β 为高程差因子,正高差时取正值,负高差时取负值;其余符号意义同前。
朱传统等 ^[16]	$PPV = k(\sqrt[3]{Q}/R)^{\alpha} (\sqrt[3]{Q}/H)^{\beta}$	基于量纲理论分析得到,实践应用效果良好。其中符号意义同前。
宋光明等 ^[17]	$PPV = k(\sqrt[3]{Q}/R)^{\alpha} (R/D)^{\beta}$	结合现场多次爆破振动实测资料提出,其中 D 为水平爆心距,其余符号意义同前。
刘美山等 ^[18]	$PPV = k(\sqrt[3]{Q}/D)^{\alpha} e^{\beta H}$	提出了适用于小湾水电站高边坡爆破振动传播规律的振速计算公式,其中符号的意义与之前相同。
唐海等 ^[19]	$PPV = k(\sqrt[3]{Q}/R)^{\alpha} (H/R)^{\beta}$	得出了能够准确反映凸形地貌正高差放大效应的爆破振动速度公式。
何理等 ^[20]	$PPV = k(\sqrt[3]{Q}/D)^{\alpha} (R/D)^{\beta} (H/D)^{\gamma}$	引入了边坡相对坡度项(H/D),能够更准确地预测坡面质点振动速度的峰值,并体现了坡度角对爆破振动速度高程放大效应的影响。其中 γ 为坡度影响因子,其余符号意义同前。

此外,还有研究人员考虑了地质不连续面和频率突变对 PPV 的影响,提出的 PPV 经验预测模型如

表 3 所示。

表 3 考虑地质不连续面和频率突变因素的 PPV 预测模型

Table 3 PPV prediction model considering geological discontinuity and frequency mutation

学者	经验公式	公式说明
Hakan et al ^[21]	$PPV = k(R/\sqrt[3]{Q}/R)^{-\alpha\lambda^\eta}$	考虑了频率突变对振速的影响。式中 λ 为间断频率值; η 为频率突变因子; 其余符号意义同前。
Simangunsong et al ^[22]	$PPV = k[(1 + \cos \theta_i + \log N_c)R/\sqrt{Q}]^{-\alpha}$	考虑了煤层数量和传播方向对振速的影响。式中 θ_i 为地震波入射角; N_c 为煤层数; 其余符号意义同前。
Kumar et al ^[23]	$PPV = f_c^{0.462} R^{-1.463} / \delta$ $PPV = (0.3396 \times 1.02^{GSI} GSI^{1.13})^{0.642} R^{-1.463} / \delta$	考虑岩石参数对振速的影响。式中 F_c 为岩石单轴抗压强度; δ 为岩体重度; GSI 为岩体地质强度指标; 其余符号意义同前。

爆破振动速度的经验模型预测方法具有简单的公式形式,而且使用振动实测数据进行回归分析较为方便,目前仍然是爆破工程作业人员首选的方法之一。然而经验模型方法考虑振速影响因素较为局限,导致其预测精度普遍不高。同时,国内外爆破施工现场多采用毫秒延时爆破技术,邻近段别爆破振动波形易产生干扰叠加现象,另外,因雷管延时误差的影响,导致同一段别炮孔的起爆时间具有离散性。即同段别多个炮孔齐发爆破时,由于起爆雷管延时误差导致各炮孔实际起爆时刻存在先后(较小的时间间隔),因此难以准确确定实际单响药量,对爆破网路实际单响药量取值、振速回归分析及 PPV 预测造成了困难。已有学者提出了短毫秒延时起爆条件下等效段药量的取值方法^[24-27],然而借助经验模型预测方法对实测数据进行回归分析的相关性并不高,并未有效解决 PPV 计算误差大的问题^[28]。此外,何理、杨仁树等通过将单孔药包均分为 M 个装药单元^[29],并建立群孔齐发爆破振速计算模型,如图 1 所示。综合考虑雷管延时误差、各炮孔爆心距与地震波传播路径差异因素,提出利用缩比因子折算炮孔数目计算齐发爆破等效药量,解决了炮孔起爆时刻离散效应引起的段药量取值困难问题。

图 1 中: a 为孔距, m ; b 为排距, m ; R_1 、 R_2 、 R_M 分别为各炮孔距离监测点的距离, m 。

同时,提出了非电毫秒延时起爆网路 PPV 的修正比例距离预测模型

$$PPV = k \times (R/Q^{1/3})^{-\alpha} + \Phi \quad (2)$$

式中: Φ 为振波叠加因子, cm/s ; 其余符号意义同前。

在前述研究成果基础上,研究人员利用概率理论分析了雷管延期误差对毫秒延时爆破分段振动叠加的影响规律^[30],建立了相邻 n 排炮孔同时起爆概率的计算方法。并提出了非电起爆网路修正单响药

量的概念和计算方法,工程实例应用结果表明,通过修正单响药量回归爆破振动速度模型,可以获得良好 PPV 预测效果。图 2 为非电起爆网路炮孔实际起爆时刻的概率分布图,图 3 为相邻 n 排炮孔同时起爆概率的计算方法。

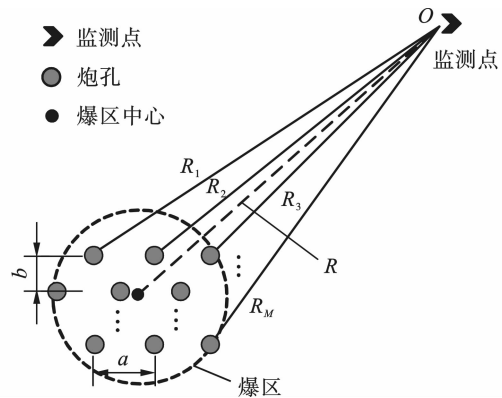


图 1 群孔齐发爆破振速计算模型

Fig. 1 Calculation model of vibration velocity for simultaneous blasting of multi-holes

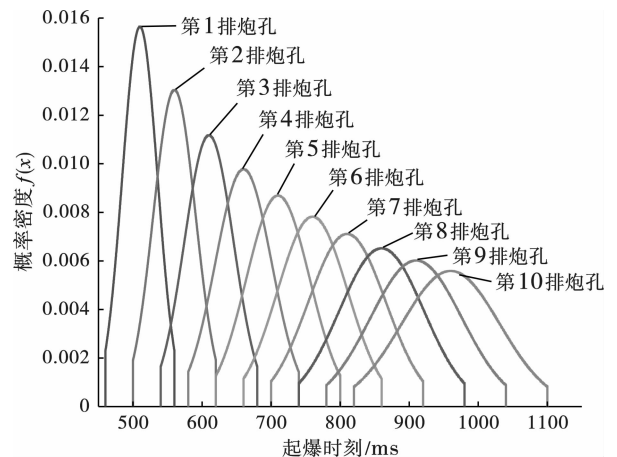


图 2 非电起爆网路炮孔实际起爆时刻的概率分布图

Fig. 2 Probability distribution of actual initiation time of each row of holes

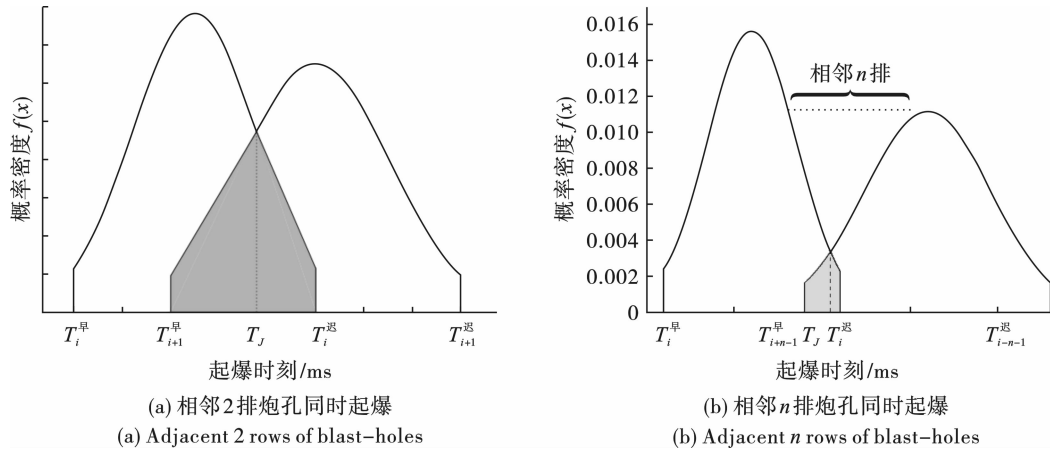


图 3 相邻 n 排炮孔同时起爆概率的计算方法

Fig. 3 Calculation diagram for simultaneous initiation probability of adjacent blast-holes

