

文章编号: 1006-7051(2021)01-0109-07

竖井爆破最佳延时时间的减振控制研究

侯义辉¹, 陈航², 王薇³, 刘鳌³

(1.绍兴市交通建设有限公司, 浙江 绍兴 312000; 2.中铁隧道局集团有限公司市政工程公司, 杭州 310000; 3.中南大学土木工程学院, 长沙 410075)

摘要: 为了深入研究在竖井爆破扩挖施工中不同延时时间对爆破效果的影响, 总结分析现有相关研究后, 综合考虑研究需要, 相对全面地将延时时间设定为 0、2、5、10、20、25、35 ms, 通过控制变量法只考虑不同延时时间对于研究主体的影响规律。利用动力有限元分析软件 LS-DYNA 建立通风竖井延时爆破扩挖数值模拟模型, 计算得出不同延时时间以及不同间隔距离对应的振速时程曲线、峰值振速以及结构失效情况, 通过对计算结果的综合分析, 从多个角度确定了针对所模拟的工况最佳的延时时间为 25 ms, 且得出了延时爆破不同延时时间对减振效果的一些实用性规律, 对于类似工程延时爆破技术设计及参数优化具有一定的借鉴意义。

关键词: 延时爆破; 竖井爆破; 延时时间; 减振效果; 数值模拟

中图分类号: TD235 文献标志码: A doi: 10.19931/j.EB.20190180

Research on vibration reduction control of optimal delay time of shaft blasting

HOU Yi-hui¹, CHEN Hang¹, WANG Wei³, LIU Ao³

(1.Zhejiang Shaojin Expressway Co., Ltd., Shaoxing 312000, Zhejiang, China; 2.Municipal Engineering Company of China Railway Tunnel Bureau, Hangzhou 310000, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In order to further study the influence of different delay time on shaft blasting excavation construction, on the basis of summarizing and analyzing relevant research, considering the research needs comprehensively, the delay time is relatively comprehensively set to 0, 2, 5, 10, 20, 25, 35 ms, and only the influence of different delay time on the research subject is considered by the control variable method. The finite element analysis software LS-DYNA was used to establish the numerical simulation model of the blasting excavation of the ventilation shaft. The time history curve, the peak vibration velocity and the structural failure condition corresponding to different delay times and different separation distances were calculated. The comprehensive analysis of the results determines that the optimal blasting delay time for the working conditions simulated is 25 ms from several aspects, and some practical laws for the damping effect of different delay time of delay blasting are obtained. It has certain guidance and reference significance for the design of delay blasting technology and parameter optimization of related blasting engineering.

Key words: delay blasting; shaft blasting; delay time; damping effect; numerical simulation

收稿日期: 2019-11-14

基金项目: 浙江省交通科技资助项目(2017041); 湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2519)

作者简介: 侯义辉(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事隧道与地下工程施工及技术管理方面的研究。E-mail: 3144965773@qq.com

近年来爆破开挖广泛应用于隧道、煤矿等实际工程中,随着工程项目的复杂程度以及开挖要求的不断提高,对于爆破振动产生影响的控制也愈加严格。如何在满足爆破效果的前提下有效削弱爆破振动成为近年来研究的热点问题。对于延时爆破技术,我国于上世纪五十年代在煤矿和金属矿等地开展了一系列的生产实践,经历了半个多世纪的发展,延时爆破技术已经成为可以有效削弱爆破振动的主要手段之一^[1],到如今,延时爆破技术的身影已广泛出现在各种工程实践中。

