

唐灵明, 黄翔, 李红明, 等. 采矿爆破振动主频率在岩溶区衰减规律现场试验研究[J]. 中国岩溶, 2024, 43(2): 454-462.  
DOI: 10.11932/karst2024y014

# 采矿爆破振动主频率在岩溶区衰减规律现场试验研究

唐灵明<sup>1,2</sup>, 黄翔<sup>1</sup>, 李红明<sup>3</sup>, 李佳明<sup>1</sup>, 曹贤发<sup>1</sup>, 陈学军<sup>1</sup>, 卢丽霞<sup>4</sup>

(1. 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西桂林 541004; 2. 广西师范大学, 广西桂林 541004;  
3. 广西交科集团有限公司, 广西南宁 530007; 4. 中国有色金属长沙勘察  
设计研究院有限公司珠海分公司, 广东珠海 519020)

**摘要:**为减小岩溶区采矿爆破施工中振动产生的地表塌陷灾害影响, 文章根据岩溶区矿山爆破振动现场实测数据, 采用傅里叶变换及回归分析方法, 对比分析塌陷区与非塌陷区爆破振动主频率的衰减规律, 以讨论岩土体性质、震中距及爆破药量对爆破振动主频率特性的影响。结果表明: 岩土体性质对爆破振动主频率存在较大影响, 表现为结构愈松散、孔隙度愈大、密实度愈小, 其爆破振动主频率和振动能量衰减得愈快; 同一次爆破中, 在塌陷区外及塌陷回填区内, 所获得的振动主频率随其震中距的增加而呈减小趋势, 而在塌陷区内, 并非严格衰减, 出现波动现象, 略有上升趋势; 在塌陷区与非塌陷区, 爆破振动主频率随着震中距和药量的增加而减小; 在同一振动荷载作用下, 爆破振动主频率在塌陷区的衰减速度明显大于非塌陷区, 且爆破药量在塌陷区内对爆破振动主频率衰减速度的影响更大。

**关键词:**岩溶区; 爆破振动; 主频率; 传播速度; 傅里叶变换; 衰减规律

**创新点:**现场实测岩溶区采矿爆破振动数据, 并采用傅里叶变换及回归分析方法处理分析记录下的数据, 探究不同条件下振动主频率的衰减规律。

**中图分类号:** TD235    **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4810 (2024) 02-0454-09

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## 0 引言

岩溶地区矿产资源蕴藏丰富<sup>[1]</sup>, 矿产开采活动频繁。在矿产开采施工中, 爆破是一项核心技术手段, 而爆破过程中产生的振动波易引发各类地质灾害, 其中地表塌陷较频发<sup>[2-4]</sup>。因此, 确定爆破振动主频率的衰减规律是行业和学术界关注较多的重要课题。2015年, 中国颁布实施了《爆破安全规程》(GB6722-2014), 明确将爆破振动频率作为振动安全控制评价指标之一<sup>[5]</sup>。此外, 大量学术研究证明, 爆破振动破

坏不仅取决于质点的振动峰值速度和持续时间, 还与振动频率密切相关<sup>[6-12]</sup>。关于爆破振动质点振动峰值速度的研究成果较成熟, 而关于爆破振动频率的研究相对较少。当前关于爆破振动主频率的研究主要围绕理论量纲分析、现场爆破试验及数值模拟分析等方面展开: 张立国等<sup>[13-16]</sup>通过理论量纲分析, 总结出特定条件下的振动频率预测和衰减公式, 并探讨振动频率衰减的影响因素; 张志呈等<sup>[17-19]</sup>通过爆破振动现场试验研究了在炸药量、震中距、传播介质、埋置条件、地质构造和地形条件等不同影响

基金项目: 国家自然科学基金(41967037); 广西岩溶动力学重点实验室开放课题基金(YR-JJHT-2016-466)

第一作者简介: 唐灵明(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程、地质灾害预测与防治研究工作。E-mail: 262611613@qq.com。

通信作者: 黄翔(1988—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事环境岩土工程、特殊土与岩溶塌陷研究工作。E-mail: guthuang@163.com。

收稿日期: 2023-03-14

因素作用下爆破振动频率的衰减规律; 周俊汝等<sup>[20-22]</sup>利用数值模拟分析方法提出了爆破振动频率预测公式, 剖析了振动主频率的衰减规律特征。爆破振动频率在传播中的衰减规律研究已取得一定成果, 但仅以理论量纲分析及数值模拟分析为主, 且多数以假定理想定义域范围展开研究, 而以现场测试相对少见, 岩溶区矿山爆破现场测试更是屈指可数。因此, 研究针对岩溶区采矿爆破振动主频率进行现场试验, 对比分析塌陷区与非塌陷区爆破振动测试数据, 将实测数据代入孟海利等<sup>[15]</sup>推导出爆破振动主频率的预测公式, 通过回归分析得到爆破振动主频率与各种影响因素间的关系, 据此探析爆破振动主频率在塌陷区与非塌陷区的衰减规律, 以期为岩溶区采矿的地表塌陷防治提供参考。

