https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.021

倾倒式危岩崩塌过程的微震原位试验研究

苏国韶[1],熊啸林[1],任玉可[1*],黄 吕[1],刘小明[2],张 勇[2]

1. 广西大学土木建筑工程学院,广西南宁 530004
2. 广西壮族自治区地质环境监测站,广西南宁 530200

摘 要: 针对危岩崩塌突发性强,传统变形监测难以实现有效临灾监测预警的问题,开展了岩溶区倾倒式危岩崩塌过程微震监测原位试验,在提出一种微震信号智能降噪方法的基础上,分析了倾倒式危岩崩塌过程微震演化特征.研究表明,基于微震信号演化过程,可将倾倒式危岩崩塌过程分为"初始开裂、裂隙扩展、崩塌临近"3个阶段,不同阶段的危岩主控裂隙的破裂行为及其微震信号特征具有显著差异;崩塌临近的微震信号特征主要有:微震信号波形出现"平静期"后再次活跃;信号主频分布范围变窄,集中在低频带、低频信号能量占比占据主导地位、MFCC θ 持续下降、b 值出现大幅度下降后重新上升、微震信号活跃度持续一段"平静期"后重新上升;剪切型信号占比显著增大.微震技术应用于危岩崩塌监测是可行的,能为危岩崩塌临灾预警提供有效途径.

关键词: 危岩;崩塌;监测;微震;原位试验;工程地质.

中图分类号: P642.21 **文章编号:** 1000-2383(2026)10-3687-14 **收稿日期:** 2025-10-14

In-Situ Microseismic Experimental for Monitoring Disaster-Causing Process of Toppling-Type Dangerous Rock

Su Guoshao[1], Xiong Xiaolin[1], Ren Yuke[1*], Huang Lü[1], Liu Xiaoming[2], Zhang Yong[2]

1. *School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning* 530004, *China*
2. *The Guangxi Zhuang Autonomous Region Geological Environment Monitoring Station, Nanning* 530200, *China*

Abstract: Aiming at the problem that dangerous rock collapse is highly sudden and traditional deformation monitoring is difficult to achieve effective disaster monitoring and early warning, an in-situ microseismic monitoring test was carried out on the collapse process of toppling-type dangerous rocks in karst areas. On the basis of proposing an intelligent noise reduction method for microseismic signals, the microseismic evolution characteristics during the collapse process of toppling-type dangerous rocks were analyzed. The research shows that according to the evolution process of microseismic signals, the collapse process of toppling-type dangerous rocks can be divided into three stages: "initial cracking, fracture expansion, and collapse approaching". There are significant differences in the fracture behavior of the main control discontinuity of dangerous rocks and microseismic signal characteristics in different stages. The microseismic signal characteristics when collapse is approaching mainly include: the microseismic signal waveform shows a period of "quiet period" before becoming active again; the dominant frequency distribution narrows and concentrates in the low-frequency band; low-frequency signal energy becomes dominant, MFCC θ continues to decrease, the b-value drops significantly before rising again; microseismic signal activity declines during a "quiet period" before

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.52169021);广西重点研发计划项目(Nos.FN2600640341, AD25069072).

作者简介: 苏国韶(1973-),教授,主要研究方向为岩石力学与工程.ORCID: 0000-0001-9506-6827. E-mail: suguoshao@163.com

* **通讯作者:** 任玉可(1996-),硕士研究生,主要研究方向为水工岩土工程.ORCID: 0009-0000-6001-8884. E-mail: renyukee@qq.com

引用格式: 苏国韶,熊啸林,任玉可,黄吕,刘小明,张勇,2026.倾倒式危岩崩塌过程的微震原位试验研究.地球科学,51(10):3687-3700.

Citation: Su Guoshao, Xiong Xiaolin, Ren Yuke, Huang Lü, Liu Xiaoming, Zhang Yong, 2026. In-Situ Microseismic Experimental for Monitoring Disaster-Causing Process of Toppling-Type Dangerous Rock. *Earth Science*, 51(10): 3687-3700.

increasing once more, and an increase in the proportion of shear-type signals. The application of microseismic technology in dangerous rock collapse monitoring is feasible and can provide an effective way for disaster early warning of dangerous rock collapse.

Key words: dangerous rock; collapse; monitoring; microseism; in-situ test; engineering geology.

0 引言

危岩崩塌是岩溶地貌地区常见的地质灾害类型之一,其具有分布广、致灾强、隐蔽突发等特性.2024年全国地质灾害共造成709人死亡失踪,直接经济损失2 630.4亿元,其中危岩崩塌占比约35%~40%.倾倒式危岩是在实际中广泛存在的一种单体危岩类型(徐刚等,2017),它的结构特征是主控裂隙面为陡倾裂隙,重心在裂隙面外侧,起始为受拉状态,有翻转倾覆的运动倾向.由于倾倒式危岩崩塌灾害具有"强时变性、强突发性、强隐蔽性"特点,因此及时、准确的倾倒式危岩崩塌灾害监测预警可以极大程度地降低人民生命和财产损失,开展危岩崩塌灾害监测预警具有重要的现实意义.

早期危岩监测主要靠人工测量方法,如采用罗盘、激光测距仪测量危岩的位移和变形对危岩崩塌灾害进行监测预警(陆业海,1991).随着科学技术不断发展,合成孔径雷达干涉测量(GB-InSAR)(代威等,2022)、地理信息系统(GIS)(张玮鹏等,2019)、三维激光扫描(褚宏亮等,2021;张森桂和胡艺,2023)、无人机测量(苏国韶等,2023;Du *et al.*,2025)等危岩监测新技术也不断涌现.如,杜岩等(2024)探讨了SDEI综合性监测技术在大型危岩体崩塌灾害早期监测预警领域的应用;张宇(2017)采用三帧差法实现对危岩崩塌运动状态的监测,并基于此开发出危岩崩塌实时图像监测系统;张志希等(2024)以唐郭路自动化监测长期监测为实例,根据变形数据结合工程实际,成功预警了一次危岩崩塌事件,该研究理论基于工程实际在特定应用场景下具有可靠性.国外学者如Hendrickx *et al.*(2022)延时摄影、地面激光扫描、无人机摄影测量等手段记录了瑞士西部阿尔卑斯山的Grosse Grabe North Pillar岩壁2017—2021年的活动性数据,收集到382次危岩崩塌事件,认为大型危岩失稳前存在明显的前兆变形特征.综上所述,尽管前人在危岩崩塌的变形监测预警研究方面取得了较大的进展,然而,危岩崩塌前变形非常小,以变形理论为基础的传统危岩崩塌监测预警方法并不适用于具有"变形小,突发性强"特点的岩溶区危岩崩塌灾害,因此,如何针对危岩崩塌突发性强的特点实现及时有效的监测预警,已成为地质灾害监测预警领域亟待解决的关键科技问题.微震监测技术可用于岩体破裂过程追踪,当前已在多个领域得到广泛应用(武成飞等,2025;刘巧霞等,2026).Senfaute *et al.*(1997)在Provence煤矿监测实例中分析了2 114个微震事件的时空分布,发现微震事件空间分布与岩体应力状态和开采方式存在关联,微震的空间分布与岩爆也存在一定的相关性;姜福兴等(2003)用微地震定位监测技术揭示采场覆岩破裂与采动应力场关系,提出由微震事件分布推断区段煤柱稳定性的方法;陈炳瑞等(2011)在锦屏II级水电站3#引水隧洞TBM施工段开展微震实时监测,获岩爆前微震活动规律,为岩爆预警提供依据;冯夏庭等(2012)通过一系列现场深埋隧洞开挖过程中的多元信息综合观测试验,揭示了深埋隧洞的即时型岩爆的裂纹、变形、弹性波、声发射和微震时空演化规律及其在时空上的分布特征;徐奴文等(2016)、胡中华等(2017)分析白鹤滩水电站岩质高边坡稳定性,用数值模拟演化失稳过程,与微震活动性一致.同样地,在室内试验方面,Su *et al.*(2021)利用微震监测技术对室内花岗岩岩爆试验全过程进行了监测,分析了微震信号在平静期、波形分形维数、活跃度等方面的显著特征.然而,针对危岩微震监测的研究则相对较少,仅有部分学者开展了相关探索性工作.例如,Amitrano *et al.*(2005)、Senfaute *et al.*(2009)对崩塌发生前夕的微震信号频率变化展开了研究,发现危岩在崩塌之前,其微震信号频率会出现突然下降的情况.迄今为止,岩溶区危岩崩塌监测微震原位试验尚未见相关文献报道,目前对于危岩崩塌孕灾过程中微震活动的演化特征以及崩塌临灾的多指标前兆特征尚未形成清晰的认知.

