

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.05.09

基于尖点突变模型与 D-S 证据融合理念的 地下矿山岩体失稳预警方法

罗周全, 李艳艳, 秦亚光, 文 磊
(中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 地下矿山岩体失稳预警一直是矿山灾害防治研究的重要课题。为了提高岩体失稳预警的准确性和可靠性, 本文提出一种基于尖点突变理论和 D-S 证据融合理论的综合性预警方法。首先通过建立尖点突变分析模型和 D-S 证据融合模型得到两种独立预警判据。然后借助风险矩阵融合两种独立预警判据形成综合性预警判据。最后利用矿山实测的微震数据分别对三种预警判据的预警效果进行检验。结果表明: 尖点突变模型对岩体失稳的预警效果较差; D-S 证据融合模型的鲁棒性较差; 综合性预警判据的预警结果与工程实际高度吻合且鲁棒性较好, 预测准确性和可靠性明显提高。

关键词: 尖点突变; D-S 证据融合; 岩体失稳; 综合预警

中图分类号: P642; TU452

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)05-0060-10

A method developed for early warning of under ground rock mass instability in mining area based on Cusp catastrophe model and D-S fusion evidence theory

LUO Zhouquan, LI Yanyan, QIN Yaguang, WEN Lei

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: Early warning of rock mass failure has always been an important research subject of mining disaster prevention. To improve the accuracy and reliability of early warning on rock mass failure, a comprehensive early warning method is proposed in this paper based on the Cusp catastrophe theory and D-S fusion evidence theory. Firstly, two independent early warning criteria were obtained by establishing the Cusp catastrophe analysis model and the D-S fusion evidence model. The following step was to form a comprehensive early warning criterion with two former criteria on the basis of risk matrix. Finally, the warning effect of the three warning methods mentioned above was tested by actual microseism data in the mine. The results show that: the cusp catastrophe model is less effective for early warning of rock mass failure and the D-S fusion evidence model is less robust, while the comprehensive early warning model has a higher accuracy and a better robustness. The accuracy and reliability of the early warning for rock mass failure is significantly improved.

Keywords: Cusp catastrophe; D-S fusion evidence; rock mass failure; comprehensive early warning

收稿日期: 2019-12-23; 修订日期: 2020-03-19

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划课题: 深部大矿段多采区时空协同连续采矿理论与技术(2017YFC0602901)

第一作者: 罗周全(1966-), 男, 湖南宁乡人, 博士, 教授, 主要从事金属矿山开采安全理论与技术、矿山工程灾害动态监测与安全预警理论研究。E-mail: lzq505@csu.edu.cn

通讯作者: 李艳艳(1994-), 女, 河南洛阳人, 硕士, 主要从事矿山工程灾害动态监测与安全预警研究。E-mail: 1641591459@qq.com

0 引言

岩体失稳是指在应力作用下岩体内部微裂隙不断发育形成断裂面,断裂面贯通后岩体瞬间破坏脱落的过程^[1-3]。深部开采岩体失稳灾害发生频率高、破坏性强,开展岩体失稳预警研究对于保障矿山经济效益和人员安全意义重大^[3-6]。目前对岩体失稳灾害的预警多借助于微震监测、声发射检测、红外热像、微重力检测等手段^[7-11]。其中,利用微震监测技术采集并分析岩体变形破坏时释放的弹性波,提取特征参数对岩体失稳进行预警的方法被广泛应用。李瑞等^[12]对大量微震监测数据进行分析,发现视体积、能量指数等参数在岩体失稳之前会呈现异常变化趋势,利用这些参数的特性可以进行岩体失稳预警。王俊光等^[13]通过对微震统计数据进行时序分析,揭示了微震能量、频次、振动速度和幅值等参数在冲击地压发生前的活动规律,对矿山地质灾害预警具有一定的指导意义。张楚旋等^[14]结合沙坝矿实际微震监测参数,利用b值、能量指数、施密特数和累积视体积建立了岩体失稳的智能预报模式。

上述研究明确了一系列对岩体稳定状态敏感的微震特征参数,但是利用其进行岩体失稳预警时多偏向于定性分析,预警结果的准确性和可靠性均有待进一步提高。尖点突变理论能够有效利用岩体失稳灾害具有的突发性特点,定量分析岩体的稳定状态并对失稳灾害进行预警。张钦礼等^[15]通过尖点突变理论对建立的简化力学模型进行分析,推导出采场顶板-矿柱系统失稳的临界条件。付成华等^[16]应用能量、熵、位移模等参数建立了5种判据对围岩稳定性进行分析,从不同方面对岩体失稳进行预警。刘新荣等^[17]结合有限元方法分析边坡强度折减过程中能量的变化规律,建立了适用于边坡失稳预警的能量突变判据。综上,利用尖点突变预警模型能实现对岩体稳定性进行定量分析,且模型具有自适应鲁棒性,缺点是突变判据单一时预警准确性难以保障,突变判据较多时又易发生冲突,以致模型的预警结果准确性难以保障。

D-S证据融合理论是一种可以有效解决证据冲突的多参数评价模型。袁四化等^[18]依据时空观和借助D-S证据融合理论建立了稳定性评价多指标体系和多信息融合评价模型,为矿山采空区稳定性评价提供了借鉴。LUO Z Q等^[19]从岩体失稳的内部机理和外部表现入手,通过将多场耦合分析得到损伤指标并与微震特征参数指标作证据融合建立起岩体失稳预警模

型。罗小燕等^[20]采集单轴压缩实验各阶段的声发射特征参数,运用敏感度特征提取法等方法选定证据体,将各证据体融合后获得各证据体于各阶段的信任度权重,建立加权证据体融合的失稳预警模型。综上,D-S证据融合理论可以用于岩体失稳灾害的预警,但是D-S证据融合理论在运用时仍存在鲁棒性较差、模型抗干扰能力弱的缺点。

鉴于尖点突变理论与D-S证据融合理论两种方法在运用时呈现出各有不足却优缺点互补的现象。笔者提出一种将尖点突变分析与D-S证据融合预警综合运用的新的预警方法,力求提高岩体失稳预警结果的准确性。本文依托广东某地下金属矿山为研究背景,基于由尖点突变理论和D-S证据融合理论形成的综合预警方法对-550 m采矿中段至-650 m采矿中段的岩体稳定性进行分析与预警,以期对矿山岩体失稳灾害的有效预警提供新的研究思路。

1 基本原理

1.1 尖点突变模型

尖点突变模型是突变理论中的一种初等突变模型,它可以忽略系统尚未可知的内部作用而直接处理飞跃式的不连续变化。主要用于研究复杂的非线性变化过程,判断系统突变发生的条件,评价系统的稳定性^[21-24]。该方法在岩体稳定性评价及失稳灾害的预警中广泛应用。岩体在破裂时会通过微地震活动释放能量^[25],因此微震事件的活动性参数与岩体状态变化之间具有密切相关性,岩石状态的突变也对应着微震活动性参数的突变。能量指数EI作为微震活动性参数之一,亦具有突变性,符合尖点突变分析的使用条件。