1.2 基波叠加预测法

自 20 世纪 80 年代开始, Anderson^[31]、Blair^[32,33]、Hinzen^[34]、卢文波^[35]、YANG^[36]、杨年华^[37]、钟冬望及何理、谢先启等人先后通过将实测单孔爆破地震波形作为种子基波^[38,39], 以不同段间延期时间叠加模拟毫秒延时爆破振动波形进而预测 PPV, 这些均是基于地震波线性叠加原理得到的。基于种子基波的线性叠加模型预测得到的爆破振动速度历程曲线 $v(t)$ 可统一表示为^[35]

$$v(t) = \sum_{n=1}^N v_s(t - t_n) \cdot [a_n H(t - t_n)] \quad (3)$$

式中: a_n 为炮孔药包影响系数, 受炸药种类和单孔药量的影响; N 为一次起爆的炮孔个数; $v_s(t)$ 为种子基波; t_n 为孔(段)间延期时间; $H(t)$ 为 Heaviside 函数, 其定义为

$$H(t - t_n) = \begin{cases} 1, & t - t_n \geq 0 \\ 0, & t - t_n < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式(3)表明, 该模型假设在特定监测点, 单孔爆破振动波形可以复现, 可以将群孔毫秒延时爆破振动波形视为振动基波在不同的时空条件下的组合形式^[36]。然而却并未考虑爆心距的影响, 以及爆破过程非线性关系导致的不同炮孔振动波形的差异因素。对此, Blair 提出了基于比例药量定律的线性叠加模型^[32], 但仅仅利用爆心距的幂函数无法准确表征爆心距对振速波形的影响。

Iwano 通过现场试验验证了短毫秒延时爆破振动波形峰值速度服从 Weibull 分布^[40], 提出利用比例距离公式计算 Weibull 参数, 并通过 Weibull 分布反函数生成服从该分布函数的随机数, 然后根据随机数对单孔爆破振动波形进行缩扩调整作为种子基波, 最后考虑隧道掌子面炮孔位置及振波传播时间

差异因素, 实现不同延期时间下的振动波形模拟。实践证明, 线性叠加模型预测 PPV, 结果一般要比实测值大^[41]。Blair 为了解决振速预报线性叠加模型的不足^[41], 提出了两种非线性叠加模型: 一种基于装药量, 一种基于岩体损伤程度。其中, 基于岩体损伤程度的非线性叠加模型能够更准确地预测振动幅值和振动包络线形状, 与实测结果更加接近。非线性叠加模型考虑了先爆炮孔造成的传播介质性质改变对后爆炮孔爆破地震波传播的影响^[42], 振速预测精度高于线性叠加模型。Liu^[43]、孙玉平拟将爆破震源与监测点之间的岩土介质视为一个非线性体系^[44], 利用 Volterra 函数来刻画爆破震源与监测点土体的非线性特性。通过构建群孔毫秒延时爆破的脉冲序列函数作为非线性系统的输入, 建立了基于 Volterra 泛函级数的群孔毫秒延时爆破振动预测模型。然而该方法对非线性系统的精确识别还存在困难, 并且在 Volterra 非线性系统参数识别时需要借助较多次独立的单孔爆破试验, 方法应用成本较高。考虑到药量相同同时不同单孔爆破振动波形差异性因素, Yang^[45]、Xie 提出了多组种子基波振动叠加模型^[46]。建议监测单孔爆破振动波形, 模拟群孔毫秒延时爆破振动波形时, 根据实际测点到爆心距离选取距离差最小的振动监测波形作为种子基波, 如图 4 所示。通过转化方程计算, 可以得到由距离差(图 5 中 δR_1 、 δR_2 和 δR_3)引起的波形特征变化。该模型综合考虑了频率随距离改变导致的爆破振动三要素的变化, 以及先爆孔破碎岩石对后爆孔振动传播的屏蔽效应。

除此之外, 有学者将基波叠加方法与数值模拟相结合建立了新的振动波形预测方法。Azizabad 提出了一种波形叠加与离散元数值模拟相互耦合的方法^[47], 首先在特定爆心距处监测得到单孔爆破振动基波, 并采用波形叠加法模拟生产爆破地震波时程,

然后将模拟地震波时程作为输入,借助离散元程序(UDEC)预测爆破振动。Blair 考虑局部岩体内节理数量、间距以及走向因素^[48],提出了各向异性岩体爆破振动的近似预测模型,该模型包括两部分,第一部分是动态有限元模型(DFEM),用于模拟特定地质条件下单孔爆破振动波形;第二部分是蒙特卡罗波形叠加模型(MCWSM),用于模拟单孔爆破振波在不同起爆顺序与延期时间叠加下的爆破振动时程。Blair 同时指出^[48],在短毫秒延时起爆条件下,炮孔爆破推进方向与岩体节理走向间的夹角对 PPV 有显著影响。基波叠加预测法属于爆破振动全历程预测方法,可实现对振速、频率与持时的综合预测。研究表明^[49-51],线性叠加模型想要获得比较理想的效果就要控制雷管延时误差小于 1~3 ms。电子雷管在爆破振动效应控制和改善岩石破碎效果方面具有较大优势,同时契合国家对民爆器材精准管控需求,基波叠加预测法在爆破振动预测及控制方面将发挥愈趋重要的作用。然而,该方法注重振动基波的精确拾取,由于监测波形覆盖了传播介质在爆破过程中的振动特性^[3,38],极大影响基波叠加模型的预测精度。因此,如何保证爆破振动采集设备的准确性和周期性校准校验是保证其有效性的关键^[52]。

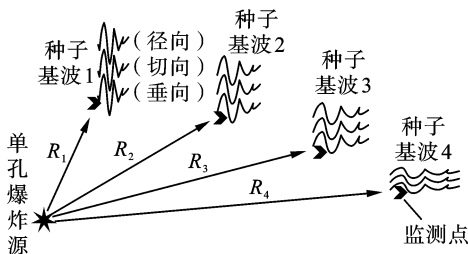


图 4 多组种子基波测量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of multi-group seed fundamental waves measurement

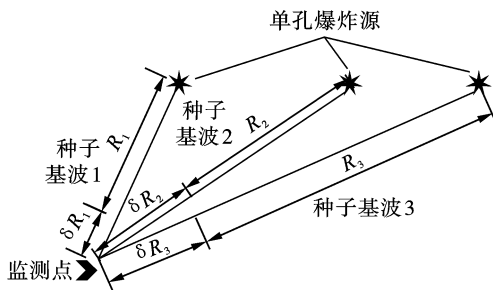


图 5 种子基波选取示意图

Fig. 5 Schematic diagram of seed fundamental wave selection

1.3 人工智能预测方法

1.3.1 神经网络方法(Artificial Neural Network, ANN)

PPV 影响因素间存在显著的非线性关系^[53],很

难得到 PPV 与各参数间的确定性关系。随着计算机科学的飞速发展,出现了各类人工智能预测方法。其中,人工神经网络(ANN)不需要事先假设数据或变量遵循某种规律与内在联系,只用对输入、输出变量进行加权学习,对处理强随机性、模糊性及不确定性的 PPV 预测问题适应性较强,其结构图如图 6 所示。目前,与神经网络相结合的各种人工智能预测模型中,模糊神经网络(FNN)^[54-56]、BP(Back Propagation)神经网络模型在 PPV 预测中应用较多^[57-60];但是,这两类模型在网络学习过程中极易陷入局部极小,且具有较低的收敛速率和泛化能力,无法在实际工程中得到推广应用^[53,61]。Amiri 将 ANN 和最近邻算法(K-nearest Neighbors, KNN)相结合^[62],构建了 PPV 预测的 ANN-KNN 模型,该模型表现出更好的预测性能,同时计算速度更快。

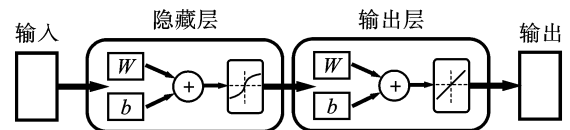


图 6 ANN 模型结构示意图

(注:修正权重参数 w 和偏置参数 b)

Fig. 6 Structure diagram of ANN model

1.3.2 支持向量机方法(Support Vector Machine, SVM)

SVM 具有较强的局部泛化能力及全局寻优能力,广泛应用于样本少、非线性、影响因子多的物理量预测中^[53,63]。支持向量回归方法(Support Vector Regression, SVR)是支持向量机的一种,其机制是将特征向量映射到高维特征空间,然后进行回归。Hasanipanah 在考虑药量和爆心距两个影响因素的条件下^[64],设计开展了 SVR 模型和经验预测方程在不同地质条件下 PPV 预测的应用研究,模型结果表明 SVR 模型的预测效果较好。Khandelwal^[65]、Mohamadnejad 等人提出了利用 SVM 模型预测地面振动速度^[66],通过比较 PPV 预测值与实测值相关性系数,发现支持向量机模型的预测结果与实际测量值更为吻合。最小二乘支持向量机(Least Squares Support Vector Machine, LS-SVM)基于支持向量机(LS-SVM)的思想,通过将支持向量机中的不等式约束转换为等价约束,有效解决了支持向量机的二次规划问题^[67,68],提高了算法的计算效率和精度。然而,SVM 对非线性问题往往没有通解,因此在选择核函数时需格外谨慎。