为此,本文以倾倒式危岩为研究对象,通过原位试验获取危岩崩塌过程的微震信号演化过程,揭示倾倒式危岩临近崩塌的微震前兆信息,为倾倒式危岩崩塌的有效监测预警提供科学依据,对于倾倒式危岩崩塌灾害防治具有重要意义.

1　倾倒式危岩崩塌过程的微震原位试验

1.1　危岩崩塌微震监测系统

试验采用某国产微震监测系统对危岩崩塌灾害进行24 h不间断监测,该系统主要包括微震传感器、信号传输线缆、微震采集仪、信号保真盒、稳压电源和微震主机等(图1),可实现数据实时自动采集、自动分析、自动定位,微震传感器采样频率为4 000 Hz,其频响范围为(50～5 000 Hz)±3 dB,灵敏度为30 V/g,分辨率为0.00 005 g,测量范围为±0.16 g.

1.2　试验对象

原位试验地点位于广西壮族自治区桂林市的屏风山,地层主要由泥盆系上统融县组组成,岩性为灰岩夹鲕粒灰岩,岩石坚硬性脆,中等风化,坡顶岩体表面具有溶蚀现象,为危岩形成提供了条件.

本文以屏风山GL_01倾倒式危岩为研究对象,主控裂隙面为陡倾裂隙,中心在裂隙面外侧,起始受力状态为受拉,起始运动方式为翻转.危岩体正面上部存在中空裂隙,背面裂隙几乎上下贯穿,风化溶蚀情况较为严重,横向尺寸约为18 cm,竖向尺寸约为20 cm,整体呈不规则形状(图2).

1.3　试验方案

利用扩张器对危岩主控裂隙面进行初始扩展,随后不断增加危岩静力载重(图3).除了微震外,采用高清摄像设备获取危岩崩塌过程中裂隙面动态扩展影像信息.4通道微震传感器布置于裂隙面内侧,摄像头拍摄危岩体裂隙面扩展过程.

1.4　试验步骤

(1)利用钻机在危岩体附近母岩部位上钻多个膨胀螺丝孔,以实现传感器的安装;在危岩正向处安装摄像头观察裂隙面扩展情况.

(2)先利用扩张器缓慢扩大以构建初始危岩体裂隙面,随后增加静力荷载,通过静力荷载作用加速危岩崩塌的整个过程.

(3)利用微震监测系统以及摄像头实时监测危岩体在自重条件下的加速劣化过程.

(4)若危岩体长时间没有崩塌,则逐级增加静力载重持续监测直至危岩崩塌.

1.5　试验结果

试验从2023年6月开始进行.2023年,7月4日17:49:38,主控裂隙上下双向扩展,使得危岩上部贯穿,下部向右下方倾斜扩展(图4a),同时产生一些低幅值的微震信号,扩展结束时出现高幅值信号(图4c);7月8日19:23:33,主控裂隙第2次扩展,沿裂纹尖端继续向下扩展,并产生向上延伸的裂纹至主控裂隙上部(图4b),同时出现高幅值信号及许多低幅值信号;7月9日19:22:33,主控裂隙扩展后贯穿至临空面,危岩崩塌(图4c).

2　倾倒式危岩崩塌过程微震信号的智能降噪

危岩崩塌过程产生的微震信号常常发生于地表,具有信号弱、衰减快,传播距离短等特点,且存在降雨、风动、人类活动等噪音信号的影响.同时,传统的微震信号降噪方法往往依赖于监测人员的经验,难以实现标准化和自动化,不适应大规模、实时的监测需求.因此,本文提出基于机器学习的危岩崩塌微震信号智能降噪技术,提高识别效率,为危岩崩塌灾害智能预警奠定基础.

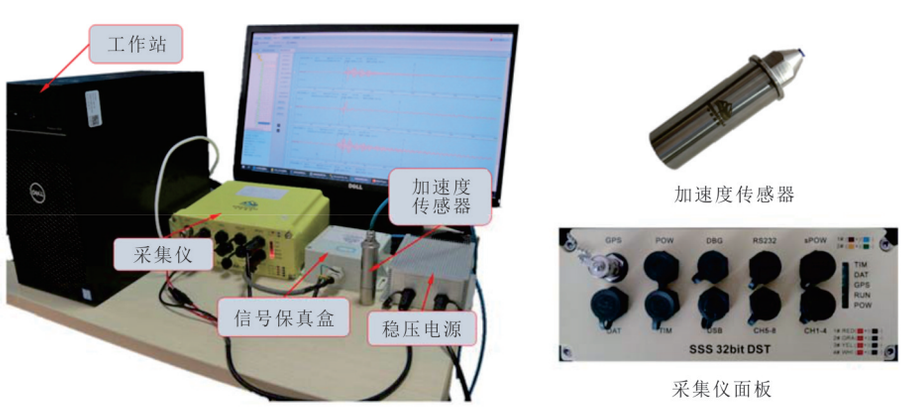


图1　微震监测系统

Fig. 1　Microseismic monitoring system

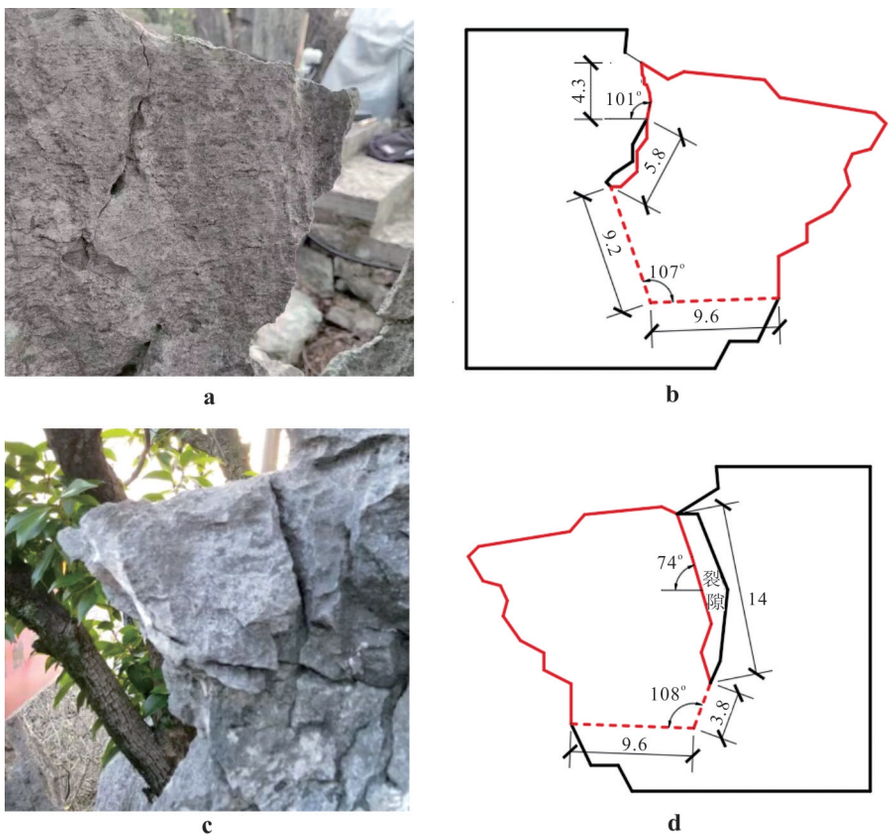


图 2 GL_01 倾倒式危岩(单位:cm)

Fig. 2 GL_01 dangerous rock mass

a. 正面照片; b. 正面简化图; c. 背面照片; d. 背面简化图



图 3 原位试验现场布置

Fig. 3 Layout of field experiment

2.1 危岩崩塌微震监测信号波形

环境噪音主要分为 3 类:(1)降雨信号.降雨有两种制造噪音信号的方式,第 1 类是雨滴直接落在传感器上,造成传感器震动产生信号,这类信号的特征幅值较大.第 2 类是雨滴落在传感器附近的岩石上,造成轻微震动产生信号,信号幅值较低.另外,降雨的强度大小也会影响信号幅值的大小,但信号的总体特征近似,信号陡然升至最大值,然后呈三角形衰减特征,频率较高,在长时段内呈现出周期性特征(图 5).降雨噪音信号的在频段分布在 0~600 Hz,高幅值信号的频段集中在 400 Hz 左右呈单峰状态,低幅值波段频段分布相对分散(图 6).

(2)风动信号.风动噪音信号是由自然风吹动根植于岩体上的树木,根系带动岩体轻微震动产生的.风动噪音信号与降雨噪音也有高幅值和低幅值两种,具有明显的上升期和多阶段的衰减期,风动信号无明显的周期性特征,以低幅值信号为例(图 7).风动噪音信号的频段分布也在 0~600 Hz,但比降雨信号的分布范围要略宽(图 8).