## 1 研究区概况

广西古丹铅锌矿矿区位于广西融安县, 属亚热带季风气候区, 四季分明, 雨水充沛, 近年来平均降雨量为 1 942.5 mm。

### 1.1 地层岩性

矿区地处岩溶峰丛谷地, 地形起伏较大, 相对高差约 300 m(图 1); 上覆土层主要以残坡积含少量黑色铁锰质结合黏土为主, 厚度为 0~10 m 不等, 下伏基岩为泥盆系上统融县组( $D_3r$ )灰—深灰色中厚层状细—中粒结晶白云岩及泥盆系中统东岗岭组( $D_2d$ )褐灰色厚层状砂岩、浅灰色薄—中层状犀利石英砂岩、灰黑色厚层状中粒结晶白云岩及浅灰—灰色中层状石英砂岩等。矿区岩溶发育与岩性有关, 在灰岩中较发育, 以裸露型为主, 埋藏型次之, 岩溶发育分布趋势与区内断裂构造一致, 岩溶发育随深度增



图 1 矿区地形地貌图

Fig. 1 Topography and geomorphology of the mining area

加而减弱, 并严格受岩性控制。经现场实地调查与访问, 矿区内见多处地表塌陷, 塌陷规模较大。

### 1.2 地质构造

矿区处于近南北向泗顶至屯秋水平岩层平缓褶皱区内, 西侧距离约 19 km 为融安至洛崖区域性大断层, 距离约 6 km 为三坡至石井塘断层, 由于受区域性构造活动影响, 矿区内次一级小型褶皱构造发育一般, 断裂构造较为发育, 断裂构造有近南北向、北东向二组。

### 1.3 水文地质条件

根据地下水的赋存条件, 水理性质, 水力特征及各含水岩组的空间分布状况, 矿区地下水类型主要为岩溶裂隙水, 主要赋存于中泥盆统东岗岭组( $D_2d$ )灰岩中, 受大气降水补给, 通过地表风化裂隙、溶洞、漏斗、落水洞等垂直补给地下水, 浅部岩层岩溶裂隙较发育, 是地下水富集的场所和岩溶发育通道。据矿山年观测资料, 矿坑总涌水量为  $128\ 921.78 \text{ m}^3 \cdot \text{年}^{-1}$ , 最大涌水量为  $3\ 499.2 \text{ m}^3 \cdot \text{日}^{-1}$ , 平均  $353.21 \text{ m}^3 \cdot \text{日}^{-1}$ (约  $4.1 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ )。涌水量的变化受大气降水的影响。

## 2 研究方法

### 2.1 试验方案

本次现场试验结合矿区生产实际和地质环境条件, 在满足施工操作简便、炸药耗量少、飞石距离近、岩石破碎较均匀、便于控制开挖面的形状和规格、适宜各种复杂地形下施工等特点, 本次测试采用浅孔爆破, 即在直径范围为 28~50 mm, 且深度小于 5 m 的钻孔中装药爆破。选取合适场地布置好测线, 并完成仪器调试, 待井下爆破发出, 按照计划要求对非塌陷区、塌陷区及塌陷回填区进行现场测试。爆破地震波具随机性和复杂性等特点, 想要准确并真实地记录下爆破地震波较难, 故只能通过对爆破地震波产生的其他物理量进行研究, 为更准确表述爆破地震波, 本次爆破振动测试选取爆破地震波振动主频率和传播速度作为测试指标。

### 2.2 试验系统

#### 2.2.1 测试仪器

本次测试选用的是 SWS 型多波列数字图像工程勘探与工程检测仪 2 台(图 2 左)和 ABEM Terrafo

Mark6 型地震仪(图 2 右)。这两款仪器目前广泛应用于各类工程物探勘察与检测、环境地质灾害调查与评价(滑坡、岩溶、泥石流、采空区、活动断裂),冻土层检测与研究、地下埋设物调查、国土资源调查、地质构造调查与水文物探勘察及爆破振动监测等。本次针对古丹铅锌矿开采活动的爆破振动的数据采集参数见表 1。



图 2 现场数据采集仪器

Fig. 2 Acquisition instrument for field data

表 1 现场数据采集参数

Table 1 Acquisition parameters of field data

仪器型号	采样率/ms	长度/ms	道数/道
SWS型多波列数字图像工程勘探与工程检测仪(+315 m窿道口)	1	8 192	24
SWS型多波列数字图像工程勘探与工程检测仪(+415 m塌陷处)	4	32 768	24
ABEM Terrafo Mark6型地震仪(+415 m塌陷处)	2	32 768	34

### 2.2.2 数据分析

本次测试数据主要利用桂林理工大学所开发的 WinWave 软件进行分析,该软件可对多通道数据同时进行震动数字信号处理与分析,地震波的分析原理为利用傅里叶变换对振动数据进行频谱分析,还嵌套以最小二乘法为理论的回归模式,将各通道波形的初至位置进行标注,便可获得各通道爆破地震波的传播速度以及绘制各监测点的位置。除此之外,另外采用 Excel 及 Matlab 进行辅助分析。

### 2.3 试验过程

爆破振动测试在广西古丹铅锌矿矿山的塌陷区域内进行。在符合测点布置原则的前提下,根据古丹铅锌矿生产的实际情况,以矿山山顶塌陷处附近作为测试场地,采用矿山采矿爆破作为测试的震源,在测试区域内总共布置了 3 条测线(图 3)。此次试验的震中距分布在 124.0~427.5 m 之间。

