

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.04.011

## 基于高精度三维模型的危岩体控制爆破技术研究\*

赵旭坤<sup>1</sup>, 吴龙海<sup>2</sup>, 柯波<sup>1,3</sup>, 苏成哲<sup>4</sup>, 熊键<sup>5</sup>, 喻明伟<sup>5</sup>, 谭海<sup>1</sup>, 张其轩<sup>6</sup>, 潘若寒<sup>1</sup>, 黄嘉俊<sup>1</sup>, 刘志浩<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070; 2. 湖北省应急管理厅, 武汉 430000;

3. 武昌理工学院, 武汉 430223; 4. 兰州有色冶金设计研究院有限公司, 兰州 730000;

5. 泸州北方化学工业有限公司, 泸州 646000; 6. 辽宁省葫芦岛市公安局治安支队, 葫芦岛 125000)

**摘要:** 开展复杂环境下危岩体控制爆破技术的研究, 对提高公路施工效率、消除潜在安全隐患具有重要的理论意义和参考价值。依托古蔺至金沙高速公路建设项目为工程背景, 为了消除施工过程中的危岩体隐患, 进行危岩体控制爆破技术研究。采用三维激光扫描技术, 架设6个扫描站点, 构建了危岩体高精度三维DTM表面模型, 结合高密度电法, 布设4条物探测线, 实现危岩体区域地质三维可视化。基于高精度三维模型, 进行了裂岩管致裂试验, 设计炮孔深度为危岩体高度的70%, 裂岩管间采用串接方式, 每孔裂岩管总装药量为720 g。结果表明: 构建的高精度三维模型准确反映了危岩体形态特征, 为爆破方案设计提供了可靠的资料, 同时裂岩管的致裂效果良好, 易于危岩体的后期治理排除, 为同类项目提供了可行的参考方案。

**关键词:** 危岩体; 三维激光扫描; 高密度电法; 裂岩管

**中图分类号:** TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2024)04-0091-10

## Research on Demolition Technology of Unstable Rock Mass based on High Precision 3D Model

ZHAO Xu-kun<sup>1</sup>, WU Long-hai<sup>2</sup>, KE Bo<sup>1,3</sup>, SU Cheng-zhe<sup>4</sup>, XIONG Jian<sup>5</sup>, YU Ming-wei<sup>5</sup>,  
TAN Hai<sup>1</sup>, ZHANG Qi-xuan<sup>6</sup>, PAN Ruo-han<sup>1</sup>, HUANG Jia-jun<sup>1</sup>, LIU Zhi-hao<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Technology,

Wuhan 430070, China; 2. Hubei Provincial Department of Emergency Management,

Wuhan 430000, China; 3. Wuchang Institute of Technology, Wuhan 430223, China;

4. Lanzhou Nonferrous Metallurgy Design and Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China;

5. Luzhou North Chemical Industry Co., Ltd., Luzhou 646000, China; 6. Public security

administration detachment of Huludao Public Security Bureau, Huludao 125000, China)

**Abstract:** Researching controlled blasting technology for hazardous rock bodies in complex environments holds significant theoretical importance and provides valuable reference points for enhancing highway construction efficiency and mitigating potential risks. This study focuses on the Gulin-Jinsha highway construction project, aiming to eliminate the dangers posed by hazardous rock bodies during construction. Six scanning stations were established using

收稿日期 (Date of reception): 2023-09-22

网络首发日期 (Published online): 2024-08-23

作者简介: 赵旭坤 (1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土爆破、智慧矿山等方面的研究工作, (E-mail) zhaoxukun@whut.edu.cn。

通讯作者: 谭海 (1970-), 男, 研究员、高级实验师, 从事采矿工程、安全工程等教学和科研工作, (E-mail) tanyx98@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42271296)

**About the author:** ZHAO Xu-kun (1999-), male, postgraduate student, mainly engaged in the research work of rock and soil blasting, smart mine, (E-mail) zhaoxukun@whut.edu.cn.

**Corresponding author:** TAN Hai (1970-), male, senior experimentalist, engaged in teaching and research work in mining engineering and safety engineering, (E-mail) tanyx98@163.com.

**Fund Programs:** National Natural Science Foundation of China (42271296)

3D laser scanning technology to create a high-precision 3D Digital Terrain Model (DTM) of the hazardous rock bodies. Additionally, four object detection lines were deployed using a high-density electrical method to achieve 3D visualization of the geological features in the hazardous rock area. A fracturing test was conducted based on the high-precision 3D model. The designed depth of the shell hole was 70% of the height of the hazardous rock body, with fracturing pipes connected in series and each pipe carrying a total charge of 720 g. The results demonstrated that the constructed high-precision 3D model accurately reflects the morphological characteristics of the hazardous rock body, providing reliable information for the blasting design. The fracturing pipes showed effective fracturing performance, facilitating the removal of the hazardous rock body during subsequent stages. This method offers a viable reference for similar projects, showcasing the potential for efficient and safe removal of hazardous rock bodies in complex environments.

**Key words:** unstable rock mass; 3D laser scanning; electrical resistivity tomography; rock splitting pipe

随着高速路网建设的不断发展,越来越多的公路穿过山区、河流等复杂区域,这些区域存在大片危岩体、孤石、溶洞等不良地质现象,给公路建设带来极大危害。因此如何快速准确查明不良地质特征,掌握潜在地质风险,采取合理有效的治理措施,是复杂环境下公路施工的难点<sup>[1]</sup>。

三维激光扫描技术通过发射激光,对被测物体进行扫描生成点云数据库,再对点云数据进行处理生成 DTM 模型,具有高效、高精度、无接触测量等优势,广泛应用于各个工程领域。吴国强等使用三维激光扫描技术对施工建筑的平整度进行了检测,与传统检测方法相比效率提高了 23.33%,且具有可靠的精度<sup>[2]</sup>。陆世东等利用三维激光扫描技术对矿山边坡进行了三维重构,获得了边坡角度、高度和岩体节理裂隙密度等参数,为边坡生态修复方案提供了精确参数<sup>[3]</sup>。