(3)人类活动信号.人类活动信号具体指行人经过传感器附近引起的震动信号.屏风山位于桂林理工大学内,上山有观景道.本次试验的地点靠近观景道内,经常性的有行人经过,行走产生的震动通过岩石传导至传感器附近,引起微震信号.这类噪音信号的特征是幅值较低,频率较低(图 9).人类活动噪音信号的总体频段在 0~200 Hz 之间,呈集

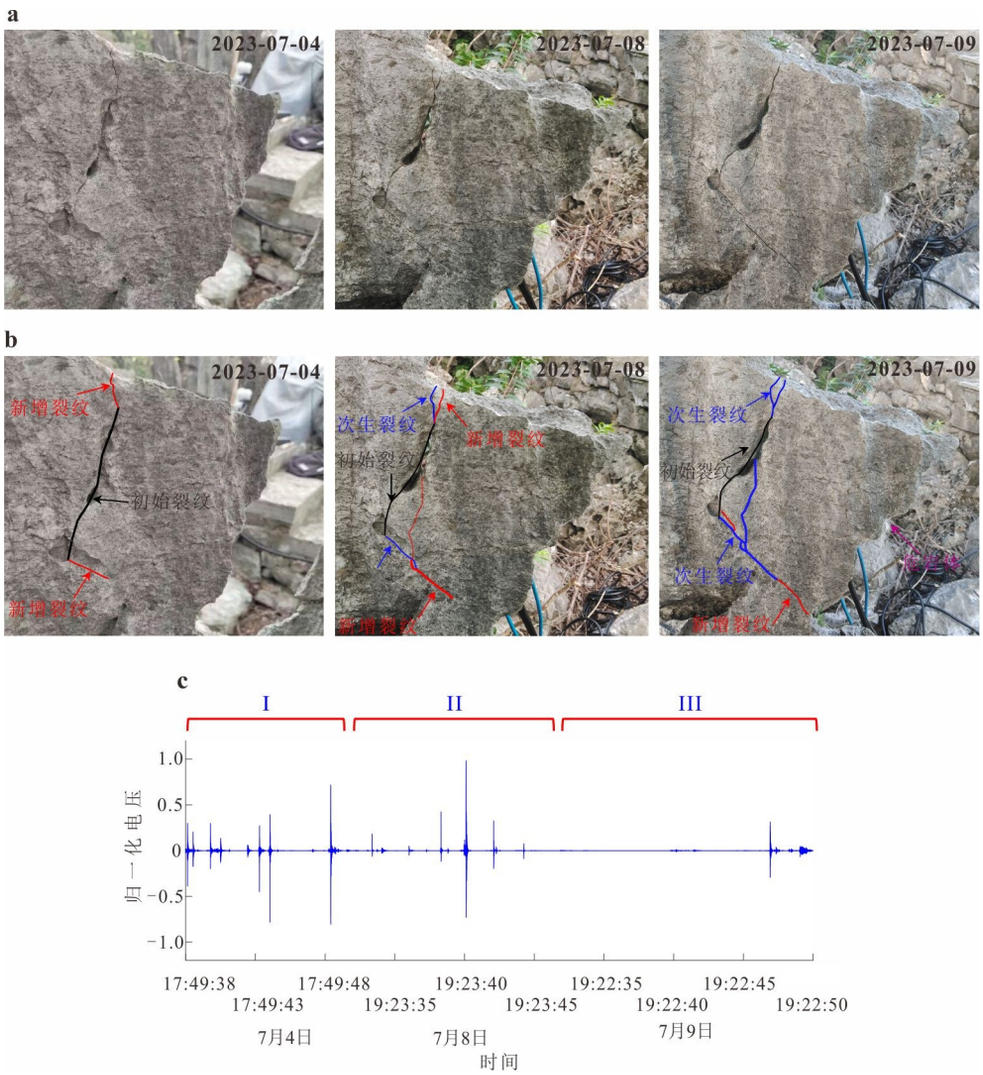


图 4　GL_01危岩崩塌过程

Fig. 4　Collapse process of GL_01 dangerous rock

a.危岩裂纹发育过程实景照片; b.危岩裂纹发育过程示意图; c.危岩崩塌过程的微震波形图

中式的“多峰”状态(图 10).

(4)岩石破裂信号是在现场试验岩石发生开裂行为中收集的岩石破裂信号.它与降雨信号相比有明显的上升期和较为短的衰减期.与风动信号和人类活动信号相比,其幅值要明显高于这两类环境噪音信号.从波形特征直观上判断,岩石破裂信号与环境噪音信号均有明显的区别(图 11),能识别噪音和岩石破裂信号提供了基础.与噪音信号相比,岩石破裂信号的频率分布范围较广,在0~1 500 Hz范围内均有存在,时间序列复杂度相对较高(图 12).

2.2　基于小波变换的随机森林智能降噪方法

小波变换以不同尺度对原始信号进行分解,进而得到不同尺度下的微震信号特征.本文采用5层小波分解处理信号,通过近似系数反映信号概貌,细节系数捕捉局部变化,结合样本熵计算、提取信号复杂度特征(图 13),方法实现步骤如下:

(1)通过小波变换和样本熵原理将原始噪音信号和岩石破裂信号进行归一化处理和特征提取,得到样本特征集 $\boldsymbol{X}$,其中包含了 6 345样本,每个样本有 16个参数特征.对样本进行标记,得到样本标签集 $\boldsymbol{Y}$.

(2)从样本特征集中,使用自助法(bootstrap)有放回地随机抽取 6 000个样本,作为每棵决策树的训练样本集.并预留 25% 的样本作为验证.

(3)从所有特征中随机选择特征,利用这些特征对选出的样本建立决策树.

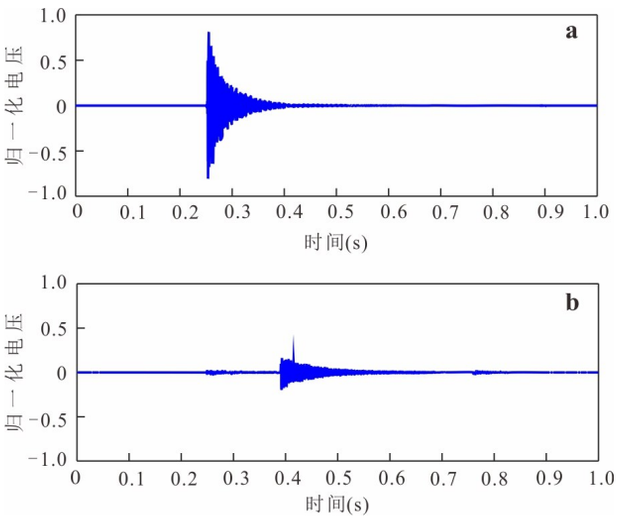


图 5 降雨信号波形图

Fig. 5 Waveform of rainfall signal

a. 第 1 类降雨信号;b. 第 2 类降雨信号

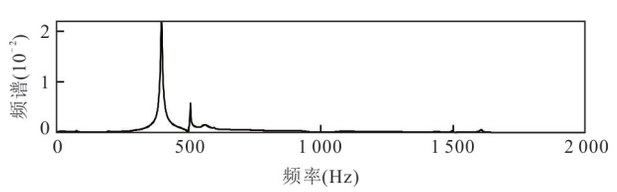


图 6 降雨信号频谱图

Fig. 6 Rainfall signal spectrogram diagram

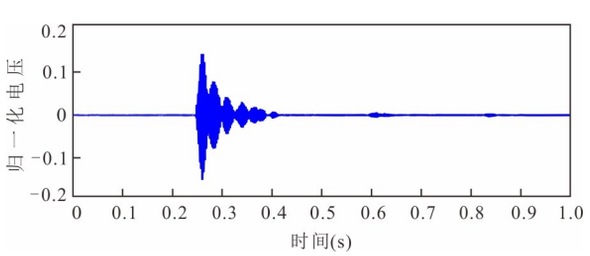


图 7 风动信号典型波形图

Fig. 7 Wind noisy signal waveform

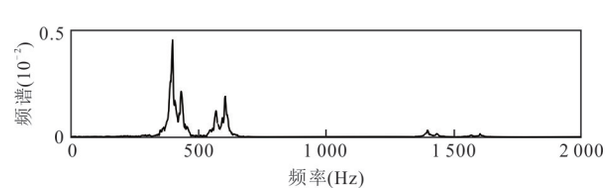


图 8 风动信号频谱图

Fig. 8 Wind noisy signal spectrogram diagram

(4)生成森林:重复以上两步多次,生成多棵决策树,形成随机森林.

(5)对于新的输入样本,让它经过随机森林中的每一棵决策树进行分类,然后根据所有树的分类结果投票决定其最终的分类.按照以上实现步骤,对微震信号样本进行训练(图 14).

