

# 危岩体崩塌灾害监测预警试验研究<sup>1)</sup>

杜 岩 <sup>\*,2)</sup> 霍磊晨 <sup>\*</sup> 谢谟文 <sup>\*</sup> 蒋宇静 <sup>†</sup> 贾北凝 <sup>\*\*</sup> 丛晓明 <sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>(北京科技大学城市地下空间工程北京市重点实验室, 北京 100083)

<sup>†</sup>(山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东青岛 266590)

<sup>\*\*</sup>(建设综合勘察研究设计院, 北京 100007)

**摘要** 岩体崩塌破坏的突发性使其成为最难预防的地质灾害之一, 严重威胁人类的生命财产安全。边坡岩块体崩塌破坏多是系统不稳定导致的动力破坏, 因此应用动力学指标进行监测预警更为有效。本研究通过引入多种时域动力学监测指标, 开展了岩体崩塌破坏全过程的监测预警实验研究。通过振动幅值、峭度指标等时域动力学指标监测, 可有效识别岩体分离破坏前兆现象, 提前 55 s 实现岩块体崩塌的早期预警。多个时域动力学指标均可识别岩体破坏前的非协调性动力特征, 其中变异系数在识别这一振荡特征上优势明显, 可通过识别这一震荡特征实现崩塌灾害的早期预警。此外, 破坏前岩体的振动速度是稳定岩体的 2.1 倍, 岩体破坏发生时刻赋存较大的冲击能量, 是岩体启程剧动的主要原因之一, 可通过综合分析峭度指标等时域动力学指标, 实现分离破坏前兆更为合理的判识。本研究不仅为岩体崩塌灾害早期预警提供了新的数据与技术方法支持, 也为崩塌岩体启程剧动机制与破坏后运动特性研究提供了新的启示。

**关键词** 岩体崩塌, 监测预警, 动力学指标, 非协调动力响应, 启程剧动

中图分类号: U260.17 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-20-441

## MONITORING AND EARLY WARNING EXPERIMENT OF ROCK COLLAPSE<sup>1)</sup>

Du Yan<sup>\*,2)</sup> Huo Leichen<sup>\*</sup> Xie Mowen<sup>\*</sup> Jiang Yujing<sup>†</sup> Jia Beining<sup>\*\*</sup> Cong Xiaoming<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>(Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

<sup>†</sup>(State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

<sup>\*\*</sup>(Comprehensive Institute of Geotechnical Investigation and Surveying, Ministry of Construction, Beijing 100007, China)

**Abstract** Rock collapse has been a hot issue in the study of geological hazards for many years, and it is difficult to prevent because of its sudden disintegration, which is a serious threaten to human life and property safety. The rock collapse is caused by the dynamic failure of the system instability, so it can be more effective to apply the dynamic monitoring index in early warning. By introducing time-domain dynamic monitoring indicators, the whole process of rock collapse is monitored in real time. Through vibration amplitude, kurtosis index and other indexes, the failure precursor in the detachment phase is analyzed. As the early warning method based on detachment precursor recognition has better timeliness in the early warning of rock collapse, it can realize the early warning of rock block collapse 55 s in advance.

2020-12-21 收稿, 2021-02-20 录用, 2021-02-21 网络版发表。

1) 国家重点研发计划(2018YFE0101100), 国家自然科学基金(41572274, 41702371)和中央高校基本科研业务专项(FRF-BD-20-01A)资助项目。

2) 杜岩, 副教授, 主要研究方向: 岩土工程与岩石力学。E-mail: mutulei@163.com

引用格式: 杜岩, 霍磊晨, 谢谟文, 蒋宇静, 贾北凝, 丛晓明. 危岩体崩塌灾害监测预警试验研究. 力学学报, 2021, 53(4): 1212-1221

Du Yan, Huo Leichen, Xie Mowen, Jiang Yujing, Jia Beining, Cong Xiaoming. Monitoring and early warning experiment of rock collapse. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(4): 1212-1221

The experimental results show that the time-domain dynamic index monitoring can identify the obvious incompatible dynamic response before rock failure, and the variation coefficient has obvious advantages in identifying the oscillation feature. The early warning of collapse disaster can be realized by identifying this oscillation feature. Furthermore, the vibration velocity of rock mass before the collapse is 2.1 times that in the stable phase, and the large impact energy of rock mass at the time of failure is one of the main reasons for the high-speed rockslide. By analyzing the kurtosis index and other time-domain dynamic indexes, the reasonable identification of the failure precursors can be achieved. The study provides new data support and enlightenment for the early warning of rock collapse, the mechanism of rock collapse and the rock movement characteristics after failure.

**Key words** rock collapse, monitoring and early warning, dynamic index, incompatible dynamic response, sudden departure

## 引言

随着我国“一带一路”重大战略的深入部署,越来越多的大型水电站、公路、铁路、桥梁、隧道和能源管线将在我国西南山区进行建设<sup>[1]</sup>。复杂的高山峡谷地形地貌,恶劣的气候条件以及大量高陡边坡的工程开挖扰动,使得岩体崩塌灾害事故的发生概率大大增大。这些潜在危岩体作为目前我国工程建设最主要的安全隐患点,一旦发生,轻则造成较大的经济损失和工期延误,重则还会造成严重的人员伤亡。因此,如何实现崩塌灾害的早期监测预警是岩土工程领域亟待解决的主要工程问题之一。

实际上,岩体脆性破坏多是系统不稳定导致的动力破坏,因此引入动力学监测指标,可有助于实现岩块体的稳定评价与早期预警<sup>[2-3]</sup>。Amitrano 等<sup>[4]</sup>分析了法国西部诺曼底海岸岩体崩塌前的振动情况,得出振动幅值等振动特征可以为崩塌的早期监测预警起到一定的指示作用; Got 等<sup>[5]</sup>监测了法国东南部维科尔斯山东南部一处天然石灰岩悬崖岩体崩塌前的位移和振动情况,得出频谱分析可以作为位移速度的补充应用于崩塌的早期预警中; Bottelin 等<sup>[6]</sup>基于振动监测技术,对阿尔卑斯山 4 个不稳定岩体的动力响应进行研究,发现不稳定岩体的振动谱共振频率下显示出清晰的能量峰值; Ma 等<sup>[7]</sup>以混凝土试块为实验案例,将频率监测与试块安全性系数进行比较发现,频率等振动特征参数对岩块体的稳定程度有一定指示作用; 杜岩等<sup>[8-10]</sup>基于模型试验,通过固有振动频率来对危岩的黏结力和摩擦力等力学指标进行分析,得出基于振动模态的岩体安全监测将在实际工程中发挥重大作用; 随后贾艳昌等<sup>[11]</sup>通过理论推导,建立了危岩块体固有振动频率、危岩块体与母岩粘结

