

基于微震信息的岩爆体积分级与判别方法研究

刘国锋¹, 李胜峰¹, 丰光亮², 陈炳瑞², 许江波¹, 杜程浩¹, 陈学琦¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 深埋地下工程岩爆灾害的危害性与其爆坑规模直接相关, 为进一步提高岩爆灾害的精细化表征及预测水平, 开展基于微震信息的岩爆爆坑体积分级及判别方法研究。首先, 通过对收集到的 111 个来源于锦屏二级水电站深埋隧洞群工程的岩爆案例进行统计分析可知, 岩爆孕育过程中的累积微震事件数、累积微震释放能、累积微震视体积、微震事件率、微震能量释放率、微震视体积率这 6 个指标与岩爆爆坑体积之间具有较高相关性, 即岩爆爆坑的体积分布与微震参数取值之间呈现出较为明显的从低到高的层次差异性。其次, 利用层次聚类分析手段, 从工程实用性与可预测性的角度构建一种岩爆体积分级划分方案, 以锦屏隧洞工程为例, 将岩爆体积等级划分为五级, 并确定相应等级的体积阈值。最后, 基于改进的分类回归树(classification and regression tree, 简称为 CART)算法, 构建了用于确定不同岩爆体积等级下各微震参数判别阈值的决策树, 形成岩爆体积等级的 6 个单微震参数判据; 进一步, 提出一种基于多微震参数的岩爆体积等级综合判别的蛛网图方法, 并通过案例反分析确定相应的判别准则, 利用该方法可快速实现洞室开挖过程中岩爆潜在规模等级的判别。对收集所得岩爆案例进行回溯验证, 结果显示, 岩爆回判准确率总体达到 85.2%, 表明该方法具有较高的准确率与适用性。该研究能够为类似深埋地下工程岩爆灾害精细化预测水平的提高提供一种新的有效途径。

关键词: 岩石力学; 岩爆体积; 微震信息; 深埋隧洞; 聚类分析; 岩爆分级; 综合判别

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2024)03-0683-15

Research on rockburst volume classification and discriminant method based on microseismic information

LIU Guofeng¹, LI Shengfeng¹, FENG Guangliang², CHEN Bingrui², XU Jiangbo¹,
DU Chenghao¹, CHEN Xueqi¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The hazard of a rockburst event is directly correlated with the scale of rock mass ejection in deep underground engineering. In order to further enhance the fine characterization and prediction level of rockburst hazards in deep underground engineering, a study was conducted on the classification and discrimination method of rockburst pit volume based on microseismic information. Firstly, a statistical analysis of one hundred and eleven

收稿日期: 2023-07-10; **修回日期:** 2023-09-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52209120); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102213203); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JM-191)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 52209120), Fundamental Research Funds for the Central Universities(Grant No. 300102213203) and Shaanxi Provincial Natural Science Basic Research Program(Grant No. 2022JM-191)

作者简介: 刘国锋(1989-), 男, 博士, 2011年毕业于中国地质大学(武汉)岩土工程专业, 现任讲师, 主要从事岩土工程灾害机制、预测与防控方面的教学与研究工作。E-mail: gfliu@chd.edu.cn. 通讯作者: 丰光亮(1988-), 男, 博士, 现任副研究员。E-mail: glfeng@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0598

rockburst cases from the deep tunnels of Jinping II hydropower station project was performed. It was found that six indicators, namely the cumulative number of microseismic events, cumulative microseismic energy release, cumulative microseismic volume, microseismic event rate, microseismic energy release rate and microseismic volume rate, showed a high correlation with the volume of rockburst pit. In other words, there was a significant hierarchical difference from low to high between the distribution of rockburst volumes and the values of microseismic parameters. Secondly, a hierarchical clustering analysis was employed to establish a classification scheme for rockburst volumes, taking into consideration engineering practicality and predictability. Taking the Jinping tunnel project as an example, the rockburst volume was divided into five levels, and the corresponding volume thresholds for each level were then determined. Finally, a decision tree based on the improved classification and regression tree(CART) algorithm was constructed to determine discrimination thresholds for various microseismic parameters under different rockburst volume levels, and six individual microseismic parameter criteria for rockburst volume classification were therefore developed. Furthermore, a spider web diagram method based on multiple microseismic parameters was developed for comprehensive discrimination of rockburst classification, and corresponding discrimination criteria were determined through case analysis. This method enables people to rapidly discriminate the potential level of rockburst volume during tunnel excavation. The results from retrospective verification of the collected rockburst cases showed an overall accuracy rate of 85.2% for rockburst volume discrimination, demonstrating a high accuracy and applicability of the proposed method. This research provides a new and effective approach to improve the fine prediction level of rockburst hazards in similar deep underground engineering projects.

Key words: rock mechanics; rockburst volume; microseismic information; deep tunnel; clustering analysis; rockburst classification; comprehensive discrimination

1 引 言

随着“交通强国”、“新时代西部大开发”等国家重大战略规划的实施,以“川藏铁路”、“滇中引水”等为代表的国家重大工程建设正不断推进,这些工程所处的地质赋存环境更加复杂,所涉及的隧道(洞)呈现出显著的“长、多、深”特点。岩爆是深部硬岩地下工程中常见且威胁巨大的一类地质灾害,岩体因开挖卸荷导致爆裂松脱、剥落、弹射甚至抛掷^[1-2],往往会造成施工人员伤亡和设备严重损坏。从工程实践来看,岩爆的危害性与岩体破坏规模直接相关^[3],岩爆爆坑体积越大,岩块弹射覆盖范围就越大,施工区域内承灾体(人员、设备等)所遭受的威胁就越严重。工程中经常采用岩爆烈度等级来衡量岩爆破坏时的剧烈程度,烈度等级的主要评价指标为爆坑深度^[4-5],深度在一定程度上可以反映岩爆规模,但相对于深度指标,爆坑体积作为更高维度的衡量指标能够更全面地反映岩爆规模,也更能描述岩爆破坏的严重程度,因此,从岩爆破坏规模的角度去开展岩爆倾向性和风险精细化预测等具有重要的现实意义。