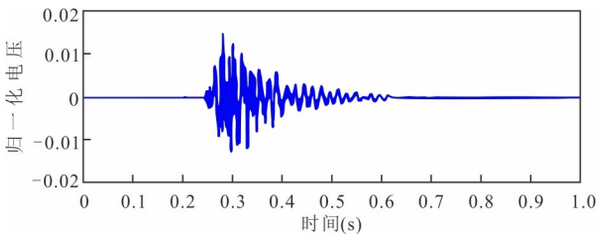


图 9 人类活动信号典型波形图

Fig. 9 Human noisy signal waveform

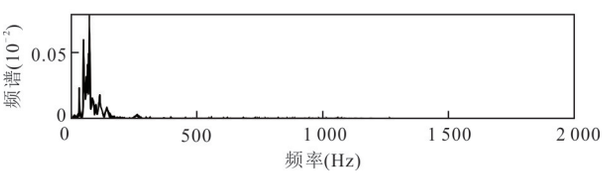
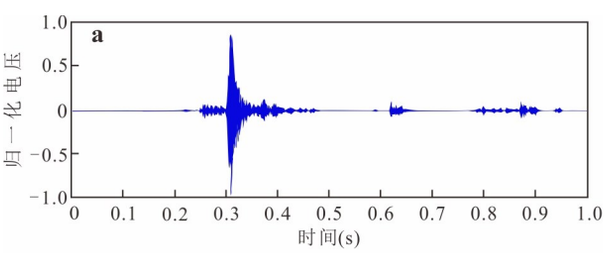


图 10 人类活动信号频谱图

Fig.10 Human noisy signal spectrogram diagram



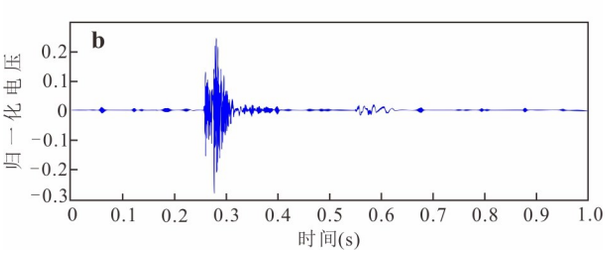


图 11 岩石破裂信号

Fig. 11 Rock fracture signal

a. 岩石破裂信号 1; b. 岩石破裂信号 2

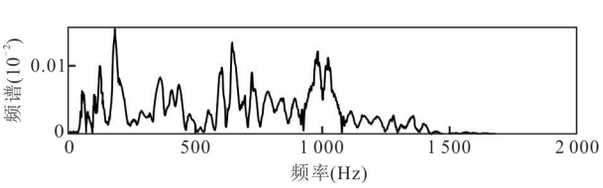


图 12 岩石破裂信号频谱图

Fig. 12 Rock fracture signal spectrogram diagram

从图 14 中可见,基于随机森林法的噪音识别模型的训练准确性较好.其中人类活动噪音信号识别准确率为 93.7%、其中降雨噪音信号为 96.7%、风动

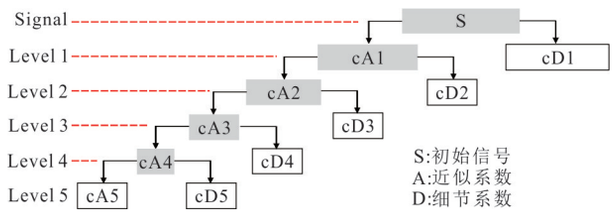


图 13　小波变换多层分解结构

Fig. 13　Structure diagram of wavelet transform multi-layer decomposition

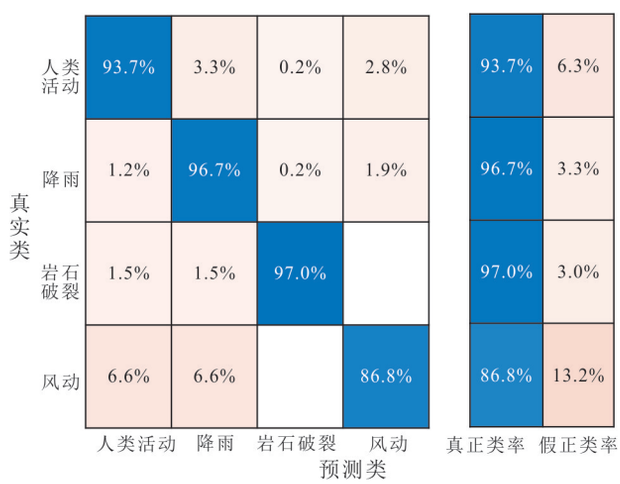


图 14　训练结果混淆矩阵

Fig. 14　Training result confusion matrix

噪音信号为86.8%、岩石破裂信号97.0%.在识别风动噪音上存在一定的混淆区域,准确率略低于其他3种信号.

为了进一步验证模型的准确性,使用未参与训练的样本数据进行分类预测,分析模型的应用效果.验证结果:对875个测试样本(人工筛选未参与训练的微震信号人类活动信号150个,降雨噪音信号500个,风动噪音信号100个,岩石破裂信号125个)的识别准确率为:人类活动信号93.3%、降雨信号97.2%、风动信号85.0%、岩石破裂信号92.8%(图15).

与KNN模型、SVM(支持向量机模型)、DT(决策树模型)对比,4种分类模型在人类活动噪音信号和降雨噪音信号的判断上准确率都在90%以上,同时在岩石破裂信号和风动信号识别上,随机森林模型准确率均高于另外3个模型,可有效滤除环境噪音,为后续信号分析奠定基础.不同模型训练结果对比如表1所示.

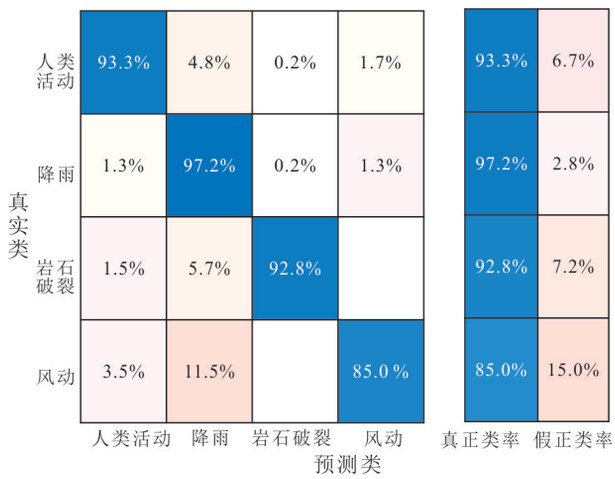


图 15　验证结果混淆矩阵

Fig. 15　Verify result confusion matrix

表 1　不同模型训练结果对比

Table 1　Comparison of training results of different models

分类模型	KNN	SVM	DT	RF
人类活动信号	91.7%	93.9%	92.4%	93.7%
降雨噪音信号	93.0%	92.5%	96.1%	96.7%
岩石破裂信号	88.6%	44.3%	86.5%	97.0%
风动信号	70.8%	61.2%	78.0%	86.8%

3　倾倒式危岩崩塌过程的微震信号演化特征

3.1　波形演化特征

波形是微震信号的重要特征参数之一,其大小、疏密代表了岩石破坏活动的剧烈程度(图4).通过对桂林GL_01危岩崩塌过程的波形分析,可将危岩崩塌孕育过程分为3个阶段:

Ⅰ阶段(危岩主控裂隙面初始开裂):危岩主控裂隙面初步松动扩展,伴随着顶部和裂隙面较小的岩块和碎屑脱落,裂隙面变形幅度不大,此过程中的微震信号主要为岩块碎屑掉落摩擦信号,信号幅值一般较低.

Ⅱ阶段(危岩主控裂隙面快速扩展):具有多阶段非连续特征,裂隙面剧烈破坏,裂缝宽度和长度增加,断裂次数多,伴随较大岩块碎屑掉落,随后裂隙面继续扩展直至近乎贯穿岩体.整个剧烈破坏阶段,微震信号表现出活跃度高、出现较多中高幅值信号、混合中低幅值信号.

Ⅲ阶段(危岩崩塌临近):主控裂隙面几乎贯穿岩体,岩体主要靠结构支撑维持临界稳定状态,受到轻微扰动即发生崩塌,崩塌过程迅速,信号波形

存在“平静现象”,但在崩塌前夕信号波形又再次活跃.

Ⅲ阶段中的微震信号出现明显“平静期”后再次活跃可以作为危岩崩塌前兆的判断标准之一.