高密度电法勘探利用各类岩石矿物不同的电磁学性质,获得地下岩体的地质特征,具有效率高、探测面积大等优点。Matthew 等运用高密度电法测得矿山边坡含水量变化,为边坡稳定性监测提供了可靠参数<sup>[4]</sup>。王恩德等利用三维高密度电阻率法对矿山采空区进行了探测,并通过建立三种异常识别模型,解决了复杂情况下采空区精准探测问题<sup>[5]</sup>。

高能气体压裂技术具有安全性高、振动小等优点,广泛应用于石油开采、煤矿开采、市政工程等领域。李军军等利用航天固体推进剂制作了煤层增透的固体推进剂,通过试验测试表明该固体推进剂适用于煤井复杂环境,具有较高的煤层致裂能量利用率<sup>[6]</sup>。孙可明等研究了超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂规律,结果表明二氧化碳气爆产生的裂隙数目和累计长度与爆破压力满足 Logistic 函数关系<sup>[7]</sup>。

因此,利用三维激光扫描技术对危岩体进行了高精度三维重建,准确反映了其空间特征,通过高密度电法对危岩体区域内进行了三维可视化,获得了

危岩体下方地层分布特征,最后进行裂岩管现场岩石致裂试验,获得了裂岩管能量释放规律,为危岩体的控制爆破应用提供了可靠的技术方案<sup>[8]</sup>。

## 1 工程概况

工程位于泸州市古蔺县龙山镇龙山加油站附近,由于古蔺至金沙高速公路建设,需对线路附近山体进行开挖,使其地面高程下降至高速公路路基设计高程。施工过程中存在一处危岩体,危岩体处于山体边坡上,如图 1 所示,其南东面为高山,北西面为沟谷,同时下方有 S309 省道穿过,危岩体距离 S309 省道平行距离约 10 m 左右,危岩体最高处距离县道路面垂直高度约为 56 m。危岩体出露面存在两处裂缝:①北西向 339°,张开 0.2~0.6 m,延伸长度 18 m 左右;②北西向 291°,张开 0.3~1.1 m,裂延伸长度 36 m 左右。为了加快高速公路的施工进度,以及消除危岩体对周边交通线路的安全隐患,决定采用爆破方法对危岩体进行处理。



图 1 危岩体

Fig. 1 Unstable rock mass

## 2 高精度三维模型构建

### 2.1 DTM 表面模型构建

采用三维激光扫描技术对危岩体 DTM 进行构

建, 扫描设备选用 Maptek I-Site XR3 三维激光扫描仪, 如图 2 所示。扫描方案如图 3 所示。



图 2 Maptek I-Site XR3 三维激光扫描仪

Fig. 2 Maptek I-Site XR3 three-dimensional laser scanner

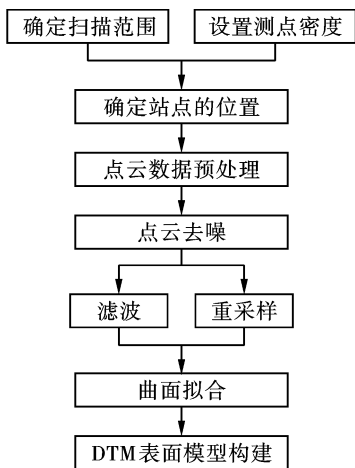


图 3 三维激光扫描技术方案

Fig. 3 3D laser scanning technology solution

为了获得危岩体整体高精度三维 DTM 模型, 避免出现扫描盲区, 共架设 6 个扫描站点, 采集 21 302 591 个点云数据, 获得的点云数据如图 4 所示。

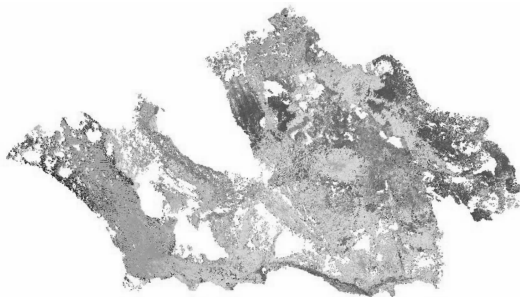
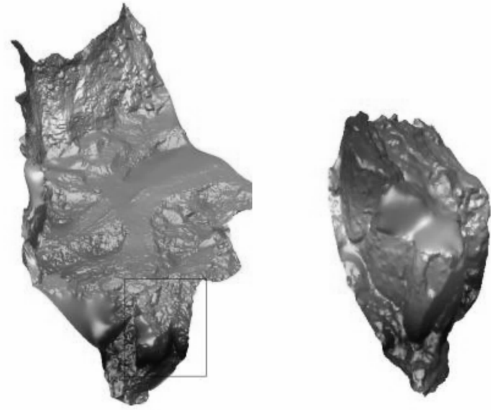


图 4 点云图

Fig. 4 Cloud of points chart

使用 I-Site Studio 7.0 扫描仪软件对生成的点云数据进行预处理, 将不同站点扫描的点云数据进行拼接, 手动裁剪剔除明显的干扰噪声, 删除冗余点云数据, 同时进行噪声过滤。

将生成的 DTM 模型进行几何校正, 按高程对其进行渲染, 得到的三维模型如图 5 所示。与现场危岩体的实际形态进行对比, 生成的 DTM 模型完全符合危岩体空间特征, 危岩体整体向外部倾斜, 在山坡上出露高度约为 5 ~ 8 m。



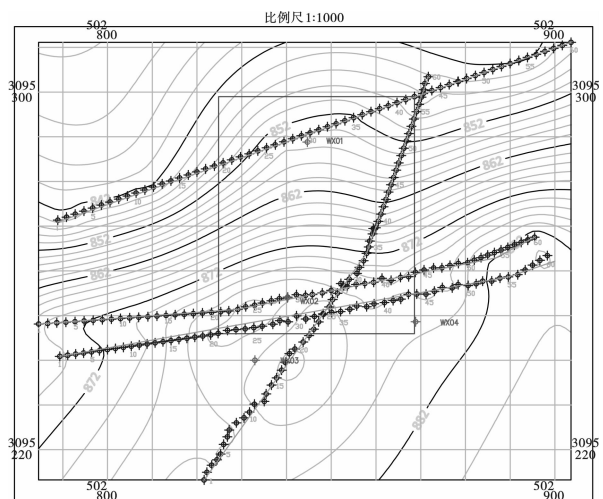
(a) 整体三维模型 (a) Overall 3D model (b) 局部三维模型 (b) Localized 3D model