近些年来,微震监测技术在深埋地下工程岩爆

灾害预测评估方面得到了广泛的应用。通过微震监测可以获取到丰富的工程岩体微破裂信息,如时间、位置、能量等,通过对岩爆发生的前兆微震活动特征的分析,可实时揭示岩爆风险的孕育过程与风险水平^[1-6]。A. Leśniak 和 Z. Isakow^[7]依托波兰 Zabrze Bielszowice 煤矿,通过对 1 000 多个微震事件的聚类分析,使用微震事件能量和时间间隔建立灾变函数,并提出灾变函数的突然下降可以作为矿震发生的简单前兆信息。C. Srinivasan 等^[8]提出使用微震事件率、微震能量和信号主频率作为岩爆发生的短期前兆信息,并在印度南部 Champion Reef 金矿的岩爆案例中进行了验证。C. A. Tang 等^[9-10]将微震监测系统应用于实际工程中,验证了由岩体失稳破坏而引起的岩爆是可预测的。冯夏庭等^[11-12]通过对锦屏二级水电站深埋隧洞岩爆灾害的研究,揭示了岩爆孕育过程的微震演化规律,并发现微震活动与岩爆事件具有时间和空间的一致性特征。C. C. Ma 等^[13]利用震源参数空间方法分析了岩爆和塌方灾害的围岩破坏过程,并区分 2 种灾害在发育阶段和发生阶段的微震特征。戴峰等^[14]通过对地下洞室开挖期间的微震参数特征进行研究,掌握了围岩潜在破坏特征。Y. Yu 等^[15-16]采用分形理论对微震活动的时空分布与微震事件的能量演化特征进行了研

究,借用分形维数很好地反映岩爆发生前后微震活动的变化状态和自相似性特征。冯夏庭等^[1, 17]通过大量案例的分析研究表明,利用岩爆孕育过程中的微震事件数(率)、微震能量(率)、视体积(率)这 6 个微震参数,可以对岩爆风险进行有效的量化预测。近几年来,融合微震监测信息与非线性分析、机器学习等手段来开展岩爆烈度等级预测模型的研究愈发多见^[9, 18-21],并被应用在水电、矿山、交通工程等领域。总体来看,前人在岩爆孕育过程微震活动特征分析及岩爆位置与烈度等级预测方面取得了大量有益的研究成果。但目前针对岩爆破坏规模的分析尚不多见,G. F. Liu 等^[3]通过案例统计分析,初步提出了一种基于微震监测信息与机器学习的岩爆体积分级估计模型,但关于微震活动与爆坑体积的相关性分析尚需进一步深入研究。

鉴于此,在前人研究的基础上,本文以锦屏二级水电站深埋隧洞工程为背景,基于所收集的 111 个岩爆监测案例,从统计分析角度探究岩爆破坏规模(即爆坑体积)与微震活动之间的相关性;开展基于微震信息聚类的岩爆体积分级研究;初步建立基于微震信息的岩爆体积分级判别方法与准则,并进行了工程验证。研究成果能够为深部地下工程岩爆灾害精细化预测水平的提升提供新的视角与借鉴。

2 岩爆数据库构建

2.1 工程概况

锦屏二级水电站深埋隧洞工程位于四川省凉山彝族自治州境内的雅砻江干流锦屏大河弯处,主要由 5 条相互平行的隧洞组成,包括 4 条引水隧洞与 1 条排水洞,其剖面布置如图 1^[22]所示。每条引水隧洞长约 16.7 km,开挖洞径为 13 m,排水洞开挖直径为 7.2 m,全洞平均埋深约 1 610 m,其中埋深大于 1 500 m 的洞段长度占全洞长度的 76%,最大埋深约 2 525 m,属于超深埋长隧洞群工程。1[#], 3[#]引水隧洞与排水洞东端部分采用 TBM 施工,其余采用钻爆法施工。隧洞大部分洞段以 II~III 类大理岩为主,岩体坚硬致密,成洞条件良好,地层总体走向以 NNE 方向为主。隧洞埋深位置最大主应力约为 70 MPa。

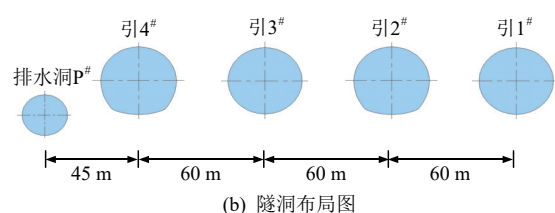
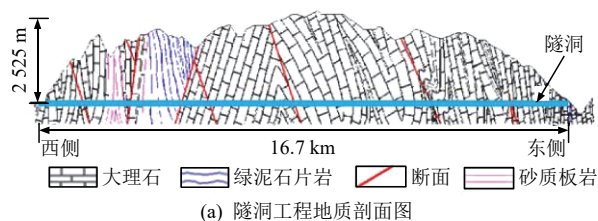


图 1 锦屏 II 级水电站引排水隧洞工程布置图^[22]

Fig.1 Layout of diversion and drainage tunnel project in Jinping II hydropower station^[22]