根据微震能量指数EI的监测序列获得能量指数的岩体失稳突变函数,并推导出尖点突变模型的突变特征值 Δ 的表达式为:

$$\Delta = 8u^3 + 27v^2 \quad (1)$$

式中, u 和 v 为基于能量指数的岩体失稳尖点突变势函数的系数参数。详细推导过程见孙建等^[25]的研究。 Δ 值的大小,代表岩石处于不同的稳定状态,即:

(1) $\Delta > 0$ 时,岩体只对应一种状态,即稳定状态。代表此时岩体承受的应力未达到峰值,微裂隙正在发育中,岩体变形还处于连续变化状态,稳定性相对较强;

(2) $\Delta = 0$ 时,岩体处于临界状态,稍加干扰就可能从稳定状态突跳到不稳定状态,产生失稳风险,岩体

稳定性欠佳。

(3) $\Delta < 0$ 时,岩体发生突变的可能性较大,岩体稳定性较差。

利用尖点突变模型进行岩体失稳预警时,判据 $\Delta < 0$ 且 Δ 值越小失稳风险越大,在一段时间内 $\Delta < 0$ 且 Δ 值最小的时间内岩体失稳发生的可能性最大。

1.2 D-S 证据融合理论

D-S 证据理论是于 1967 年被提出的一种不精确推理理论。该理论是在证据理论的基础上利用一定的证据组合规则将各个证据体进行融合,并根据相应规则做出最终决策^[26]。作为一种处理不确定信息的方法,D-S 证据融合理论近年来被广泛应用于边坡、岩体稳定性评价方面^[27]。因此,本文采用 D-S 融合理论对岩体稳定性评价是完全可行的。

日最大岩层振动速度($V_{\max}$)、日视体积增量(δV_A)与施密特指数(S_c)是微震监测常用的参数,也被广泛应用到矿岩活动性评价中^[28]。本文选取这三个参数作为证据体进行融合分析。利用微震监测结果获取三个参数的统计数据,依据 D-S 证据融合理论建立多参数数学预警模型,以科学合理地评价对象区域的岩体稳定性。

(1) 风险辨识框架设定

设定证据集 $\Omega = \{ \Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3 \}$, 其中, Λ_1 代表 $V_{\max}$, Λ_2 代表 δV_A , Λ_3 代表 S_c 。

根据岩体失稳风险等级分为 3 个级别,各个证据体的不同取值对应不同的岩体失稳风险等级,即:

I 级风险:表示监测对象区域岩体属于低失稳风险,岩体失稳发生的概率非常小;

II 级风险:表示监测对象区域岩体属于中等失稳风险,岩体失稳发生的概率较小;

III 级风险:表示监测对象区域岩体属于高失稳风险,岩体失稳发生的概率较大。

设 α_n, β_n 为证据 Λ_n 所对应的划分 I 级风险、II 级风险和 III 级风险的临界值(图 1)。

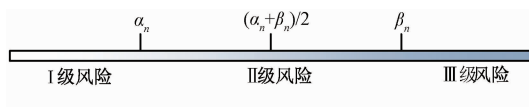


图 1 依据各参数的风险等级划分

Fig. 1 Risk level division according to the parameter

证据体 Λ_n 对应于不同风险等级的取值叫做不同证据体对应于各风险等级的基本可信度(BPA),符号记做 Λ_{nk} 。

$$\Lambda_{nk} (n = 1, 2, 3; k = \text{I}, \text{II}, \text{III}) \quad (2)$$

在式(2)中, $n = 1$ 时,对应的证据体为日最大岩层振动速度($V_{\max}$); $n = 2$ 时,对应的证据体为日视体积增量(δV_A); $n = 3$ 时,对应的证据体为施密特指数(S_c); 而($k = \text{I}, \text{II}, \text{III}$)则分别对应 3 种不同等级风险。 Λ_{nk} 的求值公式如式(3)~式(5)。

$$\Lambda_{n\text{I}} = \begin{cases} 1, & \Lambda_n < \alpha_n \\ \frac{\alpha_n + \beta_n - 2\Lambda_n}{\beta_n - \alpha_n}, & \alpha_n \leq \Lambda_n < \frac{\alpha_n + \beta_n}{2} \\ 0, & \Lambda_n \geq \frac{\alpha_n + \beta_n}{2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\Lambda_{n\text{II}} = \begin{cases} 0, & \Lambda_n < \alpha_n \text{ 或 } \Lambda_n \geq \beta_n \\ \frac{2\Lambda_n - 2\alpha_n}{\beta_n - \alpha_n}, & \alpha_n \leq \Lambda_n < \frac{\alpha_n + \beta_n}{2} \\ \frac{2\beta_n - 2\Lambda_n}{\beta_n - \alpha_n}, & \frac{\alpha_n + \beta_n}{2} \leq \Lambda_n < \beta_n \end{cases} \quad (4)$$

$$\Lambda_{n\text{III}} = \begin{cases} 0, & \Lambda_n < \frac{\alpha_n + \beta_n}{2} \\ \frac{2\Lambda_n - \alpha_n - \beta_n}{\beta_n - \alpha_n}, & \frac{\alpha_n + \beta_n}{2} \leq \Lambda_n < \beta_n \\ 1, & \Lambda_n \geq \beta_n \end{cases} \quad (5)$$

根据 Λ_{nk} 的求值公式(3)~(5)求出的各证据体对应各等级风险的基本可信度取值,具体结果的表达见表 1。

表 1 基本可信度赋值

Table 1 Basic possibility assignment

证据体	$V_{\max}/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$\delta V_A/\text{m}^3$	S_c
BPA	$\Lambda_{1\text{I}}$	$\Lambda_{2\text{I}}$	$\Lambda_{3\text{I}}$
	$\Lambda_{1\text{II}}$	$\Lambda_{2\text{II}}$	$\Lambda_{3\text{II}}$
	$\Lambda_{1\text{III}}$	$\Lambda_{2\text{III}}$	$\Lambda_{3\text{III}}$

(2) 证据融合

各个证据体的基本可信度赋值获得后,两个证据相互之间的相似系数 ρ 可以通过计算得到。 ρ 的取值区间为 $[0, 1]$, ρ 值越大,表明两个证据相互之间相互验证性越强,对评价结果的支持度越高,可靠度越大。

证据 Λ_1 和 Λ_2 之间的相似系数计算如下:

$$\rho(\Lambda_1, \Lambda_2) = \rho_{12} = \frac{\Lambda_{1k} \Lambda_{2k}}{\sqrt{(\sum \Lambda_{1k}^2)} \sqrt{(\sum \Lambda_{2k}^2)}} \quad (6)$$

将各证据之间的相似系数的计算结果以矩阵形式阵列出来,称之为相似矩阵,即:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \rho_{13} \\ \rho_{21} & 1 & \rho_{23} \\ \rho_{31} & \rho_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据相似矩阵计算单个证据体对最终评价结果的支持度 $U(\Lambda_n)$, 然后进行归一化处理, 使得每个证据体所对应所有等级风险值之和为 1, 即可得到各个证据体的可信度 $C(\Lambda_n)$, 计算公式如下:

$$U(\Lambda_n) = \sum_{k=1}^{\text{III}} \rho_{nk} \quad (n = 1, 2, 3) \quad (8)$$

$$C(\Lambda_n) = \frac{U(\Lambda_n)}{\sum_{k=1}^{\text{III}} U(\Lambda_n)} \quad (n = 1, 2, 3) \quad (9)$$

