

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2024.03.009

地下中深孔爆破的最佳减振延期时间研究*

王社光^{①②} 杨志强^{①②} 王立杰^{①②} 杨曦^③ 王福全^{①②} 王庆刚^{①②}

①河北钢铁集团沙河中关铁矿有限公司(河北邢台,054100)

②河北省复杂铁矿低碳智能高效开采技术创新中心(河北邢台,054100)

③华北理工大学矿业工程学院(河北唐山,063210)

[摘要] 以地下铁矿扇形中深孔爆破为研究对象,对实际采集的爆破振动波进行全波段的频率分析,在 Matlab 拟合叠加分析的基础上,提出了以高频次子周期对应的半周期为最佳延期时间的方法,并进行了数值模拟与现场验证。研究表明:将爆破振动波主频对应的半周期进行错相相减,减振效果并不明显,甚至有振动增强的现象;孔间最佳延期时间主要与爆破振动波有效波段内所包含的高频次子周期相关。以高频次子周期确定延期时间准确性更高。多次叠加减振强度的大小仍与高频次子周期相关。只是在低叠加次数条件下,两者之间的敏感性不高,次高频次子周期也可以起到一定的降振效果。但是,随着叠加次数的增加,两者之间的关联性不断增强,故只有高频次子周期才有良好的连续叠加减振效果。

[关键词] 中深孔爆破;孔间最佳延期时间;Matlab 数据拟合;高频次子周期;减振

[分类号] TD235

Optimal Vibration Reduction Delay Time in Medium-Deep Hole Blasting Underground

WANG Sheguang^{①②}, YANG Zhiqiang^{①②}, WANG Lijie^{①②}, YANG Xi^③, WANG Fuquan^{①②}, WANG Qinggang^{①②}

①Shahe Zhongguan Iron Mine Co., Ltd., Hebei Iron and Steel Group (Hebei Xingtai, 054100)

②Hebei Complex Iron Ore Low Carbon Intelligent and Efficient Mining Technology Innovation Center (Hebei Xingtai, 054100)

③College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology (Hebei Tangshan, 063210)

[ABSTRACT] Taking fan-shaped medium-deep hole blasting of underground iron ore as the research object, a full band frequency analysis was conducted on the actual collected blasting vibration waves. Based on Matlab fitting and superposition analysis, a method was proposed with the half-cycle corresponding to the high-frequency sub-cycle as the optimal delay time. It was verified by numerical simulation and field test. Results show that, by subtracting the half-cycle corresponding to the main frequency of blasting vibration waves in a staggered manner, the vibration reduction is not significant, and vibration enhancement is observed. The optimal delay time between holes is mainly related to the high-frequency sub-cycle contained within the effective band of the blasting vibration wave. Determining the delay time with the high-frequency sub-cycle is more accurate. The strength of multiple stacking is still related to the high-frequency sub-cycle. Under the condition of low stacking times, the sensitivity between the two is not high, and the sub-period of sub high frequencies can also have a certain vibration reduction effect. However, as the number of stacking increases, the correlation between the two continues to strengthen, so only high-frequency sub-cycles have good continuous superposition vibration reduction effects.

[KEYWORDS] medium-deep hole blasting; optimal delay time between holes; Matlab data fitting; high frequency sub-cycle; vibration reduction

0 引言

延期爆破广泛应用于矿山开采过程中,以减轻

爆破振动带来的危害。延期爆破主要是利用错峰相减原理,即在一定延期时间条件下,使不同孔位产生的爆破振动波的波峰与波谷相互叠加相消,进而达到减振的目的。这就使得合理延期时间的选择显得

* 收稿日期:2023-03-02

基金项目:河北省重点研发计划项目(20374103D)

第一作者:王社光(1986—),男,高级工程师,主要从事采矿技术研究。E-mail:406752459@qq.com

通信作者:王福全(1987—),男,高级工程师,主要从事采矿技术工作。E-mail:876855218@qq.com

尤为重要。史秀志等^[1]开展了爆破振动监测试验和时频特征分析,发现延期时间为30 ms和40 ms时的爆破效果最好。刘庆等^[2]通过数值模拟对延期减振时间的范围进行分析,发现当延期时间在30 ms以内时,减振效果较为明显。张袁娟等^[3]运用数值模拟方法,结合 Matlab 编程分析发现,42 ms 延期的爆破减振效果最好。

