近地表开采爆破动力响应及参数优化研究*

杨宁[1,2],尹贤刚[1,2],钟周颖[1,2],李泽鹏[1,2]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:为解决某铜矿矿体正上方文物区及文物群受开采爆破振动影响的问题,对近地表开采爆破动力响应及参数优化开展了系统研究。首先,分析了地表文物区与矿体的关系,结合国内外爆破振动安全判据确定了最大允许爆破振动速度,并基于M.A.萨道夫斯基经验公式得出爆破安全允许距离内的最大单段爆破炸药量;然后,通过数值模拟对全生命周期开采中最靠近地表的1 945 m、2 020 m、2 095 m、2 245 m四个中段进行爆破模拟,验证了最大单段爆破炸药量的合理性;最后,在井下代表性中段爆破时,于地表布置测点开展了爆破振动测试。结果表明,4个中段爆破的单段最大药量分别为745 kg、390 kg、172.5 kg、10 kg,均等于或小于允许的单段最大炸药量;2 245 m中段爆破引起的地表振动速度峰值为0.5 cm/s,大于其他3个中段,小于所允许的最大振速,爆破地震波对地表构筑物无影响。基于现场爆破振动数据构建了SSA-Elman神经网络Y方向爆破振动预测模型,并与传统Elman神经网络模型进行对比,SSA-Elman神经网络模型预测值与实测值基本吻合,平均MAE为0.01,验证了其准确性。研究成果为该铜矿其他中段爆破参数设计提供了依据。

关键词:爆破振动;参数优化;单段爆破炸药量;SSA-Elman神经网络预测模型

中图分类号:TD235.4 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)07-0062-09

Research on Dynamic Response and Parameter Optimization of Blasting in Near-Surface Mining

Yang Ning[1,2], *Yin Xiangang*[1,2], *Zhong Zhouying*[1,2], *Li Zepeng*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: To solve the problem that the cultural relic area and cultural relic group directly above a copper ore body are affected by mining blasting vibration, the dynamic response and parameter optimization of blasting in near-surface mining were systematically studied. Firstly, the relationship between the surface cultural relic area and the ore body was analyzed, and the maximum allowable blasting vibration velocity was determined by combining domestic and international safety criteria for blasting vibration. Based on the M. A. Sadovsky empirical formula, the maximum single-delay blasting explosive charge within the blast safety distance was obtained. Then, blasting simulations of the four levels at 1 945 m, 2 020 m, 2 095 m and 2 245 m closest to the surface throughout the mine's life cycle were carried out by numerical simulation, and the rationality of the maximum single-delay blasting explosive charge was verified. Finally, during blasting at the representative level underground, surface vibration tests were conducted using measuring points arranged on the surface. The results show that the maximum single-delay explosive charges at the four level are 745 kg, 390 kg, 172.5 kg and 10 kg, respectively, all of which are equal to or less than the allowable maximum single-delay explosive charge. The surface peak vibration induced by blasting velocity at the 2 245 m level is 0.5 cm/s, which is greater than that of the other three levels, but remains less than the maximum allowable vibration velocity, indicating that the blasting seismic wave has no effect on the surface structures. Based on the field blasting vibration data, an SSA-Elman neural network model for predicting Y-direction blasting vibration was constructed and compared with the traditional Elman neural network model. The predicted values of the SSA-Elman neural network model are basically consistent with the measured values, with an average MAE of 0.01, which verifies its accuracy. The research results provide a basis for the design of blasting parameters for other levels of the copper mine.

Key words: Blasting vibration, Parameter optimization, Single-delay blasting explosive charge, SSA-Elman neural network prediction model

---

* **收稿日期**:2025-08-18
基金项目:国家重点研发计划"十四五"项目(ZX25J063)
作者简介:杨宁(1992—),男,宁夏中卫人,硕士,高级工程师,主要研究方向为金属矿山开采。E-mail:34040682@qq.com
通信作者:李泽鹏(1999—),男,河南安阳人,硕士,助理工程师,主要研究方向为金属矿山开采。E-mail:2945289202@qq.com

0 引言

某铜矿中矿区矿体正上方分布有3#、6#、7#、13#、45#、57#、99#七个文物区及三个文物群,而矿体开采会诱发岩体移动及地表沉陷灾害,进而破坏地表文物。由于文物需原地保护,开采选用对地表扰动最小的上向分层点柱充填采矿法和分段空场嗣后充填采矿法,但需精准控制爆破,避免爆破地震波对文物产生不利影响。因此,当前亟须通过系统研究确定关键中段的爆破参数,以此保障文物安全,实现保护性开采的目标。

