

# 岩体及充填体爆破振动速度衰减规律研究

张波

(山东黄金矿业(莱州)有限公司焦家金矿)

**摘要:**巷道掘进爆破中,爆破振动是影响巷道稳定性和充填体稳定性的重要因素,频繁的爆破振动会对巷道围岩和充填体造成损伤,最终发生失稳破坏。通过建立爆破振动监测系统,改进爆破方案和监测位置研究岩体和充填体爆破振动速度衰减规律,得出岩体与充填体振动速度衰减规律的差异性,从而优化焦家金矿爆破药量。研究表明:距离爆源越近,爆破振动速度越大,而且会随着爆心距增加逐步衰减;最大振动速度出现在爆源附近,采场爆破对充填体的扰动破坏更大;距离爆炸点相等的充填体平均振动速度为0.223 cm/s,要大于岩体平均振动速度(0.087 cm/s)。根据焦家金矿岩体爆破振动速度传播特点,结合GB 6722—2023《爆破振动安全规程》,得出了最大单段药量与安全距离的对应关系,提出了一种新的动力应力比法,不仅为优化凿岩爆破设计和爆破药量设计提供依据,而且为焦家金矿深层矿床安全高效开采提供可靠的保证。

**关键词:**爆破振动速度;充填体;稳定性;振动监测;爆破振动

中图分类号:TD235

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)05-0014-05

doi:10.11792/hj20240504

## 引言

爆破振动达到足够强度时,就会引起各种破坏现象,造成矿山经济损失<sup>[1]</sup>。爆破振动具有非常典型的非平稳随机信号特点,对建筑物的影响实质上是一种能量的传递和转化过程,该过程会受到爆破地震波能量特征的影响<sup>[2]</sup>。

山东黄金矿业(莱州)有限公司焦家金矿(下称“焦家金矿”)采用进路式充填采矿法回采过程中,主要采用凿岩爆破的回采方式,频繁的生产爆破会对巷道围岩和充填体造成损伤,极易诱发巷道、采场和采空区等矿山地下工程的破坏或坍塌<sup>[3]</sup>。了解爆破振动在巷道围岩和充填体的衰减规律,能较好地预判特定条件下的爆破振动,防止围岩和充填体的失稳破坏<sup>[4]</sup>。

## 1 爆破振动监测系统

### 1.1 爆破振动监测设备

本次试验采用NUBOX-6016型智能振动监测仪,该设备主要针对现场爆破振动、爆破冲击等进行测试,记录分析爆破信号,对传感器产生的动态、静态模拟型号进行数字转换和存储,对关心特征的信号进行正确记录,可实现多段振动信号的连续自动记录<sup>[5]</sup>。配套使用TP3V-4.5三维速度型传感器和

BM View 爆破振动专用测试分析软件。

### 1.2 爆破振动监测内容

振动监测一般采用质点峰值振动速度,传感器收集数据,导入BM View软件得到振动信号,进行频谱分析、矢量合成等处理。爆破振动监测的主要内容为:

1) 监测主振频率,确定爆破振动主振频率频谱,分析变化规律,以降低共振对沿脉运输巷道的破坏作用<sup>[6]</sup>。

2) 监测最大振动速度,得到爆破质点峰值振动速度,分析最大装药量和振动速度关系,以寻找爆破药量和爆破距离与沿脉运输巷道破坏的联系<sup>[7]</sup>。

## 2 充填体爆破振动速度衰减规律

### 2.1 爆破振动速度监测方案

以焦家金矿-570 m阶段112采场为例,该采场采用浅孔爆破,单次爆破推进1.8~2.0 m。爆破振动传感器的安装是爆破质点峰值振动速度监测的关键,由于112采场的进路较短,将传感器布置在相邻的108采场,爆源和测点中间全部是充填体,对数据的分析无影响<sup>[8]</sup>。

### 2.2 监测结果及分析

以焦家金矿-570 m阶段112采场为例,充填体各传感器监测数据见表1,监测点参数和分析得到的

合速度见表2。每个传感器有3个通道,每个通道有3个振动波形,表示采场微差爆破中的其中3段,最大合速度对应现场最大单段药量<sup>[9]</sup>,由于1号传感器比其他传感器距爆源更近,因此所监测到的振动速度是最大的。由表2可知,在爆破地震波传播过程中,随着爆心距的增大,其振动速度迅速衰减。