1.3.3 分类与回归树方法(Classification and Regression Tree, CART)

CART 模型能够在不假定样本的前提下,有效

克服数据样本中存在的非线性问题, 特别适用于处理数据与被测变量间的关联关系, 模型结构示意图见图 7。CART 模型使用基尼系数对根节点的属性进行分类, 直到分区后每个样本完全纯化后才停止构建树。在一种决策树中, 假定样本集合 D 具有 K 种类别, 其中一个类别隶属于第 K 种类别的概率是 P_k , 那么可用基尼系数来衡量数据集合 D 的纯度^[69]。

$$Gini(D) = \sum_{k=1}^N p_k(1 - p_k) = 1 - \sum_{k=1}^K p_k^2 \quad (5)$$

Khandelwal 等考虑 Q 和 R 两个因素^[70], 采用 CART 模型对 PPV 进行预测, 对比得出 CART 模型比经验方程和多元回归模型具有更高的预测能力。Hasanipah 等通过选择与 Khandelwal 等人不同的根节点参数^[71], 建立的 CART 模型, PPV 预测值与实测值 R^2 达到 0.95; 在此基础上, 选取适当的决策树最大深度和最小样本数, 对 CART 模型进行了简化, 避免了树增长过快、过拟合等问题。为了尽可能获取更高的 PPV 预测精度, 研究人员通过反复试验确定合适的最大树深和节点数^[70,71], 统计结果表明使用 CART 算法预测 PPV 的性能相对较好。然而, 与其他算法相比, CART 模型所需要的输入参数有限, 一定程度上导致其预测性能下降。同时, CART 算法忽略了参数之间的相互关联关系, 使得预测结果差强人意。

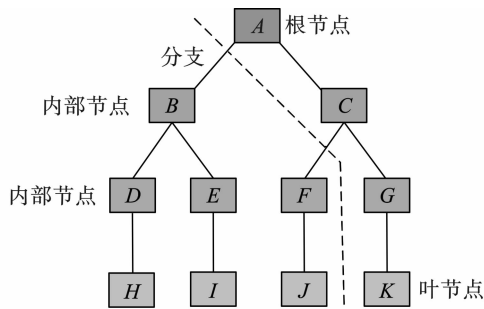


图 7 CART 模型结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of CART model

基于人工智能算法的预测模型, 较传统经验公式其预测精度均有显著提高, 但仍难满足预测误差阈值控制的要求。例如, LS-SVM 的正则化参数及核函数宽度系数通常依据经验来选择, 这对预测精度有较大影响。针对这一问题, 岳中文^[61], 何理等人将粒子群优化 (PSO) 引入到该领域^[72], 建立了基于 PSO-LSSVM 的爆破振动效应预测模型, 应用结果表明与 BP 神经网络、LS-SVM 模型相比, PSO-LSSVM 模型在泛化能力、预测准确率等方面均有较大提高。另外, 利用概率算法^[73]、遗传算法^[74,75]、模糊

推理系统 (ANFIS)^[76,77]、基因表达编程 (GEM) 等智能算法^[78,79], 在一定程度上改善了预测效果, 为多因素作用下的爆破振动效应预报提供了新的思路。

1.4 其他预测方法

卢文波等提出了基于柱面波理论、长柱状药包中子波理论以及短柱状药包激发应力波场 Heelan 解^[80], 推导了 PPV 预测的理论模型

$$PPV = kv_0 \left(\frac{r}{R} \right)^\alpha, v_0 = P_0 / \rho C_p \quad (6)$$

式中: r 为炮孔半径; P_0 为孔内爆生气体初始压力; ρ 为岩石介质密度; C_p 为岩石纵波速度; 其余符号意义同前。

与传统的经验公式模型相比, 式 (6) 具有更清晰的物理含义, 可以更好地体现炸药的种类和性质、孔径、装药结构和岩性等对 PPV 的影响。

Starfield 将柱状药包分解成多个球状药包^[81], 采用球状药包叠加法来模拟柱形装药的爆破振动场。而蒋进军则认为^[82], 多个球状药包的叠加并不能代表竖直柱状药包的辐射形态。徐全军等人在等效爆炸源模型的基础上^[83], 建立柱形药包应力场的计算公式, 并将拉氏变换和轨迹积分法相结合, 获得柱形药包的位移场与射程之间的关系。刘小鸣和陈士海以等效空洞理论为基础^[84,85], 提出了一种球形装药在爆炸过程中地面振动时程的计算方法; 考虑岩土介质黏弹性与地质弱面因素, 借助 Blair 非线性叠加理论, 建立了群孔毫秒延时爆破振动波形时程函数。但是该方法在应用时两次涉及到对场地条件系数与衰减系数的修正, 并且修正过程较为复杂。此外, Chen^[86]、Liu 等通过 UDEC 研究了节理岩体对爆炸应力波传播的衰减规律^[87]。Torano 等在考虑岩体介质非均匀性的基础上^[88], 采用有限元法对不同条件下的爆破振动效应进行了数值模拟研究。Wu 等通过 LS-DYNA 模拟了爆炸应力波的传播衰减规律^[89]。虽然数值模拟方法可再现各种复杂爆破施工工况, 可以针对具体工程进行具体分析, 并对爆区任意点处振速进行分析预测, 但是往往对理论与专业知识、数值模拟技术等要求高, 限制了其在工程的广泛应用。娄建武等首先从振动加速度响应谱中提取出振动信号功率谱^[90], 然后采用均匀分布的随机数对所研究的频率进行仿真, 然后将各频率的谐波函数进行叠加, 得到相应的振动波形。该方法可以综合分析爆破振动速度、频率与持续时间对结构物的振动损毁作用, 然而未考虑到振动信号的随机和不确定性^[42]。宋光明和娄建武提出了基于小

波包分析的爆破振动预测模型^[91,92],但该模型的模拟准确度较大依赖于传播场地衰减系数值。

2 爆破振动控制技术

工程爆破实践中主要分为主动控制与被动防护两种爆破振动控制技术,主动控制是通过优化延期时间、调整孔网参数、改变装药结果和爆破推进方向等方式控制爆破振动,而被动防护是针对特定保护对象通过开挖减振沟槽、钻取密集空孔、结构物加固等方式实现的。由于爆破振动主动控制技术具有灵活经济、可操作性强等优点,目前广泛应用于实际工程。随着高精度数码电子雷管的快速普及与推广应用,爆破设计方案的调整空间进一步拓宽,使得爆破振动主动控制技术得到了长足发展。考虑到我国现行爆破安全规程(GB 6722—2014)采用振速-主频双指标控制标准,以下主要从毫秒延时干扰减振法、爆破振动频谱控制法两方面进行论述。

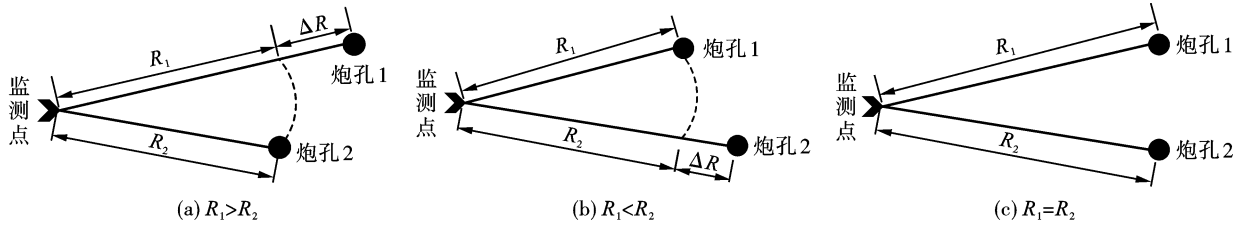


图8 炮孔和监测点位置关系

Fig. 8 Position relationship between blast-hole and monitoring point

图8中:监测点距离炮孔1和炮孔2的距离为 R_1 、 R_2 ,距离差 $\Delta R = |R_1 - R_2|$ 。

当 $R_1 > R_2$ 时,孔间合理延期时间 Δt 为

$$\Delta t = \frac{n}{2k_f} \left(\frac{QR_2^2}{C_s^7} \right)^{\frac{1}{5}} + \frac{\Delta R}{C_p} \quad (7)$$

当 $R_1 < R_2$ 时,孔间合理延期时间 Δt 为

$$\Delta t = \frac{n}{2k_f} \left(\frac{QR_2^2}{C_s^7} \right)^{\frac{1}{5}} - \frac{\Delta R}{C_p} \quad (8)$$