高地应力导致锦屏引水隧洞群施工过程中岩爆灾害频发,且岩爆烈度高,一度给现场施工造成了极大的困难与威胁。引排水隧洞开挖期间,岩爆爆坑深度相近、烈度一致但爆坑体积相差较大甚至悬殊的现象较为多见,如图 2 和 3 所示案例,从中可以看出,爆坑深度或烈度指标并不足以完全反映岩爆的破坏规模,考虑爆坑体积指标能够进一步弥补岩爆烈度评判时存在的不足。冯夏庭等^[1, 23]通过工程调研与室内模拟等研究表明,岩爆的爆坑截面形态多呈现出窝型(或平底锅型)与 V 型的形态,这种具有几何近似规律的特点,有利于人们对岩爆爆坑进行三维简化建模,进而估算爆坑规模。笔者通过对锦屏深埋隧洞大量岩爆案例的调查统计,给出了一种针对“窝”型与“V”型爆坑岩爆规模的估算模型与方法,详见刘国锋等^[24]研究,对于本研究而言,这种岩爆规模的简化估算方法已满足精度要求。针对非典型形态爆坑或量测精度要求更高的情况,可借助

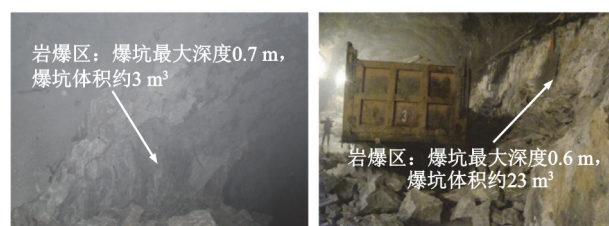


图 2 破坏规模显著差异的 2 个中等岩爆案例

Fig.2 Two moderate rockbursts with significant differences in failure scale



图 3 破坏规模显著差异的 2 个强烈岩爆案例

Fig.3 Two intensive rockbursts with significant differences in failure scale

现场三维激光扫描技术,通过构建精细的三维模型来获取岩爆坑规模。

2.2 岩爆微震监测简述

由于锦屏二级水电站深埋隧洞岩爆灾害频发且危害性大,在其开挖早期便采用南非 ISS 微震监测系统对 1#~4#引水隧洞及施工排水洞岩爆高风险洞段开展了微震监测,相关的微震监测布置方案可参考冯夏庭等^[1, 25-26]研究。

G. L. Feng 等^[12, 27-30]研究表明,利用微震对岩爆进行预测的参数有很多,如能量指数、施密特数、古腾堡-里希特关系中的 a 和 b 值,但在隧道(洞)工程中它们对于轻微或者中等烈度的岩爆预警的效果较差^[17],而累积事件数(N)、累积释放能量对数($\lg E$)与累积视体积对数($\lg V$)这 3 个反映岩体累积破裂次数、强度和变形特征的微震参变量常被应用于岩爆烈度等级的预警,且预警结果较为可靠。此外,事件率(n)、能量释放率对数($\lg e$)、视体积率对数($\lg v$)这 3 个反应破坏时间效应的岩体平均破裂速率、能量和变形演化的微震参变量对于岩爆的发生也具有指示作用^[17, 31-32]。因此,本文选取以上 6 个微震参变量开展岩爆破坏规模与岩体微破裂活动之间的相关性研究。

总体而言,岩爆属于洞室开挖期间的一种围岩局部失稳灾害,利用微震演化信息来分析评价岩爆风险时,首先需要选取一个有限且能够包含岩爆前兆微破裂信息的空间区域,该区域的尺寸主要取决于洞室开挖卸荷影响范围及掌子面附近微震事件的空间分布规律。对于锦屏二级水电站深埋洞室群工程而言,冯夏庭等^[1, 17]通过分析研究表明,可将该区域确定为掌子面后方 30 m 至前方 10 m(即

长度为 40 m)、隧洞轴线左侧 35 m 至右侧 35 m(宽度为 70 m)、隧洞轴上方 50 m 至下方 35 m(高度为 85 m)的空间长方体区域。需要说明的是,该区域随着掌子面的推进而不断移动,这是由于微震活动及岩爆风险主要集中在掌子面附近的应力重分布区域。

图 4 给出了 3#引水隧洞某次岩爆的微震活动演化过程(球体大小表示微震事件释放的能量,球体越大,释放能量越大),可以看出,岩爆的孕育发展过程可持续数天,自 2011 年 4 月 13 日起,随着掌子面的不断推进,微震事件不断增多且逐渐聚集,并在岩爆前两日微震活动变得更加活跃,最终在 4 月 20 日发生强烈岩爆,最大爆坑深度接近 1.5 m,围岩破坏面积约 49 m²,爆坑体积约 21 m³。

2.3 岩爆样本库

岩爆实例是研究岩爆孕育过程微震活动规律及其与岩体破坏规模相关性的必要基础资料,通过对 1#~4#引水隧洞及排水洞部分钻爆法施工高风险洞段进行调查统计(累计统计范围约 7.3 km,分别为引 1#K7+374~K9+138、引 2#K7+359~9+201、引 3#K5+765~K6+200、引 3#K8+600~K9+000)、引 4#K7+750~K8+350、引 4#K8+600~K9+000)与排水洞 P#K6+859~K8+757 洞段),共收集构建了 111 个包含完整微震监测信息与岩爆破坏规模的岩爆样本数据库,所收集实例包含岩爆的基本时空特征、地质信息、微震监测数据、岩爆破坏特征、开挖支护等多元信息。表 1 给出了所收集的部分岩爆实例数据,表中微震监测数据是指由岩爆发生当天掌子面位置确定的微震监测空间区域内累积收集的微震信息。