面积、弹性模量和危岩块体质量之间的关系,并用试验进行了验证。大量研究表明,基于动力学指标的岩块体的早期监测预警是人类应对崩塌灾害最为有效和技术手段之一。

崩塌灾害除受到岩体强度及结构面力学状况等内部因素作用外,还与降雨、地震、爆破等多种外界触发因素有关<sup>[12]</sup>,导致崩塌的预警难度相对较大<sup>[13]</sup>。因此,目前相对单一的监测指标体系,必然导致监测预警技术的预警时效性、准确性与可实施性方面存在较大制约,传统方法中基于位移、应力应变等监测指标的监测预警,虽然有较好的准确性,但具有一定的时间滞后性和不确定性<sup>[14]</sup>; 而单一固有振动频率的预警方法,虽然在时效性方面有较好效果<sup>[15]</sup>,但其监测往往受到环境白噪音的影响,预警的准确性方面存在诸多限制<sup>[16]</sup>。基于此,本研究通过引入激光多普勒测振仪,开展基于多个时域动力学指标的监测预警试验,实现岩体由稳定→分离→加速破坏全过程动力学指标的基本变化规律研究,丰富目前动力学监测指标体系的同时,也为工程中更好应对崩塌灾害提供新的技术支持。

## 1 原理

危岩体多发育于裂隙带后缘的地形较陡且岩体破碎的地区<sup>[17]</sup>,其破坏也多发生在由节理裂隙发育的坚硬岩体组成而并非均匀介质陡峻山崖或者斜坡上部<sup>[18]</sup>,因此其破坏过程通常可视为一个非线性动力系统的演化过程<sup>[19]</sup>。在崩塌发生前,随着岩体损伤的发生与内部节理裂隙的扩展,振动幅值等动力学指标一定会产生变异<sup>[20-23]</sup>。因此,建立包含多个动力学指标参量的崩塌破坏早期预警指标体系,是目前

工程监测与灾害预警的必然选择。岩体的动力学指标按照其信息属性可分为时域动力学指标、频域动力学指标、能量指标与模态指标 4 种。相对于其他 3 类指标, 时域动力学指标是从监测得到的时间振动信号中直接提取, 不需要进行傅里叶等变换计算, 因此该类指标作为振动监测的常态化指标, 可率先应用于崩塌灾害的监测预警指标体系中。

图 1 为某时刻岩体的时域振动信号。基于该振动波形图, 可得振动幅值、振动绝对均值、变异系数和峭度指标等 5 种时域动力学指标, 振动幅值  $x_p$  为

$$x_p = \max |x_i| \quad (1)$$

其中,  $x_i$  为某时刻的振动速度。振动幅值越大, 说明岩体越不稳定, 趋于危险; 反之则趋于安全。

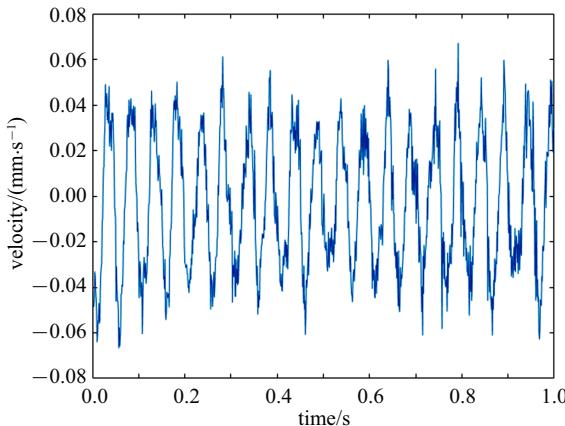


图 1 某时刻的振动历史曲线

Fig. 1 Vibration history at some time

振动绝对均值  $x_{av}$  为

$$x_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i| \quad (2)$$

其中,  $N$  为监测样本数。由振动绝对均值可知, 当均值越大, 说明岩体的振动能量越高, 预示岩体稳定程度越差。

振动方差  $D_x$  为

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{av})^2 \quad (3)$$

变异系数  $K_v$  为

$$K_v = \frac{\sqrt{D_x}}{x_{av}} \quad (4)$$

由变异系数可知, 当变异系数越大, 说明时域振动信号具有较大的离散性, 可能预示岩体稳定程度发生变异, 岩体趋于危险。

峭度指标  $\beta$  为

$$\beta = \sqrt{\frac{N}{24}} \left[ \sum_{i=1}^N \left( \frac{x_i - x_{av}}{\sqrt{D_x}} \right)^4 - 3 \right] \quad (5)$$

通常, 峭度指标对周期性的冲击信号十分敏感<sup>[24]</sup>, 因此该指标可用于分析某时刻岩体振动中的冲击能量  $E_i$  为

$$E_i = c\beta \times E_t = \frac{c\beta mx_p^2}{2} \quad (6)$$

其中,  $c$  为转换系数, 本文取最大峭度指标的倒数。由式(6)可得某时刻赋存在岩体中的冲击能量指标, 该指标可为崩塌灾害的预警预测分析提供参考。

## 2 实验结果

### 2.1 基于多种时域指标的早期预警分析

越来越多的研究证明, 岩块脆性破坏往往是拉伸或剪切破坏的同时, 也伴随着强度的实时退化<sup>[25]</sup>。如果不考虑结构面的弱化效应, 很难模拟岩体在自重状态下发生崩塌破坏的全过程。为模拟岩块体在累积损伤作用下发生崩塌破坏的全过程, 实验通过预设粘结力不断弱化的冻结冰层作为结构面, 随着冰层不断融化, 实现在自重作用下发生脆性崩塌破坏的全过程<sup>[26]</sup>。相比较其他实验方式, 该模型实验可以自发模拟岩体在累积损伤过程中由稳定到破坏的全过程, 进而为岩体崩塌前动力学指标的变化规律研究提供实验支持。实验中, 采用激光多普勒测振仪(laser doppler vibrometer, LDV)来实现岩体崩塌全过程的振动监测, 如图 2 所示。实验自计时起, 445 s 后发生崩塌破坏, 其中 0~390 s 为稳定阶段, 390~440 s 为分离阶段, 440~445 s 为加速破坏阶段。激光多普勒测振仪分别测量了不同阶段的岩体时域动力学指标。振动幅值、振动绝对均值和变异系数 3 种时域动力学监测指标实验结果如表 1 所示。