通过设定合理的爆破延时时间,相比于同时起爆可以将集中的能量先后爆发,从而产生不同的应力波,通过应力波的错峰叠加,可以有效削弱爆破,降低振动幅值,以达到降低爆破振动强度的效果^[2]。因此,对于延时爆破来说,探究最佳的延时时间是近年来研究的难点与核心。史秀志等^[3]对不同延时时间的延时爆破产生的振动波进行时频分析,确定出延时时间为 30、40 ms 时的爆破效果较好。叶海旺等^[4]利用小波分析技术,用能量分析的方法,探究了不同爆破延时时间和相同延时时间下不同爆心距的爆破效果,确定了能够降低爆破振动产生危害的合理孔间延时 42 ms,排间延时 65 ms。沈晓松等^[5]从块度分布、综合平均块度以及最大块度这 3 个指标出发,通过对爆堆图片的综合分析确定了最佳延时时间为 60 ms。相较于炮孔之间的延时起爆,刘庆等^[6]从孔内延时爆破的角度出发进行了分析研究,通过数值模拟以及现场试验证实了采用孔内延时爆破也可以进一步削弱爆破振动,延时时间小于 30 ms 的延时时间越长减振效果越好,延时时间大于 80 ms 时减振效果则没有明显的变化趋势,保持相对稳定。张袁娟等^[7]运用动力有限元分析软件 LS-DYNA 进行了数值模拟分析,并结合计算软件 MaLab 发现间隔为 42 ms 时相对延时时间为 0、25、65 ms 的能量衰减率最大,减振效果最明显,同时还提出了减振效果并不是随着延时时间的加大而增强的结论。崔正荣等^[8]通过数学计算的方式使爆破产生的应力波进行叠加,发现当延时时间为 23 ms 时,爆炸产生的振动速度最小。吴贤振等^[9]创新

性地提出 ms/m 的单位指标,通过 ANSYS/LS-DYNA 分析软件分别计算了延时时间为 0、3、5、7、8 ms/m 的毫秒延时爆炸模型,得出减振效果最优的延时时间指标为 28 ms,即 7 ms/m。楼晓明等^[10]通过结合动力有限元分析软件 LS-DYNA 的模拟数据和单孔爆破测振试验中对实测振动波进行 Gaussian 多峰拟合的结果,最终确定了最佳延时时间为 25 ms。陈士海等^[11]通过 LS-DYNA 软件运用荷载法指出了延时爆破的质点峰值振速与质点相隔起爆点的距离呈负相关,但在衰减的过程中会出现局部增大的现象。周文海等^[12]采用从二维过渡到三维的分析方法,先利用 ANSYS 软件建立二维静态模型,通过有限元折减法确定关键系数,再基于已确定的二维潜在滑动面重新建立相应的三维延时爆破模型,最终通过动力有限元分析软件 LS-DYNA 得出孔间延时时间取 42 ms 时对于边坡逐孔爆破减振效果较佳。

隧道竖井作为公路隧道通风的主要措施之一,在爆破开挖过程中产生的应力波会对周围岩体和周边环境产生不利影响,以及在近接施工时会对联络通道造成不利影响,如何有效降低这种影响,也日益成为隧道工程施工研究的关键问题。而针对竖井延时爆破的研究,史秀志等^[13]利用数值模拟的方法探究了短延时爆破在成井爆破中的应用效果,从破岩效果和振动规律的层面进行综合分析,确定调压并导井爆破同层孔间采用延时爆破技术时最佳的延时时间为 9~11 ms。

综上所述,一方面针对短延时时间的研究还相对较少,对于较短延时时间的延时爆破规律和特性探索不足。工程上采用的爆破延时通常不短于 25 ms,对于延时爆破技术的精细化,仍不能达到理想的效果^[14]。而高精度雷管的研制成功使得精准短延时爆破技术发展起来^[15]。另一方面对于通风竖井爆破扩挖相关的延时爆破技术研究还十分有限,单一地针对竖井爆破开挖产生的影响的研究很少,普遍都是借鉴类似工程的经验方法。笔者通过显式非线性动力有限元分析软件 LS-DYNA,以竖井初支为研究主体,采用控制变量的方法比较全面地分析了不同延时时间对于通风竖

井采用延时爆破扩挖技术的规律和特点,对于相关工况具有一定的指导和借鉴意义。

1 延时时间的选取

作为减振的主要手段之一,在保证爆破效果和破碎质量的前提下,延时爆破如何选取合理的延时时间来达到最优的减振效果,需要遵循多个原则选取。

1)形成新的自由面原则。边界条件对爆破效果的影响很大,当没有自由面存在时,药包产生的爆炸冲击对岩体的破碎效果相对较差,爆破方量较少。而当存在自由面时,随着自由面数量的增加,爆破方量随着边界面积的加大而大大增加,这使得炸药的消耗量会相对减少,从而能够提高炸药的利用率。