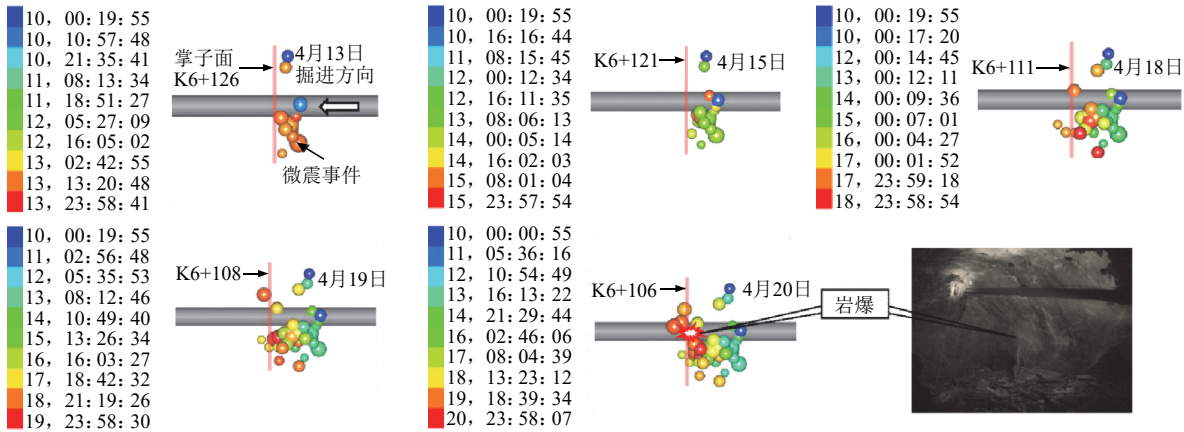


图 4 3#引水隧洞某次岩爆孕育过程微震事件时空演化过程(2011 年)

Fig.4 Evolution of the microseismic activity in the associated spatial estimating volume with the advance of the working face (in 2011)

表 1 锦屏二级水电站深埋隧洞群部分岩爆案例数据
Table 1 Data of part rockburst cases collected from the deep tunnels of Jinping II hydropower station

序号	微震监测数据						爆坑体积 R_v/m^3
	N	n/d	$\lg(E/J)$	$\lg(e/(\text{J} \cdot \text{d}^{-1}))$	$\lg(V/\text{m}^3)$	$\lg(v/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}))$	
1	41	3.70	5.97	4.93	4.69	3.65	11
2	22	2.20	5.86	4.86	4.90	3.90	8
3	10	1.25	6.58	5.67	5.08	4.18	6
4	45	4.50	5.86	4.86	5.84	4.84	47
5	49	5.44	6.37	5.42	5.17	4.21	26
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
108	11	2.20	4.11	3.41	3.62	2.93	25
109	52	6.50	6.02	5.11	5.62	4.72	44
110	61	5.55	6.42	5.38	5.77	4.73	35
111	1	0.80	2.40	1.34	3.00	1.30	0

注：本文所依托的锦屏隧洞工程中 n ， $\lg e$ ， $\lg v$ 以天为时间单位计算，时间单位由微震活动的频繁程度确定。

3 岩爆体积与微震活动的统计相关性

通过对收集到的 111 个岩爆实例进行统计与汇总分析，得到了岩爆爆坑体积与各微震参数之间的分布关系，如图 5 所示。由图可知：(1) 总体上，随着微震参数取值的增大，爆坑体积呈现出逐渐增高的趋势；(2) 爆坑体积与微震参数取值之间呈现出较为明显的从低到高的层次分布特征。以累积视体

积为例进行说明，从图 5(c)可以看出，当 $\lg V < 4.0$ 时，体积为 0 的岩爆(即无岩爆)占据绝大多数；当 $4.0 \leq \lg V < 5.0$ 时，岩爆爆坑体积多小于 20 m^3 ；当 $\lg V > 5.0$ 时，爆坑体积多大于 20 m^3 ；对于其他微震参数，亦有类似的对应规律；(3) 对于累积事件数 N 与事件率 n 、累积释放能 $\lg E$ 与能量释放率 $\lg e$ 、累积视体积 $\lg V$ 与视体积率 $\lg v$ 这三对微震参数而言，每一对参数在反映岩爆规模方面均具有较强的正相关性(即图中大部分气泡点落在一条斜直线上)，但仍然有少部分案例不具备此规律(见图 5(a)与(c)的部分位于直线外的气泡点)，这说明除了累积事件数 N 、累积释放能量 $\lg E$ 与累积视体积 $\lg V$ 这 3 个微震参数之外，进一步考虑时间因素在一定程度上可弥补微震参数选取的局限性。

为了进一步量化爆坑体积与微震参数间相关性，针对上述数据库中实际发生岩爆的案例开展拟合分析，并以决定系数 R^2 作为评价指标对相关性强弱进行评价，相关结果如图 6 所示。总体上，采用幂指数函数能较好地拟合爆坑体积与微震参数取值之间的对应关系。其中，累积微震事件数 N 与事件率 n 直接反映了岩爆区域微震活动的活跃程度，其与爆坑体积之间的拟合系数分别为 0.735 与 0.697，相关性程度较高。视体积与视体积率描述了微震震源破裂尺度，其累积值可描述围岩破坏变形的程度，累积微震视体积 $\lg V$ 和视体积率 $\lg v$ 与爆坑体积