图 3 为振动幅值、振动绝对均值与变异系数的过程线图。由图 3 可知, 在稳定阶段(0~390 s), 振动幅值和振动绝对均值随着结构面强度的下降不断呈上升趋势, 并在 390 s 出现急剧升高, 分别较前一时刻增长 2.4 和 3.1 倍, 明显触发分离破坏前兆预警; 而

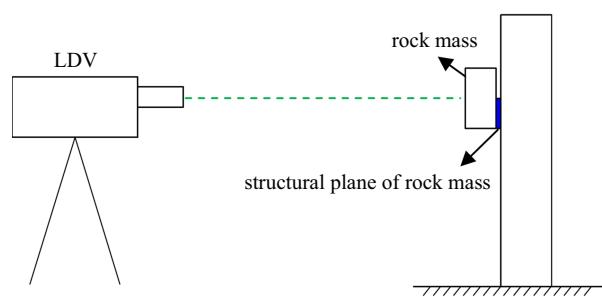


图 2 模型实验原理图

Fig. 2 Schematic view of the model experiment

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

Time/s	$x_p/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$x_{av}/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$K_v$
0	0.013 41	0.005 63	0.434 66
50	0.014 66	0.004 32	0.938 45
124	0.008 11	0.002 43	1.376 47
200	0.015 96	0.007 49	0.458 13
270	0.020 36	0.006 33	1.177 46
310	0.029 91	0.011 06	1.171 65
370	0.020 56	0.006 78	0.968 86
390	0.049 76	0.020 83	0.998 31
410	0.021 66	0.006 35	0.873 65
430	0.030 56	0.013 04	0.589 24
435	0.037 86	0.022 17	0.340 70
440	0.055 96	0.041 18	0.160 81
441	0.039 91	0.018 05	1.399 58
442	0.063 84	0.038 25	2.016 79
443	0.052 39	0.025 29	2.052 18
444	0.031 89	0.011 62	1.356 97
445	0.063 34	0.034 08	2.038 42

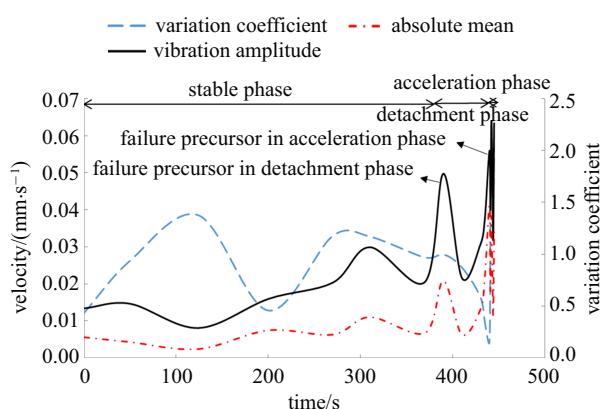


图 3 振动幅值、振动绝对均值和变异系数的过程线

Fig. 3 Curves of vibration amplitude, absolute mean and variation coefficient

变异系数指标则出现较大的波动性, 分离破坏前兆识别并不敏感; 在分离阶段(390~440 s), 振动幅值和振动绝对均值随着岩体稳定性的下降继续呈上升趋势, 并在 440 s 出现明显升高, 较前一时刻增大 1.5 和 1.9 倍, 可触发加速破坏前兆预警, 而变异系数指标则在该时间段呈整体下降趋势, 加速破坏前兆识别不敏感。

综上, 振动幅值与振动绝对均值这两种时域动力学指标均可识别分离破坏与加速破坏前兆, 而变异系数在分离破坏与加速破坏前兆识别的敏感性方面较差。在振动幅值与振动绝对均值的分离阶段前兆识别中较前一时刻增长 2 倍以上, 敏感性良好, 因此振动幅值与振动绝对均值可为基于分离破坏前兆识别的早期预警方法提供新的敏感性指标, 可提前 55 s 实现崩塌灾害的早期预警。

图 4 为 430 s 后的过程线曲线。结果显示, 相比较于分离阶段, 加速破坏阶段时的振动幅值、振动绝对均值和变异系数等均在破坏前表现出明显的非协调变化特征。这种振荡特征是岩体在崩塌前其结构不稳定状态下的外在指标表现<sup>[27]</sup>, 通过多种时域动力学指标可识别出这种加速破坏前兆特征。在破坏前的最后 5 s 内, 变异系数从最小值 0.160 81 到最大值 2.052 18, 增大 12.8 倍, 明显优于振动幅值(2.0 倍)与振动绝对均值(3.5 倍)这两个时域指标。因此, 通过变异系数可识别岩体崩塌破坏前的非协调动力特征, 为崩塌灾害的加速破坏前兆识别提供新的技术方法, 从而为更好地实现崩塌灾害的早期预警提供参考。

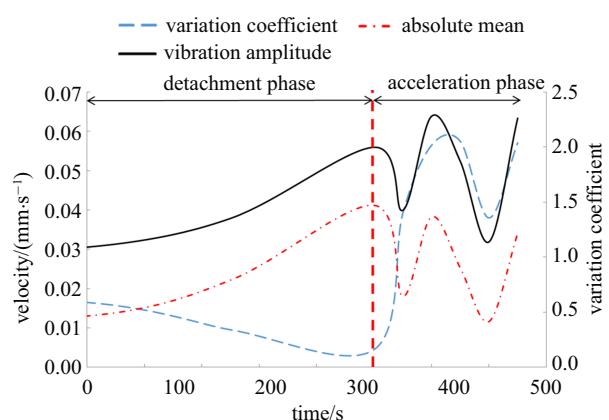


图 4 430 s 振动幅值、振动绝对均值和变异系数的过程线

Fig. 4 Curves of vibration amplitude, absolute mean and variation coefficient after 430 s