表1 充填体各传感器监测数据

Table 1 Monitoring data of sensors for filling body

传感器	通道	最大振动速度/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	主振频率/ Hz	振动持续时间/ s
1号传感器	通道1	0.639	46.997	0.629
	通道2	0.47	54.321	1.206
	通道3	-0.801	35.4	1.842
2号传感器	通道1	0.828	46.997	0.832
	通道2	-0.672	46.997	1.839
	通道3	0.51	57.373	0.843
4号传感器	通道1	0.476	60.425	0.81
	通道2	-0.341	57.373	1.839
	通道3	-0.34	60.425	1.838

表2 充填体各监测点参数和合速度

Table 2 Parameters and resultant velocity of monitoring points for filling body

监测点	传感器	爆心距/m	合速度/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	1号传感器	52.49	0.846
2	2号传感器	53.64	0.853
3	4号传感器	64.07	0.571

### 2.3 预测模型

由于炸药量和爆心距是影响爆破振动强度的主要因素<sup>[5]</sup>。因此,以爆破质点峰值振动速度表征振动强度,应用萨道夫斯基经验公式进行计算。

$$v_z = K \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: $v_z$ 为质点振动速度( $\text{cm}/\text{s}$ ); $K$ 为与介质性质相关的系数; $Q$ 为最大单段药量( $\text{kg}$ ); $R$ 为监测点到爆源的距离( $\text{m}$ ); $\alpha$ 为振动波随距离衰减的系数<sup>[10]</sup>。

根据萨道夫斯基经验公式,利用回归原理,找出合速度( $v$ )与比例距离之间的关系,得到 $K$ 、 $\alpha$ 值。利用多次监测到的爆破振动数据,计算得到式(2):

$$v = 367.04085 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.76436} \quad (2)$$

峰值振动速度随比例距离变化关系见图1。

## 3 岩体爆破振动速度衰减规律

### 3.1 爆破振动速度监测方案

以焦家金矿100-4采场为例,由于巷道布置错

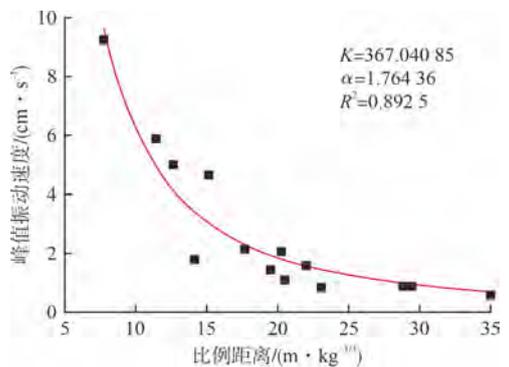
图1 充填体峰值振动速度随比例距离变化关系<sup>[11]</sup>

Fig. 1 Relationship chart of peak vibration velocity of filling body with respect to proportional distance

综复杂,选择在围岩比较坚固的地方布置传感器,且严格避开隔空区。在综合考虑现场布置的条件下,最终选择将传感器布置在采场进路中。

### 3.2 监测结果及分析

以焦家金矿100-4采场第一次掘进爆破为例,各传感器监测数据见表3,监测点参数和分析得到的合速度见表4。由表3、表4可知,在爆破地震波传播的过程中,随着爆心距的增大,其振动速度迅速衰减。

表3 100-4采场各传感器监测数据

Table 3 Monitoring data of sensors for 100-4 stope

传感器	通道	最大振动速度/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	主振频率/ Hz	振动持续时间/ s
1号传感器	通道1	-0.978	63.171	11.259
	通道2	-1.201	101.318	11.258
	通道3	-0.831	48.676	11.259
2号传感器	通道1	-0.879	80.414	11.208
	通道2	-0.677	92.773	11.208
	通道3	-0.471	42.267	11.208
3号传感器	通道1	-0.597	92.773	11.259
	通道2	-0.51	126.648	11.259
	通道3	-0.379	42.267	11.259
4号传感器	通道1	-0.322	144.806	11.259
	通道2	-0.184	73.853	11.258
	通道3	0.143	82.245	10.301

表4 100-4采场各监测点参数和合速度

Table 4 Parameters and resultant velocity of monitoring points for 100-4 stope

监测点	传感器	高差/ m	水平距离/ m	爆心距/ m	合速度/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	1号传感器	1.53	27.12902	27.17213	1.468
2	2号传感器	0.03	38.18325	38.18326	0.9
3	3号传感器	-1.47	48.74394	48.7661	0.702
4	4号传感器	-1.77	67.77662	67.79973	0.33