当 $R_1 = R_2$ 时,孔间合理延期时间 Δt 为

$$\Delta t = \frac{n}{2k_f} \left(\frac{QR_1^2}{C_s^7} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (9)$$

式(7)~(9)中: n 为正整数; k_f 为频率系数, $k_f = 0.01 \sim 0.02$; C_s 为岩体横波速度;其余符号意义同前。

张丹通过现场试验研究得到毫秒延时爆破PPV随延期时间增加逐渐降低^[99],直到达到最优延期时间时出现最小值,而后又随延期时间增加出现增大现象,最终当分段振波不存在叠加现象时稳定在单段爆破PPV水平。可见爆破振动波形在叠加时并

2.1 毫秒延时干扰减振法

以往确定毫秒延时爆破最优延期时间进行减振的思路,一种是根据爆源和岩石性质及孔网参数,利用经验公式确定孔(排)间最优延期时间^[93];另一种是尽可能减小单响药量并增大段间延期时间,避免分段地震波主震相叠加^[94]。不同于前述两种减振思路,兰格福斯等人通过研究振动波形叠加干涉效应^[95],提出了通过设置延期时间等于二分之一波形主振周期实现干扰降振的理念。张光雄、杨军提出主振周期为 T 的两列地震波^[96],当延期时间满足 $kT + T/3 < \Delta t < kT + 2T/3$ 时(其中 k 为正整数),则可使两列地震波在一定程度上互相抵消。

基于分段振波叠加干扰减振理念,李顺波^[97]、钟冬望等针对不同炮孔与监测点位置情况(图8)^[98],提出了合理孔间延期时间的计算公式(式(7)~式(9)),并分别给出了模型试验尺度下特定监测点处的合理延期时间建议值。

不总是产生干扰相消与错峰减振效果,也会出现峰峰叠加导致的振速增强现象,薛孔宽等从概率的角度对此问题进行了分析^[27],认为 n 段毫秒延时爆破振动增强的概率约为 0.5^{n-1} 。郭华杰结合隧道爆破实践研究指出^[100],在考虑半周期做延期时间的情况下,仍需通过多次试爆并借助波形分析确定合理延期时间,才能达到干扰错峰减振的目的。由于爆破振动波形频率成分复杂,随传播距离增加各谐波分量衰减速度存在较大差异,爆破地震波传播过程中振动主频并非线性衰减。同时,爆破振动波形周期随距离变化近似按照三次多项式形式逐渐增大,但要做到准确预测爆破振动波形主振周期则极为困难^[101]。因此,延期时间优选应考虑爆心距因素,这使得通过设置延期时间 $\Delta t = T/2$ (T 为主振周期)实现干扰减振的技术仅仅停留在理论层面,实践中较难实现。此外,凌同华通过准确识别毫秒延时爆破各段别实际起爆时刻^[102],借助时-频转换技术成功分离出各分段振动波形,并基于线性叠加原理将分段振波以不同延期时间进行叠加,分析得到了PPV

随延期时间的变化。钟冬望、何理等通过现场监测不同保护物处爆破振动波形^[38],依据线性叠加原理计算出不同爆心距处合理延期时间值,结果表明合理延期时间是一个或多个时间区间,并且不同距离处的合理延期时间值不同,如图9所示。

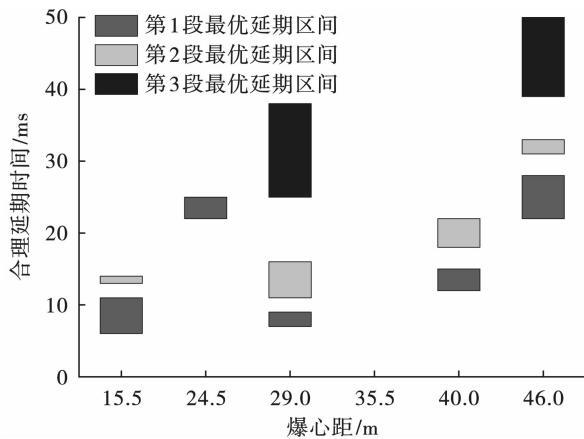


图9 合理延时区间随爆心距变化关系

Fig. 9 Variation of reasonable delay interval with distance between explosion source and measuring point

陈士海根据一次测量的爆破振动数据^[103],对不同延期时间的叠加信号进行了时频特性分析,发现其主要频率随着延期时间的增加而呈现出锯齿状的阶梯状分布;单段激振特征值越接近,干扰叠加降噪的效果就越显著。魏晓林、郑炳旭则主张采用以双孔为组^[104],组内爆破地震波时移半周期起爆,提出了孔内短延时干扰减振和组间长延时起爆的思想。Gou和Shi等人基于蒙特卡罗方法的爆炸损伤模型^[105],通过叠加分析优化延期时间,以减轻爆破振动,该方法适用于短毫秒延时爆破情况,并未考虑炮孔方位导致的爆心距差异因素。为了更加便捷高效地利用干扰减振方法控制爆破振动,Aldas开发了一套基于该理念的控制系統^[106],通过实测获取目标点处子波信号与传播场地面波速度,考虑各孔爆心距差异将子波以不同延期时间叠加模拟群孔毫秒延时爆破,选取目标点处合理延期时间值。

2.2 爆破振动频谱控制法

国内外学者采用理论分析、数值模拟和实验研究相结合的手段^[107-114],系统研究了爆源因子、起爆模式、传播介质和地质条件等因素对爆破振动频率的影响规律。研究发现:爆破荷载上升时间对频谱范围的影响较大,而加载时间、装药结构和装药量等因素对频率谱的高低频分量所占的比重和频率的衰减速率有较大的影响;随着炮孔间距、装药量和爆心距的增大,爆破振动频谱逐步向低频偏移;随着爆心

距的增大,爆破振动主频并非严格衰减,在一定范围内发生了局部突变,然而其质心频率呈现显著的衰减趋势;主频与岩石品质因子、岩体弹模及纵波速度成正比,与装药半径、装药长度呈反比;构造软弱面上如裂缝和节理均有高频滤波作用,对频率高、波长短的爆破应力波易于滤除;由于自由面的存在,使爆源的振动频率和高频能量所占的比例增大,而爆源与自由面之间的距离愈近,则振动频率愈高;通过改变起爆模式和减少单个起爆点引爆装药段长度,可以使爆破振动主频得到提高。可以看出,这些结论多是针对爆破振动主频及频谱结构相关规律的定性描述,并且由于炸药爆炸过程的复杂特性、传播介质及地质条件等因素的不可控性,使得爆破振动频谱主动控制研究较为困难。

很多学者提出通过调整延期时间控制爆破振动频谱结构,Blair较早提出若孔间延期时间为定值^[33],则爆破振动频谱在该延期时间倒数处会出现突峰值。Andrews^[115]、Anderson研究指出^[116],通过主动调整延期时间,实现对爆破振动的频谱组成进行调节,从而规避建筑物自振频段,降低爆破振动的危害性。Blair通过定义结构振动因子 F_V 来表征爆破振动在结构物自振频带内的相对能量比值^[32],其计算公式如下

$$F_V = \frac{\int_{f_1}^{f_2} P(f, x) df}{(f_2 - f_1) \int_0^{f_u} P(f, x) df} \quad (10)$$

式中: $f_1 \sim f_2$ 为建(构)筑物的自振频带范围; f_u 为爆破振动频率上限值; $P(f, x)$ 为关于参数 x 的群孔爆破振动功率谱,例如延期时间、延迟段数或孔间距等。

当式(10)中结构振动因子 F_V 大于1时,表明建(构)筑物在爆破振动作用下较大概率出现共振,不利于振动安全控制;通过研究结构振动因子 F_V 与延期时间的变化关系从而确定最优延期时间值。

Yang提出采用合理延期时间引导振动主频偏移到潜在偏移频率^[117],避免建(构)筑物产生共振损坏。施富强提出采用毫秒延时技术控制强迫振动形成基频^[118],调整炮孔推进方向形成多普勒效应实现频率偏移。陈建龙、卢文波开展了爆破振动频率偏移机制的数值实验研究^[119],揭示了多普勒效应对爆破振动频率的影响机理,并绘制出了爆源周围频率分布椭圆。Li通过动力有限元计算获取单孔爆破时边坡不同测点处振动波形^[120],并考虑爆破振动速度的高程放大效应,对归一化波形进行幅

值调整作为种子基波,而后通过叠加方法模拟群孔爆破振动时程曲线,得到PPV及结构振动因子随延期时间^[32]、测点高程的变化关系,最终确定合理延期时间值,实现了对溪洛渡大坝坝肩边坡爆破振动频谱的有效控制。然而该方法未考虑岩石破裂、节理及爆破损伤区域的振动屏蔽效应。