3.2 频域演化特征

3.2.1 主频演化特征 对微震信号进行快速傅里叶变换,结果见图16,从中可见,在Ⅰ阶段,危岩裂隙面有轻微扩张活动,信号主要以低频低幅值为主,集中在200 Hz、400 Hz和600 Hz,大尺寸危岩还会出现800 Hz主频;在Ⅱ阶段,危岩内部断裂变形活动剧烈、次数多,所产生的信号主频带分布广泛,开始出现高频信号,但总体仍以低频(200 Hz、400 Hz、600 Hz)为主;在Ⅲ阶段,危岩临近崩塌阶段,裂隙面扩展基本结束,信号数与Ⅱ阶段相比明显降低,主频分布范围变窄,信号更为集中在低频带.与波形演化规律类似,危岩崩塌的第Ⅲ阶段,信号的主频特征与前一阶段存在明显区别,表现在主频分布范围变窄,信号集中在低频带,可作为危岩崩塌前兆特征.

3.2.2 优势频段能量占比演化特征 该特征指标的实现步骤如下:(1)使用HHT变换(即Hilbert-Huang变换,一种专为非线性、非平稳信号设计的时频分析方法)计算声音信号瞬时频率及能量:①采用EMD(经验模态分解)将声音信号x分解为有限数量的固有模式函数$x_i(t)$;②对每个固有模式函数$x_i(t)$进行HHT计算,以提取单个固有模式函数$x_i(t)$所对应瞬时频率及能量;③根据固有模式函数$x_i(t)$所对应信号坐标,构成信号整体瞬时频率及能量分布图(即HHT边际谱).

(2)计算声音信号HHT频带能量占比系数:①将声音信号分解为$B_1,B_2,B_3,\cdots,B_n$等多个子频带然后;②按照频带分解边界,计算各子频带内HHT边际谱总能量$E_1,E_2,E_3,\cdots,E_n$;③利用自频带HHT边际谱能量$E_1,E_2,E_3,\cdots,E_n$,计算各自频带.在本文中,将岩石破裂声音信号分解为0~250 Hz,250~500 Hz,500~750 Hz,750~1 000 Hz,1 000~1 250 Hz,1 250~1 500 Hz,1 500~1 750 Hz,1 750~2 000 Hz共8个频带范围.

微震信号的优势频段频率演化特征见图17,从中可见,在Ⅰ阶段,微震信号低频(0~250 Hz)占比很少,GL_01危岩优势频段以500~750 Hz为主;在Ⅱ阶段:危岩剧烈破坏阶段,微震信号以中高频信号为主,每次破坏末尾低频(0~250 Hz)信号占比有所增加,频率分布范围较广;在Ⅲ阶段:低频信号能量占比明显上升,占据主导地位,随后危岩发生崩塌失稳.

通过分析此试验的结果来看,危岩崩塌破坏过程的3个阶段,其微震信号的频率演化特征有明显的区别,其中Ⅲ阶段的特征可以作为前兆预警特征,即低频信号(0~250 Hz)能量占比明显增加,占据主导地位.

3.2.3 梅尔倒谱倾角系数演化特征 梅尔倒谱系数(MFCC s)按人耳听觉原理刻画信号频带,能较

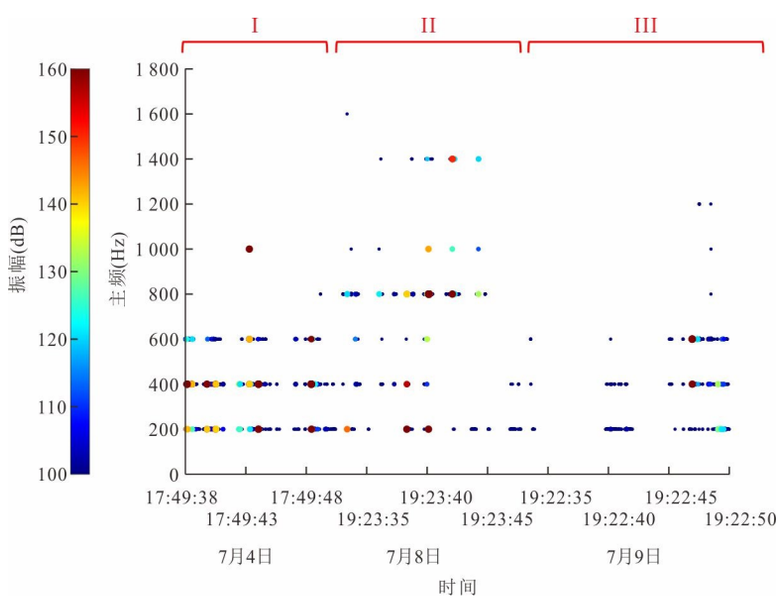


图16 危岩崩塌过程主频演化

Fig. 16 Evolution diagram of the main frequency of the collapse process of dangerous rocks

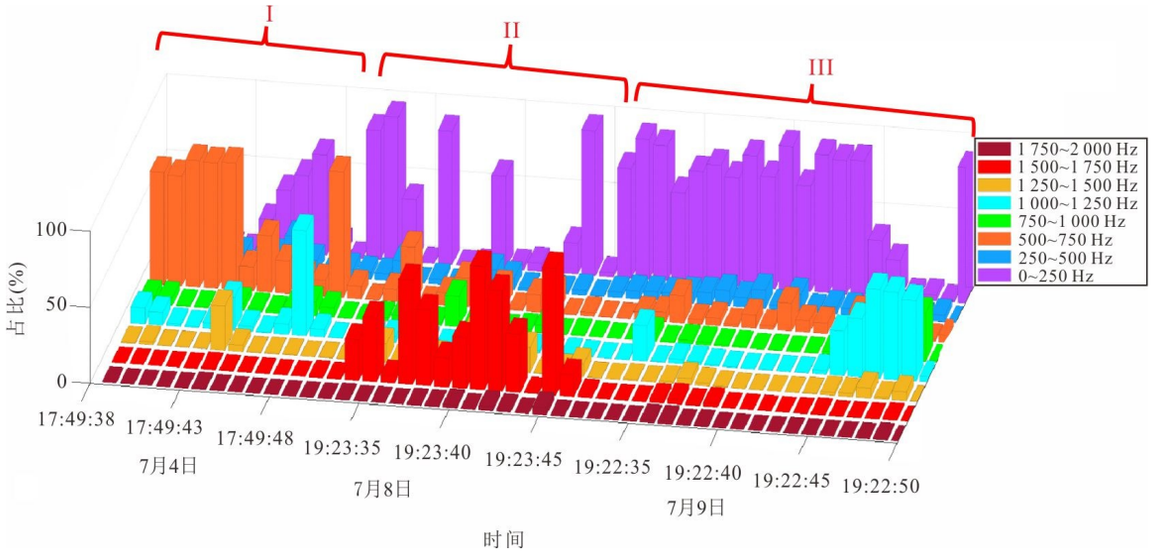


图 17　优势频段占比演化图

Fig. 17　Evolution of the proportion of dominant frequency bands

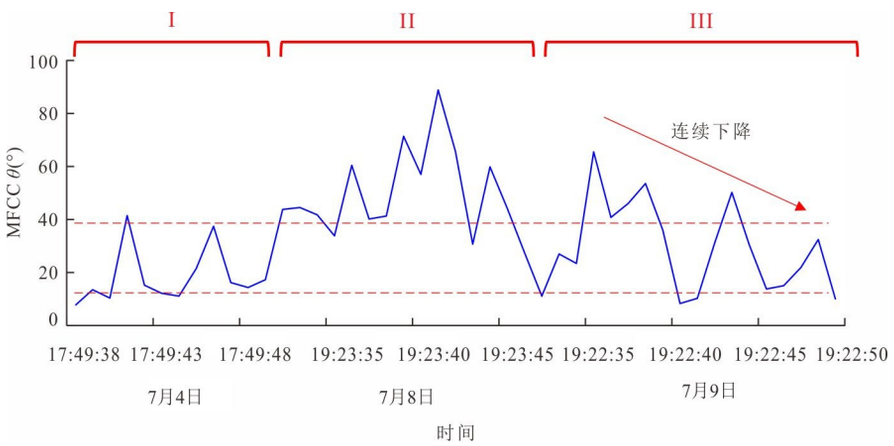


图 18　MFCC θ 演化图

Fig. 18　Evolution of the proportion of MFCC θ

好反映低频特征.通过计算 1~3 维 MFCC s 夹角得到倾角 θ,如图 18 所示.

危岩微震信号的 MFCC θ 具有明显变化规律:第Ⅰ阶段中,MFCC θ 表现出稳定波动状态,波动区间约 30°左右,少数时刻发生突增,最大值不超过 40°;第Ⅱ阶段中,MFCC θ 跃升幅度不断攀升,从 12 s 的 18°跃升至 22 s 的 91°,并且跃升间隔呈现缩小趋势;第Ⅲ阶段中(临近危岩崩塌破坏前夕),MFCC θ 出现波动下降,随后危岩体发生崩塌失稳.