### 3.3 预测模型

计算方法同 2.3, 根据萨道夫斯基经验公式, 利用回归原理, 以及多次监测到的爆破振动数据, 找出合速度与比例距离之间的关系, 得到  $K$ 、 $\alpha$  值。计算得到式(3):

$$v = 164.24 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.548} \quad (3)$$

岩体峰值振动速度随比例距离变化关系拟合图见图 2。

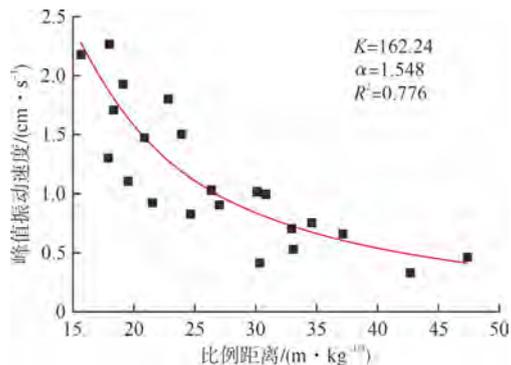


图 2 岩体峰值振动速度随比例距离变化关系

Fig. 2 Relationship chart of peak vibration velocity of rock with respect to proportional distance

## 4 对比分析

### 4.1 岩体与充填体峰值振动速度对比

通过上述得到的充填体和岩体爆破振动速度衰减预测公式, 可以发现在比例距离相同的情况下, 即爆破时最大单段药量及爆心距相同, 距爆源越近时, 相比岩体, 充填体峰值振动速度越大, 但充填体振动速度的衰减速度更快; 当峰值振动速度传播到距爆源较远位置时, 充填体的峰值振动速度又会比岩体峰值振动速度小(见图 3)。因此, 在爆源附近, 采场爆破对充填体的破坏更大<sup>[11-13]</sup>。

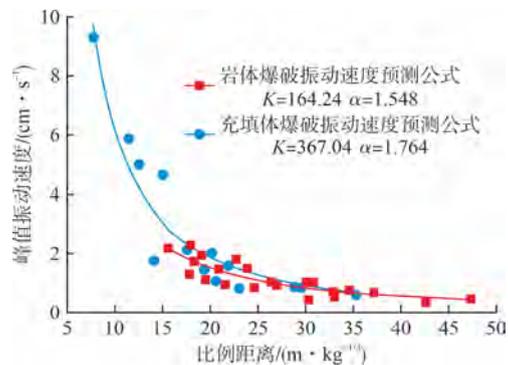


图 3 岩体与充填体峰值振动速度对比图

Fig. 3 Comparison chart of peak vibration velocity between rock and filling body

若把充填体看作软弱岩体, 获得经验公式中的场地系数  $K$ 、衰减系数  $\alpha$  和 GB 6722—2023《爆破安全

规程》(见表 5)中的一致, 说明监测结果的正确性。

表 5 不同岩性的  $K$ 、 $\alpha$  值

岩性	$K$	$\alpha$
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

### 4.2 敲击试验模拟爆破现场

萨道夫斯基经验公式并不适用在爆源近点(如数米以内)的爆炸振动速度计算<sup>[14-18]</sup>。在现场进行爆破振动监控时, 为了防止对设备造成损害, 必须将传感器设置在远离爆炸源的地方<sup>[19-23]</sup>, 同时又不能监控爆炸附近的振动速度, 所以在岩体与充填物之间进行了撞击测试, 发现岩体与充填物之间的距离是一样的(见图 4), 监测结果见表 6。



图 4 敲击试验传感器在岩体和充填体中的布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sensor layout for impact test in rock and filling body

表 6 敲击试验监测结果

序号	距敲击点距离/ m	充填体中振动速度/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	岩体中振动速度/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	2	0.114	0.086
2	2	0.143	0.095
3	2	0.213	0.092
4	2	0.241	0.092
5	2	0.153	0.088
6	2	0.233	0.089
7	2	0.263	0.079
8	2	0.285	0.080
9	2	0.219	0.089
10	2	0.133	0.084
11	2	0.309	0.085
12	2	0.256	0.091
13	2	0.337	0.083
平均值	2	0.223	0.087