针对爆破动力响应及爆破振动速度预测,国内外学者做了大量研究,闫鹏等[1]通过分析建筑物在爆破振动作用下的动力响应发现,峰值振速和主振频率能够基本反映爆破振动对建筑物影响的全貌,但由于建筑物的多样性和振动响应的复杂性,安全判据精准性还不足以满足实际需要。乔雄等[2]、陈亮[3]、王晓[4]总结了爆破振动传播规律的研究现状,并且梳理了不同国家关于爆破振动安全判据的标准。于建新等[5]、李琼等[6]、高峰等[7]采用LS-DYNA有限元分析软件,构建了不同工况下爆破振动响应模型,通过研究峰值振动速度,判断爆破振动的影响范围和程度。张伟等[8]、胡业红等[9]针对传统公式对爆破振动预测精度不高的问题,构建了基于Bi-LSTM、GA-BP等算法的爆破振动速度预测模型,且模型预测准确度较高,能够用于指导矿山爆破参数优化设计。王晗等[10]、范勇等[11]通过灰色综合关联度理论识别了影响爆破振动速度的7个重要因素,构建了基于SSA-Elman、Elman、SSA-BP、PSO-BP等算法的爆破振动速度预测模型,对比分析了这几种算法预测结果的准确度,并根据现场实测数据验证了模型的可靠性。Hoang Nguyen等[12]、Bai Runcai等[13]提出了一种基于自组织神经网络(SONIA)和元启发式算法的露天矿爆破引起的地面振动预测方法。为了提高SONIA模型的准确性,学者们引入了蝠鲼觅食优化(MRFO)、饥饿游戏搜索(HGS)、天鹰座优化(AO)和裸鼹鼠算法(NMRA)等元启发式算法。目前,针对近地表开采爆破动力响应及参数优化的研究相对较少,特别是文物群下方的爆破作业领域相关研究更为匮乏。因此,本文针对近地表文物群下的保护性开采进行深入研究,以填补现有研究空白。

本文系统分析了国内外爆破振动安全判据规定,确定了最大允许爆破振动速度,基于此采用萨道夫斯基经验公式得到爆破安全允许距离内最大单段爆破炸药量;采用数值模拟方法验证最大单段爆破炸药量的合理性,并于地表布置测点开展爆破振动测试,通过收集现场爆破振动参数,构建SSA-Elman神经网络Y方向爆破振动预测模型,以此为其他中段开采的爆破参数设计提供依据。

1 研究区域工程背景

某铜矿中矿区工程地质条件属“中等型”,矿段地形地貌简单,第三系已基本固化成岩,含矿岩系为元古代稳定坚硬岩石,矿层顶底板地层岩石为坚硬岩石。中矿区主矿体分布长度1 850 m,矿体最大真厚度210 m,矿体倾角为35°~40°。中矿区设计的开采范围为1 795~2 320 m,自下而上开采。

矿区地表存在多处文物,包括泥质人物雕像、砌体结构建筑物等,文物区(群)在地表的位置如图1所示。由图1可知,常年风化作用导致部分文物已有所损坏,稳定性较差,易在扰动作用下产生破坏。矿区内地表文物主要分布区域有3#、13#、6#、7#、57#、99#、45#文物区及W1#、W2#、W3#三个大的文物群,文物基本上位于或接近矿体上方,基于矿山提供的地表文物调查分布图与矿体模型,并量测两者最近的直线距离,得到两者详细的位置关系数据,详见表1。

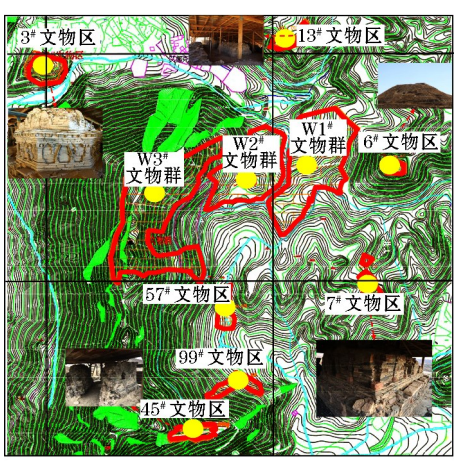


图1 文物区(群)在地表位置

Fig.1 Location of cultural relics areas (groups) on the surface

表 1 文物-矿体位置关系

Table 1 Position relationship between cultural relics and ore bodies

文物编号	文物至矿体距离/m	文物分布面积/m²	文物与矿体位置关系
3#	284.09	4 263.12	矿体西侧上方
6#	310.11	985.37	矿体正上方
7#	189.09	1 839.55	矿体正上方
13#	171.94	1 555.09	矿体正上方
45#	15.36	2 416.51	矿体正上方
57#	53.75	2 644.76	矿体正上方
99#	11.50	2 725.40	矿体正上方
W1#	114.84	27 804.04	矿体正上方
W2#	62.99	18 904.64	矿体正上方
W3#	5.98	35 971.86	

2 爆破参数优化

近地表爆破开采时,中矿区地表古建筑在爆破振动影响下可能发生墙体开裂甚至倒塌,对此,亟须优化爆破参数。

2.1 爆破振动安全判据综合分析

国内外大多数国家制定的建筑物爆破振动安全标准与判据,采用质点振动速度作为衡量爆破安全的主要指标[14]。根据最新《爆破安全规程》《古建筑防工业振动技术规范》及国外爆破振动安全判据规定,分析得到国内外各爆破振动安全判据统计,具体见表 2。其中,频率范围根据现场实测波形确定或按如下数据选取:硐室爆破 $f<20$ Hz;露天深孔爆破 $f=10\sim60$ Hz;露天浅孔爆破 $f=40\sim100$ Hz;地下深孔爆破 $f=30\sim100$ Hz;地下浅孔爆破 $f=60\sim300$ Hz。根据国内外爆破振动安全判据规范要求可知,对于某铜矿地表文物,地下爆破产生的频率范围允许值相似,而其中中国所允许的质点振动速度最低,对文物的安全稳定最有保障,因此,确定某铜矿采用中国爆破振动安全规范。