使用数码电子雷管可以更为精准地控制延期时间。杨育^[4]发现,露天浅孔爆破的最佳延期时间为5 ms,露天深孔爆破的最佳延期时间为7~10 ms。侯义辉等^[5]提出,竖井爆破的最佳延期时间为25 ms。刘翔宇等^[6]采用多因素法对隧道爆破延期时间进行分析。孟祥栋等^[7-8]对孔间微差起爆延期时间的设置方法进行了分析。

延期减振的关键在于延期时间的选择,但目前还没有一个统一的选择方法^[9-12]。归根结底,延期时间与爆破振动波的频率直接相关。而爆破振动波的全域频率幅值却难以有效表征其特征频率,这就给最佳延期时间的选择带来了困难。以主频为爆破振动波的特征频率计算延期时间,为延期时间的选择提供了一个依据。任登富等^[13]以爆破振动波主频为特征频率进行了延期时间的选择,确定了隧道爆破的最佳延期时间,并使峰值振速减小了48.7%。但实践中,以主频为特征频率进行最佳延期时间的计算,有时减振效果较好,有时则并不理想。

以某铁矿地下采场的扇形中深孔爆破为研究对象,对实际采集到的爆破振动波进行全波段的频率分析,在 Matlab 拟合分析的基础上,提出以高频次子周期对应的半周期为最佳延期时间,并进行了数值模拟验证。

1 爆破振动波采集

某铁矿井下-215 m 水平3NM1 矿房,根据施工经验确定正常排扇形中深孔装药和雷管段数。单排共14个扇形中深孔炮孔,孔径65 mm,孔底距1.6~1.8 m。设计延米装药量2.5 kg,炸药单耗0.3 kg/t,延米崩矿量5.85 t。孔间微差延时20 ms;单次爆破2排,排距1.5 m,排间微差300 ms。

采用 TC-4850 爆破测振仪测试爆破振动。爆破位置距离地表约450 m。在爆区上部均匀布设6个测点,分别标记为测点1[#]~6[#]。共进行4次爆破振动监测,测得爆破振动结果见表1。主频主要分布在25~45 Hz 之间。振动波形的主频不同,周期也不同,由此导致不同炮孔波形的叠加效果也不尽相同。

应根据不同的爆破振动波主频进行相应的分析,以达到最佳的爆破减振效果。以30、35 Hz 和40 Hz 为节点,在节点附近选取典型爆破振动波形,选取的典型波形主频为31.0、35.4 Hz 和39.2 Hz。

2 最佳延期时间

2.1 分析方法

首先,采用 Matlab 软件和 Fourier 级数进行爆破振动波数据拟合分析。将采集到的爆破振动波形拟合为时间全域的爆破振动波形拟合函数 $v(t)$ 。

$$v(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ f(t), & 0 \leq t \leq T; \\ 0, & t > T. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 表示爆破振动波拟合函数; t 表示时间; T 表示爆破振动波形的截断时间。

然后,应用 Matlab 软件,对不同组合条件下的爆破振动波进行叠加合成计算。以爆破振动波主频对应的半周期为最佳延期时间中心,考虑到爆破振动波包含频率的复杂性,每间隔2 ms 选取7~9组延期时间作为较优的延期周期。根据半周期错相相减,开展双炮孔叠加合成计算并获得结果。根据叠加合成结果,选取3~5组主频重叠的减振区间,作为孔间最佳延期时间的选取范围。

最后,以叠加次数代替炮孔数,进行不同炮孔数的叠加爆破振动减振分析。在最佳延期时间范围内,每间隔2 m 选取3~5组延期时间,叠加次数依次为1~10。针对典型爆破振动波,开展不同炮孔数的叠加爆破振动减振效果分析。依次进行叠加,获得不同叠加爆破次数的减振效果。综合确定叠加后的低值振速区域,优选最佳孔间延期时间和爆破分段。