### 4.3 爆破药量优化设计

在 GB 6722—2023《爆破安全规程》中, 对于特定的典型结构, 提出了若干具体的临界值, 并将其作为判定依据, 简明扼要, 易于理解, 但判据比较单一,

并不具有很好的说服力。同时,爆破振动受多种条件综合影响,如岩石力学条件、地形环境条件等。为此,本文提出了一种新的动力应力比法。根据焦家金矿岩体爆破振动速度传播特点,结合 GB 6722—2023《爆破安全规程》,得出了最大单段药量与安全距离的对应关系,给出了相应的计算公式:

$$v = 164.24 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.548} \quad (4)$$

另外,通过拟合最大单段药量与安全距离,得出了无支护硐室安全距离、风井与无支护巷道、采场间爆破安全距离、喷锚网支护巷道安全距离、U型钢支护巷道安全距离等。以无支护硐室的安全距离作为实例,结果见图5、表7。

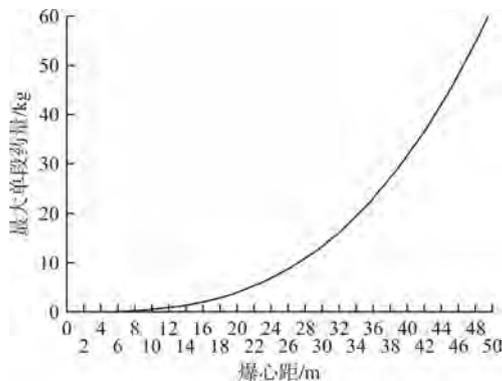


图5 无支护硐室的安全距离

Fig. 5 Safety distance for unsupported chamber

表7 爆心距与最大单段药量的关系

Table 7 Relationship between blasting center distance and maximum single charge weight

爆心距/ m	最大单段 药量/kg	爆心距/ m	最大单段 药量/kg	爆心距/ m	最大单段 药量/kg
2	0	36	23.02	70	169.26
4	0.03	38	27.08	72	184.19
6	0.11	40	31.58	74	199.97
8	0.25	42	36.56	76	216.62
10	0.49	44	42.04	78	234.18
12	0.85	46	48.03	80	252.66
14	1.35	48	54.57	82	272.08
16	2.02	50	61.68	84	292.48
18	2.88	52	69.39	86	313.88
20	3.95	54	77.70	88	336.29
22	5.25	56	86.66	90	359.74
24	6.82	58	96.28	92	384.26
26	8.67	60	106.59	94	409.87
28	10.83	62	117.61	96	436.59
30	13.32	64	129.36	98	464.45
32	16.17	66	141.87	100	493.47

## 5 结论

本文通过监测焦家金矿巷道凿岩爆破产生的爆

破振动,研究爆破振动速度在巷道围岩和充填体中的衰减规律,并根据萨道夫斯基经验公式,分别得出预测模型,得到以下结论:

1) 充填体中距离爆源 52.49 m 的 1 号传感器测得的合速度为 0.846 cm/s,而距离爆源 64.07 m 的 3 号传感器测得的合速度为 0.571 cm/s,表明距离爆源越近,爆破振动速度越大,而且会随着爆心距增加逐步衰减。

2) 最大振动速度在爆源附近,采场爆破对充填体的扰动破坏更大。

3) 在进行敲击试验时发现,在距离爆炸点相等的充填体内平均振动速度为 0.223 cm/s,要大于岩体平均振动速度(0.087 cm/s)。

4) 根据焦家金矿岩体爆破振动速度传播的特点,结合 GB 6722—2023《爆破安全规程》,得出了最大单段药量与安全距离的对应关系为  $v = 164.24 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.548}$ 。