## 2.2 岩体崩塌实验的振动冲击能量分析

由式(6)可知, 基于时域指标的监测数据可得岩体振动的冲击能量, 如表2所示。由表2可知, 岩体振动中的冲击能量在前435 s内平均值为 $3.28 \times 10^{-5}$  J, 而破坏前5 s(440~445 s)的冲击能量平均值为 $10.17 \times 10^{-5}$  J, 为前期平均能量的3.1倍。因此, 岩体在加速破坏阶段赋存的振动冲击能量也远大于前期稳定阶段与分离阶段。

岩体崩塌破坏前, 一般需要经历两个阶段: 一是分离阶段, 二是加速破坏阶段<sup>[28]</sup>。当岩体在结构面的破裂位置开始逐渐形成连续的结构面, 从母岩分离, 才真正进入分离阶段, 并发生分离破坏前兆现象<sup>[29]</sup>。实验采用LDV对岩体崩塌破坏的全过程进行实时监测, 岩体在390 s和440 s分别出现分离破坏前兆与加速破坏前兆。图5为累积损伤作用下发生崩塌破坏的全过程位移与冲击能量监测数据对比。由图5可知, 冲击能量指标在390 s较前一时刻增大2.9倍, 与振动幅值(2.4倍)和振动绝对均值(3.1倍)相比, 3种指标信号敏感性良好, 均可较好的识别岩体的分离破坏前兆。

在加速破坏前兆识别方面, 冲击能量指标在440 s较前一时刻增大2.8倍。与振动幅值(1.5倍)

和振动绝对均值(1.9倍)相比, 冲击能量指标信号敏感性最好, 可方便识别岩体的分离破坏前兆。

表2 峰度系数与冲击能量计算结果

Table 2 Kurtosis and calculation results of impact energy

Time/s	$\beta$	$E_i \times 10^5/J$
0	11 154.73	1.14
50	10 228.06	1.25
124	10 774.11	0.40
200	10 668.42	1.54
270	9 055.82	2.13
310	7 467.82	3.79
370	13 305.22	3.19
390	6 781.43	9.53
410	9 969.95	2.65
430	7 232.47	3.83
435	8 151.37	6.63
440	10 539.76	18.73
441	9 484.27	8.57
442	4 013.98	9.28
443	4 520.90	7.04
444	13 295.24	7.67
445	4 279.27	9.74

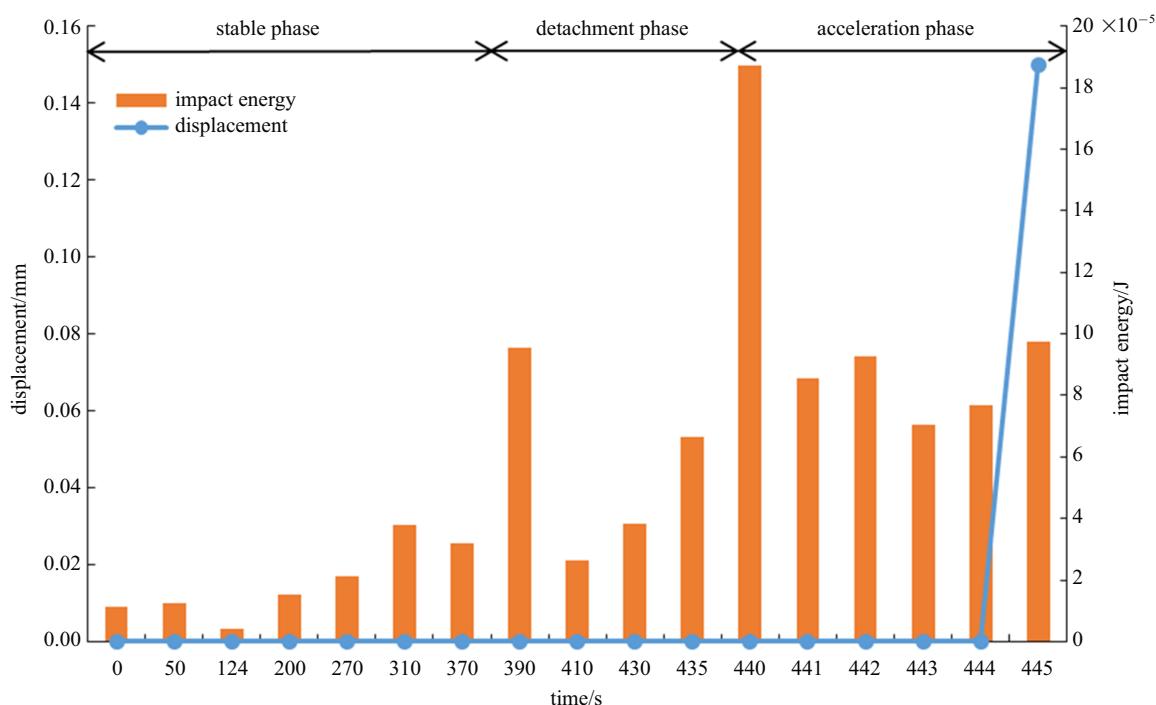


图5 崩塌实验位移与冲击能量监测数据对比

Fig. 5 Comparison of monitoring data of displacement and impact energy

表 3 为振动幅值、振动绝对均值和冲击能量的预警效果对比。由表 3 可知, 相对于基于加速破坏前兆识别的传统预警方法, 基于分离破坏前兆识别的预警效果无论在时效性还是在敏感性方面都具有潜在优势。在时效性方面, 3 种动力学指标均在 390 s 识别出岩体分离破坏前兆现象, 可提前 55 s 实现崩塌灾害的早期预警。在敏感性方面, 3 种指标均在 2.0 以上, 敏感性上均表现良好, 其中振动绝对均值最优, 冲击能量次之, 振动幅值最低。振动绝对均值等动力学指标可为基于分离破坏前兆识别的预警方法提供更丰富的监测预警指标。