表 2 部分国家爆破振动安全判据统计

Table 2 Statistics of blasting vibration safety criteria in some countries

规程	建筑物(安全保护对象)类别	频率范围/Hz	质点振动速度/(cm/s)
德国爆破振动安全标准 BRD-DIN4150	敏感建筑	<10	0.3
		10～50	0.3～0.8
		50～100	0.8～1.2
瑞士爆破振动安全规程	历史性及敏感建筑	10～60	0.8
		60～90	0.8～1.2
《爆破安全规程》(GB 6722—2014)	一般古建筑与古迹	<10	0.1～0.2
		10～50	0.2～0.3
		>50	0.3～0.5
《古建筑防工业振动技术规范》(GB/T 50452—2008)	全国重点古建筑石结构	0.5～50	0.012～0.018

2.2 各中段最大单段爆破炸药量计算

控制爆破最大段药量可以有效降低爆破振动的峰值质点振速,从而达到控制爆破振动的效果,减少对地表文物的影响。爆破安全允许距离内单段爆破炸药量常采用经验公式进行计算,我国常采用 M.A.萨道夫斯基经验公式[15]计算爆破安全允许距离内单段爆破炸药量。

M.A.萨道夫斯基经验公式为:

$$R=(\frac{K}{V})^{\frac{1}{\alpha}}Q^{\frac{1}{3}} \tag{1}$$

式中:R 为爆破振动安全允许距离,m;Q 为炸药量,齐发爆破为总药量,延时爆破为最大单段药量,kg;V 为保护对象所在地安全允许质点振速,cm/s;K,α 为与爆破点至保护对象间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数,目前在无试验数据的条件下,暂时参照表 3 选取。

某铜矿矿石和围岩属于硬岩,稳固性良好,但矿体上盘为稳定性较差的第三系岩石。综合认为该铜矿的覆岩属于中硬岩石。因此,K 取值为 200,α 取值为 1.65。

表 3 爆区不同岩性的 K、α 值

Table 3 K and α values of different lithology in the blasting area

岩性	K	α
坚硬岩石	50～150	1.3～1.5
中硬岩石	150～250	1.5～1.8
软岩石	250～350	1.8～2.0

中矿区上部 1 945 m 以上中段采用上向分层点柱充填采矿法,地下浅孔爆破作业,主振频率 f 为 60～300 Hz。

中矿区下部 1 870 m 中段和 1 795 m 中段采用分段空场嗣后充填采矿法,地下中深孔爆破作业,主振频率 f 为 30～100 Hz。

根据爆破安全允许标准,地表文物属于一般古

建筑与古迹地面,当采用上向分层点柱充填采矿法时,最低安全允许振速在 0.30～0.50 cm/s 之间,取 0.40 cm/s。当采用分段空场嗣后充填采矿法时,最低安全允许振速在 0.20～0.30 cm/s 之间,取 0.25 cm/s。

结合表 1,地表文物最低标高为 3# 文物区,为 +2 411 m。目前仅探明了该区域的文物群,为防止后续工作面顶部发现未探明文物,保护文物不受爆破振动影响,此次分析考虑极限情况,将井下开采水平与 3# 文物区之间的垂直距离作为爆破振动安全允许距离,进而计算出该距离内允许的单段最大炸药量。井下各中段开采所允许的最大单段爆破炸药量与一般古建筑(古迹)地面振动安全允许距离的关系见表 4。

表 4 各中段最大单段爆破炸药量与振动安全允许距离的关系

Table 4 Relationship between the maximum single-stage blasting explosive volume and vibration safety allowable distance in each middle section

中段/m	中段高度/m	采矿方法	爆破振动安全允许距离 R/m	允许质点振速 V/(cm/s)	与爆破点至保护对象间的地形、地质条件有关的系数 K	衰减指数 α	允许单段最大炸药量/kg
2 245	75	上向分层点柱充填采矿法	91	0.40	200	1.65	10
2 170	75		167	0.40	200	1.65	58
2 095	75		242	0.40	200	1.65	175
2 020	75		317	0.40	200	1.65	394
1 945	75		392	0.40	200	1.65	746
1 870	75	分段空场嗣后充填采矿法	467	0.25	200	1.65	537
1 795	75		542	0.25	200	1.65	839