2)保证岩石破碎效果原则。岩体在被抛出之前,先爆孔内炸药产生的爆生气体和应力波的共同作用下会使周围岩体产生裂隙并不断扩展,若选定合适的延时时间,后爆孔炸药在残余应力场尚未消失之前会产生新的应力场,与先前产生的应力场叠加,加大对岩石的作用,从而较大地提高岩石的破碎效果^[16]。

3)振动波相互削弱原则。通过选定合理的延时时间,可以使得相继起爆的药包产生的振动波主振相位在到达某点处相差 180° ,从而降低了振动波的振幅,较大地削弱了振动强度^[16]。美国费斯基于两个半周期的振动波叠加降低了爆破振幅,提出了合理延时时间的计算公式,也是以振动波相互削弱原则为依据。

通过综合考虑上述 3 个原则,结合现有的研究成果和工程经验,为了比较全面地探讨爆破延时时间对于减振效果的影响,设定爆破延时时间为 0、2、5、10、20、25、35 ms。

2 竖井爆破振动数值模型建立

结合工程数据,通风竖井采用反井开挖工法时,反井后采用爆破扩挖。利用显式非线性动力有限元分析软件 LS-DYNA 建立通风竖井爆破振动数值模型,综合考虑计算量的大小以及研究的

侧重点,计算时长设定为 50 ms,模型包含有岩石、空气、炸药以及初支 4 个部分,三维实体模型尺寸为 $5\text{ m}\times 5\text{ m}\times 50\text{ m}$,已扩挖 30 m,其中初支厚度 15 cm,2 个炮孔直径 10 cm,间距 1.8 m,模型结构如图 1 所示。模型计算采用流固耦合方法,空气和炸药采用 ALE 单元,岩石和初支采用 Lagrange 单元,空气覆盖整个域,采用 cm-g-us 单位制。对模型进行网格划分,圆形炮孔附近网格采取局部细化处理。模型除开挖掌子面其他面均设置无条件反射,模拟出无限岩体的效果。

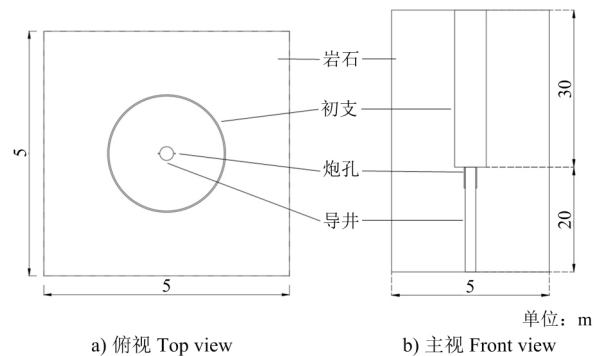


图 1 模型结构

Fig.1 Model structure

2.1 岩石材料选取

根据相关工程数据,数值模型中岩石材料模拟 IV 级围岩,采用关键字 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 描述塑性材料,围岩参数如表 1 所示。

表 1 围岩材料参数

Table 1 Surrounding rock material parameters

密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	屈服应力/GPa	泊松比
2 200	5.62	0.039 7	0.3

2.2 炸药材料选取

计算模型中炸药选取 2# 乳化炸药,采用关键字 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_NURN 和状态方程 EOS_JWL 联合描述。其中 JWL 状态方程模拟了炸药爆轰过程中压力和比容的关系:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中: A, B, R_1, R_2, ω 为材料常数; p 为压力; V 为相对体积; E_0 为初始比内能。

材料参数如表 2 所示。

表 2 炸药材料参数

Table 2 Explosive material parameters

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	A/GPa	B/GPa
1 200	3 600	2.144	1.82
R_1	R_2	ω	$E_0/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$
4.2	0.9	0.15	4.192×10^9