表 3 振动幅值、振动绝对均值和冲击能量的预警效果对比

Table 3 Comparison of early warning effects of vibration amplitude, absolute mean and impact energy

Index	Precursor identification in the detachment phase		Precursor identification in the acceleration phase	
	timeliness/s	sensitivity	timeliness/s	sensitivity
vibration amplitude	55	2.4	5	1.5
absolute mean	55	3.1	5	1.9
impact energy	55	2.9	5	2.8

### 3 讨论

#### 3.1 岩体破坏前的非协调动力特征识别

基于结构动力学理论, 力学参数的变化必然会引起岩块体动力学指标的变化。本研究通过岩块体稳定–分离–破坏全过程实验研究, 深入分析岩块体从稳定到破坏全过程中时域动力学指标的变化规律。实验结果得出, 基于振动幅值等时域动力学指标在岩体崩塌破坏前出现短暂而明显的非协调与非线性变化特征, 振动幅值、振动绝对均值与变异系数均在破坏前 5 s 出现明显的振荡特征(图 4), 为岩体破坏前非协调动力特征识别提供了新的数据支持<sup>[30-33]</sup>。

类似于材料科学中的位错机制理论<sup>[34]</sup>, 岩体崩塌前岩桥等内部缺陷的损伤破裂, 是导致岩体破坏前产生明显非协调性破坏特征的原因<sup>[35]</sup>。相关实验研究也表明<sup>[36-37]</sup>, 岩体破坏前结构面会出现裂纹不稳定扩展, 诸如岩石即将破坏时声发射指标  $b$  值会出现大幅度的波动变化。由于这种震荡特征发生在岩体破坏之前, 因此识别这一震荡特征可以为岩体崩塌灾害的早期预警提供新的技术思路, 即在岩体结构面在破坏前, 通过识别变异系数等时域动力学

参数震荡特征, 实现岩体崩塌灾害的预警预报。动力学监测指标的引入, 可完美契合岩体崩塌等脆性破坏前非协调破坏特征的监测需求, 丰富现有的崩塌灾害监测预警指标体系的同时, 也为岩体崩塌等脆性破坏灾害预警理论方法研究提供技术支持。因此, 在未来基于非协调性破坏特征识别的监测预警预测技术将作为岩体崩塌等脆性破坏灾害预警预防研究的主要方向之一, 在川藏铁路等高山峡谷建设崩塌灾害成灾机理与风险防范方面发挥积极作用。

#### 3.2 岩体崩塌破坏时的冲击能量

岩体从稳定岩体 → 母岩分离 → 加速破坏这一过程中, 力学参数必然会发生变化, 进而会分别出现分离破坏前兆与加速破坏前兆, 例如出现若干的破裂信号。由于这些信号多是由微小的裂缝扩张引起的, 通常很难用肉眼或位移测量设备进行监测识别<sup>[25]</sup>。最新的实验研究显示, 岩体在损伤破坏过程中, 损伤较小则能量释放较少; 损伤变量迅速增加则会导致能量大量的释放<sup>[38]</sup>, 而岩体冲击能量则来源于岩体发生损伤时产生的能量释放。

表 4 为实验中岩体崩塌三阶段冲击能量指标对比。由表 4 可知, 岩体在稳定阶段、分离阶段与加速破坏阶段的平均冲击能量指标的量级有明显不同: 在稳定阶段由于只有微裂隙的扩展, 损伤较小, 能量释放较少, 只有  $1.92 \times 10^{-5}$  J; 而在分离阶段, 裂隙的大量扩展, 冲击能量是稳定时期的 2.95 倍, 分离破坏前兆识别明显; 当到达加速破坏阶段, 由于岩体发生断裂破坏, 能量释放进一步升高, 平均冲击能量最大, 比分离阶段又增长了 79.68%, 是稳定阶段的 5.30 倍。因此, 引入冲击能量指标来进行岩体结构面损伤识别, 并在此基础上进行预警具有明显的优势。

表 4 岩体崩塌三阶段冲击能量指标对比

Table 4 Comparison of impact energy indexes in three phases of rock collapse

Phase	Average impact energy		Maximum impact energy	
	energy $\times 10^5$ /J	growth factor	energy $\times 10^5$ /J	time/s
stable phase	1.92	—	3.79	310
detachment phase	5.66	2.95	9.53	390
acceleration phase	10.17	5.30	18.73	440

实际上自然界的岩石在风化、降雨等累计损伤下, 不可避免会发生复杂的应力应变状态, 因此岩体从稳定到破坏全过程中需要识别损伤的发生时刻进而分析其抵御变形和破坏的能力。由表 4 可知, 最大冲击能量指标可显示其发生时刻, 表明岩体发生了较大的损伤, 这为岩体累计损伤的过程评价识别提供了新的数据支持。例如在稳定阶段, 310 s 时冲击能量指标最大, 表明岩体在这一时刻发生了较大损伤, 实验中也发现在 310 s 岩体有轻微振动的出现。因

此, 岩体在稳定到破坏的全过程中, 其抵御变形和破坏的能力并非呈规律性的下降<sup>[39]</sup>, 会因为某时刻某随机破裂的发生出现大幅下降<sup>[40]</sup>, 而只有采用综合信息的识别技术, 才能准确分析岩体由稳定到破坏发生的应力应变与损伤程度, 进而实现岩体分离破坏前兆与加速破坏前兆的有效区分<sup>[41]</sup>。结合传统的监测分析手段, 现场还可通过综合分析以下特征, 实现分离破坏前兆和加速破坏前兆的合理判识, 如表 5 所示。

表 5 分离破坏与加速破坏前兆分析综合识别

Table 5 Comprehensive identification of precursors in the detachment and acceleration phase

Index	Precursor identification in the detachment phase	Precursor identification in the acceleration phase
natural variation frequency	less than early warning threshold of detachment phase	close to 0 Hz
vibration amplitude	2-fold increase	2.5-fold increase
impact energy	2-fold increase	5-fold increase
variation coefficient	shock is not obvious	shock is obvious