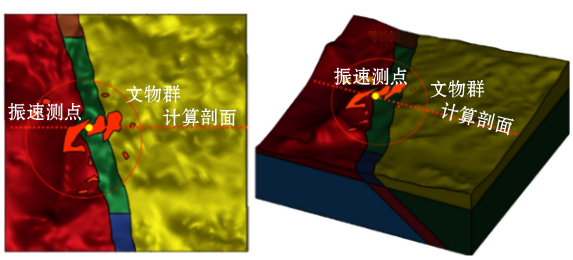
由表 4 可知,当中矿区首采 1 795～1 945 m 中段矿体时,1 795 m 中段采用分段空场嗣后充填采矿法,地下中深孔爆破,其允许最大单段炸药量为 839 kg;1 945 m 中段采用上向分层点柱充填采矿法,地下浅孔爆破作业,其允许最大单段炸药量为 746 kg。当中矿区矿体开采到最高标高 +2 245 m 时,采用上向分层点柱充填采矿法,其允许最大单段炸药量为 10 kg,为保证生产效率,该处可采用延期微差爆破技术。

3 爆破动力响应数值模拟分析

3.1 爆破振动数值模型构建

某铜矿地表文物三维空间分布如图 2 所示。文物总体分布在半径约 450 m 的圆形范围内,靠近中央有三座重要文物群,空间尺寸相对较大。爆破数值模拟与岩土工程静态稳定性模拟有本质区别。某铜矿山中矿区矿体形态变异明显,主矿体的长度为 1 850 m,矿体最大真厚度为 210 m。以 1 000 kg 最大段药量计,其数值模拟体积仅 1 m^3 左右,该尺寸在矿权范围内与不同岩土层结构相比微不足道。为保证数值模拟精度,针对性分析深部爆破作业对地表文物稳定性的影响规律,必须对当前精细化三维数字模型进行简化。在爆破振动数值分析过程中,以靠近文物群中心的黄色测点(高程 2 450 m)为关键定位依据(颜色标识见电子版),对三维精细化数字模型进行简化处理。以黄色测点与矿体走向大致垂直方向提取计算剖面进行模拟。某铜矿全生命周期开采分为 4 个阶段:第一阶段为首采 1 795～1 945 m 中段;第二阶段为开采 1 870～2 020 m 中段;第三阶段为开采 2 095～2 245 m 中段;第四阶段为开采 2 170～2 245 m 中段。4 个阶段分别取最靠近地表的中段工况进行爆破模拟,即 4 个阶段模拟中段分别为 1 945 m(方案 A_1)、2 020 m(方案 A_2)、2 095 m(方案 A_3)、2 245 m(方案 A_4)。

矿体厚度简化:中矿区主矿体的长度为 1 850 m,矿体最大真厚度 210 m;1 号矿体为扁平状,位于主矿体下方,最大厚度为 54 m;2 号矿体在 36 号剖面以北与主矿体的下部,最大厚度为 85 m;3 号矿体在剖面上位于 2 号矿体之下,最大厚度为 60 m。以主矿体为主要研究对象,采用 3DMINE 三维数字建模软件对主矿体模型进行不同剖面切分,确定其矿体厚度大致维持在 130 m。上盘岩性为第三系,下盘岩性取黑云母石英片岩。



(a) 俯视图 (b) 等轴侧

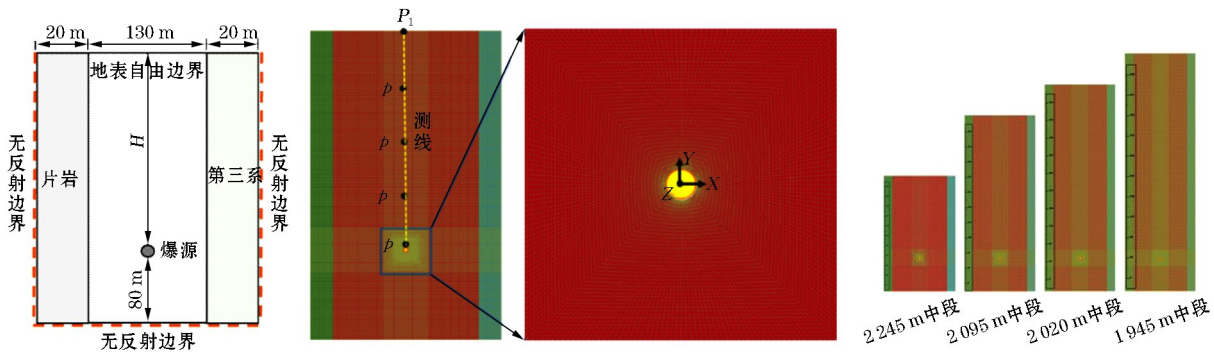
图 2 模型简化示意

Fig.2 Schematic of model simplification

3.2 数值模拟方案

影响地表爆破振动速度的关键因素为最大段药量及爆源距离[16]，忽略矿体倾角的影响，建立竖直矿体模型。因此，当前模拟方案获得的结果相对保守，即实际爆破距离可能略大于当前模型实测爆距。采用 LS-DYNA 进行数值模拟，数值计算模型如图 3 所示，最终简化模型见图 3(a)，左侧为片岩，右侧为第三系。模型左侧、底部、右侧设置无反射边界条件，以模拟无限大空间。模型宽度 170 m，左右围岩宽度分别为 20 m，爆源距模型底部距离 80 m，以便尽可能消除边界效应。模型顶部为地表自由边界，模拟地表条件，在模型中轴线顶部设置监测点，将监测得到的质点振动速度(PPV)与爆破安全规程的允许标准对比，评估最大段药量的合理性。