可以看出,目前针对爆破振动频谱控制,主要还是体现在孔(段)间延期时间的优化上,并且很多研究成果仅仅停留在理论层面或模型试验尺度条件下,缺乏大规模的现场应用实例进行验证,爆破振动频谱主动调控研究有待进一步加强。

3 展望

工程爆破行业要朝着更加绿色、安全、低碳、智能、高效、和谐的方向发展,亟需广泛吸收相关学科领域先进研究成果与技术方法,顺应信息化时代潮流,发展爆破新理念,革新爆破新技术,研发爆破新装备,实现爆破振动的准确预测及精确控制。在系统梳理爆破振动强度预测与主动控制相关理论及技术的基础上,对未来需要重点研究的几个方面内容进行展望:

(1)制定爆破振动监测国家标准规范,建立全国范围内的爆破振动监测数据共享云平台,借助先进信息处理技术构建“工程特征-设计参数-振动幅值”数据库,为复杂环境下爆破振动强度预测提供支撑。

(2)实测爆破地震波时程蕴含着丰富的关联爆源参数、传播介质力学性质、场地地形条件、建(构)筑物动态响应的特征信息,将先进成熟的信号分析技术与机器学习算法进行有效融合,揭示地震波时程蕴含的内在细节特征,找到信号处理结果的确切物理意义,深入挖掘爆破振动时频域特征信息。

(3)现有的非线性叠加模型没有考虑不同炮孔振动波形的差异。由于爆破过程中非线性关系的影响,有必要进一步研究每个炮孔的振动波形特征,推导出更完善的非线性模型来预测爆破振动全历程,进而实现爆破振动三要素的综合预测。

(4)现有振动控制方法多是针对某一特定目标进行保护,难以实现施工现场不同距离处的多目标振动控制。深入开展新型爆破装备和数据采集设备研发工作,强化爆破振动预报方法研究,形成基于多目标防护的爆破振动控制技术。

参考文献 (References)

[1] PARIDA A, MISHRA M K. Blast vibration analysis by

different predictor approaches-a comparison[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015, 11: 337-345.

- [2] 刘义佳,卢文波,陈明,等. 结构爆破振动响应的频率与持续时间依赖性分析[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(8): 189-199.
- [2] LIU Yi-jia, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Frequency and duration dependence analysis of structural blasting vibration response [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(8): 189-199. (in Chinese)
- [3] YU Yan, HOU Xiao-meng, FEI Hong-lu. Review of predicting the blast-induced ground vibrations to reduce impacts on ambient urban communities [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 260: 121135.
- [4] 霍永基. 爆破地震效应及安全评定方法[M]. 北京:冶金工业出版社, 1985.
- [4] HUO Yong-ji. *Blasting seismic effect and safety assessment method* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985. (in Chinese)
- [5] DUVALL W I, PETKOF B. Spherical propagation of explosion of generated strain pulses in rocks [R]. *USBM, RI-5483*, 1959: 21-25.
- [6] LANGEFORS U, KIHLLSTROM B. *The Modern Technique of Rock Blasting* [M]. Wiley, New York, 1963: 405.
- [7] 汪旭光,于亚伦. 关于爆破震动安全判据的几个问题[J]. *工程爆破*, 2001, 7(2): 88-92.
- [7] WANG Xu-guang, YU Ya-lun. On several problems of safety criterion for blasting vibration [J]. *Engineering Blasting*, 2001, 7(2): 88-92. (in Chinese)
- [8] Indian Standard Institute. *Criteria for safety and design of structures subjected to underground blast*. *ISI Bull IS-6922* [S]. 1973.
- [9] GHOSH A, DAEMEN J K. A simple new blast predictor of ground vibrations induced predictor [C] // *Proceedings of the 24th US Symposium on Rock Mechanics*, Texas, USA, 1983.
- [10] GUPTA R N, ROY P P, SING B. On a blast induced blast vibration predictor for efficient blasting [C] // *Proceedings of the 22nd International Conference of Safety in Mines*, 1988: 1015-1021.
- [11] BILGIN A, ESEN S, KILIC M, et al. TKI bell lignite plant research for solving environmental problems caused by blasting [C] // *Turkish Coal Enterprise*, Ankara, 1998.
- [12] MURMU S, MAHESHWARI P, VERMA H K, et al. Empirical and probabilistic analysis of blast-induced ground vibrations [J]. *Int J Rock Mech Min*, 2018, 103: 267-274.
- [13] ROY P P. Prediction and control of ground vibrations due to blasting [M]. *Colliery Gaurdian*, 1991: 210-215.

- [14] YILMAZ O. The comparison of most widely used ground vibration predictor equations and suggestions for the new attenuation formulas [J]. *Environ Earth Sci*, 2016, 75(3):1-11.
- [15] 周同岭,杨秀甫,翁家杰. 爆破地震高程效应的实验研究[J]. *建井技术*, 1997, 18(S1):31-35.
- [15] ZHOU Tong-ling, YANG Xiu-fu, WENG Jia-jie. Experimental study on elevation effect of blasting earthquake [J]. *Mine Construction Technology*, 1997, 18(S1):31-35. (in Chinese)
- [16] 朱传统,刘宏根,梅锦煜. 地震波参数沿边坡坡面传播规律公式的选择[J]. *爆破*, 1988, 10(2):33-34.
- [16] ZHU Chuan-tong, LIU Hong-gen, MEI Jin-yu. Selection of propagation law formula of seismic wave parameters along slope [J]. *Blasting*, 1988, 10(2):33-34. (in Chinese)
- [17] 宋光明,陈寿如,史秀志,等. 露天矿边坡爆破振动监测与评价方法的研究[J]. *有色金属:矿山部分*, 2000(4):24-27.
- [17] SONG Guang-ming, CHEN Shou-ru, SHI Xiu-zhi, et al. Study on monitoring and evaluation method of blasting vibration in open pit slope [J]. *Nonferrous Metals (Mine Section)*, 2000(4):24-27. (in Chinese)
- [18] 刘美山,吴从清,张正宇. 小湾水电站高边坡爆破震动安全判据试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2007, 24(1):40-43.
- [18] LIU Mei-shan, WU Cong-qing, ZHANG Zheng-yu. Experimentation on judging standard of blasting vibration safety in high slope excavation of Xiaowan Hydropower Station [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2007, 24(1):40-43. (in Chinese)
- [19] 唐海,李海波. 反映高程放大效应的爆破振动公式研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3):820-824.
- [19] TANG Hai, LI Hai-bo. Study of blasting vibration formula of reflecting amplification effect on elevation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3):820-824. (in Chinese)
- [20] 何理,钟冬望,李鹏,等. 下穿隧道爆破荷载激励下边坡振动预测及能量分析[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(7):105-114.
- [20] HE Li, ZHONG Dong-wang, LI Peng, et al. Vibration prediction and energy analysis of slope under blasting load in underpass tunnel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(7):105-114. (in Chinese)
- [21] HAKAN A k, MELIH I, MAHMUT Y, et al. Evaluation of ground vibration effect of blasting operations in a magnesite mine [J]. *Soil Dynam Earthq Eng*, 2009, 29(4):669-676.
- [22] SIMANGUNSONG G, WAHYUDI S. Effect of bedding plane on prediction blast-induced ground vibration in open pit coal mines [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2015, 79:1-8.
- [23] KUMAR R, CHOUDHURY D, BHARGAVA K. Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties [J]. *J Rock Mech Geotech Eng*, 2016, 8:341-349.
- [24] 顾毅成. 对毫秒延时爆破地震公式的讨论[J]. *铁道建筑*, 2005(Z1):73-75.
- [24] GU Yi-cheng. Discussion on seismic formula concerning multistage millisecond explosion [J]. *Railway Engineering*, 2005, (Z1):73-75. (in Chinese)
- [25] 吴绵拔. 土岩微差爆破的振动效应[J]. *土工基础*, 2005(6):75-76.
- [25] WU Mian-ba. The vibration effect of micro timelag in soil and rock [J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2005(6):75-76. (in Chinese)
- [26] 薛孔宽,唐光荣,曹恒安,等. 分段微差爆破地震效应的叠加分析[J]. *爆破*, 1991, 8(3):67-71.
- [26] XUE Kong-kuan, TANG Guang-rong, CAO Heng-an, et al. Superposition analysis of seismic effect of segmented millisecond blasting [J]. *Blasting*, 1991, 8(3):67-71. (in Chinese)
- [27] 龙源,冯长根,徐全军,等. 爆破地震波在岩石介质中传播特性与数值计算研究[J]. *工程爆破*, 2000(3):1-7.
- [27] LONG Yuan, FEN Chang-gen, XU Quan-jun, et al. Study on propagation characteristics of blasting seismic waves in a rock medium and numerical calculation [J]. *Engineering Blasting*, 2000(3):1-7. (in Chinese)
- [28] 杨年华. 基于经验格林函数方法的爆破振动预测[J]. *工程爆破*, 2016, 22(5):32-36.
- [28] YANG Nian-hua. Prediction of blasting vibration based on empirical Green's function method [J]. *Engineering Blasting*, 2016, 22(5):32-36. (in Chinese)
- [29] 何理,杨仁树,钟冬望,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):129-141.
- [29] HE Li, YANG Ren-shu, ZHONG Dong-wang, et al. Calculation of equivalent charge weight per delay and vibration velocity prediction for millisecond delay blasting [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(9):129-141. (in Chinese)
- [30] 何理,杨仁树,钟冬望,等. 非电起爆网路修正单响药量计算及PPV预测应用实例[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(15):54-62.
- [30] HE Li, YANG Ren-shu, ZHONG Dong-wang, et al. Calculation of modified charge amount per delay in non-electric initiation network and its application in onsite