### 3.3 岩体崩塌启程剧动分析探讨

岩体崩滑的启程剧动机制一直是岩土工程领域研究的热点<sup>[42]</sup>。多个大型案例表明, 岩体滑动发生时均有明显的地面震动, 且这种强振动是在结构面突然剪断时触发的, 并发生于岩体下滑启动之前<sup>[32]</sup>。虽然实际案例分析中已经得出岩体在崩塌前就已经具备了较大的冲击能量, 但在该能量的来源解释上还未给予明确解释。本实验中, 岩体在破坏前(445 s)的最大冲击能量高达  $18.73 \times 10^{-5}$  J, 为稳定时期(310 s)最大值的 4.94 倍, 如表 4 所示。因此, 岩体在破坏前是可能具备一定的冲击速度与冲击能量, 进而从室内试验中解释了岩体启程剧动机制的能量来源。

图 6 为岩体由稳定到破坏全过程中的耗散能与冲击能量关系分析。由图 6 可知, 当处于稳定阶段(OA 段), 岩体处于弹性应力应变状态, 耗散能  $U_{D1}$  较小, 进而该阶段岩体获得的冲击能量较小, 往往可以忽略不计; 当进入分离破坏阶段(AB 段), 岩体处于塑形应力应变状态, 耗散能  $U_{D2}$  相较于  $U_{D1}$  有明显增大, 耗散能的释放导致该阶段岩体的冲击能量有明显提高; 当岩体进入加速破坏阶段(BC 段), 岩体内部裂隙不断扩展, 耗散能  $U_{D3}$  最大, 该岩体破坏时不仅具有非常可观的冲击能量, 同时破坏时刻伴有岩体弹性能( $U_E$ )的释放, 使得岩体破坏时的弹冲效应非常显著。实验与工程研究表明, 锁固段岩体对崩塌灾

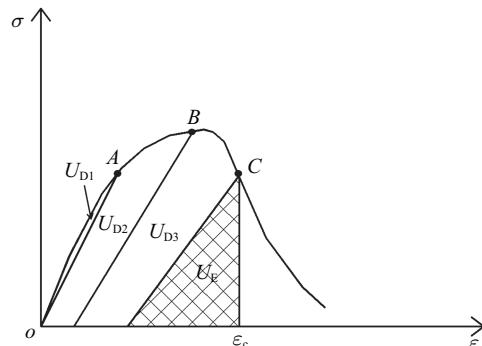


图 6 岩体崩塌耗散能与冲击能量关系示意  
Fig. 6 Relationship diagram between dissipation energy and impact energy of rock collapse

害的动力反应起着控制性作用<sup>[43]</sup>, 且锁固段岩体的峰残强降差是高速启动的根本原因<sup>[44]</sup>。当峰残强降差越大, 表明岩体结构面破坏前释放耗散能越大, 进而导致岩体在崩滑破坏发生时会赋存很大的冲击能量。因此, 在岩体在崩塌破坏的全过程中, 耗散能的释放使得岩体具有一定的冲击速度, 进而使得岩体在破坏时刻出现明显的“弹冲效应”<sup>[32]</sup>。

实际上在高速岩体崩塌破坏的启动剧动机制研究中, 人们往往只关注岩体赋存的弹性能量, 而很少关注岩体破坏前赋存的冲击能量<sup>[32]</sup>, 因此在岩体启动速度和下滑距离的分析中存在一定误差。实验与工程研究表明, 锁固段岩体对崩塌灾害的动力反应起着控制性作用<sup>[43]</sup>, 且锁固段岩体的峰残强降差是

高速启动的根本原因<sup>[44]</sup>。当峰残强降差越大, 表明岩体结构面破坏前释放耗散能  $U_{D3}$  越大, 进而导致岩体在崩滑破坏发生时会赋存很大的冲击能量。因此, 在岩体崩塌运动轨迹等数值模拟过程中, 应充分考虑岩体崩滑前的冲击振动速度, 只有这样才能保证计算分析结果的准确可靠。该试验研究结果为岩体破坏启程刷动机理研究提供了新的启示, 为崩塌岩体的速度、运动轨迹与落点位置等运动特性分析提供新的参考。

## 4 结论

本研究通过引入峭度指标、冲击能量等多个新的动力学监测指标, 开展了岩体崩塌破坏全过程的早期监测预警实验研究, 得出如下结论:

(1) 在岩体分离破坏前兆识别方面, 振动幅值、振动绝对均值与冲击能量均在 390 s 识别岩体的分离破坏前兆。由于分离破坏前兆识别预警方法在岩体崩塌等脆性破坏灾害监测预警方面具有更好的时效性, 可提前 55 s 实现岩块体崩塌破坏的早期预警。

(2) 在岩体崩塌加速破坏前兆识别方面, 振动幅值、振动绝对均值与冲击能量均可在在 440 s 识别其加速破坏前兆。但在识别的敏感性方面, 冲击能量最优, 而振动绝对均值与振动幅值敏感性较差。

(3) 岩体在破坏前多个时域动力学指标呈现短暂而明显的非协调动力特征, 其中变异系数在识别这一振荡特征上优势最为明显。因此, 时域动力学指标监测可以为岩体破坏前非协调动力特征识别与相关预警理论研究提供数据支持。

(4) 岩体在破坏前具备较大的冲击速度, 是崩塌岩体产生弹冲加速效应的主要原因之一。因此在岩体崩塌破坏后的运动特性分析时需要考虑岩体的冲击振动速度的影响。研究结果为崩塌岩体启程刷动机制等相关研究提供了新的启示。