图 5 危岩体三维模型

Fig. 5 3D model of unstable rock mass

### 2.2 三维地质可视化

为了掌握项目现场附近的地质特征, 确定危岩体在山体中的延伸深度, 采用高密度电阻率法进行勘探, 使用的仪器为 DUK-2B 型电法测量系统, 根据现场条件共布置了 4 测线。其中 1 线、2 线、4 线为近东西向测线, 1 线、2 线分布在危岩体的南侧根部, 4 线分布在危岩体北侧根部; 3 线为北东向测线, 分布在危岩体东侧根部。物探测线布置如图 6 所示。



图例  
□ 物探勘查重点工作区 □ 岩石物性地表调查点  
▭ 物探高密度测线 □ 测点检查点  
+ 物探电极点点位

图 6 物探工作布置图

Fig. 6 Layout of geophysical work

对 4 条测线剖面进行二维反演分析, 结合区域

地质资料,揭示地表覆盖层、岩石和岩溶分界面,

具体如图 7 所示。

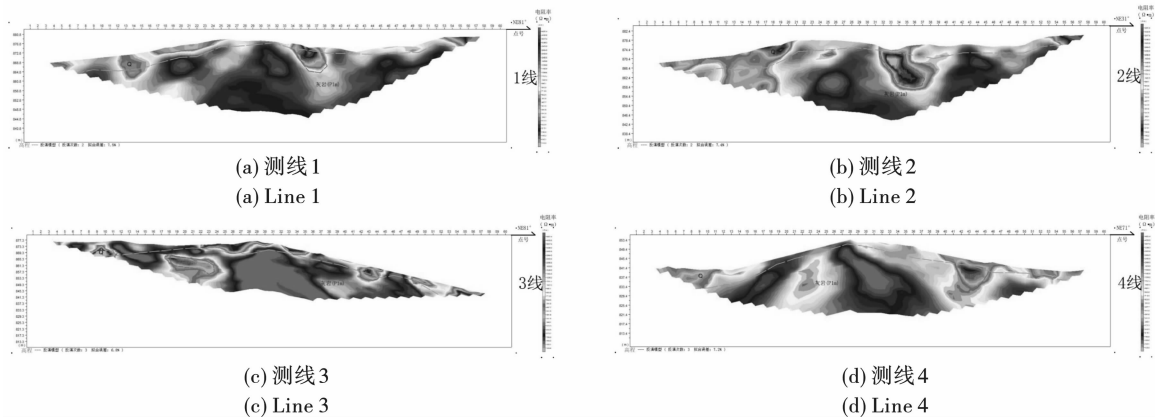


图 7 高密度电法反演成果

Fig. 7 High-density electrical inversion results

4 条测线均表现为上部电阻率低,电阻率值为  $111.9 \sim 401 \Omega \cdot m$ ,推测为第四系粘土、砂土,厚度为  $1 \sim 14 m$ ,下部电阻率高,电阻率值为  $301 \sim 4851 \Omega \cdot m$ ,推测为二叠系茅口组( $P1m$ )灰岩。其中 1 测线 34~37 号点显相对低阻异常,异常向下延伸至标高 864 m 处,2 测线 31~35 号点显相对低阻异常,异常向下延伸至标高 850 m 处,3 测线 18~24 号点显相对低阻异常,异常向下延伸至标高 857 m 处,4 测线 41~45 号点显相对低阻异常,异常向下延伸至标高 835 m

处,推测为岩溶发育区,溶沟发育深度小于 20 m。

将物探数据进行三维可视化处理,主要选取 1 线 21~44 号点、2 线 21~44 号点、3 线 26~54 号点、4 线 19~42 号点,经 Voxler 软件处理生成不同深度的高低阻区域图<sup>[8]</sup>,如图 8 所示。由图可知,840、850 m、860 m 三段电阻率值较大,且相互之间差异较小,说明危岩体在此深度区域是连续完整的,但 870 m 处出现明显高低阻界线,推测危岩体地下埋深为 30 m。