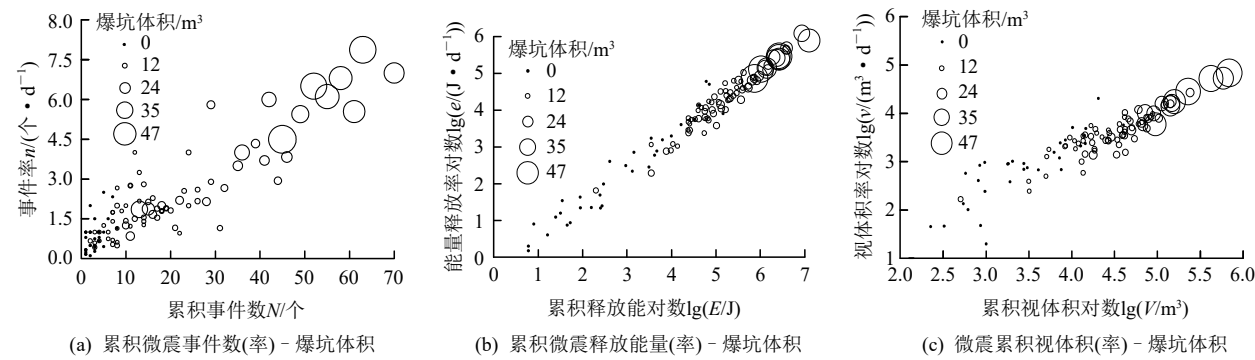
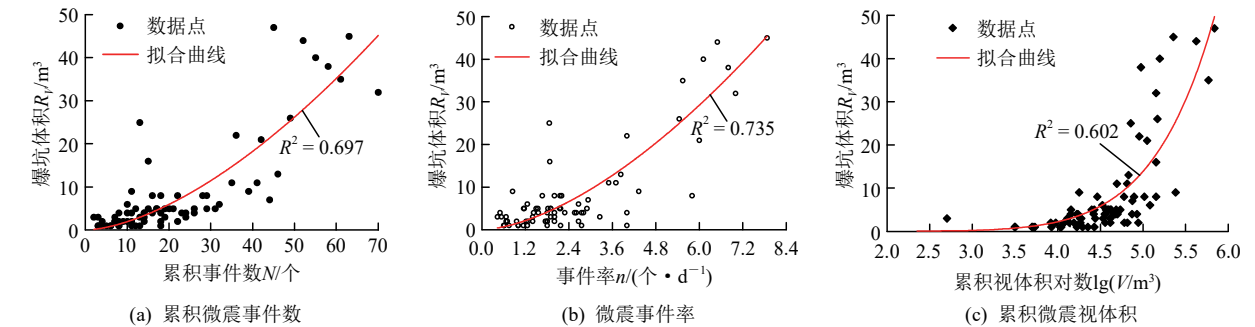


图 5 爆坑体积与各微震参数对应的气泡分布图

Fig.5 Bubble diagrams between each microseismic parameter and rockburst pit volume



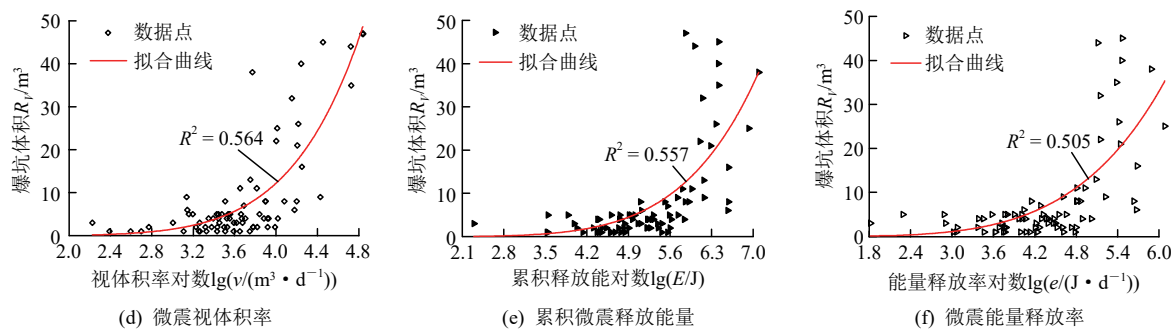


图6 爆坑体积与各微震参数散点分布图

Fig.6 Scatter diagrams of the distribution between each microseismic parameter and rockburst pit volume

之间的拟合系数分别为 0.602 与 0.564。微震释放能与能量释放率描述了微震震源破裂的释放能量大小,其累积值可描述岩体破裂强度,累积释放能 $\lg E$ 和能量释放率 $\lg e$ 与爆坑体积拟合系数分别为 0.557 与 0.505。

由上可知,单个微震参数与岩爆爆坑体积的拟合系数取值大体上处于 0.50~0.75,呈现出一定的正相关性,这对于岩爆体积的判别及预测具有重要的启示意义,说明利用微震信息预测岩爆体积是可行的。但由于单个微震参数与爆坑体积之间的相关性系数均小于 0.75,相关性并不十分显著,且各微震参数对爆坑体积的识别度在不同规模范围内亦有所不同(当数据点分布较为集中时,说明其对于相应规模岩爆的识别度高,如对于大体积岩爆而言,累积微震事件数、微震事件率或视体积率的识别度优于其它参数;而对于较小体积岩爆,累积微震视体积、视体积率、累积微震释放能或能量释放率识别度更高,见图 6)。由此可见,不同微震参数在反映与识别岩爆规模方面各有优劣,应联合采用,优势互补,避免单一指标的片面性与局限性。

4 基于聚类分析的岩爆体积等级划分

需要说明的是,由于岩爆机制的复杂性,岩爆的预测预警始终是地下工程领域的一道挑战性难题,显然,岩爆爆坑体积的精确预测目前仍难以实现。不过由上述统计结果可知,爆坑体积与微震参数取值之间总体上呈现出从低到高的层次对应关系,表明了利用微震信息去预判岩爆体积的大致范围是可行的,这对于现场岩爆灾害防控策略的动态调控依然具有有益的指导作用。