为了更准确地评价岩体状态, 将可信度作为证据 Λ_n 的权重, 结合证据体 Ω 中各个证据体的基本可信度值解得各个证据对结果的加权合成后的风险概率值, 即融合风险概率 $\Lambda(k)$:

$$\Lambda(k) = \sum_{n=1}^3 \Lambda_n C(\Lambda_n) \quad (k = \text{I}, \text{II}, \text{III}) \quad (10)$$

当 $\Lambda(k)$ 值最大时, k 所对应的风险等级即为风险等级评价结果。利用 D-S 证据融合模型进行岩体失稳预警时, 若出现失稳等级不断上升并出现 1 次以上高等失稳风险, 则可判断高等失稳风险出现后的一段时间岩体失稳发生的可能性较大。

1.3 综合预警

风险矩阵法是一种常用于风险评估领域的风险可视化方法, 其核心是通过一个二维表格实现对风险等级的综合评估。上述尖点突变分析模型和 D-S 证据融合模型两种模型的风险等级评价结果均在一定程度上反映了对象区域的岩体失稳风险性, 但是单依靠其中任一结果都无法保证岩体失稳预警的准确性。为了解决这个问题, 进一步提高岩体失稳预警的准确性, 以尖点突变分析模型和 D-S 证据融合模型的评价结果作为两种评估依据, 运用风险矩阵对两种结果进行融合, 获得综合性预警模型的风险等级表达。基于风险矩阵法的岩体失稳风险等级综合评价矩阵见表 2。

表 2 综合预警模式

Table 2 Comprehensive warning mode

风险等级	$\Delta > 0$	$\Delta = 0$	$\Delta < 0$
I	1	2	3
II	2	3	4
III	3	4	5

1 级: 无风险, 表示岩体处于稳定的状态, 是岩体

失稳的早期孕育期, 微震活动性较弱。微震活动参数处于原有微裂隙被压缩闭合阶段, 但是未产生塑性变形。阶段应对措施: 正常生产。

2 级: 低等风险, 岩体处于较稳定的状态, 是岩体失稳的缓慢发育期, 微震活动性增强。阶段应对措施: 正常生产, 适当加强排查。

3 级: 中等风险, 岩体处于欠稳定状态, 是岩体失稳的快速发育期, 微震活动性较强。阶段应对措施: 正常生产, 加强排查, 必要时加强支护与防控。

4 级: 高等风险, 岩体处于稳定与不稳定的交叉临界状态, 是岩体失稳的发育峰值期, 是岩体能量积聚达到承受极限的状态。阶段应对措施: 减缓生产, 全范围排查, 必要时加强支护与防控。

5 级: 极高风险, 岩体处于不稳定状态, 是岩体失稳的能量释放期, 极易发生失稳灾害。阶段应对措施: 对应区域立即停产, 同时加强支护与防控。

利用综合预警模型进行岩体失稳预警时, 若出现失稳等级不断上升并出现 1 次以上 4 级 (高等失稳风险), 则判断高等失稳风险出现后的一段时间岩体失稳发生的可能性较大; 5 级 (极高等失稳风险) 一旦出现, 就要发出岩体失稳灾害即将发生的警告, 呼吁矿方立即采取相应措施。

2 应用实例

2.1 工程概况

广东某地下金属矿山开采已由浅部转入深部, 其深部采区的主矿体赋存于 F3 断层的下盘, 埋深 $-580 \sim -880$ m 之间, 矿体以块状产出, 上、下盘围岩均为灰岩。与浅部相比, 深部矿岩较脆, 应力集中加剧, 地压活动增多, 岩体失稳风险上升。且 F3 断层的存在, 加剧了矿区井下地压活动特征的复杂性, 增加了地压灾害事故产生的概率。为了确保深部矿体安全、高效地开采深部矿体。该矿山构建微震地压监测系统, 对矿山地压活动开展实时监测, 并对地压灾害事件进行预警预报。

根据矿山实际生产情况, 整个矿山总共布置 44 个通道微震监测系统, 配置 32 个微震检波器, 覆盖 10 个中段。考虑到目前正开采 $-550 \sim -650$ m 之间的 3 个中段, 总段高 100 m, 控制矿体长度 800 m, 控制宽度约 200 m, 因此重点监测该区域。监测该区域的微震检波器主要安装在 -550 m 和 -650 m 两个中段 (图 2)。每个中段布置 5 个单向检波器 (U) 和一个三向检波器 (T), 共 12 个检波器, 能完全实现该中段的监测。