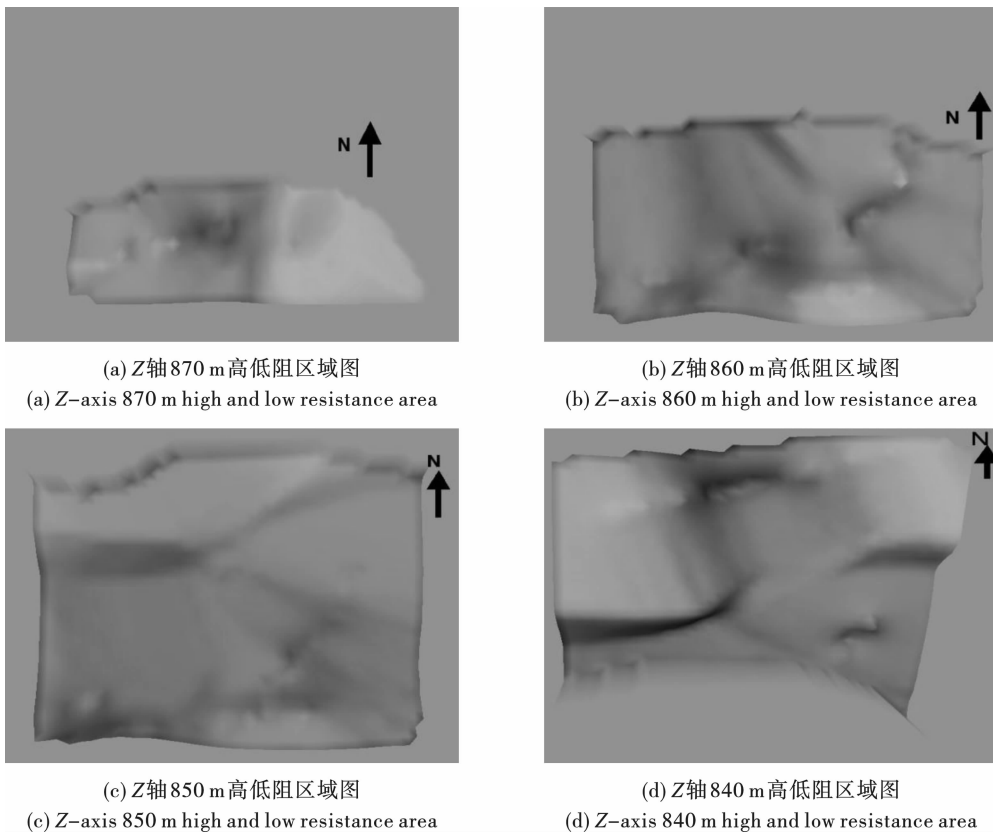


图 8 高低阻区域图

Fig. 8 High and low resistance area

### 3 爆破试验

#### 3.1 爆破器材

为了降低爆破对周边环境造成的危害,同时满足破碎危岩体的技术要求,选用泸州北方化工有限公司的新型裂岩器材,其结构如图9所示<sup>[9]</sup>。该裂岩管主要由脚线、聚丙烯外管、密封盖、电热丝药头、火药等部分构成。与传统炸药爆破相比,裂岩管主要通过火药爆燃产生大量高能气体,对孔壁冲击做功,实现破岩的目的,因此在破岩过程中产生的噪声、有毒气体、飞石、振动等危害较小。

#### 3.2 布孔参数

为了测试裂岩管破岩效果,选取危岩体中较完整的一处孤石进行爆破试验。单节长度30 cm的裂岩管的单耗为 $0.25 \text{ kg/m}^3$ ,为了实现较好的破岩效

果,设计钻孔深度为孤石高度的70%,因此需将单节裂岩管进行串联,增加炮孔中的总体装药量,串联裂岩管数量为4节,每节装药量均为180 g,具体布孔参数及布孔方式如表1和图10所示。



图9 裂岩管结构图

Fig. 9 Structural diagram of rock-splitting pipe

表1 裂岩管布孔参数

Table 1 Hole-pattern parameters of rock splitting pipe

孔径/mm	高度/m	孔深/m	孔距/m	单耗/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	单孔装药量/ kg	单孔装药/g	点火方式
38	2.5	1.75	1	0.192	0.72	4 × 180	电点火



图10 布孔方式

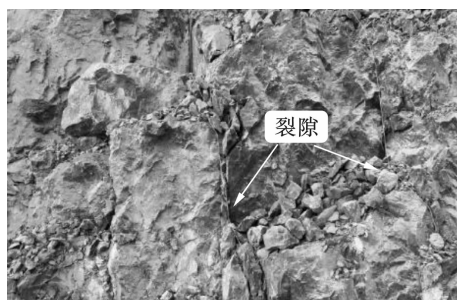
Fig. 10 Arrangement of holes

裂岩管的破岩机理主要是通过火药爆燃产生的大量高能气体作用于炮孔孔壁,使岩石发生拉伸破

坏,同时气体不断冲击岩石中的微裂隙,致使裂纹发育,实现破岩的目的。因此对炮孔的堵塞是减少气体逸散,防止破岩能量损失的关键。本次试验采用现场的钻孔灰进行炮孔堵塞,堵塞时需每隔一段距离对钻孔灰压实处理,重复该步骤多次,确保炮孔完全堵塞。

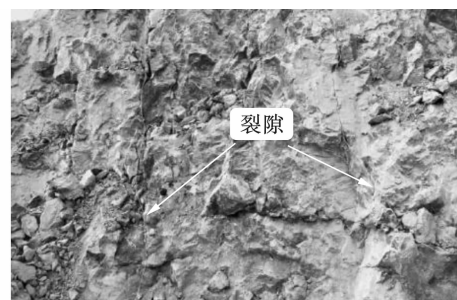
#### 3.3 爆破效果

爆破时未产生飞石,仅造成少量粉尘,且持续时间较短,距离爆源300 m处未听见明显噪声。爆后的孤石完整性较好,形成了4条竖直延伸的裂隙,易于后期危岩体的拆除。从试验结果看,在工程条件受限的复杂环境下,裂岩管具有很好的岩石致裂效果。孤石爆破后的裂隙如图11所示。



(a) 裂隙图

(a) Fractures picture



(b) 裂隙图

(b) Fractures picture

图11 爆破裂隙图

Fig. 11 Blasting cracks

## 4 爆破振动分析

### 4.1 爆破振动监测

测振设备选用成都交博科技有限公司的 L20-N

型爆破测振仪,在距离爆心 2 m、4 m、6 m、9 m 的位置设置四处振动监测点。振动监测点布置图如图 12 所示。现场共采集到四组爆破振动数据,如表 2 所示。



(a) 距爆心 2 m 处监测点  
(a) Monitoring point at 2 m from the center of the explosion



(b) 距爆心 4 m 处监测点  
(b) Monitoring point at 4 m from the center of the explosion



(c) 距爆心 6 m 处监测点  
(c) Monitoring point at 6 m from the center of the explosion



(d) 距爆心 9 m 处监测点  
(d) Monitoring point at 9 m from the center of the explosion

图 12 振动监测点布置图

Fig. 12 Layout of vibration monitoring points

表 2 爆破振动数据

Table 2 Blasting vibration data

测点	爆心距/m	X-PPV/ (cm · s <sup>-1</sup> )	Y-PPV/ (cm · s <sup>-1</sup> )	Z-PPV/ (cm · s <sup>-1</sup> )
1	2	0.7039	0.2611	0.1521
2	4	0.0931	0.0392	0.0541
3	6	0.0760	0.0383	0.0323
4	9	0.0700	0.0276	0.0175