某铜矿全生命周期 4 个阶段模拟工况中，爆源距地表距离 H 分别为 215 m、365 m、440 m、515 m。网格分布特征见图 3(b)，4 个阶段数值模拟网格模型见图 3(c)。模型整体采用六面体网格，爆源附近网格局部作细化处理，采用映射网格划分方法确保模型精度，最大网格尺寸为 1 m，采用 kg-m-s 单位制进行求解。



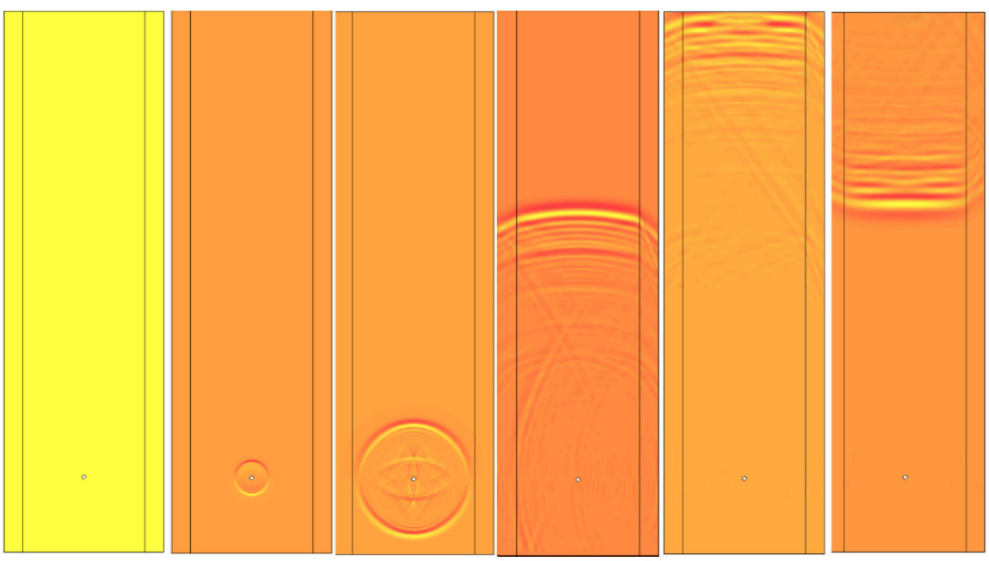
(a) 数值模型边界条件　(b) 网络模型及测点布置　(c) 全生命周期四阶段爆破数值模拟

图 3 数值计算模型

Fig.3 Numerical calculation model

3.3 爆破振动模拟结果分析

以方案 A_1 为例，Y 方向振动速度云图如图 4 所示，PPV 时程曲线如图 5 所示。炸药起爆后爆炸应力波以同心圆形式向外扩散，起爆后 289 ms 时刻，爆炸应力波传至顶部，PPV 时程曲线开始出现波动，310 ms 时刻 Y 方向 PPV 达到最大值，为 0.45 cm/s，此后开始衰减，571 ms 时刻 X 方向 PPV 达到最大值，为 0.035 cm/s。总体而言，Y 方向 PPV 极值均大于 X 方向，具有数量级差异，因此选用 Y 方向 PPV 进行安全允许振速分析，4 个阶段的 Y 方向 PPV 时程曲线如图 6 所示。



(a) T=0　(b) T=11 ms　(c) T=38 ms　(d) T=178 ms　(e) T=304 ms　(f) T=436 ms

图 4 Y 方向振动速度云图(方案 A_1)

Fig.4 Cloud diagrams of Y-direction vibration velocity (scheme A_1)