因此,有必要构建一套岩爆体积等级的划分方案,类似于现有的岩爆烈度等级,在此基础上,可

开展岩爆规模的评价和预测。岩爆体积分级应兼顾预测精度和工程实用两方面的需求,其核心在于确定其等级数量和相应阈值。其中,等级数量的确定不宜过多,亦不宜过少,参考现有的岩爆烈度等级划分,将其数量设置在 4~6 范围较为合理(含无岩爆等级),具体以分析结果为准。阈值的确定应以规模等级能够得到有效预测作为前提,否则其工程指导意义将大打折扣。

为了解决等级划分问题,以岩爆体积与微震信息的相关性为基础,通过聚类分析来确定岩爆样本的分类情况,依据研究对象之间的相似性统计量,将其划分成若干个互不相交类或簇,确定岩爆样本的最优分类数(即确定等级划分数量)。在此基础上,根据不同类的岩爆体积分布情况进而确定等级阈值。

4.1 岩爆体积等级划分数量确定

聚类分析(cluster analysis)^[33]是一种将研究对象分为相对同质的群组的统计分析技术,广泛应用于不同领域,利用该技术可将数据分类到不同的类或者簇,同一个簇中的对象有很大的相似性。这里以上述岩爆监测案例数据库作为分析对象,采用层次 Q 型聚类分析方法,利用累积事件数、累积释放能、累积视体积、事件率、能量释放率与视体积率 6 个关键微震参数作为聚类指标,并根据聚类分析的谱系图和聚类过程,确定岩爆体积的分级阈值。

岩爆案例之间的相似性主要采用平方欧式距离进行度量,计算公式为

$$d_{sc}(x, y) = \sum_{i=1}^q (x_i - y_i)^2 \quad (1)$$

式中: x, y 为岩爆案例; x_i, y_i 分别为 x 与 y 案例对应的各微震参数取值; q 为微震参数数量,取值为 6; $d_{sc}(x, y)$ 为 x 案例与 y 之间的平方欧式距离。

通常聚类分析之前,需要先对数据进行标准化

处理,以消去数据量纲不同或量级差别较大对分类结果的影响,从而使得不同量纲的指标参数能够进行比较,且当岩爆样本改变时,数据仍能保持相对稳定性,可采用以下公式进行标准化处理:

$$X_{ki}^* = \frac{X_{ki} - \bar{X}_i}{s_i} \quad (2)$$

式中: X_{ki} 为第 k 个岩爆案例、第 i 个微震参数的取值; $\bar{X}_i$ 为所有岩爆案例第 i 个微震参数取值的平均值; s_i 为所有岩爆案例第 i 个微震参数分布的标准差; X_{ki}^* 为第 k 个岩爆案例、第 i 个微震参数经标准化处理后的取值。

凝聚层级聚类算法(hierarchical agglomerative clustering)是层次聚类分析中广泛采用的一种自下而上的算法,可采用该算法实现岩爆样本的聚类过程计算。首先将每个样本看作一个初始簇,再将这些簇合并成一个更大的簇,根据簇间对象的距离反复合并,直到得到一个最大的簇。2 个簇之间的距离计算存在多种方法,其中组间平均锁链法(between-group linkage)具有可以用于处理不同类型数据的优点,考虑聚类方法应用于工程实际问题的普适性要求,因而采用该方法来度量簇间距离,计算公式为

$$d\{x, (y, z)\} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\sum_{i=1}^q (x_i - y_i)^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^q (x_i - z_i)^2} \right] \quad (3)$$

式中: z_i 为岩爆案例 z 对应的各微震参数取值, (y, z) 为 y 案例和 z 组成的小簇。

所构建的样本集中共有 32 个无岩爆案例(即爆坑体积为 0),属于无岩爆等级序列,因此不参与聚类分析。剩下 79 个岩爆案例聚类分析的最终结果如图 7 所示,需要说明的是,该谱系图横坐标表示岩爆案例,为直观显示不同聚类中岩爆的体积分布,故对各案例对应的岩爆体积进行了标注;纵坐标代表的是各岩爆案例的聚类距离,可将距离在一定范

围内较为集中的案例归为一大类,表明这些案例的微震参数在取值上较为接近。聚类结果显示,样本集中存在一个岩爆体积约为 3 m^3 的案例与其他案例的距离相差较大,可将其视为离散性较大的异常案例,在后续分析中不予考虑。

综上所述,考核岩爆案例类簇之间的相似性程度主要依靠各类簇之间的距离,距离较为接近时可将其归为一类。组内平方误差和(sum of squared error, SSE)表示一个类簇内各点与该类质心的平方误差之和,能够描述同一类簇内样本围绕簇质心的紧密程度^[34],可作为岩爆样本聚类数目确定的依据。假设 n 个岩爆样本被划分为 $K(K \leq n-1)$ 类,则 E_{ss} 取值可由下式进行计算:

$$E_{ss} = \sum_{k=1}^K \sum_{x_i \in C_k} |x_i - u_k|^2 \quad (4)$$

式中: E_{ss} 为 K 个组的组内平方误差和; C_k 为第 k 个类簇, $k=1, 2, \dots, K$; x_i 为类簇 C_k 中第 i 个岩爆案例微震参数取值构成的向量; u_k 为类簇 C_k 的重心,也即类簇 C_k 内岩爆案例的各微震参数取值的均值向量。