2.2 延期时间分析

2.2.1 不同延期时间与频率减振效果

爆破振动波包含多种频率,受到爆破药量、地形、爆心距等多种因素影响,而主频受到的影响较大。故选取3种典型主频的爆破振动波,开展相应研究。3种典型主频的波形如图1所示。

对3种典型波形进行双炮孔叠加,确定不同延期时间下峰值振速的变化规律。主频为31.0 Hz 的爆破振动波的主频对应周期为32 ms,根据半周期错相相减可知,半周期16 ms 应为最佳延期时间。选定较优延期周期10、12、14、16、18、20 ms 和22 ms。主频为35.4 Hz 的爆破振动波的主频对应周期为28 ms,半周期14 ms 应为最佳延期时间,选定较

表 1 爆破振动测试结果

Tab. 1 Test results of blasting vibration

编号	测点	X 方向		Y 方向		Z 方向	
		主频/Hz	峰值振速/(cm · s ⁻¹)	主频/Hz	峰值振速/(cm · s ⁻¹)	主频/Hz	峰值振速/(cm · s ⁻¹)
I	1 [#]	33.6	0.10	33.6	0.12	26.5	0.04
	2 [#]	29.4	0.09	27.8	0.11	28.4	0.04
	3 [#]	32.3	0.13	37.7	0.15	27.0	0.05
	4 [#]	40.0	0.08	41.1	0.09	32.0	0.04
	5 [#]	43.0	0.01	43.5	0.11	35.7	0.03
	6 [#]	42.6	0.04	35.7	0.05	38.1	0.02
II	1 [#]	31.0	0.09	43.5	0.20	41.2	0.04
	2 [#]	38.1	0.24	30.8	0.21	35.1	0.05
	3 [#]	41.7	0.09	53.3	0.14	47.1	0.05
	4 [#]	39.2	0.12	43.0	0.11	44.9	0.06
	5 [#]	35.4	0.14	51.9	0.12	38.8	0.03
	6 [#]	35.4	0.07	36.0	0.15	33.6	0.02
III	1 [#]	—	—	—	—	—	—
	2 [#]	27.4	0.11	31.0	0.08	33.3	0.03
	3 [#]	39.6	0.28	39.2	0.44	32.3	0.09
	4 [#]	37.0	0.08	37.7	0.15	38.5	0.07
	5 [#]	—	—	—	—	—	—
	6 [#]	—	—	—	—	—	—
IV	1 [#]	—	—	—	—	—	—
	2 [#]	31.0	0.06	30.8	0.09	30.3	0.02
	3 [#]	39.2	0.10	39.6	0.14	32.5	0.03
	4 [#]	—	—	—	—	—	—
	5 [#]	—	—	—	—	—	—
	6 [#]	—	—	—	—	—	—

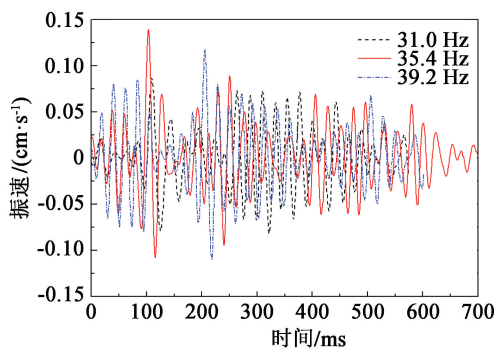


图 1 3 种典型主频波形

Fig. 1 Three typical waveforms in blasting

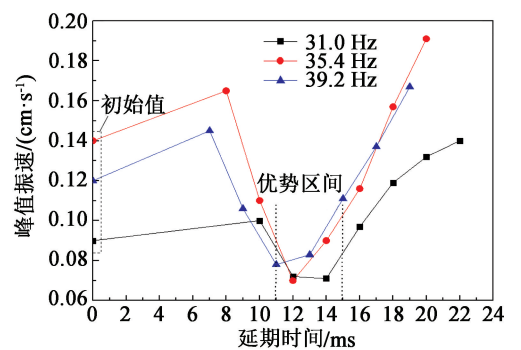


图 2 不同延期时间与峰值振速

Fig. 2 Different delay times and peak vibration velocities

优延期周期 8、10、12、14、16、18 ms 和 20 ms。39.2 Hz 的爆破振动波的主频对应周期为 26 ms, 半周期 13 ms 应为最佳延期时间, 选定较优延期周期 7、9、11、13、15、17 ms 和 19 ms。