结合危岩崩塌阶段分析来看,第Ⅰ阶段危岩有轻微的破坏行为,频率维持相对稳定的水平,MFCC θ 在 30°区间内小幅波动;第Ⅱ阶段危岩剧烈破坏阶段,危岩破裂行为复杂,频率组成成分复杂,表现为 MFCC θ 连续的上升趋势,出现峰值;第Ⅲ阶段危岩临近崩塌,活动性降低,频率逐渐回归到稳定状态,表现为 MFCC θ 回落到较低的波动状态,随后危岩发生崩塌失稳.综上,第Ⅲ阶段中 MFCC θ 出现明显连续下降现象可作为危岩崩塌预警前兆.

3.3　活跃度演化特征

3.3.1　*b* 值演化特征　b 值是 Gutenberg and Richter (1944)提出的地震活动频率和振幅之间的相关性(G-R 关系)引入的描述地震活动程度的指标.岩石从微裂纹到宏观裂纹的破坏过程与地震活动从弱震到强震的演变之间存在一些相似之处.

$$\lg N = a - bm\ , \tag{1}$$

式中:m 是地震事件的大小,N 是大小在 $\triangle m$ 内变化的地震事件的数量,a 表征在统计时间、区域内的地震活动水平.在本文中,b 值通过 MATLAB 程序计

算,计算时以0.05 s为统计计算间隔,为提取有效信号,计算门槛值设置为0.01(波形归一化后幅值).

b值的变化与岩石裂纹的发展密切相关,其减小则表明大尺度事件的比例增加,急剧减少则表明岩石裂纹扩展加速进而导致破坏.崩塌过程中的b值演化过程见图19,从中可见,在Ⅰ阶段,b值小幅度先升后降,表明小规模破裂事件增加;在Ⅱ阶段,b值呈大幅度下降且无明显上升;在Ⅲ阶段,b值在持续一段时间的连续下降后出现大幅度上升,随后危岩体发生崩塌失稳.

不难看出,崩塌前b值会出现大幅度下降后明显上升的变化特征,这一特征规律可以作为危岩崩塌破坏的微震前兆特征之一.

3.3.2 微震事件活跃度演化特征 信号活跃度指数(Activity index)定义为信号波形超过某一设定阈值的次数,类似于声发射信号振铃计数参数,其能够反映出一定时期内信号变化的剧烈程度大小,即岩石内部破坏活动强弱.如果单个信号波形的最大幅值超过设定的门槛,则该信号标记为活跃信号,该信号的活跃指数记为1,否则记为0.微震事件活跃度是统计一小段时间内多个信号活跃度指数之和.累积活跃度指信号从开始至统计时刻事件区间内的活跃度.具体计算公式如下(赵国富等,2022):

$$\text{Activity index}=\begin{cases}N,N\text{表示信号超过门槛的次数}\\0,\text{信号均未超过门槛值}\end{cases}. \tag{2}$$

根据活跃度定义和计算公式,求得试验全过程的平均活跃度和累计活跃度(图20).从中可见,在Ⅰ阶段,活跃度为8;在Ⅱ阶段,活跃度为10;在Ⅲ阶段,活跃度为3,累计活跃度曲线呈“稳步上升—平缓—小幅上升”趋势,因此,Ⅲ阶段中“微震活跃度突然降低,持续一段时间后重新上升”可作为有效预警信息.

3.4 拉剪信号演化特征

采用小波变换和随机森林方法建立拉剪信号识别模型,主要思路如下:

(1)通过开展室内巴西圆盘及直剪的微震监测试验,分别采集单纯的张拉型及剪切型微震信号,将其作为识别模型的训练样本(赵国富等,2022).

(2)通过对张拉型和剪切型的微震信号采用小波分析方法进行分解,将其各层小波的幅值、各层小波(代表不同频段)信号能量和各层小波的样本熵等16个参数作为训练样本的特征集.小波变换方法能够通过伸缩平移运算对信号进行多尺度细化,信号的样本熵反映非平稳信号时间序列的复杂度,二者结合能够代表非平稳信号的总体特征.

(3)建立基于随机森林(RF)的岩石拉剪破裂类型识别模型.通过自助法(Bootstrap)重采样技术,从原始训练样本集中有放回地重复随机抽取样本生成新的训练样本集合来训练决策树.重复上述步骤,生成多棵决策树组成随机森林.对于新数据的分类,每棵树都会给出自己的分类结果,最后根据所有树的投票结果确定最终的分类.

(4)通过危岩崩塌现场试验采集微震信号,并通过小波变换进行分解和样本熵计算,提取样本信号的特征向量,然后将特征参数输入随机森林模型中进行破裂模式分类.剪切型信号和张拉型信号的小波分解信号及频谱图见图21和图22(波形图纵轴坐标是幅值(mV),频谱图纵轴坐标是归一化电压值,为无量纲值,数量级为10^{-2}).