## 参 考 文 献

- 崔鹏, 胡凯衡, 陈华勇等. 丝绸之路经济带自然灾害与重大工程风险. 科学通报, 2018, 63(11): 989-997 (Cui Peng, Hu Kaiheng, Chen Huayong, et al. Risks along the silk road economic belt owing to natural hazards and construction of major projects. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(11): 989-997 (in Chinese))
- Qiu LM, Song DZ, Li ZH, et al. Research on AE and EMR response law of the driving face passing through the fault. *Safety Science*, 2019, 17: 184-193
- Vlentin J, Capron A, Jongmans D, et al. The dynamic response of prone-to-fall columns to ambient vibrations: comparison between measurements and numerical modelling. *Geophysical Journal International*, 2017, 208(2): 1058-1076
- Amitrano D, Grasso JR, Senfaute G. Seismic precursory patterns before a cliff collapse and critical point phenomena. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(8): 08314
- Got JL, Mourot P, Grangeon J. Pre-failure behaviour of an unstable limestone cliff from displacement and seismic data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, 10(4): 819-829
- Bottelin P, Jongmans D, Baillet L, et al. Spectral analysis of prone-to-fall rock compartments using ambient vibrations. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2013, 18(4): 205-217
- Ma GC, Sawada K, Yashima A, et al. Experimental study of the applicability of the remotely positioned laser doppler vibrometer to rock-block stability assessment. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(2): 787-802
- 杜岩, 谢谋文, 蒋宇静等. 基于自振频率的监测预警指标确定方法. 岩土力学, 2015, 36(8): 2284-2290 (Du Yan, Xie Mowen, Jiang Yujing, et al. Methods of determining warning indices based on predominant frequency monitoring. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(8): 2284-2290 (in Chinese))
- Jia B, Wu Z, Du Y. Real-time stability assessment of unstable rocks based on fundamental natural frequency. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 124: 104134
- 杜岩, 谢谋文, 蒋宇静等. 基于固有振动频率的危岩安全监测试验研究. 岩土力学, 2016, 37(10): 3035-3040 (Du Yan, Xie Mowen, Jiang Yujing, et al. Safety monitoring experiment of unstable rock based on natural vibration frequency. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(10): 3035-3040 (in Chinese))
- 贾艳昌, 谢谋文, 昌圣翔等. 基于固有振动频率的滑移式和坠落式危岩块体稳定性评价模型研究. 岩土力学, 2017, 38(7): 2149-2156 (Jia Yanchang, Xie Mowen, Chang Shengxiang, et al. A model for evaluation of stability of sliding and falling-type dangerous rock blocks based on natural vibration frequency. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(7): 2149-2156 (in Chinese))
- 吕乔森, 董玮玮. 阿勒泰骆驼峰景区崩塌灾害特征与防治措施研究. 水利学报, 2015, 46(S1): 214-219, 224 (Lü Qiaosen, Dong Weiwei. Study on rock fall features and prevention in mount camel of alay. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(S1): 214-219, 224 (in Chinese))
- 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957-966 (Xu Qiang, Dong Xiujun, Li Weile. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 957-966 (in Chinese))
- 杨晓杰, 侯定贵, 王嘉敏等. 南芬露天铁矿下盘高陡边坡稳定性分析与监测预警技术研究. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(5): 1000-1007 (Yang Xiaojie, Hou Dinggui, Wang Jamin, et al. Study on the stability and remote real-time monitoring for high steep slope in Nanfen open pit iron mine. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(5): 1000-1007 (in Chinese))
- 杜岩, 谢谋文, 蒋宇静等. 基于固有振动频率的滑坡安全评价新方法. 工程科学学报, 2015, 37(9): 1118-1123 (Du Yan, Xie Mowen, Jiang Yujing, et al. A new method for landslide safety assessments based on natural vibration frequency. *Chinese Journal of Engineering*, 2015, 37(9): 1118-1123 (in Chinese))