### 2.4 试验数据

通过对矿区爆破震动监测,共得到 76 个测点的实测爆破地震波波形(Ⅱ号测线爆破震动波形见图 4),其中:40 个测点位于矿山山顶的塌陷区,36 个测点位于矿山山顶的非塌陷区。利用傅里叶变换公式:

$$\begin{cases} A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \cos \omega \tau d\tau \\ B(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \sin \omega \tau d\tau \\ R(\omega) = \sqrt{[A(\omega)]^2 + [B(\omega)]^2} \end{cases} \quad (1)$$

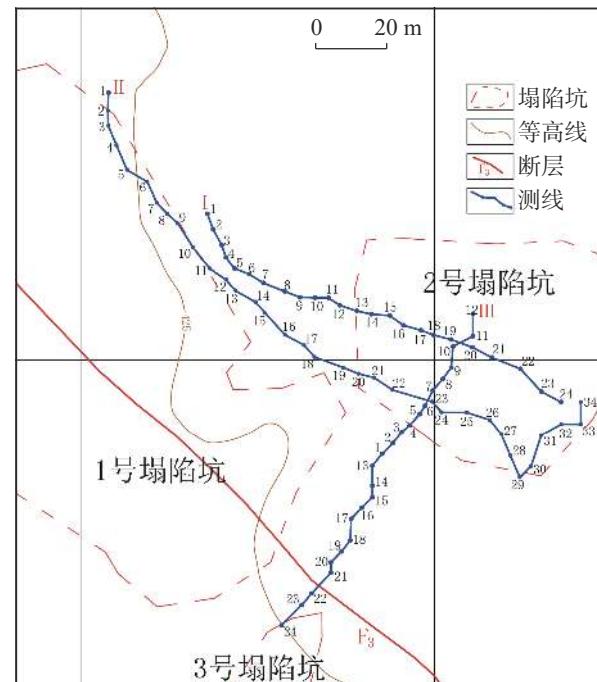


图 3 测线布置图

Fig. 3 Layout of the measuring lines

式中:  $R(\omega)$  为函数  $f(t)$  的傅里叶振幅谱;  $A(\omega)$ 、 $B(\omega)$  则分别是傅里叶变换的实部和虚部。对爆破试验 76 个测点的实测地震波数据进行频谱分析,得到各测点爆破振动主频率。由于篇幅所限,以下仅列出Ⅱ号测线震中距、主频率及高程统计结果(表 2),各测点高程曲线图见图 5。

Ⅱ号测线的测点 1、测点 11~19 以及测点 29 检波器位于塌陷区外,测点 2~10 检波器处于塌陷区内,测点 20~28 和测点 30~34 检波器处于塌陷回填区内。

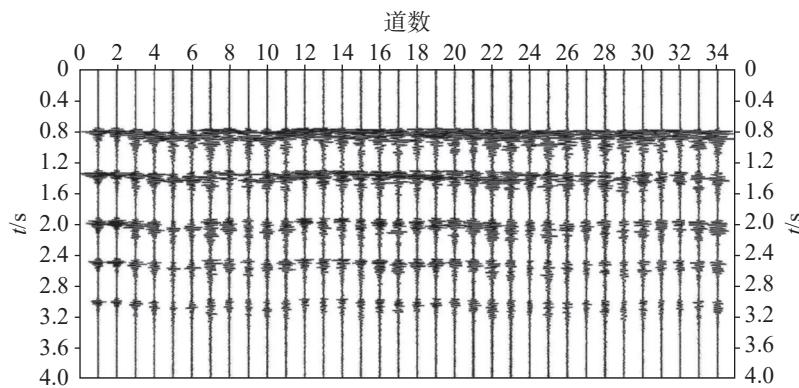


图 4 II 号测线爆破震动波形图

Fig. 4 Blasting vibration waveform of No. II measuring line

表 2 II 号测线测试数据统计表

Table 2 Statistics of test data of No. II line

道数	震中距R/m	主频f/Hz	测点高程H/m	道数	震中距R/m	主频f/Hz	测点高程H/m
1	128.33	48.5	413.70	18	128.94	48.4	415.10
2	129.42	51.7	414.00	19	128.77	48.5	414.80
3	130.10	27.5	414.20	20	128.96	32.0	414.50
4	129.18	30.3	413.90	21	128.83	28.9	414.30
5	128.68	30.6	413.70	22	130.44	30.5	414.00
6	125.56	25.8	413.40	23	131.83	36.0	413.70
7	125.55	27.4	413.00	24	134.43	34.5	414.10
8	124.86	27.5	412.90	25	124.21	19.4	414.60
9	124.27	25.7	413.30	26	137.23	37.2	414.90
10	125.06	30.3	413.80	27	141.01	33.4	415.40
11	125.33	42.6	414.10	28	146.48	25.8	415.80
12	125.07	47.1	414.50	29	152.17	29.1	416.40
13	125.55	41.9	414.70	30	150.30	25.8	416.70
14	124.92	47.0	414.90	31	143.65	26.1	416.90
15	125.74	40.4	415.10	32	142.78	32.2	417.40
16	127.43	42.5	415.00	33	144.25	25.7	417.50
17	127.80	45.8	415.30	34	139.39	25.8	417.00