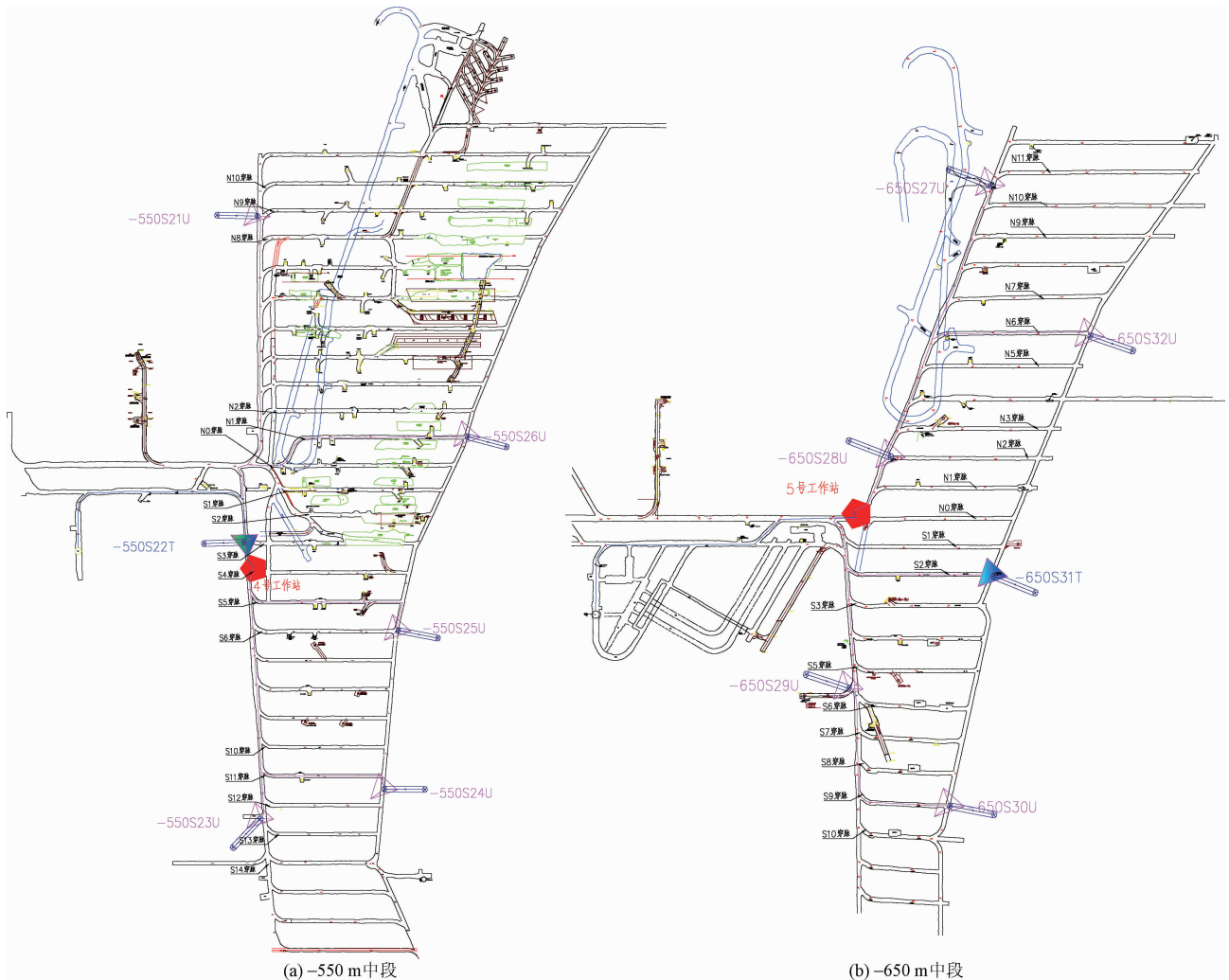


图2 检波器阵列分布图

Fig.2 Geophone array distribution

图2中,红色原点代表该中段工作站所在位置;三角形符号所位置即为检波器布置位置,三角符号对应编号代表检波器的位置和属性信息,如“-550S21U”即代表该检波器为安装在-550m中段,编号为S21的单向检波器;黑色字体如“N10穿脉”、“S1穿脉”代表对应穿脉的在中段中的编号。

2.2 数据获取

系统建成后5个月的统计结果显示,地压活动性最强的区域为-550m中段~-650m中段,同时该区域于2017年7月26日发生了具有一定规模的冒顶片帮事件,并且微震震级达1.4级。因此,选取该中段为研究对象,并将“7·26”事件作为已知事件进行尖点突变分析与D-S证据融合分析,以反向验证本文所建立模型的有效性。依据该思路,选择6月31日~7月27日时间段内能量指数监测数据做尖点突变分析,统计

结果如图3所示。选择6月31日~7月27日时间段内最大岩层振动速度、日视体积增量与施密特指数的监测数据做D-S证据融合分析,统计结果见表3。

2.2.1 尖点突变公式拟合

以能量指数为状态变量进行尖点突变分析时,首先要选定用于拟合突变函数的原始数据序列。选定规则为:

(1)以微震系统10天的监测值形成原始数据序列,且序列随日期更新。

(2)更新时剔除前一组序列中最早日期的监测值,添加最新日期的监测值至序列末尾形成新一组序列。

获取2017年6月30日~2017年7月27日期间该矿山微震能量指数的监测数据,并按照上述序列生成规则形成初始序列见表3。由表3可知,能量指数在

表 3 能量指数序列

Table 3 Sequences of energy index

时间段	对应数据序列 $[t_1, t_2, \dots, t_n]$	时间段	对应数据序列 $[t_1, t_2, \dots, t_n]$
6/30~7/9	$[0, -0.25, -0.1, -0.15, -0.1, 0.05, 0, 0.1, 0.12, 0.18]$	7/10~7/19	$[0.15, 0.17, 0.16, 0.19, 0.25, 0.27, 0.26, 0.29, 0.3, 0.3]$
7/1~7/10	$[-0.25, -0.1, -0.15, -0.1, 0.05, 0, 0.1, 0.12, 0.18, 0.15]$	7/11~7/20	$[0.17, 0.16, 0.19, 0.25, 0.27, 0.26, 0.29, 0.3, 0.3, 0.28]$
7/2~7/11	$[-0.1, -0.15, -0.1, 0.05, 0, 0.1, 0.12, 0.18, 0.15, 0.17]$	7/12~7/21	$[0.16, 0.19, 0.25, 0.27, 0.26, 0.29, 0.3, 0.3, 0.28, 0.3]$
7/3~7/12	$[-0.15, -0.1, 0.05, 0, 0.1, 0.12, 0.18, 0.15, 0.17, 0.16]$	7/13~7/22	$[0.19, 0.25, 0.27, 0.26, 0.29, 0.3, 0.3, 0.28, 0.3, 0.2]$
7/4~7/13	$[-0.1, 0.05, 0, 0.1, 0.12, 0.18, 0.15, 0.17, 0.16, 0.19]$	7/14~7/23	$[0.25, 0.27, 0.26, 0.29, 0.3, 0.3, 0.28, 0.3, 0.2, 0]$
7/5~7/14	$[0.05, 0, 0.1, 0.12, 0.18, 0.15, 0.17, 0.16, 0.19, 0.25]$	7/15~7/24	$[0.27, 0.26, 0.29, 0.3, 0.3, 0.28, 0.3, 0.2, 0, -0.1]$
7/6~7/15	$[0, 0.1, 0.12, 0.18, 0.15, 0.17, 0.16, 0.19, 0.25, 0.27]$	7/16~7/25	$[0.26, 0.29, 0.3, 0.3, 0.28, 0.3, 0.2, 0, -0.1, -0.1]$
7/7~7/16	$[0.1, 0.12, 0.18, 0.15, 0.17, 0.16, 0.19, 0.25, 0.27, 0.26]$	7/17~7/26	$[0.3, 0.3, 0.3, 0.28, 0.3, 0.2, 0, -0.1, -0.1, 0]$
7/8~7/17	$[0.12, 0.18, 0.15, 0.17, 0.16, 0.19, 0.25, 0.27, 0.26, 0.3]$	7/18~7/27	$[0.3, 0.3, 0.28, 0.3, 0.2, 0, -0.1, -0.1, 0, -0.05]$
7/9~7/18	$[0.18, 0.15, 0.17, 0.16, 0.19, 0.25, 0.27, 0.26, 0.29, 0.3]$		

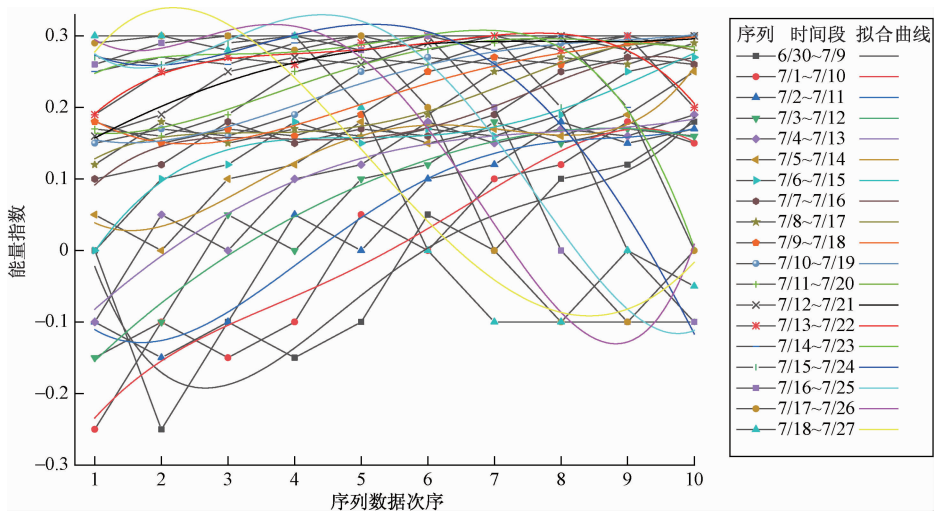


图 3 各组能量指数对应序列拟合曲线图

Fig. 3 Fitting curve corresponding to energy index

所选时间段内的监测值所处区间为 $[-0.25, 0.3]$,且存在前期随时间逐渐增大,后期随时间逐渐减小的规律,即监测数据序列存在尖点,符合尖点突变分析方法的使用条件。