对上述选定周期开展双炮孔叠加, 结果见图 2。主频为 31.0 Hz 的爆破振动波在 12 ms 和 14 ms 的孔间延期时间下, 可以达到减振的目的, 峰值振速由

0.090 cm/s 分别下降到 0.072 cm/s 和 0.071 cm/s, 平均降幅达到 21%。主频为 35.4 Hz 的爆破振动波在 10、12、14 ms 和 16 ms 的孔间延期时间下, 可以达到减振的目的, 峰值振速由 0.140 cm/s 分别下降到 0.110、0.070、0.090 cm/s 和 0.116 cm/s, 平均降幅达到 31%, 最大降幅为 50%。主频为 39.2 Hz 的爆破振动波在 9、11、13 ms 和 15 ms 的孔间延期

时间下,可以达到减振的目的,峰值振速由 0.120 cm/s 分别下降到 0.106、0.078、0.083 cm/s 和 0.111 cm/s,平均降振率达到 21%,最大降幅为 35%。

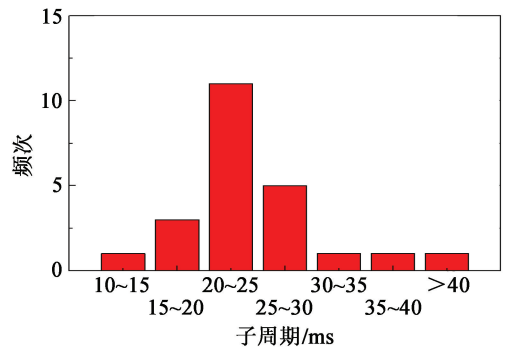
由于爆破振动波包含频率的复杂性,采用以主频计算得到的半周期进行错相相减的方法,并不一定能准确地减小爆破振动。主频为 31.0 Hz 的爆破振动波的主频对应周期为 32 ms,半周期 16 ms 应为最佳延期时间。但是,在孔间延时为 16 ms 时,峰值振速不但没有降低,反而增加到了 0.097 cm/s。主频为 35.4 Hz 的爆破振动波的主频对应周期为 28 ms,半周期 14 ms 应为最佳延期时间。虽然,14 ms 延期时间也有效降低了峰值振速,但是,延期时间为 12 ms 时峰值振速降低最大。39.2 Hz 的爆破振动波的主频对应周期为 26 ms,半周期 13 ms 应为最佳延期时间。但是,在 11 ms 时的减振效果最好。

因此,减振周期的选择应该从爆破振动波包含的所有波段周期频次出发,统计确定所有波段子周期,以最高频次波段进行错相相减。如图 3(a)所示,对主频为 31.0 Hz 的爆破振动波全波段所包含的子周期进行统计。子周期中,20~25 ms 段包含的子周期个数最多,而且多集中在 22、23 ms 和 24 ms 几个周期上。其次为 25~30 ms 段,包含的子周期个数多集中在 27 ms 和 28 ms 2 个周期上。12 ms 和 14 ms 的全周期分别为 24 ms 和 28 ms,恰好处于频次最高与次高的周期上。所以,主频为 31.0 Hz 的爆破振动波在 12 ms 和 14 ms 的半周期错相相减中,减振的效果最好。而主频对应的半周期 16 ms 出现频次低,出现位置可能在波段的的不同位置,前部波段包含的子周期与主频周期并不对应,波形峰谷难以有效对应,造成减振效果差,甚至出现不降反增的现象。当然,主频对应周期也可能是高频次子周期,此时也可以得到较好的减振效果。