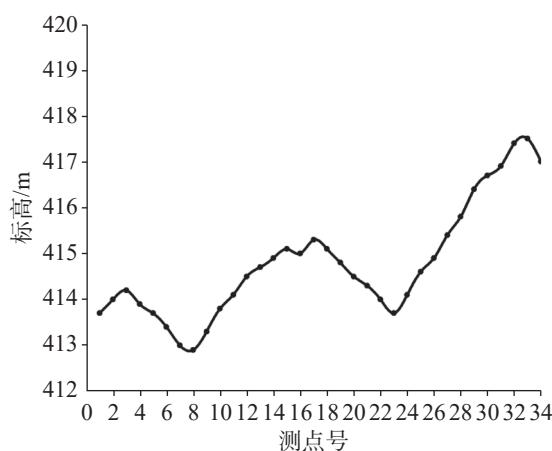


图 5 II 号测线测点高程曲线图

Fig. 5 Elevation curve of survey point of No. II line

通过对爆破地震波数据进行傅里叶变换分析所得到的主频率分析结果发现, 振动波主频率分布在 19.40~51.70 Hz 之间。

### 3 爆破振动主频率衰减规律

#### 3.1 岩土体性质对爆破振动主频率的影响

根据现场实测数据, 建立 II 号测线振动主频率与测点位置间的关系曲线图(图 6), 分析振动主频率在各区段的变化关系。由图 6 可知, 在塌陷区的爆破振动主频率出现明显的突变, 在塌陷区主频率一般只有 25~30 Hz, 明显低于非塌陷区的主频率 40~

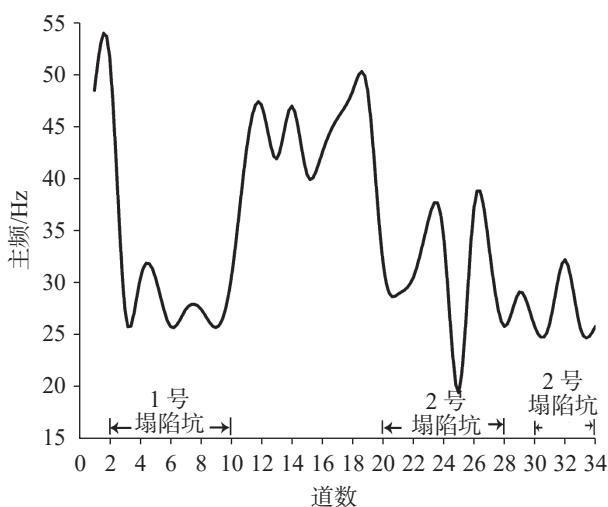


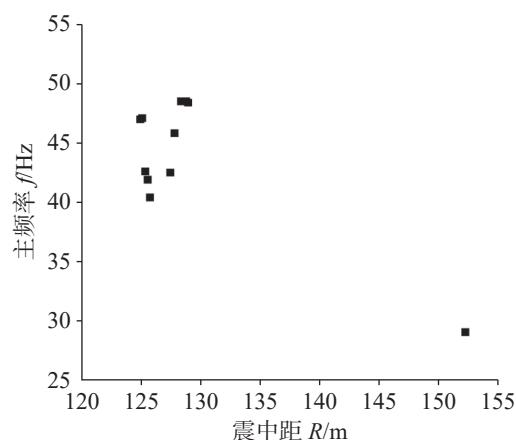
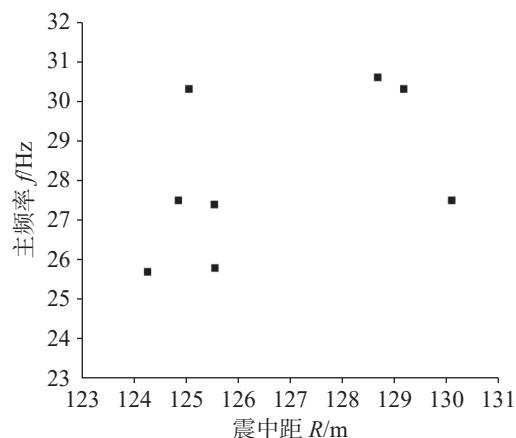
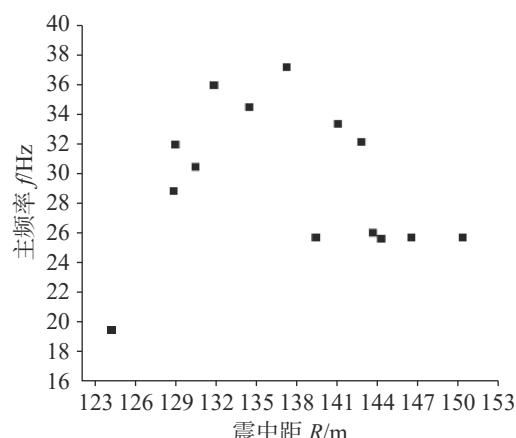
图 6 II 号测线主频率分析图