根据表 3 各组数据的序列次序变化绘制折线图,并对其进行四次多项式拟合,得到如图 3 所示的一系列拟合曲线。从图 3 可以看出,7 月 21 日之前各组序列均呈持续上升趋势,7 月 22 日开始序列开始先上升后下降,出现尖点,进一步说明能量指数具有进行尖点突变分析的可行性。

从曲线拟合的报表中可以得到拟合曲线对应的函数表达式以及拟合度 R^2 。从 R^2 的值均大于 0.9 可知,曲线的拟合效果较优,满足进行尖点突变分析的需要。根据上述分析,采用尖点突变方法,拟合函数表达式进行计算,求出突变方程控制变量 u 、 v 的值见表 4。

将表 4 中的控制变量 u 、 v 按照式(10)计算突变特征值 Δ (图 4)。由图 4 可知,7 月 9 日~7 月 18 日期

间,突变特征值 Δ 持续大于 0,说明该监测时间段 - 600 m 中段岩体正处于稳定状态。7 月 18 日~7 月 27 日期间, Δ 值多次出现负值,且负值最小值出现在 7 月 22 日。由此判断,7 月 22 日发生岩体失稳的可能性最大,但 7 月 22 日并未发生岩体失稳事件。这说明尖点突变模型对岩体失稳的预警效果较差。

2.2.2 D-S 证据融合预警

统计矿山 2017 年 1 月~2017 年 6 月的微震监测数据,分析证据体 $V_{\max}$ 、 δV_A 、 S_c 每日监测值与日最大震级之间的对应关系,确定划分失稳风险等级的临界值 α_n 、 β_n ,具体取值见表 5。

以表 5 中的 α_n 、 β_n 值为参考,将各个证据体不同时期的数据代入公式 3~5 计算 Λ_{nk} ,获得的 Λ_{nk} 的值即为各证据体不同时期对应的基本可信度取值。结合图 5 中各证据体于 6 月 30 日~7 月 27 日期间的监测数据,计算得到各个证据体的基本可信度并作出其随时间变化的曲线(图 6)。由图 6 知,3 个证据体对各级

表 4 拟合结果
Table 4 Fitting results

时间段	拟合结果	突变控制变量		
	拟合函数表达式	R^2	u	v
6/30 ~ 7/9	$y = 0.179\ 1 + 0.103\ 1t - 0.041\ 2t^2 + 0.007\ 0t^3 - 0.000\ 4t^4$	0.909	0.189\ 149\ 1	0.055\ 260\ 4
7/1 ~ 7/10	$y = -0.039\ 1 + 0.183\ 3t - 0.060\ 1t^2 + 0.008\ 0t^3 - 0.000\ 3t^4$	0.929	0.426\ 698\ 8	0.127\ 484\ 3
7/2 ~ 7/11	$y = -0.370\ 8 + 0.176\ 3t - 0.045\ 7t^2 + 0.006\ 4t^3 - 0.000\ 3t^4$	0.932	0.244\ 449\ 6	0.364\ 711\ 1
7/3 ~ 7/12	$y = 0.074\ 1 + 0.158\ 8t - 0.047\ 9t^2 + 0.006\ 4t^3 - 0.000\ 3t^4$	0.939	0.123\ 681\ 9	0.060\ 686\ 9
7/4 ~ 7/13	$y = 0.050\ 0 + 0.112\ 5t - 0.039\ 8t^2 + 0.005\ 8t^3 - 0.000\ 3t^4$	0.901	0.404\ 588\ 8	0.145\ 449\ 7
7/5 ~ 7/14	$y = -0.177\ 5 + 0.226\ 3t - 0.055\ 2t^2 + 0.005\ 7t^3 - 0.000\ 2t^4$	0.932	0.482\ 730\ 7	0.191\ 557
7/6 ~ 7/15	$y = 0.100\ 0 + 0.248\ 2t - 0.077\ 0t^2 + 0.006\ 5t^3 - 0.000\ 1t^4$	0.967	3.071\ 383\ 6	1.975\ 229\ 4
7/7 ~ 7/16	$y = -0.253\ 3 + 0.109\ 4t - 0.011\ 2t^2 + 0.000\ 8t^3 - 0.000\ 03t^4$	0.940	-0.747\ 253	0.458\ 501\ 7
7/8 ~ 7/17	$y = 0.170\ 0 + 0.094\ 3t - 0.006\ 1t^2 - 0.000\ 4t^3 - 0.000\ 04t^4$	0.921	-0.770\ 761	1.519\ 204\ 8
7/9 ~ 7/18	$y = 0.105\ 0 + 0.055\ 9t - 0.003\ 3t^2 - 0.000\ 3t^3 + 0.000\ 03t^4$	0.954	-0.868\ 237	0.432\ 491\ 6
7/10 ~ 7/19	$y = 0.187\ 5 - 0.044\ 7t + 0.024\ 1t^2 - 0.003\ 0t^3 + 0.000\ 1t^4$	0.957	-0.485\ 842	0.128\ 574\ 1
7/11 ~ 7/20	$y = 0.191\ 7 - 0.060\ 2t + 0.026\ 3t^2 - 0.003\ 1t^3 + 0.000\ 1t^4$	0.946	-0.374\ 285	0.174\ 958\ 7
7/12 ~ 7/21	$y = 0.261\ 7 - 0.111\ 3t + 0.034\ 7t^2 - 0.003\ 6t^3 + 0.000\ 1t^4$	0.950	-0.291\ 273	0.205\ 147\ 2
7/13 ~ 7/22	$y = 0.345\ 8 - 0.112\ 1t + 0.044\ 97t^2 - 0.005\ 7t^3 + 0.000\ 2t^4$	0.903	-1.555\ 972	-0.832\ 076
7/14 ~ 7/23	$y = -0.002\ 5 - 0.169\ 2t + 0.069\ 0t^2 - 0.008\ 3t^3 + 0.000\ 3t^4$	0.978	-0.572\ 503	0.281\ 361\ 1
7/15 ~ 7/24	$y = 0.135\ 8 - 0.162\ 4t + 0.075\ 8t^2 - 0.011\ 1t^3 + 0.000\ 5t^4$	0.967	-0.518\ 592	0.134\ 498\ 2
7/16 ~ 7/25	$y = 0.335\ 8 - 0.494\ 2t + 0.152\ 5t^2 - 0.017\ 4t^3 + 0.000\ 7t^4$	0.969	-0.819\ 630	0.316\ 137\ 5
7/17 ~ 7/26	$y = 0.415\ 0 - 0.231\ 6t + 0.107\ 6t^2 - 0.017\ 0t^3 + 0.000\ 8t^4$	0.979	-0.962\ 630	-0.270\ 279
7/18 ~ 7/27	$y = 0.425\ 0 - 0.222\ 8t + 0.111\ 4t^2 - 0.019\ 9t^3 + 0.001\ 1t^4$	0.918	-0.884\ 853	-0.300\ 878