- PPV prediction [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(15): 54-62. (in Chinese)
- [31] ANDERSON DA, RITTER AP, WINZER SR, et al. A method for site-specific prediction and control of ground vibration from blasting [C] // *International Society of Explosive Engineers. Proceeding 11th Annual Conference Explosives and Blast Technique*, New Orleans; Academic Press, 1985: 94-104.
- [32] BLAIR DP. Blast vibration control in presence of delay scatter and random fluctuations between blastholes [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1993, 17(2): 95-118
- [33] BLAIR DP. The measurement, modelling and control of ground vibrations due to blasting [C] // *Second International Symposium Rock Fragmentation by Blasting*, Colorado, 1987. 88-101.
- [34] HINZEN KG. Modelling of blast vibration [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 1988, 25(6): 435-445.
- [35] 卢文波, 王进攻. 爆源中远区的爆破振动场模拟 [J]. *爆破*, 1996, 13(3): 8-11.
- [35] LU Wen-bo, WANG Jin-gong. A simulation of blasting vibration in middle and far field of explosion source [J]. *Blasting*, 1996, 13(3): 8-11. (in Chinese)
- [36] ZHANG Zong-Xian, NAARTTIJAERVI T. Reducing ground vibrations caused by underground blasts in LKAB Malmberget mine [J]. *Fragblast-International Journal of Blasting and Fragmentation*, 2005, 9(2): 61-78.
- [37] 杨年华, 张 乐. 爆破振动波叠加数值预测方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(1): 84-90.
- [37] YANG Nian-hua, ZHANG Le. Blasting vibration waveform prediction method based on superposition principle [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(1): 84-90. (in Chinese)
- [38] 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): 703-809.
- [38] ZHONG Dong-wang, HE Li, CAO Peng, et al. Analysis of blasting vibration duration and optimizing of delayed time interval for millisecond blasting [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(5): 703-809. (in Chinese)
- [39] 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]. *金属矿山*, 2021(11): 41-48.
- [39] HE Li, XIE Xian-qi, HAN Chuan-wei, et al. Delay time interval optimization of electronic detonator based on spectrum analysis and linear superposition of seismic wave [J]. *Metal Mine*, 2021(11): 41-48. (in Chinese)
- [40] IWANO K, HASHIBA K, NAGAE J, et al. Reduction of tunnel blasting induced ground vibrations using advanced electronic detonators-ScienceDirect [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2020, 105: 103556.
- [41] BLAIR DP. Non-linear superposition models of blast vibration [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2008, 45(2): 235-247.
- [42] 李 鹏, 卢文波, 陈 明. 爆破振动全历程预测及主动控制研究进展 [J]. *力学进展*, 2011, 41(5): 537-546.
- [42] LI Peng, LU Wen-bo, CHEN Ming. Advances in full time-history prediction and active control of blasting vibration [J]. *Advances in Mechanics*, 2011, 41(5): 537-546. (in Chinese)
- [43] LIU Jun, ZHANG Yu, YUN Bin. A new method for predicting nonlinear structural vibrations induced by ground impact loading [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, 331(9): 2129-2140.
- [44] 孙玉平, 刘 军. 结构倒塌触地振动效应非线性预测方法研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2013, 9(5): 1155-1160.
- [44] SUN Yu-ping, LIU Jun. Research on nonlinear prediction method for touchdown vibration effect induced by structural collapse [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013, 9(5): 1155-1160. (in Chinese)
- [45] YANG Rui-lin, SCOVIRA DS. A model for near and far-field blast vibration based on multiple seed waveforms and transfer functions [C] // *In 36th Conference explosives and blasting technique*, Orlando, Florida, 2010.
- [46] XIE Lian-ku, XIONG Dai-yu, YANG Tian-hong, et al. A method for multihole blasting seismic wave prediction and its application in pillar recovery [J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 9: 569453.
- [47] AZIZABADI H, MANSOURI H, FOUCHÉ O. Coupling of two methods, waveform superposition and numerical, to model blast vibration effect on slope stability in jointed rock masses [J]. *Computers & Geotechnics*, 2014, 61: 42-49.
- [48] BLAIR DP. Approximate models of blast vibration in non-isotropic rock masses [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 128: 104245.
- [49] HINZEN KG, LUDELING R, HEINEMEYER F, et al. A new approach to predict and reduce blast vibration by modelling of seismograms and using a new electronic initiation system [C] // *Proceedings of the 13rd Conference on Explosives and Blasting Techniques*, 1987. 144-161.
- [50] 徐全军, 毛志远, 张庆明, 等. 深孔微差爆破震动预报

- 浅析. 爆炸与冲击, 1998, 18(2):182-186.
- [50] XU Quan-jun, MAO Zhi-yuan, ZHANG Qing-ming, et al. The analysis of ground vibration prediction of delay fired bench blasting [J]. *Explosion and Shock Waves* 1998, 18(2):182-186. (in Chinese)
- [51] 张志毅, 杨年华, 卢文波, 等. 中国爆破振动控制技术的新进展 [J]. *爆破*, 2013, 30(2):25-32.
- [51] ZHANG Zhi-yi, YANG Nian-hua, LU Wen-bo, et al. Progress of blasting vibration control technology in China [J]. *Blasting*, 2013, 30(2):25-32. (in Chinese)
- [52] 钟明寿, 谢全民, 刘影, 等. 爆破振动危害智能监测系统研究进展 [J]. *爆破器材*, 2017, 46(3):57-64.
- [52] ZHONG Ming-shou, XIE Quan-min, LIU Ying, et al. Research progress of intelligent monitoring system for blasting vibration damage [J]. *Explosive Materials*, 2017, 46(3):57-64. (in Chinese)
- [53] 岳中文, 吴羽霄, 魏正, 等. 基于 PCA-GA-SVM 的露天矿爆破振动速度预测模型研究 [J]. *工程爆破*, 2021, 27(4):22-28, 39.
- [53] YUE Zhong-wen, WU Yu-xiao, WEI Zheng, et al. Research on a prediction model of blasting vibration velocity in an open-pit mine based on PCA-GA-SVM [J]. *Engineering Blasting*, 2021, 27(4):22-28, 39. (in Chinese)
- [54] ZHONG Dong-wan. Study on the forecast of blasting vibration peak value based on the fuzzy neural network [C]//The 7th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Beijing, China, 2002:263-266.
- [55] 史秀志, 林大能, 陈寿如. 基于粗糙集模糊神经网络的爆破振动危害预测 [J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(4):401-407.
- [55] SHI Xiu-zhi, LIN Da-neng, CHEN Shou-ru. Blasting-vibration-induced damage prediction by rough set-based fuzzy-neural network [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(4):401-407. (in Chinese)
- [56] YUAN Qing, WU Li, ZUO Qing-jun, et al. Peak particle velocity and principal frequency prediction based on RS-FNN comprehension method for blasting vibration [J]. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 19(S2):10043-10056.
- [57] 徐全军, 张庆明, 恽寿榕. 爆破地震峰值的神经网络预报模型 [J]. *北京理工大学学报*, 1998, 18(4):472-475.
- [57] XU Quan-jun, ZHANG Qing-ming, YUN Shou-rong. Neural network prediction model of blasting seismic peak value [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 1998, 18(4):472-475. (in Chinese)
- [58] 唐海, 石永强, 李海波. 基于神经网络的爆破振动速度峰值预报 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(1):3533-3539.
- [58] TANG Hai, SHI Yong-qiang, LI Hai-bo. Prediction of peak velocity of blasting vibration based on neural network [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(1):3533-3539. (in Chinese)
- [59] MOSTAFA Tantawy Mohamed. Artificial neural network for prediction and control of blasting vibrations in Assiut (Egypt) limestone quarry [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 2009, 46:426-431.
- [60] KHANDELWAL K, SINGH TN. Prediction of blast induced ground vibrations and frequency in opencast mine: a neural network approach [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006(289):711-725.
- [61] 岳中文, 吴羽霄, 魏正, 等. 基于 PSO-LSSVM 模型的露天矿爆破振动效应预测 [J]. *爆破*, 2020, 26(6):1-8.
- [61] YUE Zhong-wen, WU Yu-xiao, WEI Zheng, et al. Prediction of blasting vibration effect in open-pit mine based on PSO-LSSVM model [J]. *Engineering Blasting*, 2020, 26(6):1-8. (in Chinese)
- [62] AMIRI M, AMNIEH H B, HASANIPANAH M, et al. A new combination of artificial neural network and K-nearest neighbors models to predict blast-induced ground vibration and air-overpressure [J]. *Engineering with Computers*, 2016, 32(4):631-644.
- [63] 梅比, 汪旭光, 杨仁树. 基于 Adaboost-SVM 组合算法的爆破振动强度预测研究 [J]. *振动与冲击*, 2018, 38(18):231-235.
- [63] MEI Bi, WANG Xu-guang, YANG Ren-shu. Prediction of blasting vibration intensity based on Adaboost-SVM combination algorithm [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 38(18):231-235. (in Chinese)
- [64] HASANIPANAH M, MONJEZI M, SHAHNAZAR A, et al. Feasibility of indirect determination of blast induced ground vibration based on support vector machine [J]. *Measurement*, 2015:289-295.
- [65] KHANDELWAL M, KANKAR P K. Evaluation and prediction of blast induced ground vibration using support vector machine [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2010, 20(1):64-70.
- [66] MOHAMADNEJAD M, GHOLAMI R, ATAEI M. Comparison of intelligence science techniques and empirical methods for prediction of blasting vibrations [J]. *Tunneling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2012, 28:238-244.
- [67] SAMUI P, KIM D. Least square support vector machine and multivariate adaptive regression spline for modeling lateral load capacity of piles [J]. *Neural Computing and Applications*, 2013, 23:1123-1127.