Fig. 6 Analysis of the main frequency of No. II line

50 Hz。6号测点和15号测点震中距相同,但6号测点的检波器位于塌陷回填区内。对比分析发现,6号测点的主频率为25.8 Hz,而15号测点的主频率为40.4 Hz。结果表明:在同一振动荷载作用下,岩性不同,其爆破振动主频率也不同。在塌陷回填区,由于回填的主要是采矿废石(土),其结构松散,孔隙度大,密实度小,引起爆破振动主频率明显降低;而天然岩土体区域,由于基岩较完整,结构性较好,裂隙发育程度不高,使其振动主频率相对较高。故岩土体的性质对爆破振动主频率存在很大的影响,表现为结构愈松散、孔隙度愈大、密实度愈小,其爆破振动主频率衰减得愈快。

### 3.2 震中距对爆破振动主频率的影响

II号测线获得的测试数据经傅里叶变换计算,得到各测点对应振动主频率(表2),本次实测数据均在同一次爆破中获得,根据实测数据绘制研究区域(塌陷区外、塌陷区内及塌陷回填区三类区域)的主频率( $f$ )与震中距( $R$ )间曲线关系图,分别如图7、图8及图9所示。图7中因测点震中距基本集中在125~130 m范围内,各震中距间相差不大,其所测得主频率( $f$ )出现上下波动现象,无明显规律,但有一测点震中距位于152.17 m处,相对其他测点距离较大,则明显看出随震中距增大,振动主频率总体呈减小趋势。图8中爆破振动主频( $f$ )随震中距( $R$ )的增大并非严格的衰减,出现波动现象,反而总体上略有上升趋势,出现此现象的原因可能是各测点的震中距相差较小,同时研究区位于野外山顶处,各测点间存在高差,地

图 7 同次爆破中塌陷区外  $f$ - $R$  关系图Fig. 7 Diagram of the  $f$ - $R$  relationship outside the collapse area in the same blasting图 8 同次爆破中塌陷区内  $f$ - $R$  关系图Fig. 8 Diagram of the  $f$ - $R$  relationship in the collapse area in the same blasting图 9 同次爆破中塌陷回填区内  $f$ - $R$  关系图Fig. 9 Diagram of the  $f$ - $R$  relationship in the collapse backfill area in the same blasting

震波的传播路径各不相同所致。图9中主频率( $f$ )随震中距( $R$ )的增加而呈下降趋势,在传播过程中波动

较明显, 局部测点离散性较大, 如震中距( $R$ )为 124.21 m 处测点, 所测得主频率 $f$ 为 19.4 Hz, 明显偏离主频率平均值 30.30 Hz, 同样, 分析地面高差对地震波传播影响较大, 致使局部测点主频在衰减过程中产生突变现象。

综上所述, 在同一次爆破中: 在塌陷区域外, 随震中距( $R$ )增大, 所获得振动主频率( $f$ )总体呈减小趋势; 在塌陷区内, 因各测点的震中距相差较小, 各测点间存在相对高差, 地震波的传播路径各不相同, 爆破振动主频( $f$ )随震中距( $R$ )的增大并非严格的衰减, 出现波动现象, 反而略有上升趋势; 在塌陷回填区内, 振动主频率( $f$ )随震中距( $R$ )的增加而呈下降趋势, 在传播过程中波动较明显, 局部测点离散性较大, 其具体影响机制有待后期进一步研究。

### 3.3 爆破振动主频率衰减规律的回归分析

孟海利等<sup>[15]</sup>根据地震波在黏弹性介质中的传播理论, 推导出爆破振动主频率的预测公式  $f = \frac{1/R}{a_1(Q^{1/3}/R) + a_2 R}$ , 式中:  $f$  为爆破地震波主频率,  $R$  为观测点到爆破地震波源的距离(即震中距),  $(Q^{1/3}/R)$  为比例药量,  $a_1$  和  $a_2$  为待定常数。将本次研究测得试验数据代入上述公式验证, 确定此式有较高可信度。对所得数据分三组进行回归分析, 总结出塌陷区与非塌陷区爆破振动波主频率随震中距、药量变化规律, 即爆破振动主频率随着震中距和药量的增加而减小。其对应线性拟合曲线如图 10、图 11 所示。其中参数  $a_1, a_2$  代入预测公式得:

$$\frac{1}{f \cdot R^2} = 7 \times 10^{-5} \left( \frac{Q^{1/3}}{R} \right) / R + 1 \times 10^{-7}$$

或:

$$f = \frac{1/R}{7 \times 10^{-5} (Q^{1/3}/R) + 1 \times 10^{-7} R} \quad (2)$$

$$\frac{1}{f \cdot R^2} = 0.0126 \left( \frac{Q^{1/3}}{R} \right) / R + 2 \times 10^{-7}$$

或:

$$f = \frac{1/R}{0.0126 (Q^{1/3}/R) + 2 \times 10^{-7} R} \quad (3)$$

公式(1)、(2)分别为非塌陷区、塌陷区爆破振动主频率随距离、药量变化公式。从推测公式可明显发现塌陷区  $a_1, a_2$  值都比非塌陷区的大, 并且根据推测公式, 塌陷区的  $a_1$  为 0.0126, 而非塌陷区的  $a_1$  为 0.00723, 两者之间相差一个数量级。在同一振动荷