E_{ss} 越小则说明各岩爆类簇越收敛,但并不是越小越好。因为若将所有的岩爆样本点均视作单一类簇,此时计算的 $E_{ss} = 0$,无法达到分类的目的。因此,需要寻找一个合适的 E_{ss} 取值点。肘部法则是聚类分析中一种常用的确定最优分类数目的方法^[35],即指定一个 K 值,视其为可能的最大聚类数目,将岩爆样本聚类数目从 1 开始递增至 K ,计算出相应的 E_{ss} 。显然,每个岩爆类簇包含的样本数会随着 K 值的增大而减少,而随着 K 值的增大, E_{ss} 取值会呈现出减小的趋势,最后趋于平稳。当 E_{ss} 减幅趋于缓慢时,可认为岩爆聚类效果并不能随着分类数目的增加而显著增强,此时这个“肘点(拐点)”就是最优分类数目,选取该肘点处的 K 值可以取得较佳的聚类效果。

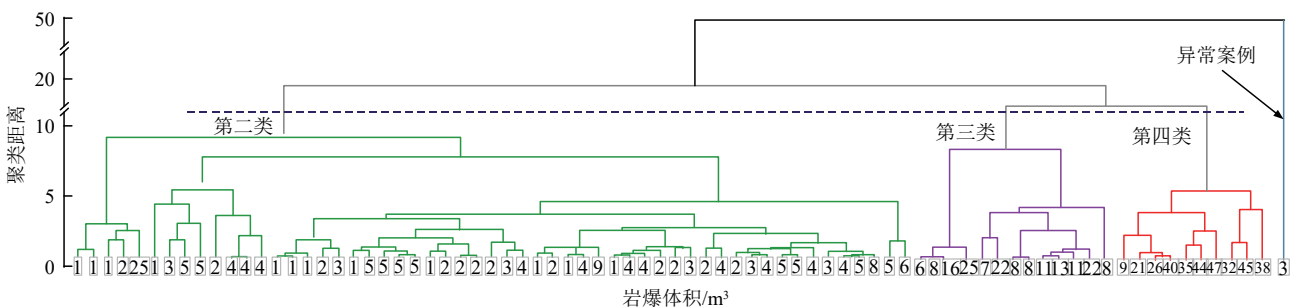


图 7 岩爆样本集聚类分析谱系图

Fig.7 Dendrogram of the cluster analysis results by using rockburst samples

通过上述方法获得了岩爆样本集对应的 E_{ss} 取值随分类数目的变化规律, 如图 8 所示, 基于肘部法则, 可见当分类数目从 3 变为 4 时, E_{ss} 取值逐渐趋于平缓, 同时, 结合图 7 所示的聚类分析谱系图分布结果, 可将上述剩余岩爆案例的最佳分类数目确定为 3 (即图 7 中标注的第二、三、四类)。从图 7 的岩爆案例体积分布来看, 同一类样本对应的岩爆体积较为接近, 绝大多数集中在某一区间, 且这三类岩爆样本对应的体积分布区间存在层次差异性, 从微震可预测性角度来看, 说明以上聚类分析的结果可作为岩爆体积分级的依据。考虑到未参与聚类分析的 32 例无岩爆案例 (即第一类), 则最终的岩爆分类结果如图 9 所示, 整体来看, 所划分的四类岩爆样本在体积分布上存在着较为明显的区别, 能够为岩爆体积等级的阈值划分提供依据。另外, 需要说明的是, 当前所收集的岩爆样本库中并未包含规模极大的极强岩爆 (此类岩爆案例较少), 但在岩爆体积分级时应予以考虑, 将其归为第五类。综上所述, 岩爆体积等级数量可确定为 5 个, 即划分为五级 (类), 这里分别用 I, II, III, IV 与 V 级表示, 这也与已有的岩爆烈度分级数量相一致^[5], 可满足工程实用性需求。

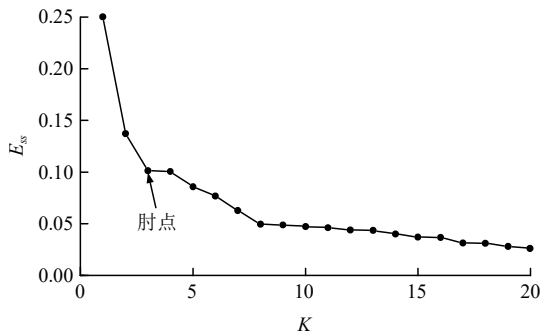


图 8 岩爆样本集 E_{ss} 折线图

Fig.8 E_{ss} line diagram from rockburst dataset

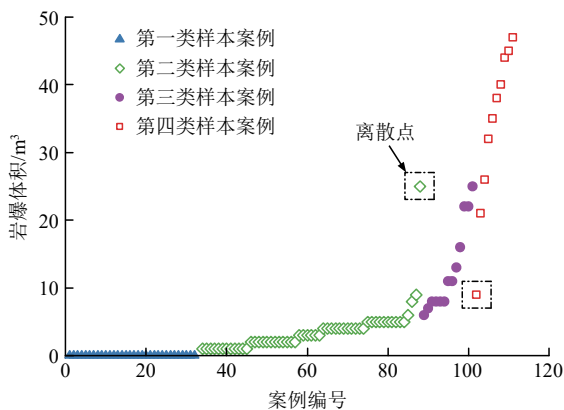


图 9 不同类岩爆样本的体积分布

Fig.9 Volume distribution of rockbursts with different classes

4.2 岩爆体积等级阈值确定

根据图 9 所示的不同等级岩爆样本对应的体积分布规律, 可进一步确定岩爆体积等级阈值。需要注意的是, 从相同等级岩爆样本的体积分布来看, 不可避免地存在极少数在岩爆体积上偏离整体分布范围的离散型案例 (见图 9)。冯夏庭等^[1, 3, 17]研究亦表明, 对于个别岩爆而言, 其孕育过程并没有明显的微震前兆特征, 这与岩爆机制的复杂性、微震监测定位技术的精度等有关, 从而导致所收集的岩爆样本库中存在极少数较为离散、较奇异的案例, 如果不对其进行识别与剔除, 将导致后续分析结果精度降低。由图 9 可见, II 级 (类) 样本中岩爆体积为 25 m^3 以及 IV 级 (类) 样本中岩爆体积为 9 m^3 的案例明显离群, 可予以剔除。需要说明的是, 剔除的岩爆案例共 3 个, 包括前文中聚类分析确定的异常案例, 各等级单项指标对应异常案例剔除比不超过 10%, 总体剔除比约 2.7%。