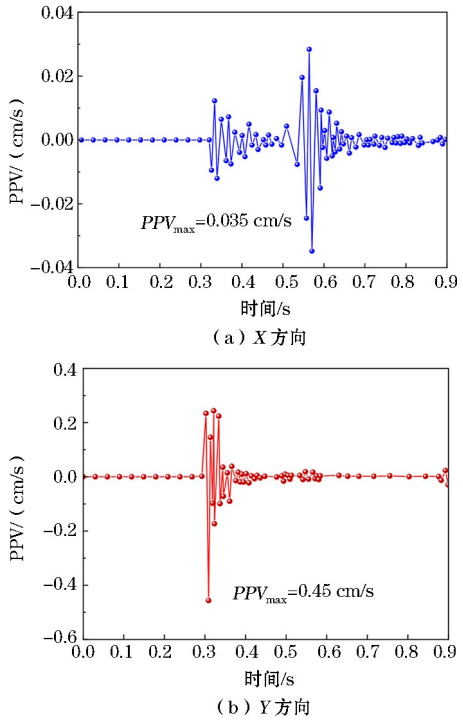


图 5 方案 A_1 的 PPV 时程曲线

Fig.5 PPV time history curves of scheme A_1

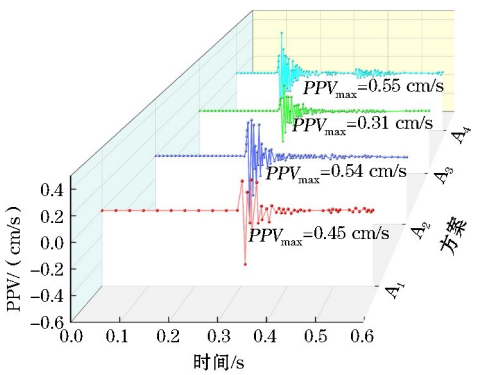


图 6 4 个阶段的 Y 方向 PPV 时程曲线

Fig.6 Y-direction PPV time history curves of the four stages

由图 6 可知,A_1、A_2、A_3、A_4 方案的监测点峰值 PPV 分别为 0.45 cm/s、0.54 cm/s、0.31 cm/s、0.55 cm/s。参考相关经验可知,中深孔爆破频率基本上大于 50 Hz,因此以爆破安全规程允许的最大允许振速 0.5 cm/s 进行类比,方案 A_2、A_4 的峰值 PPV 略微大于 0.5 cm/s,其余方案的峰值 PPV 均在安全阈值以下。

某铜矿爆破振动数值模拟过程中,将矿岩材料视为均匀介质,未考虑实际地层不良结构体对应力波的阻碍及耗散作用,因此数值模拟的 PPV 结果相对偏高。考虑矿区实际地理位置及采矿效率等因素,参考国际主流爆破安全规程,对重点保护建筑物的最大允许振速可取 1.2 cm/s,上述 4 个方案峰值 PPV 小于 1.2 m/s。综上,以经验值选取的 K 与 α 反算获得的不同开采阶段最大段药量,经数值模拟验证,药量合理,可用于指导后续生产。此外,矿山生产过程中采动影响将引起岩层空间异构特征发生改变,需加强爆破振动现场监测,及时调整回采爆破方案。

4 爆破振动测试

针对某铜矿井下不同中段爆破开展测试,在地表选取与数值模拟相吻合的地点布置测点,监测井下爆破产生的地震波是否会对地表建筑物及构筑物产生影响。

4.1 测试方案及测点布置

共进行 4 次爆破振动测试,布置 4 个监测点,分别监测 1 945 m、2 020 m、2 095 m、2 245 m 中段采场进行爆破时的振动速度峰值,具体测点布置见图 7。

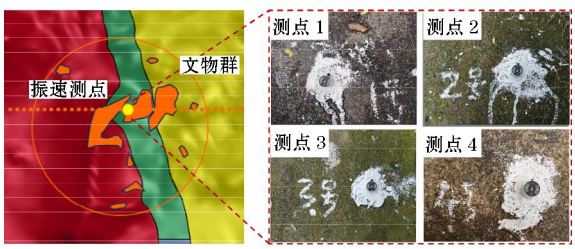


图 7 测点布置

Fig.7 Layout of measuring points

4.2 振速测试结果分析

4 次爆破共统计到 16 组数据,1 945 m、2 020 m、2 095 m、2 245 m 4 个中段爆破的单段最大炸药量分别为 745 kg、390 kg、172.5 kg、10 kg,实际单段最大炸药量均等于或小于允许的单段最大炸药量,各测点 Y 方向振动速度峰值如图 8 所示。

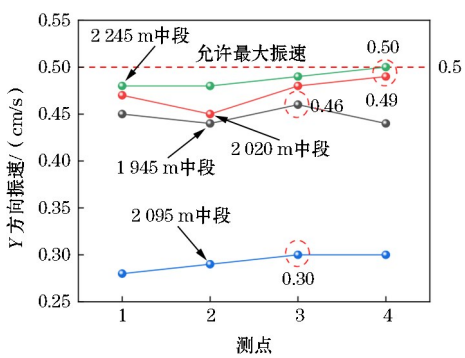


图 8 各测点 Y 方向振动速度峰值

Fig.8 Peak value of vibration velocity in the Y-direction for each measurement point

从图 8 可以看出,2 245 m 中段开采时,振动速度峰值为 0.5 cm/s,由于爆破地点距地表测点仅有 91 m,振动速度峰值较其他三个中段爆破时的大,但小于所允许的最大振速,表明距地表最近的上向分层点柱充填采矿法采场爆破产生的地震波并不会对地表构筑物产生影响。

5 爆破振动速度预测

由于萨道夫斯基振动速度计算公式考虑的因素较少,且矿山位移监测受到传感器成本、地质活动周期性和监测技术限制,连续高频采样难以实现。因此,本小节通过收集现场爆破振动参数,构建 SSA(麻雀搜索算法)-Elman 神经网络预测模型,得到适用于整个矿山的 Y 方向爆破振动速度预测模型。

5.1 爆破振动预测模型

为获取足量爆破振动数据,在各个中段其他采场回采过程中均布置测点进行监测,共得到 112 组 Y 方向爆破振动数据,结果见表 5,其中 B_1 为爆心距,B_2 为孔深,B_3 为单段最大炸药量,B_4 为孔径,B_5 为排距,B_6 为孔底距,C_1 为 Y 方向爆破振动速度。