### 4.2 爆破振动信号时频分析

常用的非稳态信号分析方法主要有:短时傅立叶变换、HHT、连续小波变换等。短时傅立叶变化通过建立一个局部窗函数实现信号的时频分析,当确定了窗函数,其分辨率也就确定了,因此只能进行单一频率的分析,无法实现较大幅度变化的信号分析。HHT 首先通过 EMD 方法对原始信号进行分解,然后对分解后的模态函数做希尔伯特变换,最后汇总得到原始信号的希尔伯特谱,但该方法在非平稳信号中分析效果不佳<sup>[10]</sup>。连续小波变换通过改变时

间窗和频率窗实现信号的局部化时频分析,但该方法在低频时间域和高温部分分辨率较低。为了提高信号分析精度,采用一种改进的连续小波变换对振动信号的时频分析,其表达式如下所示<sup>[11]</sup>

$$W_r^m(a,b) = \frac{2a^2k^2}{f_p^3\sqrt{\pi}} e^{-2\sigma^2\pi^2\mu^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \xi^4 \cdot e^{-\left(\frac{1}{f_p^2}+2a^2\sigma^2\pi^2\right)\xi^2 + [4\mu\sigma^2\pi^2 + j2\pi(b-b_0)]\xi} d\xi \quad (1)$$

通过 MATLAB 软件运行改进的连续小波变换,测点原始振动信号如图 13 所示,生成的能量时频分布等高线图和三维图如图 14 所示。

可以看出改进的连续小波变换具有更高的分辨率,增强了时频能量的聚集性,对地震信号的能量时频分析有很好的应用效果。从图 14 可知,随着与爆心距离的增加,地震波能量呈现衰减趋势,但主频信号的持续时间呈现增长趋势,2 m 处的振动主频持续时间约 0.2 s,4 m、6 m 和 9 m 处的振动主频持续时间约 0.4 ~ 0.6 s。这一结果说明与炸药的能量释放规律不同,裂岩管的能量释放有瞬时的能量释放

和持续的残留能量释放两个过程, 在岩石致裂后, 裂缝中的气体会缓慢释放并对岩石进行膨胀作用, 使

裂缝进一步扩展。

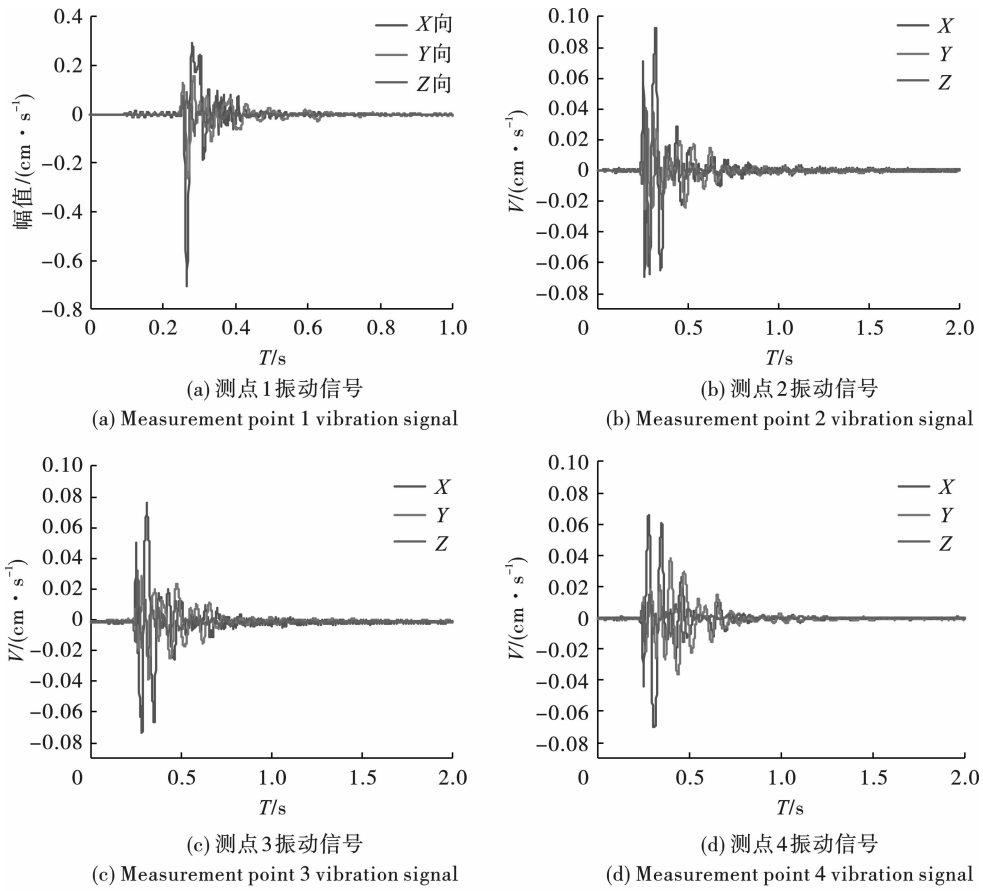
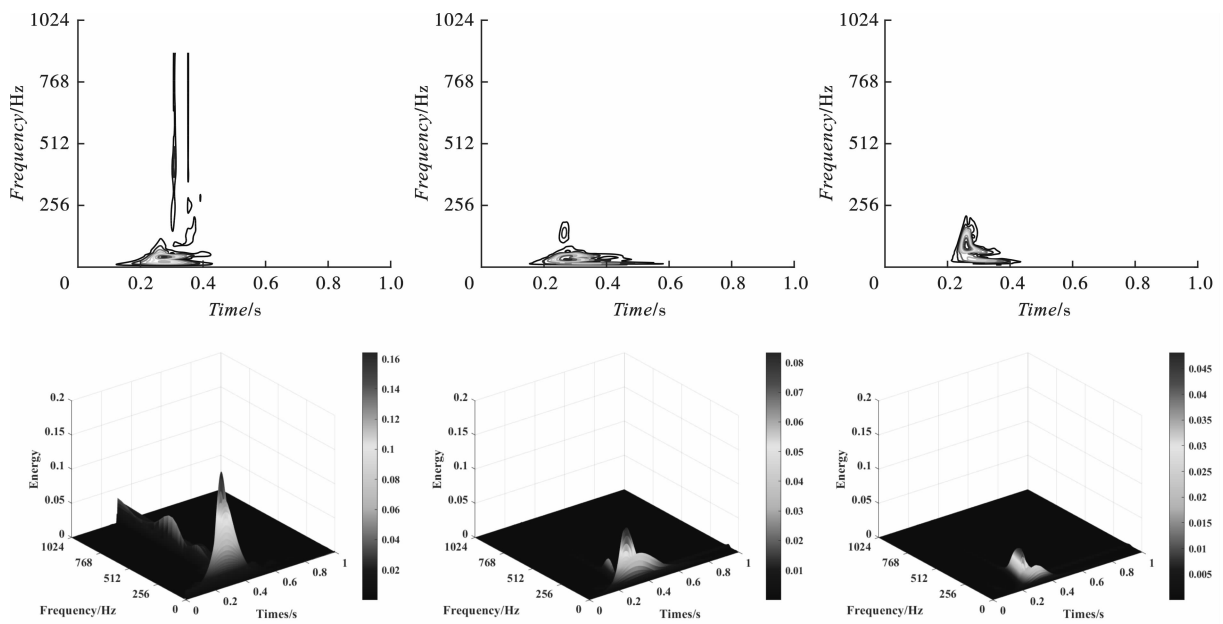