表 3 初衬材料参数

Table 3 Initial lining material parameters

$\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	f_c/MPa	A	B	C	S_{\max}	G/GPa	T/MPa	D_1	D_2
2 400	39.2	1.05	1.65	0.007	7	13.89	3.162	0.04	1
$P_{\text{crush}}/\text{MPa}$	μ_{crush}	$P_{\text{lock}}/\text{GPa}$	μ_{lock}	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	EF_{\min}	N	FS
13.07	0.000 7	0.8	0.1	85	-171	208	0.01	0.76	1.35

3 数值模拟结果分析

选取初衬作为研究主体,基于上述延时爆破延时时间的选取分析,设定双炮孔爆炸延时时间为 0、2、5、10、20、25、35 ms 的 7 种工况进行计算,利用大型可视化后处理软件 Hyperview 进行结果分析。为了比较清晰地分析延时爆破的规律,对炸药的尺寸进行了适当的加大。在初衬中距离炸药 10 m 处设立测点 A,节点编号为 1046071,再依次往后每隔 3 m 设立一个测点。测点的具体布置位置如图 2 所示。

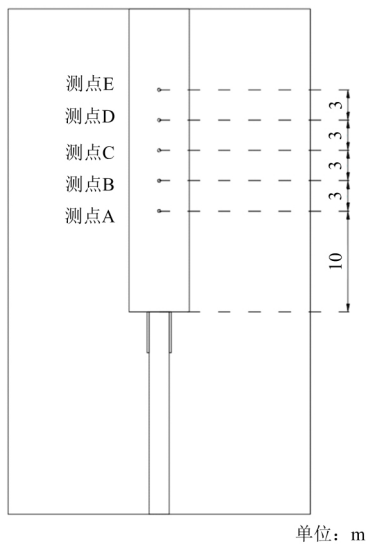


图 2 测点布置

Fig.2 Layout of measuring points

3.1 不同延时时间与最大振速的相互关系

将测点 A 作为基准测点,采集 7 种不同爆破

2.3 初衬材料选取

计算模型中初衬选用 Johnson-Holmquist 模型模拟 C30 混凝土材料,采用关键字 MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE 描述,初衬材料如表 3 所示。

延时时间对应工况的振速时程曲线,再取得每个时程曲线的最大值点,即测点 A 不同爆破延时时间对应的最大振速。以延时时间为 x 轴数据,最大振速为 y 轴数据用 Origin 软件得二者关系(见图 3)。

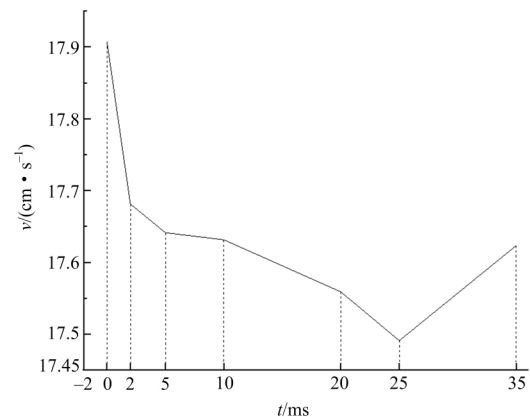


图 3 不同延时时间与最大振速关系

Fig.3 The relationship between different delay times and maximum vibration velocity

由图 3 可知,随着双孔爆破延时时间的延长,最大振速呈减小趋势,起到了比较明显的减振作用。在延时时间为 25 ms 时,最大振速为 7 种工况中的最小值,减振效果最为显著,这说明 25 ms 是相对最为合理的延时时间。当延时时间超过 25 ms 时,最大振速开始增大,呈上升趋势,说明延时爆破的减振作用并不是延时时间越长越好,一方面因为错开的地震波相互作用时可能会起到叠加增强作用,另一方面由于双孔爆炸延时时间过长,相当于两个炸药依次爆炸,不能起到减振作用。

同时可以看到延时时间在 2 ms 到 10 ms 区间段曲线相对平稳,说明当延时时间较短时,减振效果随着延时时间的变化不会有比较明显的优化或者劣化,且减振效果不佳。

3.2 不同延时时间与结构受损的相互关系

利用后处理软件 Hyperview 的自动删除失效单元功能,设定阈值为 5 cm/s 时,Hyperview 将自动删除振速大于 5 cm/s 的单元,模拟出结构破坏临界振速为 5 cm/s 时的受损情况。对比开始爆炸后 15 ms 时刻的各不同爆破延时时间对应的主体结构受损情况(见图 4)。