- [68] 卢二伟,史秀志,陈佳耀. 基于 LS-SVR 小样本容量的爆破振动峰值速度预测研究[J]. 世界科技研究与发展,2016,38(6):1258-1261.
- [68] LU Er-wei, SHI Xiu-zhi, CHEN Jia-yao. Prediction research for blasting-vibration-peak-speed based on LS-SVR in small sample space[J]. World Sci-tech R&D, 2016,38(6):1258-1261. (in Chinese)
- [69] 赵锦阳,卢会国,蒋娟萍,等. 基于改进决策树的故障诊断方法研究[J]. 成都信息工程大学学报,2018,33(6):624-631.
- [69] ZHAO Mian-yang, LU Hui-guo, JIANG Juan-pin, et al. Research on fault diagnosis method based on improved decision tree[J]. Journal of Chengdu University Of Information Technology, 2018,33(6):624-631. (in Chinese)
- [70] KHANDELWAL M, ARNAGHANI D J, FARADONBEH R S, et al. Classification and regression tree technique in estimating peak particle velocity caused by blasting[J]. Engineering With Computers,2016,32(120):1-9.
- [71] HASANIPANAH M, FARADONBEH R S, AMNIEH H B, et al. Forecasting blast-induced ground vibration developing a CART model[J]. Engineering With Computers,2017,33(2):307-316.
- [72] 何理,刘易和,李琳娜,等. 基于粒子群-最小二乘支持向量机模型的矿山爆破振动速度预测[J]. 金属矿山,2022(7):145-150.
- [72] HE Li, LIU Yi-he, LI Lin-na, et al. Prediction of blasting vibration velocity of mines based on particle swarm-least squares support vector machine model[J]. Metal Mine, 2022(7):145-150. (in Chinese)
- [73] 王林峰,邓冰杰,莫 诘,等. 基于概率论的爆破振动安全评估与控制[J]. 振动与冲击,2020,39(14):122-129.
- [73] WANG Lin-feng, DENG Bing-jie, MO Qu, et al. Safety assessment and control of blasting vibration based on the probability theory[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020,39(14):122-129. (in Chinese)
- [74] TUMENBAYAR BADRAKH-YERUUL, 夏岸雄, 张建华, 等. 基于遗传算法的神经网络在爆破振动预测中的应用[J]. 爆破,2014,31(3):140-144.
- [74] TUMENBAYAR B, XIA An-xiong, ZHANG Jian-hua, et al. Application of Neural Network based on Genetic Algorithm in Prediction of Blasting Vibration[J]. Blasting, 2014,31(3):140-144. (in Chinese)
- [75] SHI Xiu-zhi, ZHOU Jian. Prediction residential house's damage effect near openpit against blasting vibration based on SVM with Grid Searching Method/Genetic Algorithm[J]. Advanced Science Letters, 2012,11(1):238-243.
- [76] KOCASLAN A, YUKSEK A G, GORGULU K, et al. Evaluation of blast-induced ground vibrations in open-pit mines by using adaptive neuro-fuzzy inference systems [J]. Environmental Earth Sciences,2017,76(1):57.
- [77] XUE Xin-hua, YANG Xin-guo, LI Peng. Evaluation of ground vibration due to blasting using fuzzy logic [J]. Geotechnical and Geological Engineering,2017,35(3):1231-1237.
- [78] SHIRANI Faradonbeh R, JAHED Armaghani D, ABD Majid M Z, et al. Prediction of ground vibration due to quarry blasting based on gene expression programming: a new model for peak particle velocity prediction [J]. International Journal of Environmental Science and Technology,2016,13(6):1453-1464.
- [79] FARADONBEH R S, MONJEZI M. Prediction and minimization of blast-induced ground vibration using two robust meta-heuristic algorithms [J]. Engineering With Computers,2017,33(4):835-851.
- [80] 卢文波, HUSTRULID W. 质点峰值振动速度衰减公式的改进[J]. 工程爆破,2002,8(3):1-4.
- [80] LU Wen-bo, HUSTRULID W. An improvement to the equation for the attenuation of the peak particle velocity [J]. Engineering Blasting, 2002,8(3):1-4. (in Chinese)
- [81] STARFIELD AM, PUGLIESE JM. Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges: A comparison between a computer model and field measurements [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1968,5(1):65-77.
- [82] 蒋进军, BLAIR D P, BAIRD G R. 地下爆源引起的表面振动[J]. 爆破,1993,10(3):1-7.
- [82] JIANG Jin-jun, BLAIR D P, BAIRD G R. Surface vibration caused by underground explosion source [J]. Blasting, 1993,10(3):1-7. (in Chinese)
- [83] 徐全军,王希之,季茂荣,等. 柱状装药近源场爆破振动峰值预报研究 [C] // 成都:第七届全国工程爆破学术会议论文集,2001:745-750.
- [83] XU Quan-jun, WANG Xi-zhi, JI Mao-rong, et al. The research on the calculation of the stress wave field by cylinder charge [C] // Chengdu: Proceedings of the 7th National Engineering Blasting academic conference, 2001:745-750. (in Chinese)
- [84] 刘小鸣,陈士海. 隧道掘进中掏槽孔爆破引起的地表振动波形预测 [J]. 岩土工程学报,2019,41(9):1731-1737.
- [84] LIU Xiao-ming, CHEN Shi-hai. Prediction of surface vibration waveform caused by cuthole blasting in tunneling [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,