表 5 爆破振动数据

Table 5 Blasting vibration data

序号	B_1/m	B_2/m	B_3/kg	B_4/mm	B_5/m	B_6/m	C_1/(cm/s)
1	91	4	10	45	1	1	0.48
2	167	4	58	45	1	1	0.35
3	242	4	174	45	1	2	0.30
4	317	4	390	45	1	2	0.46
5	392	4	745	45	1	2	0.44
6	467	21	537	76	1.5	2	0.41
7	542	21	839	76	1.5	2.4	0.43
8	91	4	10	45	1	2	5.00
				……			
111	467	21	537	76	1.5	2.3	0.46
112	542	21	839	76	1.5	2.3	0.48

将前 104 组爆破振动数据作为训练集,后 8 组数据作为测试集,最大段药量、爆心距、孔径、孔距、排距、孔深及延时时间数据作为预测模型输入值,Y 方向爆破振动速度数据作为预测模型的期望输出值,建立爆破振动速度 SSA-Elman 和 Elman 神经网络预测模型。两种模型的适应度随迭代次数的变化曲线如图 9 所示。

由图 9 所知,SSA-Elman 模型充分收敛且计算高效,适应度达 0.3,曲线趋于稳定,表明该模型在优化过程中收敛良好。

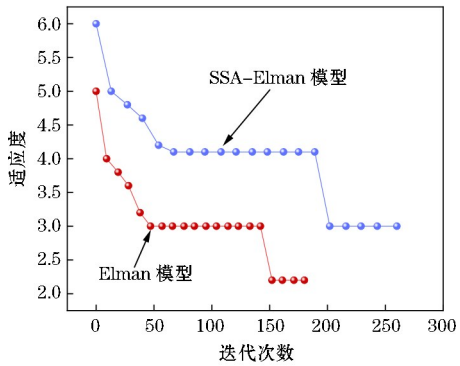


图 9 迭代次数变化

Fig.9 Changes in the number of iterations

5.2 预测结果分析

将测试集 8 组数据代入 SSA-Elman 模型,并将模型预测值与 Elman 神经网络预测模型预测值相比较,同时与实测值比较,验证 SSA-Elman 模型的准确性及优越性,对比结果如图 10 所示。

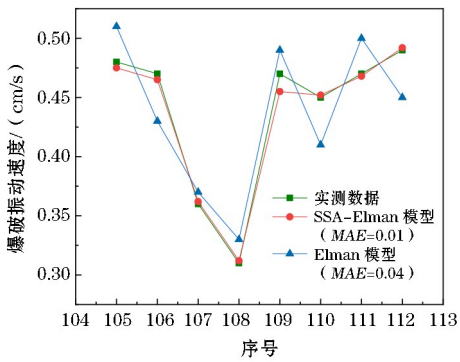


图 10 模型预测结果对比

Fig.10 Comparison of model prediction results

由图 10 可知,SSA-Elman 神经网络模型预测值与实测值基本吻合,平均 MAE 为 0.01,相比之下,传统 Elman 模型预测值的平均 MAE 为 0.04,相比前者误差较大。表明经 SSA 改进后的 Elman 神经网络预测模型的预测值更精准,能够有效满足工程实践对爆破振动速度预测的需求。

6 结论

(1) 某铜矿中矿区主要分布区域有 3#、13#、6#、7#、57#、99#、45# 文物区及 W1#、W2#、W3# 3 个大的文物群,本文系统分析了地表文物区与矿体之间的关系,结合国内外爆破振动安全判据规定,确定了最大允许爆破振动速度,基于此采用 M.A.萨道夫斯基经验公式得到了爆破安全允许距离内最大单段爆破炸药量。

(2) 采用数值模拟方法对某铜矿全生命周期开采4个阶段最靠近地表的中段进行爆破模拟,得到了1 945 m、2 020 m、2 095 m、2 245 m 4个中段爆破时的地表Y方向峰值振动速度分别为0.45 cm/s、0.54 cm/s、0.31 cm/s、0.55 cm/s,均在安全阈值(1.2 cm/s)以下,表明最大单段爆破炸药量合理。

(3) 爆破振动测试结果表明,1 945 m、2 020 m、2 095 m、2 245 m 4个中段爆破的单段最大药量分别为745 kg、390 kg、172.5 kg、10 kg,均等于或小于允许的单段最大炸药量;2 245 m中段爆破时的地表振动速度峰值为0.5 cm/s,大于其他3个中段爆破时的峰值振动速度,但小于所允许的最大振速,表明距地表最近的上向分层点柱充填采矿法采场爆破产生的地震波并不会对地表构筑物产生影响。

(4) 通过收集现场爆破振动参数,构建了SSA-Elman神经网络Y方向爆破振动速度预测模型,代入测试集数据,并与传统的Elman神经网络预测模型进行对比。结果表明,SSA-Elman神经网络模型预测值与实测值基本吻合,平均MAE为0.01,而传统Elman模型预测值平均MAE为0.04,误差较大,表明经SSA改进后的Elman神经网络预测模型可有效满足工程实践对爆破振动速度预测的需求。

参考文献(References):

[1] 闫鹏,张云鹏,申宇宙,等.爆破振动作用下建筑物动力响应研究综述[J].金属矿山,2025(6):131-143.
Yan Peng, Zhang Yunpeng, Shen Yuzhou, et al. Review on the dynamic response of buildings subjected to blasting vibration[J]. Metal Mine,2025(6):131-143.