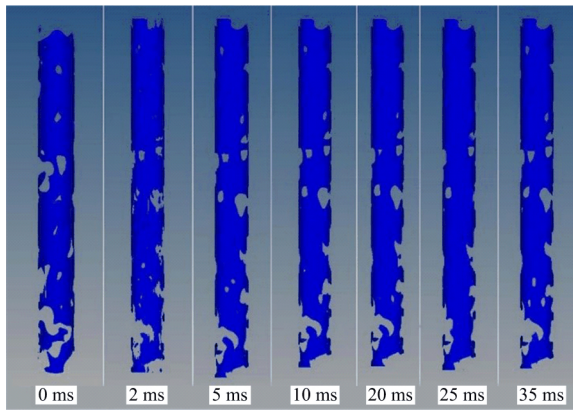


图 4 不同延时时间主体结构受损

Fig.4 Damage of main structure with different delay time

由图 4 可以观察到,当设定失效阈值为 5 cm/s 时,不采用延时爆破技术时失效网格数量占比为 13.2%,主体结构受损最为严重。当爆破延时为 2 ms 到 10 ms 区段时失效网格占比分别为 11.8% 和 11.3%,受损得到缓解,证实了延时爆破的减振效果,但减振效果很弱且减缓趋势相对不明显。当爆破延时时间为 25 ms 时,初衬主体失效单元数量占比 7.3%,数量明显减小,受损明显减轻。当延时时间为 35 ms 的时候失效网格数量占比 10.9%,观察到初衬主体结构相对爆破延时时间为 25 ms 时受损严重,说明 25 ms 为最佳延时时间,且若再增大延时时间将会削弱减振效果,再次验证了由图 3 所得规律。

3.3 不同延时时间时程曲线对比分析

通过上述分析,可以得出 25 ms 为该竖井延时爆破的最佳延时时间,为了进一步探讨延时爆破的减振机理,将延时时间为 0 ms 和 25 ms 时的振速时程曲线重叠,进行对比分析(见图 5)。

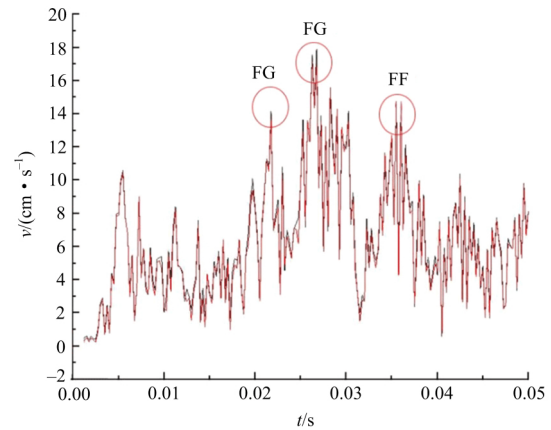


图 5 0、25 ms 振速时程

Fig.5 0、25 ms velocity time history

定义波峰与波峰叠加为 FF,波峰与波谷叠加为 FG,易知波峰与波峰叠加会加大振速,波峰与波谷叠加有减弱作用,会降低振速。观察图 5 可知,图中标示 FG 处,为延时时间为 25 ms 时,两炮孔的振动波波峰与波谷叠加,红色线条(25 ms 时程曲线)明显低于黑色线条(0 ms 时程曲线),振速明显降低。图中标示 FF 处,两炮孔的振动波波峰与波峰叠加,红色线条高于黑色线条,反而使得振速比不采用延时爆破时要大。这说明延时爆破的减振机理并不是所有波峰完全与波谷叠加产生削弱作用,而是波峰与波谷叠加的情况较多,达到了降低振速的目的,从而通过爆炸产生的振动波频谱,计算出使波峰与波谷叠加最多的延时时间,理论上可以最大程度的达到减振效果。