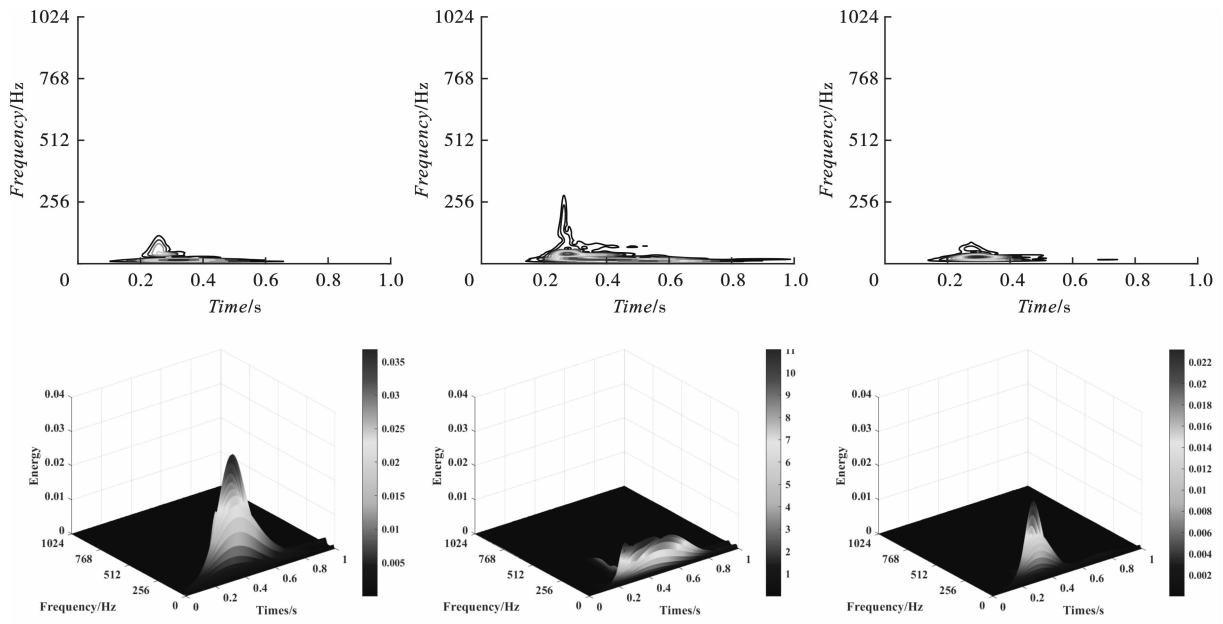
图 13 振动信号

Fig. 13 Vibration signal



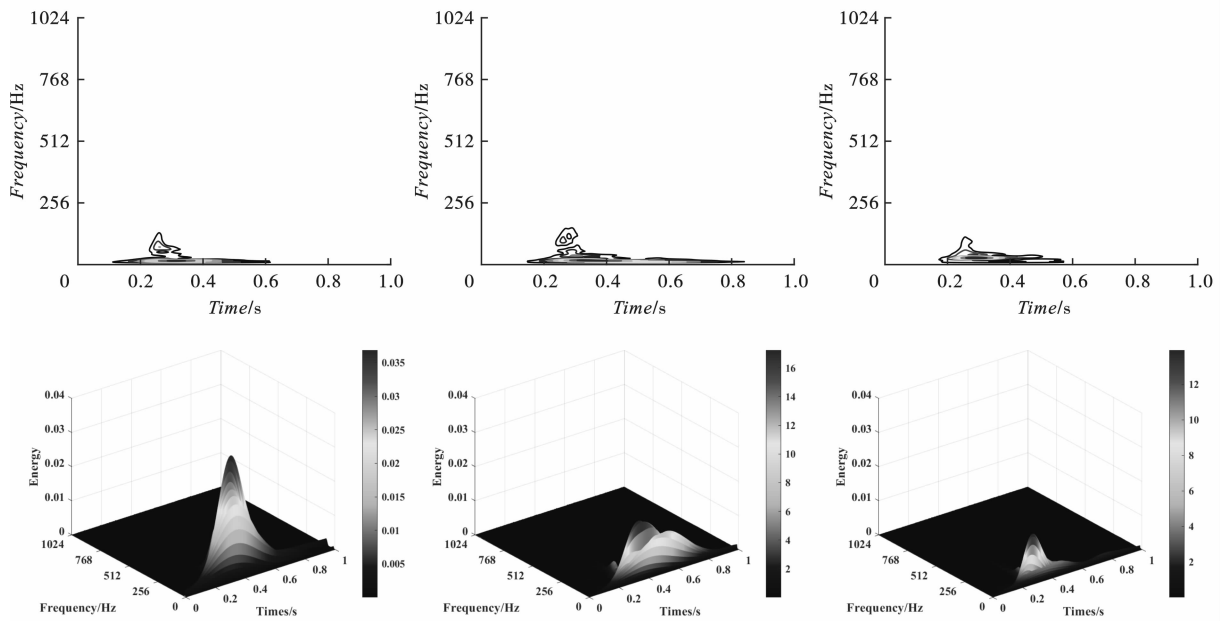
(a) 测点1能量时频分布等高线和三维图

(a) Contour and three-dimensional map of the time-frequency distribution of energy at measurement point 1