[2] 乔雄,黄锦聪,杨鑫,等.爆破振动传播规律及控制技术研究进展[J].地震工程学报,2025,47(4):751-766.
Qiao Xiong, Huang Jincong, Yang Xin, et al. Research advances in propagation laws and control technologies of blasting vibration [J]. China Earth quake Engineering Journal,2025,47(4):751-766.

[3] 陈亮.临近既有隧道的新建隧道爆破振动数值模拟[J].地下空间与工程学报,2024,20(增刊2):857-864.
Chen Liang. Numerical simulation of the blasting vibration of new tunnel near existing tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(Suppl.2): 857-864.

[4] 王晓.应力波作用下隧洞顶板围岩块体失稳滑动解析理论研究[J].力学学报,2024,56(1):183-197.
Wang Xiao. Analytical theory on instability sliding of surrounding rock blocks in tunnel roof under stress wave actions[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2024,56(1):183-197.

[5] 于建新,刘文金,张馨,等.初始地应力影响下水平层状岩体隧道支护结构的爆破振动响应特征[J].河南理工大学学报(自然科学版),2025,44(5):100-110.
Yu Jianxin, Liu Wenjin, Zhang Xin, et al. Blasting vibration response characteristics of tunnel lining structure in horizontallayered rock mass under the influence of initial in-situ stress[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science),2025,44(5):100-110.

[6] 李琼,贾虎,王解放,等.竖井与井下平洞连接段贯穿爆破振动响应数值模拟分析[J/OL].工程爆破:1-9[2025-08-15]. https://link.cnki.net/doi/10.19931/j.EB.20250034.
Li Qiong, Jia Hu, Wang Jiefang, et al. Numerical simulation of vibration response in the connection section between shaft and underground horizontal tunnel[J/OL]. Engineering Blasting: 1-9[2025-08-15]. https://link.cnki.net/doi/10.19931/j.EB.20250034.

[7] 高峰,常旭,王连生,等.近矿区高层建筑爆破振动响应特征研究[J].黄金科学技术,2025,33(2):339-348.
Gao Feng, Chang Xu, Wang Liansheng, et al. Research on blasting vibration response characteristics of high-rise buildings in the vicinity of the mine[J]. Gold Science and Technology,2025,33(2):339-348.

[8] 张伟,倪彬,王立,等.基于Bi-LSTM算法的露天矿山爆破振动速度预测[J].矿冶工程,2025,45(1):21-26.
Zhang Wei, Ni Bin, Wang Li, et al. Velocity prediction for blast-induced vibration in open-pit mine based on Bi-LSTM algorithm[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2025,45(1):21-26.

[9] 胡业红,何梦,周参军,等.基于GA-BP神经网络的毫秒延时爆破振动速度预测研究[J].中国矿业,2022,31(2):72-77.
Hu Yehong, He Meng, Zhou Canjun, et al. Study on vibration velocity prediction of millisecond delay blasting based on GA-BP neural network [J]. China Mining Magazine,2022,31(2):72-77.

[10] 王晗,闫鹏,张云鹏,等.基于SSA-Elman神经网络的爆破振动速度预测[J].工程爆破,2025,31(3):140-150.
Wang Han, Yan Peng, Zhang Yunpeng, et al. Prediction of blasting vibration velocity based on SSA-Elman neural network[J]. Engineering Blasting,2025,31(3):140-150.

[11] 范勇,裴勇,杨广栋,等.基于改进PSO-BP神经网络的爆破振动速度峰值预测[J].振动与冲击,2022,41(16):194-203+302.
Fan Yong, Pei Yong, Yang Guangdong, et al. Prediction of blasting vibration velocity peak based on an improved PSO-BP neural network[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022,41(16):194-203+302.

[12] Hoang Nguyen, Bai Runcai, Erkan Topal. Enhancing predictions of blast-induced ground vibration in open-pit mines: comparing swarm-based optimization algorithms to optimize self-organizing neural networks[J]. International Journal of Coal Geology,2023,275:104294.

[13] Bai Runcai, Zhang Pengfei, Zhang Zhiqiang ,et al. Optimization of blasting parameters and prediction of vibration effects in open pit mines based on deep neural networks[J]. Alexandria Engineering Journal,2023,70:261-271.

[14] Xu Mingnan, Li Xinping, Xu Kun, et al. Influence of the spatial distribution of underground tunnel group on its blasting vibration response[J]. Underground Space,2023,10:248-268.

[15] 黄麟淇,刘迎泽,王钊炜,等.柿竹园露天地下协同开采隔离层安全厚度研究[J].黄金科学技术,2025,33(3):591-604.
Huang Linqi, Liu Yingze, Wang Zhaowei, et al. Research on the safety thickness of the isolation layer in open-pit and underground synergetic mining at Shizhuyuan Mine[J]. Gold Science and Technology,2025,33(3):591-604.

[16] Prassetyo Hero Simon, Simangunsong Marihot Ganda, Wattimena Kresna Ridho. Numerical modeling and field monitoring of blast-induced ground vibrations of the Jakarta-Bandung high-speed railway Tunnel #11[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2025, 1514(1):012006.