### [参考文献]

- [1] PENG K, LIU Z P, ZHANG Y L, et al. Determination of isolation layer thickness for undersea mine based on differential cubature solution to irregular Mindlin plate [J]. Journal of Central South University, 2017, 24(3): 708-719.
- [2] PENG K, YIN X Y, YIN Z G, et al. Galerkin solution of Winkler foundation-based irregular Kirchhoff plate model and its application in crown pillar optimization [J]. Journal of Central South University, 2016, 23(5): 1 253-1 263.
- [3] 彭康, 李夕兵, 彭述权, 等. 基于响应面法的海下框架式采场结构优化选择[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(8): 2 417-2 422.
- [4] 彭康, 李夕兵, 彭述权, 等. 海底下架式分层充填法开采中矿岩稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(1): 3 452-3 458.
- [5] 钱七虎, 陈士海. 爆破地震效应[J]. 爆破, 2004, 21(2): 1-5.
- [6] 李洪涛, 舒大强. 爆破震动衰减规律的影响因素[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(1): 79-82.
- [7] 李洪涛. 基于能量原理的爆破地震效应研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2007.
- [8] 王明年, 潘晓马, 张成满, 等. 邻近隧道爆破振动响应研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 412-414.
- [9] 蒋复量. 金属矿岩可爆性评价及井下采场深孔爆破参数优化的理论与试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [10] 张雪亮, 黄树棠. 爆破地震效应[M]. 北京: 地震出版社, 1981.
- [11] 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.
- [12] 周亚博, 张杰, 刘也, 等. 深部破碎巷道围岩——支护作用与支护时机[J]. 金属矿山, 2022(6): 17-23.
- [13] 张沛. 破碎顶板巷道围岩支护优化及应用[J]. 能源与节能, 2022(4): 149-151.
- [14] 王进忠, 年鑫喆. 深孔台阶爆破振动衰减及信号能量频域分布特征[J]. 现代矿业, 2022, 38(4): 86-90.

- [15] 孙琰,刘敬智,李吉杨英. 减振孔在缅甸某露天矿区爆破振动控制中的应用[J]. 中国矿业,2022,31(2):155-159.
- [16] 许金成,张绍江,李岗,等. 金属矿破碎带巷道围岩支护优化设计[J]. 中国矿山工程,2021,50(6):92-96.
- [17] 王雨波,汪为平,刘海林. 某地下矿山大直径中深孔爆破振动衰减规律分析[J]. 现代矿业,2021,37(8):91-93,108.
- [18] 李鹏,朱永建,王平,等. 高水平应力下巷道围岩破坏机理及其控制技术[J]. 矿业工程研究,2020,35(1):33-40.
- [19] 李文豪. 破碎岩体的强度特征研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2018.
- [20] 胡学龙,璩世杰,蒋文利,等. 基于等效路径的爆破地震波衰减规律[J]. 爆炸与冲击,2017,37(6):966-975.
- [21] 刘明学. 爆破振动作用下深埋直墙拱形硐室的动力响应研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [22] 赵昕普. 爆破振动衰减规律及爆破振动对岩体累积损伤影响的研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2008.
- [23] 陈仕阔. 采动破碎岩体渗流特性及渗流耦合模型研究[D]. 沈阳:东北大学,2008.

## Study on attenuation law of blasting vibration velocity in rock mass and filling body

Zhang Bo

(*Jiaojia Gold Mine, Shandong Gold Mining Industry (Laizhou) Co., Ltd.*)

**Abstract:** Blasting vibration in roadway excavation blasting is an important factor affecting the stability of roadways and filling bodies. Frequent blasting vibration can cause damage to the surrounding rock of roadways and filling bodies, ultimately leading to instability and failure. By establishing a blasting vibration monitoring system and improving blasting schemes and monitoring positions, the attenuation law of blasting vibration velocity in the rock mass and filling body is studied. The differences in vibration attenuation laws between rock mass and filling body are obtained, thereby optimizing the blasting charge of Jiaojia Gold Mine. The results show that the closer to the blast source, the more pronounced the blasting vibration velocity, which gradually decreases with increasing distance from the blast center. The maximum vibration velocity occurs near the blast source, and blasting in the stope causes greater disturbance and damage to the filling body. The average vibration velocity in the filling body at a distance equal to the explosion point is 0.223 cm/s, greater than the average vibration velocity inside the rock of 0.087 cm/s. Based on the characteristics of blasting vibration velocity propagation in Jiaojia Gold Mine, combined with GB 6722—2023 Blasting Vibration Safety Regulations, the corresponding relationship between the maximum charge for a single section and the safe distance is derived, and a new dynamic stress ratio method is proposed. This not only provides a basis for optimizing rock blasting design and blasting charge optimization design but also provides a reliable guarantee for the safe and efficient mining of deep-seated ore deposits in Jiaojia Gold Mine.

**Keywords:** blasting vibration velocity; filling body; stability; vibration monitoring; blasting vibration