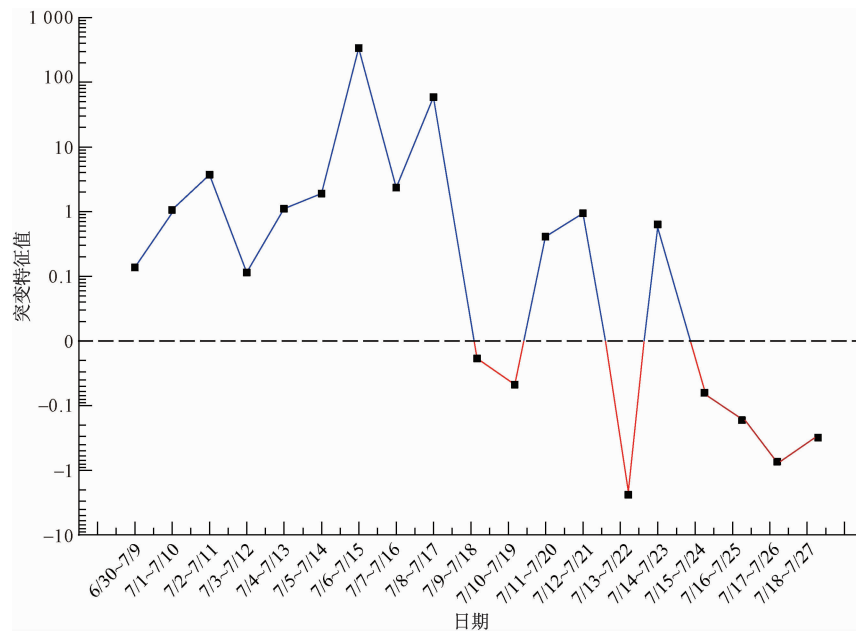


图 4 能量指数突变分析结果

Fig.4 Analysis results of energy index based on Cusp catastrophe theory

风险的基本可信度取值不同,即不同证据体对风险等级的评估结果存在差别。只有将所有孤立的评估结果综合起来进行分析才能实现直观的、准确的、系统的风险预警。图 7 所示即为将 3 个证据体的基本可信度依据式(6)~(10)综合计算得到的融合结果。

图 7 所示为将证据体 $V_{\max}$ 、 δV_A 、 S_c 的等级评价结果融合后得到的各级别风险的融合概率。落入灰色方框区域内的点对应的风险等级即判定为当天的失稳风险等级。从图 7 中可以得到如下判断:6 月 30 日~7 月 20 日岩体一直处于低失稳风险状态;7 月 21 日失

稳风险上升至中等后,于 7 月 22 日转换为低风险,又于 7 月 23 日~7 月 25 日之间上升至中等风险,据此无法判断 7 月 25 日之后是否会发生岩体失稳灾害。进一步验证了 D-S 证据融合方法鲁棒性较差,无法保证岩体失稳灾害的预警效果。

表 5 不同证据体划分各级失稳风险等级的临界值
Table 5 Critical values based on different evidence for risk levels of rock mass failure

证据体	失稳等级划分临界值	
	α_n	β_n
$V_{\max}/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	1	20
$\delta V_A/(10^6\text{m}^3)$	1	5
S_c	20.5	19

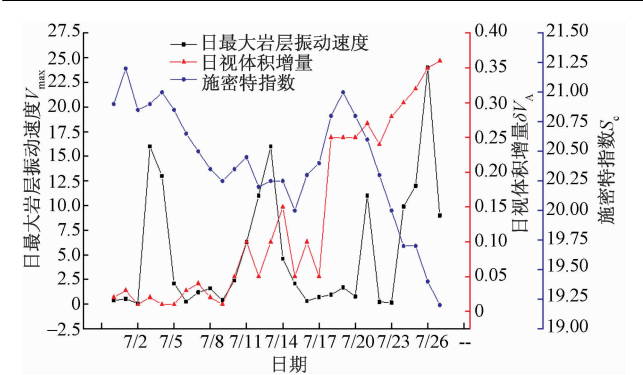


图 5 各证据体演化规律图
Fig. 5 Variation of the evidences

2.2.3 综合预警

基于尖点突变分析与 D-S 证据融合的风险评价结果,按照表 2 中的风险矩阵法对岩体失稳风险等级进行综合预警,预警结果与当日最大微震等级见表 6。

表 6 综合预警结果与实况
Table 6 Comprehensive warning results and the actual situations

时间	$\Delta(k)$	综合预警结果	日最大微震等级	时间	$\Delta(k)$	综合预警结果	日最大微震等级
7/9	I	+	1	7/19	I	-	3
7/10	I	+	1	7/20	II	+	2
7/11	I	+	1	7/21	II	+	2
7/12	I	+	1	7/22	I	-	3
7/13	I	+	1	7/23	II	+	2
7/14	I	+	1	7/24	II	-	4
7/15	II	+	2	7/25	II	-	4
7/16	I	+	1	7/26	III	-	5
7/17	I	+	1	7/27	II	-	4
7/18	I	-	3				