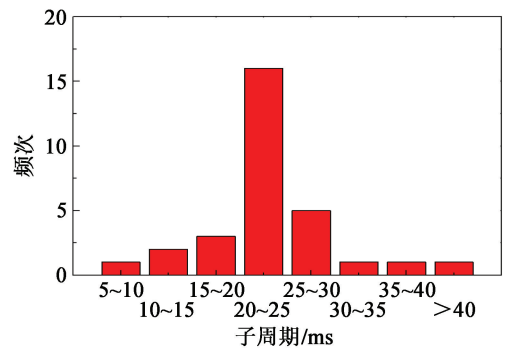
如图 3(b)所示,主频为 35.4 Hz 的爆破振动波子周期中,20~25 ms 段所包含的子周期个数最多,25~30 ms 段包含的子周期个数次之。高频子周期与减振效果较好的周期相对应。

如图 3(c)所示,主频为 39.2 Hz 的爆破振动波子周期中,20~25 ms 段包含的子周期个数最多。高频子周期与减振效果较好的周期相对应。

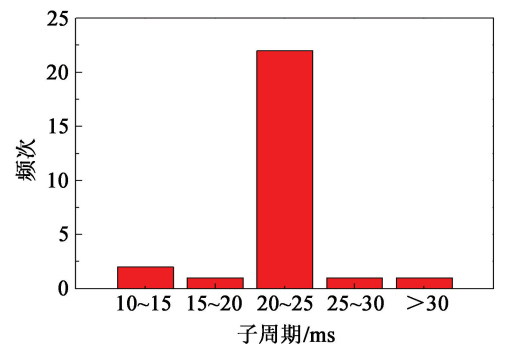
3 种典型爆破振动波形的主频虽然不同,但是,减振效果最好的优势区间仍有部分重合,也是由于最高频次子周期相近导致的。而优势区间的宽度不同,则主要与次高频次的子周期相关。除最高频次子周期外,爆破振动波还包含一定量次高频次的子



(a) 主频 31.0 Hz



(b) 主频 35.4 Hz



(c) 主频 39.2 Hz

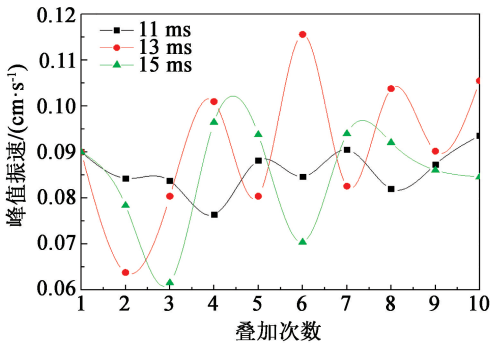
图 3 不同子周期出现的频次

Fig. 3 Occurrence frequency of different sub-cycles

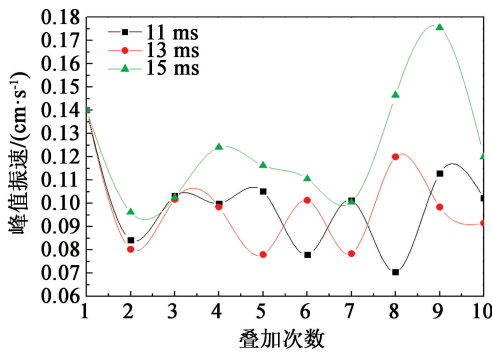
周期,也可以减小爆破振动,但是效果略有降低。综合分析结果,三者重叠的减振区间在 11~15 ms 之间,孔间延期时间可在此范围内选取。

2.2.2 不同叠加次数减振效果

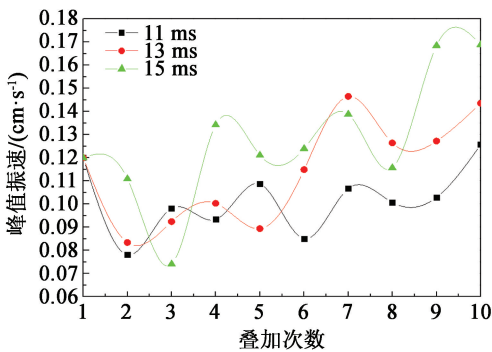
针对 3 种典型爆破振动波,以不同叠加次数代表不同炮孔数,开展不同炮孔数的爆破振动减振分析。选定叠加次数依次为 1~10。以 11、13 ms 和 15 ms 为延期时间,每个波形按照延期时间与次数依次叠加,并确定叠加后振速,优选最佳叠加次数,见图 4。3 种典型波形的叠加峰值振速均随着叠加次数的增加呈现波浪式上下振动,与单次不叠加的情况相比,减振强度或强或弱。