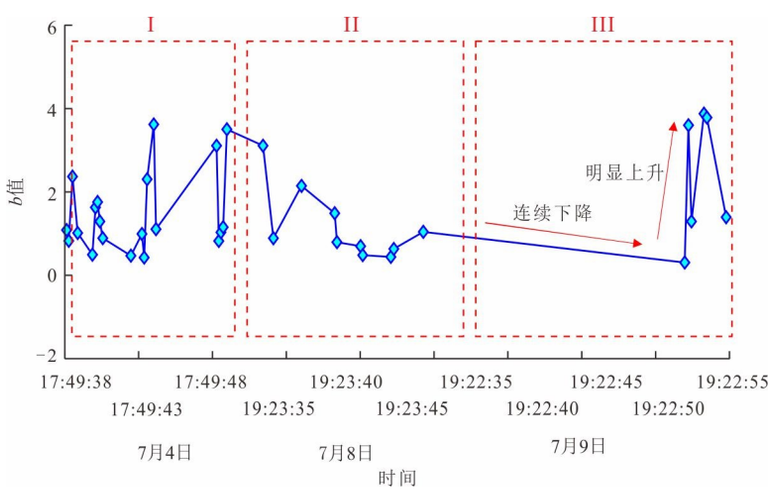


图19 微震信号b值随时间变化

Fig.19 Variations in the MS b-value over time

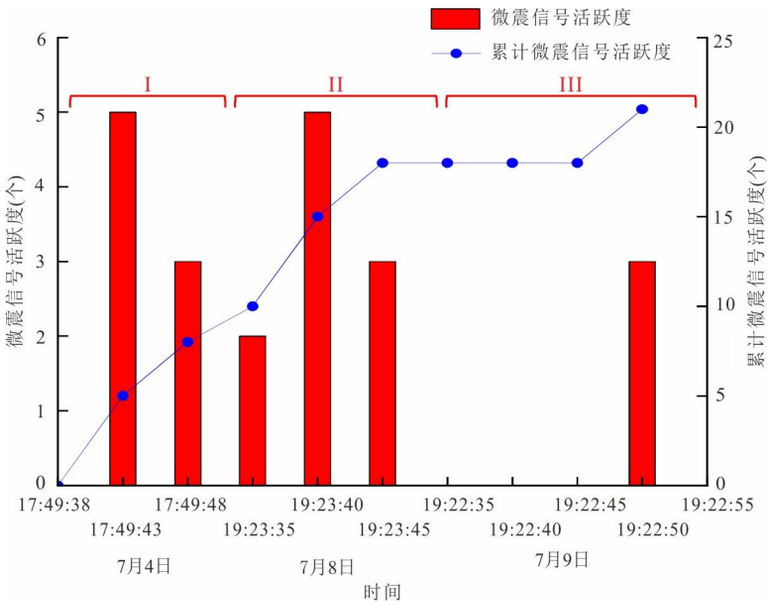


图 20　微震事件活跃度

Fig. 20　Microseismic event activity

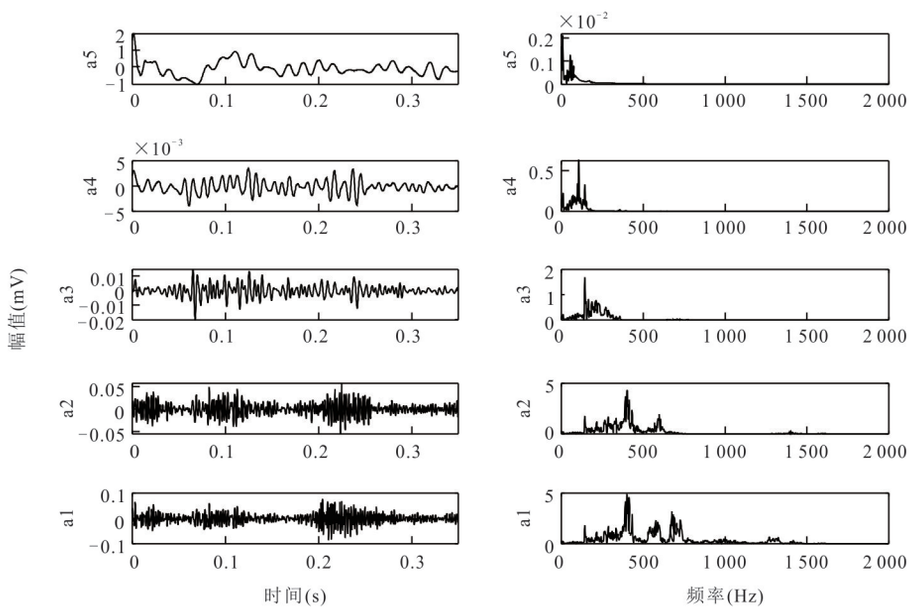


图 21　剪切型微震信号小波分解图

Fig. 21　Shear microseismic signal wavelet decomposition diagrams

根据上述方法,将本次试验过程获取的微震信号进行小波变换提取分解后的第5层近似信号的样本熵及微震信号幅度,输入训练好的识别模型中,得到各个时刻的张拉及剪切信号分类结果.计算各个时刻的张拉型及剪切型信号的占比,如图23所示.对比3个阶段的平均剪切型信号占比,Ⅰ阶段平均占比为16.67%,Ⅱ阶段平均占比为21.33%,Ⅲ阶段为25.88%,可以看出,在Ⅲ阶段中剪切型信号平均占比出现了显著增加,因此剪切型信号占比显著增大可作为危岩崩塌前兆预警信息之一.

3.5　倾倒式危岩崩塌前夕的微震前兆特征

传统的危岩崩塌预警技术主要采用变形、位移等相对滞后的宏观监测信息作为预警依据,导致危岩崩塌预警的超前性降低,没有充分的预警避险时间,而微震监测技术能够直接反映危岩体内部的破裂活动,进而超前感知危岩崩塌的孕灾过程.因此需要结合倾倒式危岩崩塌微震信号演化特征,总结危岩崩塌前夕微震前兆信息,就能够实现危岩崩塌

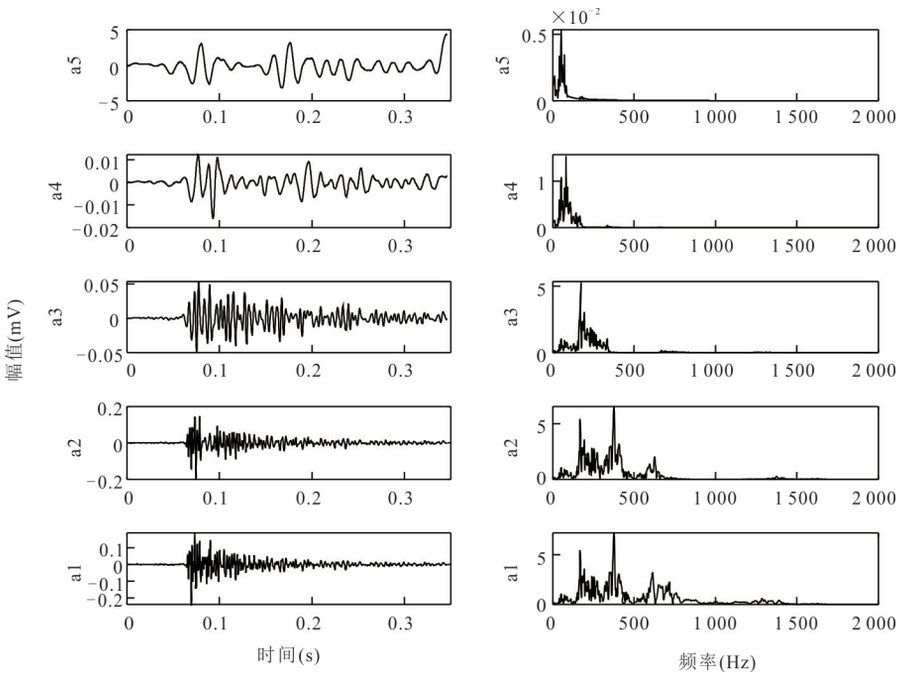


图 22 张拉型微震信号小波分解图

Fig. 22 Tension microseismic signal wavelet decomposition diagrams

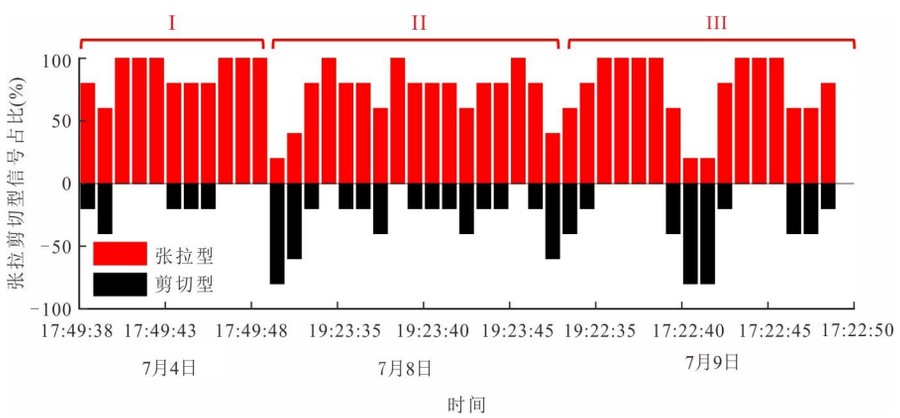


图 23 危岩崩塌过程拉剪信号占比随时间变化

Fig.23 The proportion of tensile and shear signal in the process of dangerous rock collapse changes with time

表 2 危岩临近崩塌的微震信号前兆特征

Table 2 Microseismic signal precursor characteristics of dangerous rocks near collapse

特征指标	特征描述
波形	出现“平静期”后再次活跃
频率	主频范围变窄,集中在低频带
优势频段能量占比	低频信号能量占比明显增加,占据主导地位
MFCC θ	连续波动下降
b值	连续下降后出现大幅度上升
微震活跃度	突降持续一段时间后重新上升
拉剪信号占比	剪切型信号占比显著增大

灾害的及时预警.危岩崩塌前夕的微震信号前兆信息汇总见表 2.

4 结 语

本文以广西桂林屏风山的典型岩溶地貌危岩为例,利用高灵敏度微震监测系统,对倾倒式危岩崩塌过程进行原位监测,提出微震监测环境噪音的“小波变换+随机森林”智能降噪方法,对倾倒式危岩微震信号演化特征开展了深入分析,发现了若干倾倒式危岩临近崩塌的微震信号前兆特征.主要结论如下:

(1)基于微震信号演化过程,可将倾倒式危岩

崩塌过程分为“初始开裂、裂隙扩展、崩塌临近”3个阶段,不同阶段的危岩主控裂隙的破裂行为及其微震信号特征具有显著差异,说明利用微震监测危岩崩塌过程是可行的.

(2)基于小波变换和随机森林的微震监测环境噪音智能识别降噪方法是可行的.该方法基于小波变换和样本熵理论,可有效提取危岩主控裂隙面开裂过程的岩石破裂信号,具有高效、准确率高的特点.

(3)倾倒式危岩临近崩塌的微震信号前兆特征为:微震信号波形出现“平静期”后再次活跃;信号主频分布范围变窄,信号集中在低频带;低频信号能量占比占据主导地位、MFCC θ 持续下降;b 值出现大幅度下降后重新增大;微震信号活跃度持续一段“平静期”后重新上升;剪切型信号占比显著增大.此前兆特征的揭示为危岩崩塌灾害的有效监测预警提供了重要科学依据.

本文对微震监测技术在危岩崩塌监测领域的应用开展了初步探索,但在试验过程中采取劈裂扩张和增大自重的方式实现危岩崩塌,而实际危岩体主要在外部自然因素作用下发生崩塌失稳,主控裂隙面劣化行为更为复杂,未来需开展更多危岩崩塌微震监测原位试验,探究岩溶区倾倒式危岩在自然崩塌过程中的微震信号演化特征及前兆信息.

References

Amitrano, D., Grasso, J. R., Senfaute, G., 2005. Seismic Precursory Patterns before a Cliff Collapse and Critical Point Phenomena. *Geophysical Research Letters*, 32(8): 2004GL022270. https://doi.org/10.1029/2004gl022270

Chen, B. R., Feng, X. T., Zeng, X. H., et al., 2011. Real-Time Microseismic Monitoring and Its Characteristic Analysis during TBM Tunneling in Deep-Buried Tunnel. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(2): 275−283 (in Chinese with English abstract).