从表 6 中可以看出:综合预警模型的预警结果显示 7 月 9 日~7 月 14 日以及 7 月 16 日~7 月 17 日失

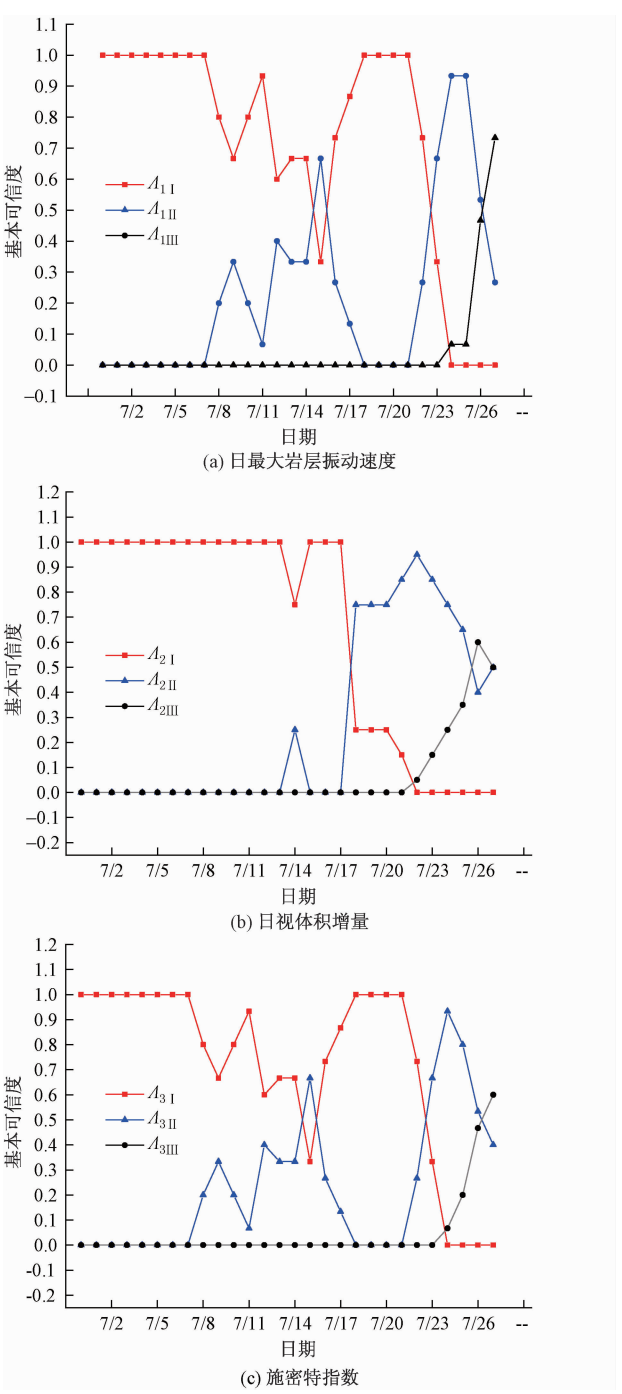


图 6 证据体基本可信度变化规律
Fig. 6 Variation of basic possibility of evidences

稳风险等级为 1(无风险),仅 7 月 15 日失稳风险等级为 2(低风险),表明该段时间内监测中段的岩体稳定性较好,无失稳风险;7 月 18 日~7 月 23 日时间段内,失稳风险等级在 2 级(低风险)和 3 级(中等风险)之间转换 3 次,表明该段时间内岩体稳定性变化频繁,且失稳风险等级整体上升;7 月 24 日、7 月 25 日两天时间内岩体失稳风险均上升至 4 级(高等风险),已经达

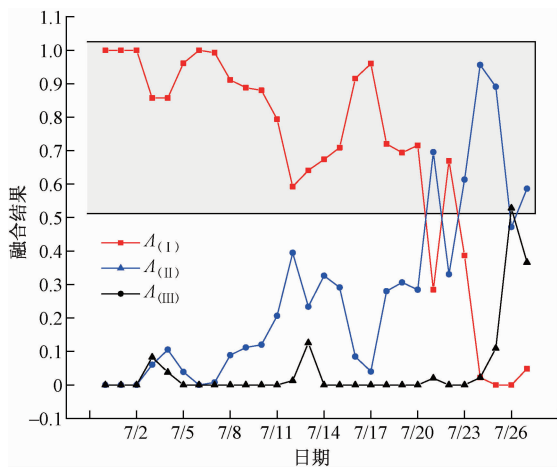


图 7 D-S 证据融合预警结果

Fig. 7 Warning results based on D-S fusion evidence

到岩体失稳的发育峰值期,表明岩体的稳定状态可能已经比较脆弱,因此判断 7 月 25 日之后监测区域发生岩体失稳灾害的可能性极大。

实际情况为:2017 年 7 月 26 日下午 16:50 分左右,矿山监测到一个里氏震级 1.4 级的特大震级微震事件。矿方在图 2 中 N5、N6 穿脉附近发现了具有一定规模的冒顶和片帮现象,巷道顶板有新鲜断面和剥落痕迹(图 8)。此外,表 5 中 7 月 27 日失稳风险等级降低至高等风险,这与大震级事件发生后,对应区域的应力和能量得到了部分释放,岩体稳定性上升的现象相一致。

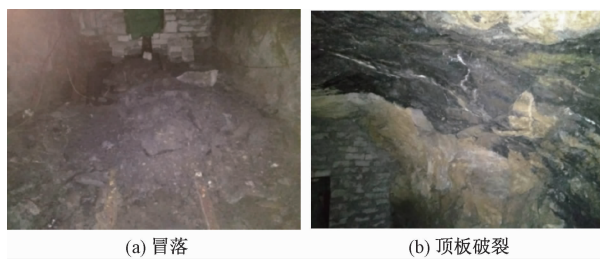


图 8 破坏现场照片

Fig. 8 Photos of rock mass failure

3 结论

井下矿山岩体失稳的准确预警对于矿山安全生产具有重要的意义。本文针对尖点突变分析、D-S 证据融合理论两种方法综合预警岩体失稳灾害,得到如下结论:

(1) 分别基于尖点突变分析和 D-S 证据融合理论对岩体失稳灾害进行预警分析,结果表明两种方法的

预警都有一定的缺陷。

(2) 针对尖点突变分析预警指标过于单一和 D-S 证据融合理论普适性较弱的缺陷,在利用实时微震监测数据拟合获得突变分析结果的基础上,结合 D-S 证据融合方法构建了关于岩体失稳风险的综合预警模型。

(3) 综合预警模型实现了岩体失稳风险等级的定量化表达,重新设计了失稳风险等级。

(4) 结合微震监测数据对综合预警模型的预警效果进行验证,结果表明:综合预警模型有效克服了尖点突变分析和 D-S 证据融合理论模型单独应用时存在的缺陷,预警效果准确度更高且时效性也更好。

综上,尖点突变与 D-S 证据融合的失稳综合预警模型为岩体稳定性评价与失稳灾害的预测预警提供了新的技术支撑。

参考文献:

- [1] SHNORHOKIANS, MACNEIL B, MITRIHS. Volumetric analysis of rock mass instability around haulage drifts in underground mines[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(1):60-71.
- [2] SALVONI M, DIGHT P. Rock damage assessment in a large unstable slope from microseismic monitoring-MMG Century mine (Queensland, Australia) case study[J]. Engineering Geology, 2016, 210:45-56.
- [3] 武中鹏,刘宏,董秀群,等. 单体危岩崩塌灾害危险性评价——以贵州威宁县新发乡樊家岩为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 30-34. [WU Z P, LIU H, DONG X Q, et al. Hazard assessment of rockfall disaster of a dangerous rock: a case study at Fanjiayan, Xinfa Township, Weining County of Guizhou Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(2):30-34. (in Chinese)]
- [4] 李鹏翔,陈炳瑞,周扬一,等. 硬岩岩爆预测预警研究进展[J]. 煤炭学报, 2019: 1-21. [LI P X, CHEN B R, ZHOU Y Y, et al. Review of the research progress of rockburst prediction and early warning in hard rock underground engineering[J]. Journal of China Coal Society, 2019: 1-21. (in Chinese)]
- [5] 孙元元,周生通,杜晓鹏. 基于 NORTA-MCS 方法的香港秀茂坪岩坡失稳概率分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(4): 17-22. [SUN Y Y, ZHOU S T, DU X P. Failure probability analysis of