(a) 主频 31.0 Hz



(b) 主频 35.4 Hz



(c) 主频 39.2 Hz

图 4 不同叠加次数减振效果

Fig. 4 Vibration reduction of different stacking times

图 4(a) 中:13 ms 延时条件下,主频 31.0 Hz 的典型振动波在叠加次数为 2、3、5 和 7 时出现了振动强度的减弱;15 ms 延时条件下,在叠加次数为 2、3、6、9 和 10 时出现了振动强度的减弱;只有 11 ms 延时条件下,在叠加次数为 2~8 的连续情况下出现了振动强度的减弱。11 ms 延时条件下,适用的叠加次数范围更广,但是,减振强度要低。

如图 4(b) 所示,11 ms 和 13 ms 延时条件下,主频 35.4 Hz 的典型振动波在叠加次数为 2~10 的连续情况下均出现了振动强度的减弱;15 ms 延时条件下,在叠加次数为 2~7 的连续情况下均出现了振动强度的减弱,适用的叠加次数范围减小,减振强度

也略低。

如图 4(c) 所示,13 ms 和 15 ms 延时条件下,主频 39.2 Hz 的典型振动波,在叠加次数为 2 和 3 时出现了振动强度的减弱;11 ms 延时条件下,在叠加次数为 2~9 的连续情况下均出现了振动强度的减弱,适用的叠加次数范围增加,减振强度也增加。

综合上述分析,多次叠加减振强度的大小仍与高频子周期相关。只是在低叠加次数下,两者之间的敏感性不高,次高频子周期也可以起到一定的降振效果。但是,随着叠加次数的增加,两者之间的关联性不断增强,故只有高频子周期才有良好的连续叠加减振效果。结合前文中对高频子周期的分析,推荐使用的孔间延期时间为 11 ms 或 12 ms,叠加次数可选取 7~9,即在保证每段药量相近的情况下可以分为 7~9 段爆破。

3 数值模拟验证与现场实践

3.1 数值模拟验证

采用 LS-DYNA 数值模拟软件,以施加典型波形的方式对延期时间进行验证。岩石采用 * Mat_Plastic_Kinematic 材料模型。具体参数如表 2 所示。

表 2 岩石材料参数

Tab. 2 Material parameters of rock

密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	弹性 模量/ GPa	泊松 比	切线 模量/ GPa	抗压 强度/ MPa	抗拉 强度/ MPa
2.35	56.6	0.24	5.4	56	4.49

如图 5 所示,建立长 20 m、宽 10 m 的爆破区域模型。其中,设置炮孔个数为 8,采用拉格朗日网格建立。模型边界为透射边界。在模型另一端监测峰值振幅。

采集主频为 35.4 Hz 的爆破振动波形,按照 11、

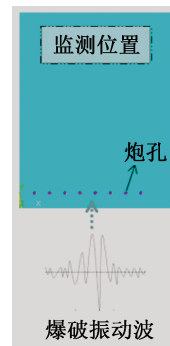


图 5 爆破区域模型

Fig. 5 Model of blasting area

13 ms 和 15 ms 的孔间延期时间分别施加于各个炮孔,并在监测位置提取爆破振动波形,结果如图 6 所示。在 8 个炮孔依次叠加的情况下,延期时间为 15 ms 的峰值振速最大,13 ms 的峰值振速次之,11 ms 的峰值振速最小。这与前文中的分析结果相一致,验证了前文分析结果的准确性。