- 2019,41(9):1731-1737. (in Chinese)
- [85] 刘小鸣,陈士海. 群孔微差爆破的地表振动波形预测及其效应分析[J]. 岩土工程学报,2020,42(3):551-560.
- [85] LIU Xiao-ming, CHEN Shi-hai. Prediction and effect analysis of surface vibration waveform for group hole delay blasting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42(3):551-560. (in Chinese)
- [86] CHEN Shou-gen, ZHAO Jian. A study of UDEC modeling for blast wave propagation in jointed rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1998,35(1):93-99.
- [87] LIU Yan-qing, LI Hai-bo, ZHAO Jian, et al. Udec simulation for dynamic response of a rock slope subject to explosions[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2004,41(S1):599-604.
- [88] TORANO J, RODRIGUEZ R, DIEGO I, et al. FEM models including randomness and its application to the blasting vibrations prediction[J]. Computers and Geotechnics,2006,33(1):15-28.
- [89] WU Cheng-qing, HAO Hong. Numerical study of characteristics of underground blast induced surface ground motion and their effect on above-ground structures. Part I. Ground motion characteristics[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering,2005,25(1):27-38.
- [90] 娄建武,龙源,徐全军. 人工模拟爆破震动信号及其频谱特性检验[J]. 工程爆破,2001,7(1):7-11.
- [90] LOU Jian-wu, LONG Yuan, XU Quan-jun. Simulation of blasting vibration signal and verification of its frequency spectrum[J]. Engineering Blasting,2001,7(1):7-11. (in Chinese)
- [91] 宋光明,曾新吾,陈寿如,等. 基于波形预测小波包分析模型的降振微差时间选择[J]. 爆炸与冲击,2003,23(3):163-168.
- [91] SONG Guang-ming, ZENG Xin-wu, CHEN Shou-ru, et al. The selection of millisecond delay interval of blasting for decreasing ground vibration based on the wavelet packets prediction model of waveforms[J]. Explosion And Shock Waves,2003,23(3):163-168. (in Chinese)
- [92] 娄建武,龙源,徐全军,等. 基于小波包技术的爆破地震波特征提取及预报[J]. 爆炸与冲击,2004,24(3):261-267.
- [92] LOU Jian-wu, LONG yuan, XU quan-jun, et al. A study on the extraction and prediction of blasting seismic wave characteristics by wavelet packets technique[J]. Explosion and Shock Waves,2004,24(3):261-267. (in Chinese)
- [93] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京:煤炭工业出版社,1983. 238-239.
- [93] WANG Wen-long. Drilling and blasting[M]. Beijing: Coal Industry Press,1983:238-239. (in Chinese)
- [94] 李德林,王伟策,高振儒. 中深孔微差爆破合理间隔时间的研究[J]. 爆破,1999,16(3):74-77.
- [94] LI De-lin, WANG Wei-ce, GAO Zhen-ru. Experimental study on the rational delay interval of millisecond borehole blasting[J]. Blasting,1999,16(3):74-77. (in Chinese)
- [95] 兰格福斯 U,基尔斯特略 B,著. 岩石爆破现代技术[M].《岩石爆破现代技术》翻译组. 北京:冶金工业出版社,1983,286-289.
- [95] LANGFORTH U, KILSTROW B. Modern rock blasting technology[M]. Translation group of Modern Rock Blasting Technology. Beijing: Metallurgical Industry Press,1983:286-289. (in Chinese)
- [96] 张光雄,杨军,卢红卫. 毫秒延时爆破干扰降振作用研究[J]. 工程爆破,2009,15(3):17-21.
- [96] ZHANG Guang-xiong, YANG Jun, LU Hong-wei. Research on seismic wave interference effect of millisecond blasting[J]. Engineering Blasting,2009,15(3):17-21. (in Chinese)
- [97] 李顺波,杨军,陈浦,等. 精确延时控制爆破振动的实验研究[J]. 爆炸与冲击,2013,33(5):513-518.
- [97] LI Shun-bo, YANG Jun, CHEN Pu, et al. Experimental study of blasting vibration with precisely-controlled delay time[J]. Explosion and Shock Waves,2013,33(5):513-518. (in Chinese)
- [98] 钟冬望,何理,操鹏,等. 基于精确毫秒延时控制的爆破降振试验研究[J]. 煤炭学报,2015(S1):107-112.
- [98] ZHONG Dong-wang, HE Li, CAO Peng, et al. Experimental study of reducing vibration intensity based on controlled blasting with precise time delay[J]. Journal of China Coal Society,2015(S1):107-112. (in Chinese)
- [99] 张丹,段恒建,曾福洪. 分段爆破地震强度的试验研究[J]. 爆炸与冲击,2006,26(3):279-283.
- [99] ZHANG Dan, DUAN Heng-jian, ZENG Fu-hong. Experimental study on subordinate blasting seismic intensity[J]. Explosion and Shock Waves,2006,26(3):279-283. (in Chinese)
- [100] 郭华杰,袁绍国. 电子雷管在地铁隧道爆破降振中的应用[J]. 工程爆破,2016,22(1):56-60.
- [100] GUO Hua-jie, YUAN Shao-guo. Application of electronic detonator reducing the vibration in subway tunnel blasting[J]. Engineering Blasting,2016,22(1):56-60. (in Chinese)
- [101] 张乐,杨年华. 单孔爆破振动周期变化特征的分析[J]. 工程爆破,2013,19(4):1-4.

- [101] ZHANG Le, YANG Nian-hua. Analysis for variation characteristics of the vibration period induced by single hole blasting[J]. *Engineering Blasting*, 2013, 19(4):1-4. (in Chinese)
- [102] 凌同华, 李夕兵, 王桂尧. 爆破振动灾害主动控制方法研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(7):1439-1442.
- [102] LING Tong-hua, LI Xi-bing, WANG Gui-yao. Study on active control method of blasting vibration disaster[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(7):1439-1442. (in Chinese)
- [103] 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.
- [103] CHEN Shi-hai, YAN Yong-feng, QI Gui-feng, et al. Analysis of influence factors of interference vibration reduction of millisecond blasting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(10):3003-3008. (in Chinese)
- [104] 魏晓林, 郑炳旭. 干扰减振控制分析与应用实例[J]. *工程爆破*, 2009, 15(2):1-6.
- [104] WEI Xiao-lin, ZHENG Bing-xu. Analysis of control blast-induced vibration and practice[J]. *Engineering Blasting*, 2009, 15(2):1-6. (in Chinese)
- [105] GOU Yong-gang, SHI Xiu-zhi, QIU Xian-yang, et al. Assessment of induced vibrations derived from the wave superposition in time-delay blasts[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 144(2):104814.
- [106] ALDAS GGU, ECEVITOGU B. Waveform analysis in mitigation of blast-induced vibrations[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2008, 66(1-2):25-30
- [107] 范磊, 沈蔚. 爆破振动频谱特性实验研究[J]. *爆破*, 2001, 18(4):18-20.
- [107] FAN Lei, SHEN Wei. Experimental study on frequency spectrum characteristics of blast vibration wave[J]. *Blasting*, 2001, 18(4):18-20. (in Chinese)
- [108] 李孝林, 王少雄, 高怀树. 爆破振动频率影响因素分析[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2006, 25(2):204-206.
- [108] LI Xiao-lin, WANG Shao-xiong, GAO Huai-shu. Analysis of factors affecting blasting vibration frequency[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*, 2006, 25(2):204-206. (in Chinese)
- [109] 李鹏, 卢文波, 吴新霞, 等. 爆源因素对岩体开挖爆破振动频谱特性的影响研究[J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(11):182-188.
- [109] LI Peng, LU Wen-bo, WU Xin-xia, et al. Influence of blast source parameters on spectral characteristics of vibration induced by blast of rock mass[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(11):182-188. (in Chinese)
- [110] 卢文波, 张乐, 周俊汝, 等. 爆破振动频率衰减机制和衰减规律的理论分析[J]. *爆破*, 2013, 30(2):1-6, 11.
- [110] LU Wen-bo, ZHANG Le, ZHOU Junru, et al. Theoretical analysis on decay mechanism and law of blasting vibration frequency[J]. *Blasting*, 2013, 30(2):1-6, 11. (in Chinese)
- [111] 杨建华, 卢文波, 严鹏, 等. 全断面开挖爆破产生的自由面对振动频率的影响研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(7):192-197.
- [111] YANG Jian-hua, LU Wen-bo, YAN Peng, et al. Influences of blast-created free surfaces on blasting vibration frequencies during full-face excavation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(7):192-197. (in Chinese)
- [112] 饶宇, 夏元友, 胡英国, 等. 预裂缝对爆破振动频谱分布特征的影响[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(7):191-198.
- [112] RAO Yu, XIA Yuan-you, HU Ying-guo, et al. Influence of pre-splitting crack on spectrum distribution characteristics of blasting vibration[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(7):191-198. (in Chinese)
- [113] RICHARDS AB, MOORE AJ. Factors affecting frequency control of blast vibration[C]//WANG X. *New Development on Engineering Blasting*. Beijing, China: Metallurgical Industry Press, 2017:305-310.
- [114] 李新平, 张雪屏, 刘飞香, 等. 群孔齐发爆破岩体振动频谱特性研究[J]. *爆破*, 2021, 38(1):14-20, 35.
- [114] LI Xin-ping, ZHANG Xue-ping, LIU Fei-xiang, et al. Vibration spectrum characteristics of rock mass in simultaneous borehole blasting[J]. *Blasting*, 2021, 38(1):14-20, 35. (in Chinese)
- [115] ANDREWS AB. Design criteria for sequential blasting[C]//*Proceeding of the Seventh Conference on Explosives and Blasting Techniques*, 1980:173-192.
- [116] ANDERSON DA, WINZER SR, RITTER AP. Blast design for optimizing fragmentation while controlling frequency of ground vibration[C]//*Proceedings of the 8th Conference on Explosives and Blasting Technique*, New Orleans, 1982:69-89.
- [117] YANG Rui-lin. PPV management and frequency shifting in soft ground near highwalls to reduce blast damage[C]//*Asian-Pacific Symposium on Blasting Techniques*, Dalian, China, 2009:72-83.