3.4 不同延时时间振速衰减分析

采集 A~E 的 5 个测点在延时时间分别为 0、25 ms 爆破时的最大振速,并比较分析测点与炸药的垂直距离的二者关系,如图 6 所示。

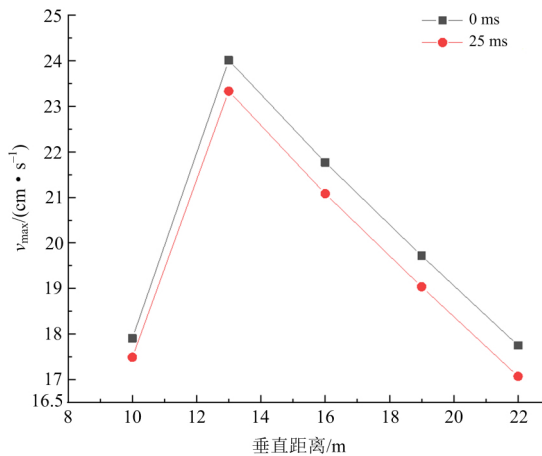


图 6 最大振速与距炸药距离关系

Fig.6 The relationship between the maximum vibration velocity and the distance between explosives

由图 6 可以观察到,在距离炸药 13 m 的位置,振速明显加大,这是由于双孔炸药的振动波在这个位置出现波峰叠加,形成局部放大效应。当采用延时时间为 25 ms 爆破时在距离炸药 13 m 处振速相对较小,说明采用延时爆破削弱了两个炸药产生的振动波波峰相互叠加加强的效果,也从侧面反映出采用多孔爆破时延时爆破减振的有效性。

从相隔炸药距离 13 m 往后,随着距离的增大,振速也逐渐降低,符合实际爆破作业时的振速规律。同时观察到延时时间为 25 ms 的最大振速明显低于 0 ms 时的最大振速,且通过观察斜率可以看到 25 ms 时的衰减速度在距离炸药 14~16 m 的区段要明显大于延时时间为 0 ms 时的衰减速度,在距离炸药 16~22 m 区间段衰减速度要稍微小于延时时间为 0 m 时的衰减速度。这说明延时爆破对振速的衰减也会产生影响,且通过图 6 的分析可以发现合适的爆破延时时间对振速的衰减会起到积极作用。

4 结论

1)对于双孔起爆,采用延时爆破技术能在一定程度上降低爆破振动产生的振动幅值,但当延时时间较小时,减振效果相对不明显,且在延时时间较小的区间内减振趋势相对平缓。当延时时间

较大时,减振效果会削弱,呈现出振速增大的趋势。

2)针对本文所述项目概况,采用延时时间为 25 ms 的延时爆破能达到最佳的减振效果,同时通过设定失效阈值观察主体结构受损程度进一步验证了该结论。即采用合理的延时时间,延时爆破能有效加快振速的衰减速度,大大减轻对临近岩体或者建(构)筑物的不利影响。

3)采用多孔爆破时,质点的峰值振速随着相隔炸药距离的增大整体呈负增长,但会有局部放大效应,这种放大效应是因为不同的振动波的波峰叠加导致的,与炸药间距离有关,同时采用合理的延时爆破技术能有效削弱这种放大效应。

参考文献(References):

- [1] 吴腾芳,王凯.延时爆破技术研究现状[J].爆破,1997,14(1):53-57.
WU T F, WANG K. Research status of delay blasting technology [J]. Blasting, 1997, 14 (1): 53-57.
- [2] 张迪.地铁隧道精确延时爆破振动传播规律与控制试验研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2016.
ZHANG D. Experimental study on vibration propagation law and control of precise delay blasting in subway tunnel [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2016.
- [3] 史秀志,陈寿如.爆破振动信号时频特征的延时时间效应[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2008(3):10-13.
SHI X Z, CHEN S R. Time delay effect of time-frequency characteristics of blasting vibration signal [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural science edition), 2008 (3): 10-13.
- [4] 叶海旺,石文杰,王二猛,等.金堆城露天矿生产爆破合理延时时间的探讨[J].爆破,2010,27(1):96-98.
YE H W, SHI W J, WANG E M, et al. Discussion on reasonable delay time of production blasting in Jinduicheng open pit mine [J]. Blasting, 2010, 27 (1): 96-98.
- [5] 沈晓松,赵明生,池恩安,等.延时时间对爆破块度影