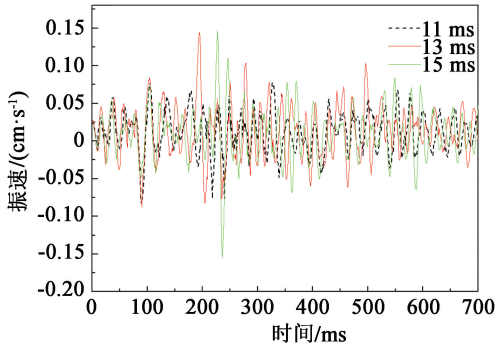


图 6 不同延期时间模拟叠加效果

Fig. 6 Simulated overlay outcomes of different delay times

3.2 现场实践

为进一步验证延期时间的准确性,开展现场试验研究。共布设 6 个测点,点位与前文中提及的 6 个点位相同。孔间延期时间为 11 ms,其他爆破参数不变。采集爆破振动波 3 次,结果如表 3 所示。改变延期时间后,部分测点振速过小,已经达不到仪

器的触发振速。采集到的振速中,大部分没有超过 0.10 cm/s,最大振速 0.15 cm/s,与 20 ms 延期时间相比,爆破振速明显减小。证明了文中所取延期时间的准确性和所提方法的合理性。

4 结论

地下中深孔爆破中,最佳延期时间的选择是决定减振效果的关键。经现场爆破振动波采集、Matlab 拟合分析、数值模拟与现场实践验证,得出以下结论:

1) 以爆破振动波主频对应半周期进行错相相减,减振效果并不明显,甚至有振动增强的现象。最佳孔间延期时间主要与爆破振动波有效波段内所包含的高频次子周期相关。根据典型爆破振动波的计算结果,高频次子周期主要集中在 20 ~ 25 ms 之间。3 种典型爆破振动波的主频虽然不同,但是,由于最高频次子周期相近,减振效果最好的优势区间仍有部分重合。3 种典型爆破振动波重叠的减振区间在 11 ~ 15 ms 之间,孔间延期时间可在此范围内选取。此外,除最高频次子周期外,爆破振动波包含的一定量次高频次的子周期也可以减小爆破振动,但是效果略有降低。

表 3 爆破振动验证试验结果

Tab. 3 Verification test results of blasting vibration

编号	测点	X 方向		Y 方向		Z 方向	
		主频/Hz	峰值振速/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	主频/Hz	峰值振速/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	主频/Hz	峰值振速/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
I	1 [#]	31.5	0.06	33.8	0.08	35.6	0.03
	2 [#]	32.0	0.05	35.7	0.07	32.1	0.02
	3 [#]	33.2	0.08	38.7	0.11	31.5	0.02
	4 [#]	36.6	0.07	37.2	0.08	34.3	0.03
	5 [#]	—	—	—	—	—	—
	6 [#]	—	—	—	—	—	—
II	1 [#]	—	—	—	—	—	—
	2 [#]	29.2	0.09	33.0	0.09	31.2	0.03
	3 [#]	38.1	0.12	37.2	0.15	33.1	0.06
	4 [#]	34.4	0.08	38.1	0.10	35.7	0.04
	5 [#]	—	—	—	—	—	—
	6 [#]	—	—	—	—	—	—
III	1 [#]	—	—	—	—	—	—
	2 [#]	39.2	0.08	34.1	0.09	35.3	0.02
	3 [#]	32.3	0.12	30.1	0.08	35.2	0.05
	4 [#]	—	—	—	—	—	—
	5 [#]	—	—	—	—	—	—
	6 [#]	—	—	—	—	—	—

2) 多次叠加, 减振强度的大小仍与高频次子周期相关。只是在低叠加次数条件下, 两者之间的敏感性不高, 次高频次子周期也可以起到一定的降振效果。但是, 随着叠加次数的增加, 两者之间的关联性不断增强, 故只有高频次子周期才有良好的连续叠加减振效果。推荐使用的孔间延期时间为 11 ms 或 12 ms, 叠加次数可选取为 7~9, 即在保证每段药量相近的情况下可以分为 7~9 段爆破。