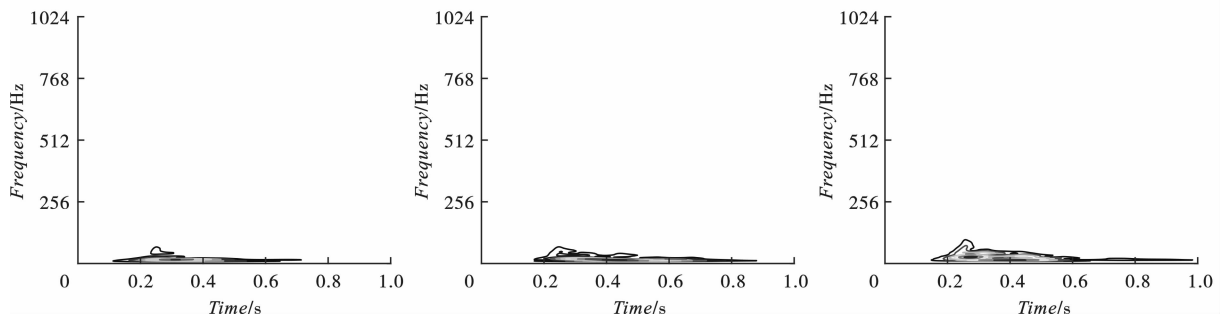
(b) 测点2能量时频分布等高线和三维图

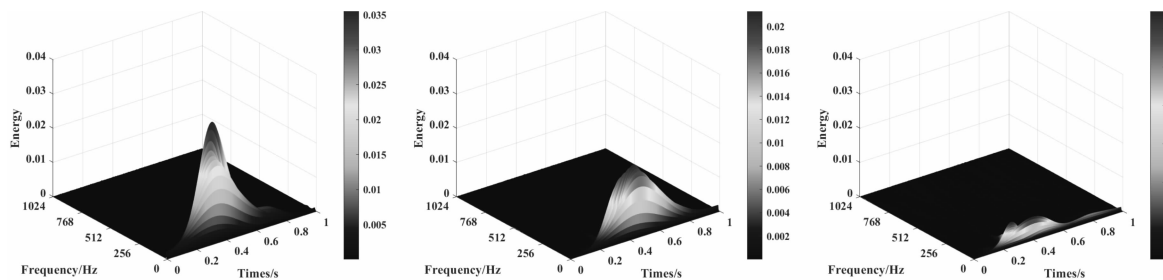
(b) Contour and three-dimensional map of the time-frequency distribution of energy at measurement point 2



(c) 测点3能量时频分布等高线和三维图

(c) Contour and three-dimensional map of the time-frequency distribution of energy at measurement point 3





(d) 测点4能量时频分布等高线和三维图

(d) Contour and three-dimensional map of the time-frequency distribution of energy at measurement point 4

图 14 能量时频分布

Fig. 14 Energy time-frequency distribution

## 5 结论

采用三维激光扫描技术,构建了危岩体高精度三维 DTM 表面模型,运用高密度电阻率法,实现了项目区域三维地质可视化,对新型裂岩管破岩效果进行了试验,分析了振动信号的时频分布规律,得到以下结论:

(1)使用移动最小二乘法对扫描得到的点云数据进行拟合,生成的危岩体三维 DTM 模型具有较高的精度,准确反映了危岩体的空间形态,为后续的拆除方案提供了可靠的资料。

(2)通过三维地质可视化可知,区域内覆盖层厚度为 1~14 m,在危岩体东部有一北东走向深度小于 20 m 的溶沟,危岩体整体高度约为 30 m。

(3)新型裂岩管具有良好的岩石致裂效果,且爆破过程无明显的噪声和粉尘危害,能应用于非炸药爆破的危岩体拆除。通过地震波时频分布可知,裂岩管的能量释放分为瞬时能量释放和持续的残留能量释放两个过程。

### 参考文献 (References)

- [1] 王毅,李升甫,马洪生,等. 山区公路脆弱地质环境灾害多方法早期识别及路线优化[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版):1-15. [2024-03-09]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230214>.
- [1] WANG Yi, LI Sheng-fu, MA Hong-sheng, et al. Multi-method early identification and route optimization of vulnerable geological environment hazards on mountainous highways[J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University: 1-15. [2024-08-09]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230214>. (in Chinese)
- [2] 吴国强,俞家勇,马巍,等. 基于三维激光扫描的施工建筑平整度检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(16): 257-263.
- [2] WU Guo-qiang, YU Jia-yong, MA Wei, et al. Construction building flatness detection method based on 3D Laser Scanning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(16): 257-263. (in Chinese)
- [3] 陆世东,张栋,涂美义,等. 基于岩体结构数字识别技术的露天矿山边坡生态修复方案优选[J]. 金属矿山, 2021(11): 181-187.
- [3] LU Shi-dong, ZHANG Dong, TU Mei-yi, et al. Optimization of slope ecological restoration scheme of open-pit mine based on digital identification technology of rock mass structure[J]. Metal Mine, 2021(11): 181-187. (in Chinese)
- [4] CRAWFORD M M, BRYSON L S. Assessment of active landslides using field electrical measurements[J]. Engineering Geology, 2018, 233: 146-159.
- [5] 王恩德,沈剑,李彬,等. 基于三维高密度电阻率法的露天铁矿空区精准探测[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(7): 996-1001.
- [5] WANG En-de, SHEN Jian, LI Bin, et al. Accurate detection of goaf in open-pit iron mine based on 3D high-density resistivity method[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2023, 44(7): 996-1001. (in Chinese)
- [6] 李军军,余梦飞,李国富,等. 模拟煤样航天固体推进剂致裂试验研究[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-9. [2024-08-09]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1022>.
- [6] LI Jun-jun, YU Meng-fei, LI Guo-fu, et al. Experimental study on simulation coal fracturing by aerospace solid propellant[J/OL]. Coal Science and Technology: 1-9. [2024-03-09]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1022>. (in Chinese)
- [7] 孙可明,辛利伟,张树翠,等. 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂规律实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(7): 27-31.
- [7] SUN Ke-ming, XIN Li-wei, ZHANG Shu-cui, et al. Experimental study on laws of crack caused by gas burst of supercritical carbon dioxide[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(7): 27-31. (in Chinese)
- [8] 代昱昊,王华,彭桂彬. 基于 TEM 的玉磨铁路隧道渗