- Hong Kong Sau Mau Ping rock slope using NORTA-MCS approach[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(4): 17 - 22. (in Chinese)]
- [6] 冯晓东, 林峰, 李庶林, 等. 内蒙万城矿7线矿柱开裂微震监测预警与稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(3): 75 - 80. [FENG X D, LIN F, LI S L, et al. The stability analysis and microseismic monitoring warning of the dehiscent No. 7 pillar in Wancheng mine[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(3): 75 - 80. (in Chinese)]
- [7] 殷志强. 运用科技手段强化地质灾害监测预警[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 3. [YIN Z Q. Strengthening monitoring and early warning of geological hazards with scientific and technological means [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(5): 3. (in Chinese)]
- [8] LURKA A. Location of high seismic activity zones and seismic hazard assessment in Zabrze Bielszowice coal mine using passive tomography[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 18(2): 177 - 181.
- [9] ZHAO G Y, MA J, DONG L J, et al. Classification of mine blasts and microseismic events using starting-up features in seismograms [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(10): 3410 - 3420.
- [10] 李涛, 刘国栋, 王聪. 基于可靠度理论的尾矿坝失稳概率及敏感性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(3): 81 - 86. [LI T, LIU G D, WANG C. Instability probability and sensitivity analysis of tailings dam based on reliability theory [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(3): 81 - 86. (in Chinese)]
- [11] WILL R, SMITH V, LEETARU H E, et al. Microseismic monitoring, event occurrence, and the relationship to subsurface geology [J]. Energy Procedia, 2014, 63(63): 4424 - 4436.
- [12] 李瑞, 吴爱祥, 王春来, 等. 微震监测参数主要特性及关系的研究[J]. 矿业研究与开发, 2010, 30(6): 9 - 11. [LI R, WU A X, WANG C L, et al. Study on the major characteristics and relationship of microseismic monitoring parameters [J]. Mining Research and Development, 2010, 30(6): 9 - 11. (in Chinese)]
- [13] 王俊光, 田利军, 梁冰, 等. “三硬”煤层冲击矿压的微震信号特征分析[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(2): 185 - 188. [WANG J G, TIAN L J, LIANG B, et al. Analysis of microseismic signal characteristics of rock burst in the “three-hard” Featured coal seam [J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(2): 185 - 188. (in Chinese)]
- [14] 张楚旋, 李夕兵, 董陇军, 等. 基于微震监测的岩体失稳智能预报[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(3): 5 - 9. [ZHANG C X, LI X B, DONG L J, et al. Intelligent prediction of rock mass instability based on microseismic monitoring [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(3): 5 - 9. (in Chinese)]
- [15] 张钦礼, 曹小刚, 王艳利, 等. 基于尖点突变模型的采场顶板-矿柱稳定性分析[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(10): 52 - 57. [ZHANG Q L, CAO X G, WANG Y L, et al. Stability analysis of stope roof-pillar based on cusp catastrophe model [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(10): 52 - 57. (in Chinese)]
- [16] 付成华, 陈胜宏. 基于突变理论的地下工程洞室围岩失稳判据研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 167 - 172. [FU C H, CHEN S H. Study on instability criteria of surrounding rock of underground engineering cavern based on catastrophe theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 167 - 172. (in Chinese)]
- [17] 刘新荣, 涂义亮, 钟祖良, 等. 基于能量突变的强度折减法边坡失稳判据[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(6): 2065 - 2072. [LIU X R, TU Y L, ZHONG Z L, et al. Slope's failure criterion based on energy catastrophe in shear strength reduction method [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(6): 2065 - 2072. (in Chinese)]
- [18] 袁四化, 李忠, 刘晓燕. 陡煤采空区稳定性评价的信息融合模型[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(5): 582 - 586. [YUAN S H, LI Z, LIU X Y. Information fusion model of stability evaluation in steep coal-goaf [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2014, 33(5): 582 - 586. (in Chinese)]
- [19] LUO Z Q, WANG W, QIN Y G, et al. Early warning of rock mass instability based on multi-field coupling analysis and microseismic monitoring [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(6): 1285 - 1293.

- Beijing: China Communications Press, 2018. (in Chinese)]
- [8] 甘建军, 刘民生, 黄润秋, 等. 九寨沟核心景区水循环系统研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(1):34-39. [GAN J J, LIU M S, HUANG R Q, et al. A study of hydrological cycle in the Jiuzhaigou core scenic area[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010, 37(1):34-39. (in Chinese)]
- [9] 武斌, 汪智, 张淳, 等. 综合工程物探在九寨沟核心景区水循环系统研究中应用评价[J]. 四川地质学报, 2009, 29(2):213-216. [WU B, WANG Z, ZHANG C, et al. The application of comprehensive engineering geophysical exploration to the study of hydrologic cycle system in the Jiuzhai valley scenic spot[J]. Acta Geologica Sichuan, 2009, 29(2):213-216. (in Chinese)]
- [10] 尹观, 范晓. 四川九寨沟水循环系统的同位素示踪[J]. 地理学报, 2000, 55(4):487-494. [YIN G, FAN X. Isotope tracer on water cycly system in Jiuzhaigou, Sichuan [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(4):487-494. (in Chinese)]

(上接第 69 页)

- [20] 罗小燕, 占鹏飞, 黄祥海, 等. 基于加权 D-S 证据理论融合多域特征的岩体失稳预测方法[J]. 煤炭学报:1-9. [LUO X Y, ZHAN P F, HUANG X H, et al. Rock mass instability prediction method based on weighted D-S evidence theory and multi-domain features fusion [J]. Journal of China Coal Society: 1-9. (in Chinese)]
- [21] YU L, LIU J J. Stability of interbed for salt cavern gas storage in solution mining considering cusp displacement catastrophe theory [J]. Petroleum, 2015, 1(1):82-90.
- [22] 于秋鸽, 张华兴, 邓伟男. 基于尖点突变模型的采空塌陷地表裂缝形成机理[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(2):73-77. [YU Q G, ZHANG H X, DENG W N. Mechanism of collapsing ground fissure formation based on cusp catastrophe model[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(2):73-77. (in Chinese)]
- [23] 鞠兴华, 杨晓华, 张莎莎. 基于尖点突变理论的软岩弃渣路堤局部稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(6):112-118. [JU X H, YANG X H, ZHANG S S. An analysis of local stability of soft rock cinder embankment based on the cusp catastrophe theory [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(6):112-118. (in Chinese)]
- [24] 王明洋, 李杰, 李凯锐. 深部岩体非线性力学能量作用原理与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4):659-667. [WANG M Y, LI J, LI K R. A nonlinear mechanical energy theory in deep rock mass engineering and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4):659-667. (in Chinese)]
- [25] 孙建, 王连国. 基于微震信号突变分析的底板断层突水预测[J]. 煤炭学报, 2013, 38(8):1404-1410. [SUN J, WANG L G. Floor fault water-inrush prediction based on catastrophe analysis of micro-seismic signals [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8):1404-1410. (in Chinese)]
- [26] 易革军. 基于 D-S 证据理论的信息融合方法研究与应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2015. [YI G J. Research and application of information fusion based on D-S evidence theory [D]. Changsha: Hunan University, 2015. (in Chinese)]
- [27] CHEN L W, WANG W H, ZHANG W J. Risk evaluation of regional collapses geological hazard based on D-S evidence theory-A case study of Haiyuan active fault belt in Ningxia Province [J]. Energy Procedia, 2012, 16:371-376.
- [28] XU N W, LI T B, DAI F, et al. Microseismic monitoring and stability evaluation for the large scale underground Caverns at the Houziyan hydropower station in Southwest China [J]. Engineering Geology, 2015, 188:48-67.