参 考 文 献

- [1] 史秀志, 陈寿如. 爆破振动信号时频特征的微差时间效应[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2008, 23(3): 10-13.
SHI X Z, CHEN S R. Delay time interval effect for the time-frequency characteristic of blast vibration signal [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2008, 23(3): 10-13.
- [2] 刘庆, 康强, 赵明生. 孔内微差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 experiment research of in-hole microsecond blasting [J]. Mining Research and Development, 2013, 33(3): 108-110, 121.
- [3] 张袁娟, 黄金香, 农冬灵, 等. 某露天矿生产爆破合理微差时间探讨[J]. 煤炭技术, 2013, 32(12): 202-203.
ZHANG Y J, HUANG J X, NONG D L, et al. Study on reasonable millisecond delay time in open-pit mine [J]. Coal Technology, 2013, 32(12): 202-203.
- [4] 杨育. 孔间超短延时台阶爆破干扰降振技术[J]. 工程爆破, 2019, 25(3): 53-59.
YANG Y. Interference vibration reduction technique of ultra-short delay step blasting between holes [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(3): 53-59.
- [5] 侯义辉, 陈航, 王薇, 等. 竖井爆破最佳延时时间的减振控制研究[J]. 工程爆破, 2021, 27(1): 109-115.
HOU Y H, CHEN H, WANG W, et al. Research on vibration reduction control of optimal delay time of shaft blasting [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(1): 109-115.
- [6] 刘翔宇, 龚敏, 吴昊骏, 等. 多因素耦合影响下隧道电子雷管爆破参数的计算与实践[J]. 振动与冲击, 2021, 40(5): 24-32.
LIU X Y, GONG M, WU H J, et al. Calculation and practice of blasting parameters of electronic detonator in tunnel under the influence of multi-factor coupling [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(5): 24-32.
- [7] 孟祥栋, 田振农, 王守伟, 等. 城区隧道微震爆破技术研究[J]. 爆破, 2011, 28(4): 6-10.
MENG X D, TIAN Z N, WANG S W, et al. Study on slight vibration technology of tunnel blasting in urban area [J]. Blasting, 2011, 28(4): 6-10.
- [8] 傅洪贤, 赵继罡, 高宇璠. 铁路隧道近距下穿地铁隧道的微振爆破技术[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(9): 72-78.
FU H X, ZHAO J G, GAO Y F. Micro-vibration blasting technology for railway tunnels beneath existing metro tunnel in short distance [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(9): 72-78.
- [9] 王松青, 张全峰, 汪海波, 等. 武汉地铁区间隧道下穿建筑物爆破振动控制技术[J]. 工程爆破, 2020, 26(1): 85-90.
WANG S Q, ZHANG Q F, WANG H B, et al. Research on blasting construction technology in subway tunnel beneath buildings in Wuhan [J]. Engineering Blasting, 2020, 26(1): 85-90.
- [10] 方俊波. 地铁隧道爆破施工下穿地表建筑物的减振技术研究[J]. 中国工程科学, 2014, 16(11): 58-64.
FANG J B. Study on vibration reduction to adjacent surface building due to subway tunnel blasting [J]. Strategic Study of CAE, 2014, 16(11): 58-64.
- [11] 曹杨, 王旭春, 余志伟, 等. 隧道近距下穿老旧建筑物爆破振动监测及减振技术研究[J]. 施工技术, 2017, 46(11): 82-85.
CAO Y, WANG X C, YU Z W, et al. Blasting vibration monitoring and reduction technology of tunnel underpassing aging buildings in a short distance [J]. Construction Technology, 2017, 46(11): 82-85.
- [12] 李祥龙, 张其虎, 王建国, 等. 地下爆破精确延时逐孔起爆减振试验研究[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(3): 401-410.
LI X L, ZHANG Q H, WANG J G, et al. Experimental study on precise delay hole-by-hole blasting vibration reduction of underground blasting [J]. Gold Science and Technology, 2021, 29(3): 401-410.
- [13] 任登富, 简中飞, 孟祥栋, 等. 数码雷管错相减震爆破技术在地铁隧道施工中的应用[J]. 爆破, 2020, 37(2): 53-59.
REN D F, JIAN Z F, MENG X D, et al. Application of staggered phase damping blasting technology of electronic detonator in Guiyang Metro Tunnel [J]. Blasting, 2020, 37(2): 53-59.