- 漏水状态预测方法研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(7): 88-92, 144.
- [8] DAI Yu-hao, WANG Hua, PENG Gui-bin, et al. Prediction method of leakage state in the yuxi-mohan railway tunnel based on TEM[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(7): 88-92, 144. (in Chinese)
- [9] 马健行, 王彦君, 赵 静, 等. 新型裂岩器材装填药剂的燃烧性能研究[J]. 爆破, 2023, 40(2): 165-171, 189.
- [9] MA Jian-xing, WANG Yan-jun, ZHAO Jing, et al. Study on combustion performance of new type rock splitting equipment[J]. Blasting, 2023, 40(2): 165-171, 189. (in Chinese)
- [10] 石义虎, 邓德志, 廖 兵, 等. 基于 HHT 研究断层岩溶对爆破地震波传播的影响[J]. 爆破, 2023, 40(2): 199-209.
- [10] SHI Yi-hu, DENG De-zhi, LIAO Bing, et al. Influence of fault and karst on propagation of blasting seismic wave based on HHT Method[J]. Blasting, 2023, 40(2): 199-209. (in Chinese)
- [11] 尚文擎. 用于地震信号的高分辨率时频分析方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- [11] SHANG Wen-qing. Research on high resolution time-frequency analysis method for seismic signal[J]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022. (in Chinese)
- (上接第 90 页)
- [6] 刘 庆, 康 强, 赵明生. 采石场空气间隔装药数值模拟及应用[J]. 爆破, 2013, 30(3): 65-69.
- [6] LIU Qing, KANG Qiang, ZHAO Ming-sheng. Numerical simulation and application of air deck charging in quarry [J]. Blasting, 2013, 30(3): 65-69. (in Chinese)
- [7] 林继凯, 孙梦迪, 刘增辉, 等. 中部空气间隔不同比例装药对炮孔孔壁受力及碎石块度的影响[J]. 爆破器材, 2023, 52(6): 55-64.
- [7] LIN Ji-kai, SUN Meng-di, LIU Zeng-hui, et al. Influence of charge with different proportions under the condition of middle air separation on the stress on the borehole wall and the rock fragmentation [J]. Explosive Materials, 2023, 52(6): 55-64. (in Chinese)
- [8] 张晓平, 马建军, 刘 令. 露天深孔空气间隔装药爆破的数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(33): 13599-13605.
- [8] ZHANG Xiao-ping, MA Jian-jun, LIU Ling. Research on numerical simulation of open air deep hole blasting with air interval charge[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(33): 13599-13605. (in Chinese)
- [9] 唐 海, 易 帅, 王建龙, 等. 考虑裂隙岩体爆破损伤的装药结构研究[J]. 爆破, 2019, 36(1): 70-76, 89.
- [9] TANG Hai, YI Shuai, WANG Jian-long, et al. Study on charge structure based on blasting damage of fractured rock[J]. Blasting, 2019, 36(1): 70-76, 89. (in Chinese)
- [10] 雷 涛, 康普林, 叶海旺, 等. 柱状药包爆破过程中应力波叠加与岩体裂隙分布的方向效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(2): 399-411.
- [10] LEI Tao, KANG Pu-lin, YE Hai-wang, et al. Study on the direction effect of stress wave superposition and fracture distribution in rock mass during cylindrical charge blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(2): 399-411. (in Chinese)
- [11] FANG J S, PING C L, FENG X Z, et al. Damage Mechanism and Wave Attenuation Induced by Blasting in Jointed Rock[J]. Geofluids, 2022, 2022: 1-15.
- [12] 叶海旺, 韦文蓬, 周汉红, 等. 裂隙岩体精细化数值模型构建与爆破模拟[J]. 爆破, 2023, 40(4): 44-51.
- [12] YE Hai-wang, WEI Wen-peng, ZHOU Han-hong, et al. Refined numerical model construction and blasting simulation of fractured rock mass[J]. Blasting, 2023, 40(4): 44-51. (in Chinese)
- [13] 王宇涛. 基于 RHT 本构的岩体爆破破碎模型研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015.
- [13] WANG Yu-tao. The study of broken model for rock mass blasting based on RHT constitutive equations [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2015. (in Chinese)
- [14] 李洪超. 岩石 RHT 模型理论及主要参数确定方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
- [14] LI Hong-chao. The study of the rock RHT model and to determine the values of main parameters [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2016. (in Chinese)
- [15] 凌天龙, 王宇涛, 刘殿书, 等. 修正 RHT 模型在岩体爆破响应数值模拟中的应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S2): 434-442.
- [15] LING Tian-long, WANG Yu-tao, LIU Dian-shu, et al. Modified RHT model for numerical simulation of dynamic response of rock mass under blasting load[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S2): 434-442. (in Chinese)
- [16] WANG H C, WANG Z L, WANG J G, et al. Effect of confining pressure on damage accumulation of rock under repeated blast loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 156: 103961. (prepublish)
- [17] 朱 宽, 钟冬望, 周桂松. 空气间隔堵塞爆破数值模拟与试验研究[J]. 爆破, 2022, 39(1): 43-50.
- [17] ZHU Kuan, ZHONG Dong-wang, ZHOU Gui-song. Numerical simulation and experimental study on air deck stemming of blasting [J]. Blasting, 2022, 39(1): 43-50. (in Chinese)