- 响的试验研究[J].爆破,2012,29(3):70-73.
SHEN X S, ZHAO M S, CHI E A, et al. Experimental study on the effect of delay time on blasting fragmentation [J]. Blasting, 2012,29 (3): 70-73.
- [6] 刘庆,康强,赵明生.孔内延时爆破数值模拟及试验研究[J].矿业研究与开发,2013,33(3):108-110,121.
LIU Q, KANG Q, ZHAO M S. Numerical simulation and experimental study on delay blasting in hole [J]. Mining Research and Development, 2013,33 (3): 108-110,121.
- [7] 张袁娟,黄金香,农冬灵,等.某露天矿生产爆破合理延时时间探讨[J].煤炭技术,2013,32(12):202-203.
ZHANG Y J, HUANG J X, NONG D L, et al. Discussion on reasonable delay time of production blasting in an open pit mine [J]. Coal Technology, 2013,32 (12): 202-203.
- [8] 崔正荣,张西良,梅山铁矿深孔爆破合理延时时间研究[J].现代矿业,2014,30(5):9-10,39.
CUI Z R, ZHANG X L. Study on reasonable delay time of deep hole blasting in Meishan iron mine [J]. Modern Mining, 2014,30 (5): 9-10,39.
- [9] 吴贤振,尹丽冰,刘建伟,等.基于 LS-DYNA 的临近采空区多段爆破延时时间优化研究[J].爆破,2015,32(1):87-92.
WU X Z, YIN L B, LIU J W, et al. Optimization of multi-stage blasting delay time near goaf based on LS-DYNA [J]. Blasting, 2015,32 (1): 87-92.
- [10] 楼晓明,周文海,陈必港.基于 LS-DYNA 台阶延时爆破最佳延期时间的降振控制[J].福州大学学报(自然科学版),2016,44(5):753-759.
LOU X M, ZHOU W H, CHEN B G. Vibration reduction control based on optimal delay time of LS-DYNA bench blasting [J]. Journal of Fuzhou University (Natural science edition), 2016,44 (5): 753-759.
- [11] 陈士海,吴建.双孔延时及长柱药包爆破振动数值模拟研究[J].爆破,2017,34(3):46-52.
CHEN S H, WU J. Numerical simulation of blasting vibration of double hole delay and long column charge [J]. Blasting, 2017,34 (3): 46-52.
- [12] 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延时降振时间[J].爆炸与冲击,2019,39(4):1-10.
ZHOU W H, LIANG R, CHEN J L, et al. Delay vibration reduction time between blasting holes determined by time history stability coefficient [J]. Explosion and Impact, 2019,39(4):1-10.
- [13] 史秀志,邱贤阳,周健,等.超大断面高天井短延时类球状药包爆破成井技术与工程实例[J].岩石力学与工程学报,2016,35(8):1 659-1 667.
SHI X Z, QIU X Y, ZHOU J, et al. Short delay spherical charge blasting technology and engineering example of super large section high raise [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35 (8): 1 659-1 667.
- [14] 马晓明,王振宇,陈银鲁,等.精确延时爆破振动能量分布特征分析[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2012,13(4):449-454.
MA X M, WANG Z Y, CHEN Y L, et al. Analysis of vibration energy distribution characteristics of precise delay blasting [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural science edition), 2012,13 (4): 449-454.
- [15] 徐振洋,杨军,陈占扬.高精度雷管逐孔起爆地振信号的精确时频分析[J].煤炭学报,2013,38(S2):331-336.
XU Z Y, YANG J, CHEN Z Y. Precise time frequency analysis of ground vibration signal of hole by hole initiation of high precision detonator [J]. Journal of China Coal Society, 2013,38 (S2): 331-336.
- [16] 罗杰峰.隧道掘进爆破合理延时时间研究[D].长沙:长沙理工大学,2014.
LUO J F. Study on reasonable delay time of tunnel excavation blasting [D]. Changsha:Changsha University of Science & Technology, 2014.