- 16 杜岩. 基于固有振动频率的危岩块体稳定评价模型研究. [博士论文]. 北京: 北京科技大学, 2016 (Du Yan. Study on the model of rock block stability evaluation based on natural vibration frequency. [PhD Thesis]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2016 (in Chinese))
- 17 崔杰, 王兰生, 王卫等. 采空区边坡变形破裂演化机制研究. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(4): 409-414 (Cui Jie, Wang Lansheng, Wang Wei, et al. Deformation and fracturing mechanism of goaf slope. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2008, 25(4): 409-414 (in Chinese))
- 18 董秀军, 许强, 余金星等. 九寨沟核心景区多源遥感数据地质灾害解译初探. 武汉大学学报 (信息科学版), 2020, 45(3): 432-441 (Dong Xiujun, Xu Qiang, She Jinxing, et al. Preliminary study on interpretation of geological hazards in Jiuzhaigou based on multi-source remote sensing data. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 432-441 (in Chinese))
- 19 杜岩, 谢谟文, 蒋宇静等. 基于动力学监测指标的崩塌早期预警研究进展. 工程科学学报, 2019, 41(4): 427-435 (Du Yan, Xie Mowen, Jiang Yujing, et al. Research progress on dynamic monitoring index for early warning of collapse. *Chinese Journal of Engineering*, 2019, 41(4): 427-435 (in Chinese))
- 20 Stead D, Eberhardt E, Coggan JS. Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modelling techniques. *Engineering Geology*, 2006, 83(1): 217-235
- 21 杜岩, 陆永都, 谢谟文等. 基于激光多普勒测振的危岩体岩桥长度测量. 煤炭学报, 2019, 44(S2): 560-565 (Du Yan, Lu Yongdu, Xie Mowen, et al. Measurement of rock bridge length of unstable rock based on laser doppler vibrometer. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S2): 560-565 (in Chinese))
- 22 Du Y, Lu Y, Xie M, et al. A new attempt for early warning of unstable rocks based on vibration parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020(4): 1-6
- 23 Burjánek J, Gischig V, Moore JR, et al. Ambient vibration characterization and monitoring of a rock slope close to collapse. *Geophysical Journal International*, 2018, 212(1): 297-310
- 24 刘文明, 刘永强, 杨绍普等. 基于典型谱相关峭度图的滚动轴承故障诊断方法. 振动与冲击, 2018, 37(8): 87-92 (Liu Wenpeng, Liu Yongqiang, Yang Shaopu, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on typical correlated kurtogram. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(8): 87-92 (in Chinese))
- 25 杜岩, 谢谟文, 蒋宇静等. 应用激光多普勒测振仪的岩块体累计损伤评价试验研究. 工程科学学报, 2017, 39(1): 141-146 (Du Yan, Xie Mowen, Jiang Yujing, et al. Experimental study on cumulative damage assessment of rock-block using a laser doppler vibrometer. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(1): 141-146 (in Chinese))
- 26 Du Y, Xie MW, Jiang YJ, et al. Experimental rock stability assessment using the frozen-thawing test. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(4): 1049-1053
- 27 杜岩, 郑孝婷, 谢谟文等. 岩爆结构面强度的弱化特征. 工程科学学报, 2018, 40(1): 269-275 (Du Yan, Zheng Xiaoting, Xie Mowen, et al. Strength weakening characteristic of rock burst structural planes. *Chinese Journal of Engineering*, 2018, 40(1): 269-275 (in Chinese))
- 28 Sattele M, Krautblatter M, Brundl M, et al. Forecasting rock slope failure: how reliable and effective are warning systems? *Landslides*, 2016, 13(4): 737-750
- 29 杜岩, 吴志祥, 谢谟文等. 岩体崩塌的早期预警方法与试验验证. 煤炭学报, 2019, 44(10): 3069-3075 (Du Yan, Wu Zhixiang, Xie Mowen, et al. Early-warning method of rock collapse and its experimental verification. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(10): 3069-3075 (in Chinese))
- 30 吴昊, 方秦, 于冬勋. 深部块系岩体摆型波现象的研究进展. 力学进展, 2008, 38(5): 601-609 (Wu Hao, Fang Qin, Yu Dongxun. Advances in the study on pendulum-type wave phenomenon in the deep block rock mass. *Advances in Mechanics*, 2008, 38(5): 601-609 (in Chinese))
- 31 邹宗兴, 唐辉明, 熊承仁等. 高速岩质滑坡启动弹冲加速机制及弹冲速度计算 —— 以武隆县鸡尾山滑坡为例. 岩土力学, 2014, 35(7): 2004-2012 (Zou Zongxing, Tang Huiming, Xiong Chengren, et al. Starting-elastic-impulsive acceleration mechanism of high-speed rockslide and elastic-impulsive velocity calculation: Taking Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing for example. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(7): 2004-2012 (in Chinese))
- 32 罗刚, 胡卸文, 顾成壮. 强震作用下顺层岩质斜坡动力失稳机制及启动速度研究. 岩土力学, 2013, 34(2): 483-490 (Luo Gang, Hu Xiewen, Gu Chengzhuang. Study of kinetic failure mechanism and starting velocity of consequent rock slopes under strong earthquake. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(2): 483-490 (in Chinese))
- 33 赵晓彦, 胡凯, 梁瑶等. 王家岩滑坡锁固段剪切震动触发启程刷动试验. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 104-111 (Zhao Xiaoyan, Hu Kai, Liang Yao, et al. Experiment on sudden departure triggered by shearing vibration for locked segment of Wangjiayan landslide. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(1): 104-111 (in Chinese))
- 34 董杰, 王雨田, 胡晶等. 非晶合金剪切带动力学行为研究. 力学学报, 2020, 52(2): 379-391 (Dong Jie, Wang Yutian, Hu Jing, et al. Shear-band dynamics in metallic glasses. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(2): 379-391 (in Chinese))
- 35 Golshani A, Oda M, Okui Y, et al. Numerical simulation of the excavation damaged zone around an opening in brittle rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(6): 835-845
- 36 付斌, 周宗红, 王海泉等. 大理岩单轴循环加载声发射先兆信息研究. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1946-1953 (Fu Bin, Zhou Zonghong, Wang Haiquan, et al. Precursor information study on acoustic emission characteristics of marble under uniaxial cyclic loading-unloading. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(8): 1946-1953 (in Chinese))
- 37 朱洪林, 陈乔, 徐小虎等. 白云岩受压声学特性及其在裂缝研究中的应用. 力学学报, 2019, 51(3): 949-960 (Zhu Honglin, Chen Qiao, Xu Xiaohu, et al. The acoustic characteristics of dolomite under compression and its application in the crack research. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(3): 949-960 (in Chinese))
- 38 向高, 刘建锋, 李天一等. 基于声发射的盐岩变形破坏过程的分形与损伤特征研究. 岩土力学, 2018, 39(8): 2905-2912 (Xiang Gao, Liu Jiangfeng, Li Tianyi, et al. Study of fractal and damage characteristic in the deformation and failure process of salt rock based on acoustic emission. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(8): 2905-2912 (in Chinese))
- 39 杜岩, 谢谟文, 吕夫侠等. 基于模态参量变化的边坡动态稳定分析新方法. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1334-1339 (Du Yan, Xie Mowen, Lü Fuxia, et al. New method for dynamic analysis of rock slope stability based on modal parameters. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(7): 1334-1339 (in Chinese))

- 40 任会兰, 宁建国, 宋水舟等. 基于声发射矩张量分析混凝土破坏的裂纹运动. 力学学报, 2019, 51(6): 1830-1840 (Ren Huilan, Ning Jianguo, Song Shuizhou, et al. Investigation on crack growth in concrete by moment tensor analysis of acoustic emission. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(6): 1830-1840 (in Chinese))
- 41 杜岩, 谢博文, 蒋宇静等. 岩体崩塌灾害成因机制与早期预警研究综述. 金属矿山, 2021, 50(1): 106-119 (Du Yan, Xie Mowen, Jiang Yujing, et al. Review on the formation mechanism and early warning of rock collapse. *Metal Mine*, 2021, 50(1): 106-119 (in Chinese))
- 42 秦涛, 段燕伟, 孙洪茹等. 砂岩三轴加载过程中力学特征与能量耗散特征. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 255-262 (Qin Tao, Duan Yanwei, Sun Hongru, et al. Mechanical characteristics and energy dissipation characteristics of sandstone under triaxial stress conditions. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S1): 255-262 (in Chinese))
- 43 曹琰波, 戴福初, 许冲等. 唐家山滑坡变形运动机制的离散元模拟. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 2878-2887 (Cao Yanbo, Dai Fuchu, Xu Chong, et al. Discrete element simulation of deformation and movement mechanism for Tangjiashan landslide. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(S1): 2878-2887 (in Chinese))
- 44 肖诗荣, 刘德富, 胡志宇. 三峡库区千将坪滑坡高速滑动机制研究. 岩土力学, 2010, 31(11): 3531-3536 (Xiao Shirong, Liu Defu, Hu Zhiyu. Study of high speed slide mechanism of Qianjiangping landslide in three gorges reservoir area. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(11): 3531-3536 (in Chinese))