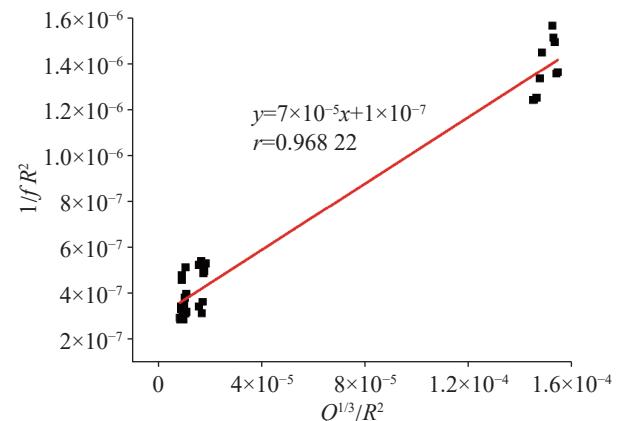


图 10 非塌陷区(矿山山顶)爆破振动主频率  
随距离、药量的变化规律

Fig. 10 Variation of the main frequency of blasting vibration in non-collapse area (top of the mine) with distance and explosive dosage

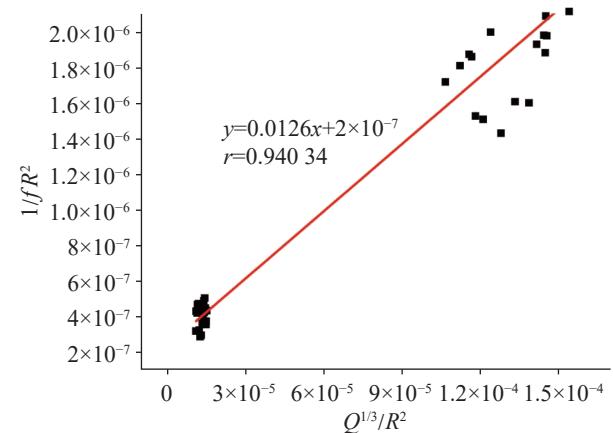


图 11 塌陷区爆破振动主频率随距离、药量的变化规律

Fig. 11 Variation of the main frequency of blasting vibration in the collapse area with distance and explosive dosage

载作用下, 爆破振动主频率在塌陷区的衰减速度明显大于非塌陷区, 且相对非塌陷区, 爆破药量在塌陷区内对爆破振动主频率的衰减速度影响更大。

## 4 结 论

(1) 岩土体性质对爆破振动主频率存在很大影响, 表现为结构愈松散、孔隙度愈大、密实度愈小, 其爆破振动主频率和振动能量衰减得愈快。

(2) 同一次爆破中, 在塌陷区外及塌陷回填区内, 所获得的振动主频率( $f$ )随其震中距( $R$ )的增加而呈减小趋势; 但在塌陷区内, 爆破振动主频( $f$ )随震中距( $R$ )的增大并非严格的衰减, 出现波动现象, 反而略

有上升的趋势,其原因主要为各测点的震中距相差较小,各测点间存在相对高差,地震波的传播路径各不相同。

(3)将实测数据代入爆破振动频率公式,验证得出该公式对岩溶塌陷区矿山爆破振动具有较高参考价值,塌陷区与非塌陷区,爆破振动主频率随着震中距和药量的增加而减小;在同一振动荷载作用下,爆破振动主频率在塌陷区的衰减速度明显大于非塌陷区,且爆破药量在塌陷区内对爆破振动主频率的衰减速度影响更大。