Chu, H. L., Xing, G. L., Li, K. Z., et al., 2021. Monitoring of Dangerous Rock Mass in the Three Gorges Reservoir Area Based on the Terrestrial Laser Scanning Method. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(4): 124−132 (in Chinese with English abstract).

Dai, W., Jiang, N., Yang, X. G., et al., 2022. Non-Contact Real-Time Deformation Monitoring of Dangerous Slope Based on GB-InSAR. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 20(6): 69−74 (in Chinese with English abstract).

Du, W. J., Sheng, Q., Fu, X. D., et al., 2025. Application of Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing on Dangerous Rock Mass Identification and Deformation Analysis: Case Study of a High-Steep Slope in an Open Pit Mine. *Journal of Earth Science*, 36(2): 750−763. https://doi.org/10.1007/s12583-023-1813-7

Du, Y., Zhang, H. D., Xie, M. W., et al., 2024. Review on the Monitoring and Early Warning Technology of Large-Scale Unstable Rock Collapse. *Advanced Engineering Sciences*, 56(5): 10−23 (in Chinese with English abstract).

Feng, X. T., Chen, B. R., Ming, H. J., et al., 2012. Evolution Law and Mechanism of Rockbursts in Deep Tunnels: Immediate Rockburst. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(3): 433−444 (in Chinese with English abstract).

Hendrickx, H., Le Roy, G., Helmstetter, A., et al., 2022. Timing, Volume and Precursory Indicators of Rock- and Cliff Fall on a Permafrost Mountain Ridge (Mattertal, Switzerland). *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(6): 1532−1549. https://doi. org/10.1002/esp.5333

Hu, Z. H., Xu, N. W., Dai, F., et al., 2017. Micro-Seismicity Analysis of the Left Bank Rock Slope at Baihetan Hydropower Station. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 37(5): 769−775 (in Chinese with English abstract).

Jiang, F. X., Luo, X., Yang, S. H., 2003. Study on Microseismic Monitoring for Spatial Structure of Overlying Strata and Mining Pressure Field in Longwall Face. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 25(1): 23−25 (in Chinese with English abstract).

Liu, Q. X., Tian, X. F., Wang, Q. D., et al., 2026. Intelligent Monitoring and Distribution Characteristics of Seismic Activity in Huai'an Salt Mining Area, Jiangsu Province. *Earth Science*, 51(1): 160−172 (in Chinese with English abstract).

Lu, Y. H., 1991. Monitoring of Lianzi Cliff Dangerous Rock Body and Analysis about Its Deformation in Sanxia Gorge on Changjiang River. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2(3): 87−98 (in Chinese with English abstract).

Senfaute, G., Chambon, C., Bigarré, P., et al., 1997. Spatial Distribution of Mining Tremors and the Relationship to Rockburst Hazard. *Pure and Applied Geophysics*, 150(3): 451−459. https://doi. org/10.1007/s000240050087

Senfaute, G., Duperret, A., Lawrence, J. A., 2009. Micro-Seismic Precursory Cracks Prior to Rock-Fall on Coastal Chalk Cliffs: A Case Study at Mesnil-Val, Normandie, NW France. *Natural Hazards and Earth Sys-*

tem Sciences, 9(5): 1625－1641. https://doi. org/10.5194/nhess-9-1625-2009

Su, G. S., Li, Z., Fan, Q. Y., et al., 2023. A Three-Dimensional Discrete Element Calculation Method of Dangerous Rock Using UAV Remote Sensing for Fast Modeling. *Journal of Guangxi University* (*Natural Science Edition*), 48(3): 641－650 (in Chinese with English abstract).

Su, G. S., Zhao, G. F., Jiang, J. Q., et al., 2021. Experimental Study on the Characteristics of Microseismic Signals Generated during Granite Rockburst Events. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(8): 6023－6045. https://doi. org/10.1007/s10064-021-02295-2

Wu, C. F., Liao, J., Yuan, G. Q., et al., 2025. Effect of Pre-Existing Faults on Spatio-Temporal Evolution of In-Situ Stress and Microseismic Distribution. *Earth Science*, 50(10): 4027－4043 (in Chinese with English abstract).

Xu, G., Zhang, Z. B., Fan, Z. Y., 2017. Classification of Instability Modes of Dangerous Rock Masses. *Engineering Geology*, 25(S1): 390－399 (in Chinese with English abstract).

Xu, N. W., Li, B., Dai, F., et al., 2016. Stability Analysis of Bedding Rock Slopes during Excavation Based on Microseismic Monitoring. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(10): 2089－2097 (in Chinese with English abstract).

Zhang, S. G., Hu, Y., 2023. Application of 3D Laser Scanning Technology in Scanning and Monitoring of Dangerous Rock in Scenic Areas. *Sci-Tech Innovation and Productivity*, 44(5): 128－130, 133 (in Chinese with English abstract).

Zhang, W. P., Jia, J. K., Zeng, G. H., et al., 2019. Study on Monitoring and Pre-Warning of Dangerous Rock Mass Belt Based on Internet of Things and Network GIS. *Yangtze River*, 50(S1): 112－114, 139 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y., 2017. Design and Implementation of Real-Time Image Monitoring System for Dangerous Rock Collapse (Dissertation). Chongqing University, Chongqing (in Chinese with English abstract).

Zhang, Z. X., Chen, K. X., Hou, J. H., et al., 2024. Application of Intelligent Monitoring and Early Warning Technology Mode of Geological Disaster: A Case Study of Tangguo Road in Jiangbei District of Chongqing. *Natural Resources Informatization*, (1): 35－41 (in Chinese with English abstract).

Zhao, G. F., Su, G. S., Hu, S. H., et al., 2022. A Recognition Method of Cracking Types for Hard Rock Based on Microseisms Tests. *Journal of Experimental Mechanics*, 37(1): 107－117 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

陈炳瑞, 冯夏庭, 曾雄辉, 等, 2011. 深埋隧洞TBM掘进微震实时监测与特征分析. 岩石力学与工程学报, 30(2): 275－283.

褚宏亮, 邢顾莲, 李昆仲, 等, 2021. 基于地面三维激光扫描的三峡库区危岩体监测. 水文地质工程地质, 48(4): 124－132.

代威, 蒋楠, 杨兴国, 等, 2022. 基于地基合成孔径雷达的危险边坡变形非接触实时监测. 水利与建筑工程学报, 20(6): 69－74.

杜岩, 张洪达, 谢谟文, 等, 2024. 大型危岩体崩塌灾害早期监测预警技术研究综述. 工程科学与技术, 56(5): 10－23.

冯夏庭, 陈炳瑞, 明华军, 等, 2012. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 即时型岩爆. 岩石力学与工程学报, 31(3): 433－444.

胡中华, 徐奴文, 戴峰, 等, 2017. 白鹤滩水电站岩质边坡微震活动特征研究. 防灾减灾工程学报, 37(5): 769－775.

姜福兴, 罗勋, 杨淑华, 2003. 采场覆岩空间破裂与采动应力场的微震探测研究. 岩土工程学报, 25(1): 23－25.

刘巧霞, 田晓峰, 王清东, 等, 2026. 江苏淮安盐矿区地震活动智能监测及其分布特征. 地球科学, 51(1): 160－172.

陆业海, 1991. 链子崖危岩体形变监测与分析. 中国地质灾害与防治学报, 2(3): 87－98.

苏国韶, 李战, 范秋雁, 等, 2023. 基于无人机遥感快速建模的危岩体三维离散元计算方法. 广西大学学报(自然科学版), 48(3): 641－650.

武成飞, 廖杰, 原桂强, 等, 2025. 先存断层对地应力演化及微震分布的影响. 地球科学, 50(10): 4027－4043.

徐刚,张志斌,范泽英,2017. 危岩失稳模式分类研究. 工程地质,25(s1): 390－399.

徐奴文, 李彪, 戴峰, 等, 2016. 基于微震监测的顺层岩质边坡开挖稳定性分析. 岩石力学与工程学报, 35(10): 2089－2097.

张森桂, 胡艺, 2023. 三维激光扫描技术在景区危岩扫描监测中的应用. 科技创新与生产力, 44(5): 128－130, 133.

张玮鹏, 贾进科, 曾光辉, 等, 2019. 基于物联网与网络GIS的危岩带监测预警研究. 人民长江, 50(增刊1): 112－114, 139.

张宇, 2017. 危岩崩塌实时图像监测系统的设计与实现(博士学位论文). 重庆: 重庆大学.

张志希, 陈克勋, 侯均洪, 等, 2024. 危岩变形自动化监测预警技术与应用: 以重庆市江北区唐郭路为例. 自然资源信息化, (1): 35－41.

赵国富, 苏国韶, 胡诗红, 等, 2022. 一种基于微震试验的硬岩破裂模式识别方法. 实验力学, 37(1): 107－117.