## 参考文献

- [1] 袁道先. 岩溶地区的地质环境和水文生态问题[J]. 南方国土资源, 2003(1): 22-25.
- [2] 蒋小珍, 冯涛, 郑志文, 雷明堂, 张伟, 马晓, 伊小娟. 岩溶塌陷机理研究进展[J]. 中国岩溶, 2023, 42(3): 517-527.  
JIANG Xiaozhen, FENG Tao, ZHENG Zhiwen, LEI Mingtang, ZHANG Wei, MA Xiao, YI Xiaojuan. A review of karst collapse mechanisms[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(3): 517-527.
- [3] 周爱红, 牛鹏飞, 袁颖, 黄虎城. 基于PCA-PSO-SVM的凡口铅锌矿地区岩溶地表塌陷危险性预测[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 622-628.  
ZHOU Aihong, NIU Pengfei, YUAN Ying, HUANG Hucheng. Prediction of karst surface subsidence risk in the Fankou lead-zinc mine area based on PCA-PSO-SVM[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 622-628.
- [4] 陈标典, 李喜, 熊启华, 李彧磊, 涂婧, 刘鹏瑞, 叶疆. 武汉纸坊—庙山老黏土区岩溶地面塌陷形成演化与监测[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 361-369.  
CHEN Biaodian, LI Xi, XIONG Qihua, LI Yulei, TU Jing, LIU Pengrui, YE Jiang. Formation and monitoring of karst ground collapse in the Zhifang-Miaoshan old clay area, Wuhan[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(2): 361-369.
- [5] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 6722-2014, 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.  
National Standards Compilation Group of the People's Republic of China. GB 6722-2014, Safety regulations for blasting[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [6] 郭学彬, 肖正学, 张继春. 爆破振动频率特性的测试与研究[J]. 中国矿业, 2004, 13(9): 68-72.  
GUO Xuebin, XIAO Zhengxue, ZHANG Jichun. Testing and study of frequency specific property of blasting vibration[J]. China Mining Magazine, 2004, 13(9): 68-72.
- [7] 费鸿禄, 张龙飞, 杨智广. 拆除爆破落振动频率预测及其回归分析[J]. 爆破, 2014, 31(3): 28-31, 95.  
FEI Honglu, ZHANG Longfei, YANG Zhiguang. Forecast of collapsing vibration frequency of demolition blasting and its regression analysis[J]. Blasting, 2014, 31(3): 28-31, 95.
- [8] 叶红宇, 杨小林, 卓越. 基于损伤累积的爆破振动主频衰减规律试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(4): 92-96.  
YE Hongyu, YANG Xiaolin, ZHUO Yue. Experimental study on the attenuation law of main frequency in blasting vibration based on damage accumulation[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(4): 92-96.
- [9] 汪浩, 陈书军. 在特殊情况下爆破震动波的危害[J]. 爆破, 1994(4): 81-84.
- [10] 陈宏涛, 程贵海. 临近燃气管道的爆破质点峰值振速预测[J]. 工程爆破, 2020, 26(2): 80-86.  
CHEN Hongtao, CHENG Guihai. Prediction of peak particle velocity of blasting vibration adjacent to gas pipeline[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(2): 80-86.
- [11] 王迪安. 多层建筑对爆破地震波主频率的响应特性[J]. 矿业研究与开发, 1999(Suppl.3): 10-12.
- [12] 李洪涛, 杨兴国, 高星吉, 周家文, 周宏伟. 地下厂房开挖爆破地震能量分布特征[J]. 爆破, 2010, 27(2): 5-9, 13.  
LI Hongtao, YANG Xingguo, GAO Xingji, ZHOU Jiawen, ZHOU Hongwei. Study on energy distribution characteristics of blasting vibration in underground powerhouse excavation[J]. Blasting, 2010, 27(2): 5-9, 13.
- [13] 张立国, 龚敏, 于亚伦. 爆破振动频率预测及其回归分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005(2): 187-189.  
ZHANG Liguo, GONG Min, YU Yalun. Forecast and regression analysis of blasting vibration frequency[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005(2): 187-189.
- [14] 高富强, 侯爱军, 杨小林, 杨军. 基于量纲理论的爆破振动频率分析[J]. 爆破, 2010, 27(3): 1-3, 8.  
GAO Fuqiang, HOU Ajun, YANG Xiaolin, YANG Jun. Analysis of blasting vibration frequency based on dimensional method[J]. Blasting, 2010, 27(3): 1-3, 8.
- [15] 孟海利, 郭峰. 爆破地震波主频率的试验研究[J]. 铁道工程学报, 2009, 26(11): 81-83, 93.  
MENG Haili, GUO Feng. Experimental research on the master frequency of blasting seismic wave[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 26(11): 81-83, 93.
- [16] 卢文波, 张乐, 周俊汝, 金旭浩, 陈明, 严鹏. 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.  
LU Wenbo, ZHANG Le, ZHOU Junru, JIN Xuhao, CHEN Ming, YAN Peng. Theoretical analysis on decay mechanism and law of blasting vibration frequency[J]. Blasting, 2013, 30(2): 1-6, 11.
- [17] 张志呈, 张渝疆, 李春晓. 爆破地震波的频率特征及其影响因素[J]. 四川冶金, 2005(1): 1-4, 27.  
ZHANG Zhicheng, ZHANG Yujiang, LI Chunxiao. Frequency properties of detonate earthquake wave and influence factors[J]. Sichuan Metallurgy, 2005(1): 1-4, 27.
- [18] 陈学军, 余思皓, 宋宇, 李佳明, 陈议城, 陈李洁, 赵志永, 杨越. 采矿爆破振动波在岩溶区的传播影响因素分析[J]. 地质力学学报, 2018, 24(5): 692-698.  
CHEN Xuejun, YU Sizhe, SONG Yu, LI Jiaming, CHEN

- Yicheng, CHEN Lijie, ZHAO Zhiyong, YANG Yue. Analysis of factors influencing the propagation of mining blasting vibration wave in karst area [J]. Chinese Journal of Geomechanics, 2018, 24(5): 692-698.
- [19] 李孝林, 穆太升, 董鑫, 周东良, 薛思读. 频率在爆破震害中的作用及其影响因素分析 [J]. 工程爆破, 2001(3): 15-18.  
LI Xiaolin, MU Taisheng, DONG Xin, ZHOU Dongliang, XUE Sidu. Role of frequency in harm of blasting vibration and analysis on its influence factors [J]. Engineering Blasting, 2001(3): 15-18.
- [20] 周俊汝, 卢文波, 张乐, 陈明, 严鹏. 爆破地震波传播过程的振动频率衰减规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2171-2178.  
ZHOU Junru, LU Wenbo, ZHANG Le, CHEN Ming, YAN Peng. Attenuation of vibration frequency during propagation of blasting seismic wave [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(11): 2171-2178.
- [21] 李鹏, 卢文波, 吴新霞, 陈明, 严鹏. 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.  
LI Peng, LU Wenbo, WU Xinxia, CHEN Ming, YAN Peng. 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.
- [22] 周俊汝, 卢文波, 钟冬望, 吴亮, 冷振东, 杨文光. 竖向钻孔爆破激发振动波频率的衰减特征 [J]. 爆破, 2019, 36(1): 14-20.  
ZHOU Junru, LU Wenbo, ZHONG Dongwang, WU Liang, LENG Zhendong, YANG Wenguang. Attenuation characteristics of vibration frequency induced by vertical borehole blasting [J]. Blasting, 2019, 36(1): 14-20.

## Field experiment on the attenuation rule of main frequency for mining blasting vibration in the karst area

TANG Lingming<sup>1,2</sup>, HUANG Xiang<sup>1</sup>, LI Hongming<sup>3</sup>, LI Jiaming<sup>1</sup>, CAO Xianfa<sup>1</sup>, CHEN Xuejun<sup>1</sup>, LU Lixia<sup>4</sup>  
( 1. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., LTD, Nanning, Guangxi 530007, China; 4. Zhuhai Branch of Changsha Survey and Design Institute Co., Ltd., China Nonferrous Metals, Zhuhai, Guangdong 519020, China )

**Abstract** The study area is located within the Gudan lead-zinc mining region of Rong'an county, Guangxi. This area falls under the subtropical monsoon climate zone, experiencing four distinct seasons with abundant rainfall. It is characterized by a karst landscape of peak-cluster valleys, with undulating topography and a relative elevation difference of about 300 m. The study area is located in the gently flexural fold structure of rock strata from Siding to Tunqiu in a nearly north-south direction. The secondary small-scale fold structures are developed in a normal way, but fault structures are well developed, consisting of two main groups in north-south and north-east directions. The overlying soil layer mainly consists of clay soil, while the underlying bedrock is made up of sandstone, quartz sandstone, dolomite and gray rock. Karst is well developed primarily in exposed form, followed by buried type. The distribution trend of karst is in accordance with the fault structure of the area. Karst development is subject to lithology, and slows down with the increase of depth. Many surface collapses have occurred on a large scale in the study area. Karst fissure water is the primary groundwater, mainly existing in the limestone of Donggangling Formation ( $D_2d$ ) of the Middle Devonian. Groundwater is recharged by atmospheric precipitation and replenished vertically through surface weathering fissures, karst caves, funnels and sinkholes. The karst fissures well developed at the shallow part serve as conduits for groundwater recharge and karst formation.

This paper presents an analysis of the relationship between the main frequency for mining blasting vibration and various influencing factors in the karst area. The attenuation patterns of the main frequency of blasting vibration in collapse areas, backfilled areas, and non-collapse areas have been investigated, with the aim of providing suggestions for the prevention and control of surface subsidence in the karst mining area. The field data on blasting vibration were collected with the use of the engineering exploration detector of SWS-type multi-wavelength digital image and the ABEM Terrafo Mark6 seismometer. To determine the main frequency of blasting vibration at different measurement points under different conditions, the collected data were analyzed by WinWave software from Guilin University of Technology, supplemented by Matlab software. This facilitated the establishment of the relationship between the main frequency for mining blasting vibration and the influencing factors of mining in the karst area.

The results indicate that the properties of the rock and soil have a significant effect on the main frequency of blasting vibration, which can be manifested that the looser the structure is, the larger the porosity becomes, and the smaller the compactness is, and thus the faster the attenuation of the main frequency and vibration energy of blasting vibration will be. In addition, the main vibration frequency  $f$  tends to decrease with the increase of epicentral distance  $R$  in the outer subsidence area and the subsidence backfill area. However, the main vibration frequency shows a fluctuation and a slight upward trend within the subsidence area. Furthermore, the frequency formula of blasting vibration was verified that this formula is of high reference value for testing mining blasting vibration in karst collapse areas. In collapse and non-collapse areas, the main frequency of blasting vibration decreased with the increase of epicenter distance and dosage of explosive. Under the same vibration load, the attenuation rate of the main frequency of blasting vibration in the collapse is significantly higher than that in the non-collapse area. The impact of explosive dosage on the attenuation rate of the main frequency of blasting vibration is greater in the collapse area compared to the non-collapse area.

**Key words** karst area, blasting vibration, main vibration frequency, transmission speed, Fourier transform, attenuation law

(编辑 黄晨晖)

## 桂林丫吉试验场开展“世界地球日”科普活动

2024年4月22日,为树立共筑绿色家园的理念,迎接第55个世界地球日,桂林岩溶地质广西野外科学观测研究站的丫吉试验场面向社会公众开放参观。

开放活动中,中国地质调查局岩溶地质研究所郭芳研究员和刘凡助理研究员向桂林理工大学和广西师范大学师生以及参观的市民进行科普讲解。郭芳研究员以环境中“微塑料”的危害入手,讲解了当前地球面临的各种环境问题,并积极倡导大家保护

地球环境;在野外参观活动中,以桂林丫吉试验场为例介绍了岩溶区的水文地质特征和水循环过程,引导大家认识和保护地下水资源,并进行了野外现场观测示范与互动。

桂林丫吉试验场首次面向社会公众的科普活动,提高了大家对岩溶水资源的认识,增进了保护地球环境的意识,为全面推进美丽中国建设贡献力量。

(供稿:刘凡)