利用上述岩爆样本对锦屏隧洞群工程岩爆体积分级进行阈值分析, 其中, I 级与 II 级岩爆以有无岩爆作为区别, 即阈值为 0; 而 II, III, IV 与 V 级岩爆可根据相应案例体积分布的交界范围进行分析, 样本库中各级岩爆体积累积频率分布如图 10 所示。可见, II, III 与 IV 级岩爆的体积分布范围分别为 $0 \sim 9$, $5 \sim 25$ 和 $20 \sim 47 \text{ m}^3$, 也就是说, II 与 III 级岩爆之间的阈值在 $5 \sim 9 \text{ m}^3$ 范围, III 与 IV 级岩爆之间的阈值在 $20 \sim 25 \text{ m}^3$ 范围, 而 IV 与 V 级岩爆之间的阈值应落在 47 m^3 附近。在确定阈值分割的准则时, 应考虑了 2 个关键因素: 一方面, 该准则应使大多数岩爆案例的岩爆体积落在相应的等级区间内, 以保证分级结果的可靠性; 另一方面, 从工程

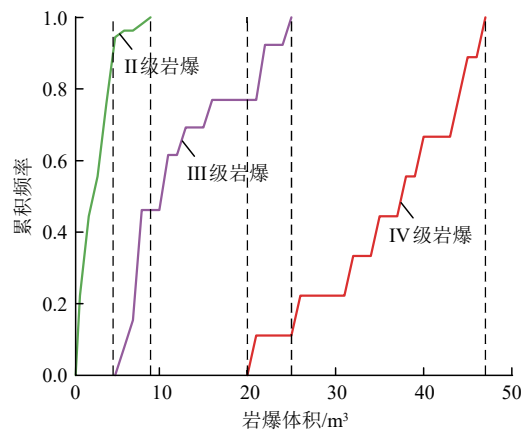


图 10 各等级岩爆爆坑体积的累积频率分布曲线

Fig.10 Cumulative frequency distribution curves of the pit volume of rockbursts with different classes

应用偏安全保守的角度出发，阈值划定应尽可能使高等级岩爆的阈值稍低一点，即该等级对应的体积分布范围稍大一点，以确保在实际工程中能够充分考虑此类岩爆的潜在风险。基于以上 2 个准则，II~V 级岩爆体积等级的相应阈值分别为 5, 20 和 50 m³。综上，最终的岩爆等级阈值结果如表 2 所示，需要说明的是，利用该方法得到的分级结果主要以岩爆体积的可预测性作为依据，且体积的划分应根据项目的范围和性质确定，不同的工程项目可能有所不同。

表 2 基于案例统计的锦屏岩爆体积分级结果

Table 2 Classification result of the rockburst pit volume based on a statistical analysis of cases from Jinping tunnels

岩爆体积等级	爆坑体积/m ³	描述
I	0	无
II	(0, 5]	小型
III	(5, 20]	中型
IV	(20, 50]	大型
V	>50	极大型

5 基于微震信息的岩爆体积判别方法

5.1 岩爆体积等级的单微震参数判别

针对每类等级的岩爆样本集开展统计分析，可逐一确定各等级岩爆对应的各微震参数取值分布范围，如图 11 所示。总体上，随着岩爆体积等级的增高，各微震参数的取值分布及均值均呈现出递增的

趋势，说明上述岩爆体积等级的划分较为合理，且岩爆体积与微震信息之间具有一定的相关性。进一步地，通过相关的数据挖掘及分析手段，可逐一确定岩爆体积等级对应的各微震参数阈值，从而构建出适用于相应工程的岩爆体积等级的单微震参数经验判据，便于现场技术与管理人员对于岩爆体积规模的初步定性判别。事实上，微震参数阈值的确定是一个单属性多分类问题，解决此类问题的方法包含很多，如数理统计、贝叶斯估计、机器学习(如决策树方法、神经网络方法、粗糙集方法和遗传算法等)。其中，决策树具有易生成、分类精度高、可视化强、易于解释等优点而被广泛应用在数据挖掘中，本文采用该方法来确定岩爆体积等级的单微震参数阈值及相应判据。

决策树方法是以实例为基础，从一个无次序、无规则的集合中归纳出一组采用树形结构表示分类规则的一套归纳学习算法^[36]。其原理如图 12 所示，其中，每个内部节点都表示一次分裂，每个分支代表一个决策树分裂后的输出，每个叶子节点表示一种分类。图 12 中 A, B, C 与 D 为叶子节点的标签，对应于不同岩爆体积等级。根据节点分裂标准的不同，构建决策树的算法也不同，如 ID3(Iterative Dichotomic version3)算法、C4.5 算法与 CART (Classification and regression tree)算法等。由于 CART 算法^[37]的生成速度和分类准确率优于 ID3 和 C4.5 算法，本文采用该算法构建决策树，确定不同岩爆体积等级下各微震参数的判别阈值。

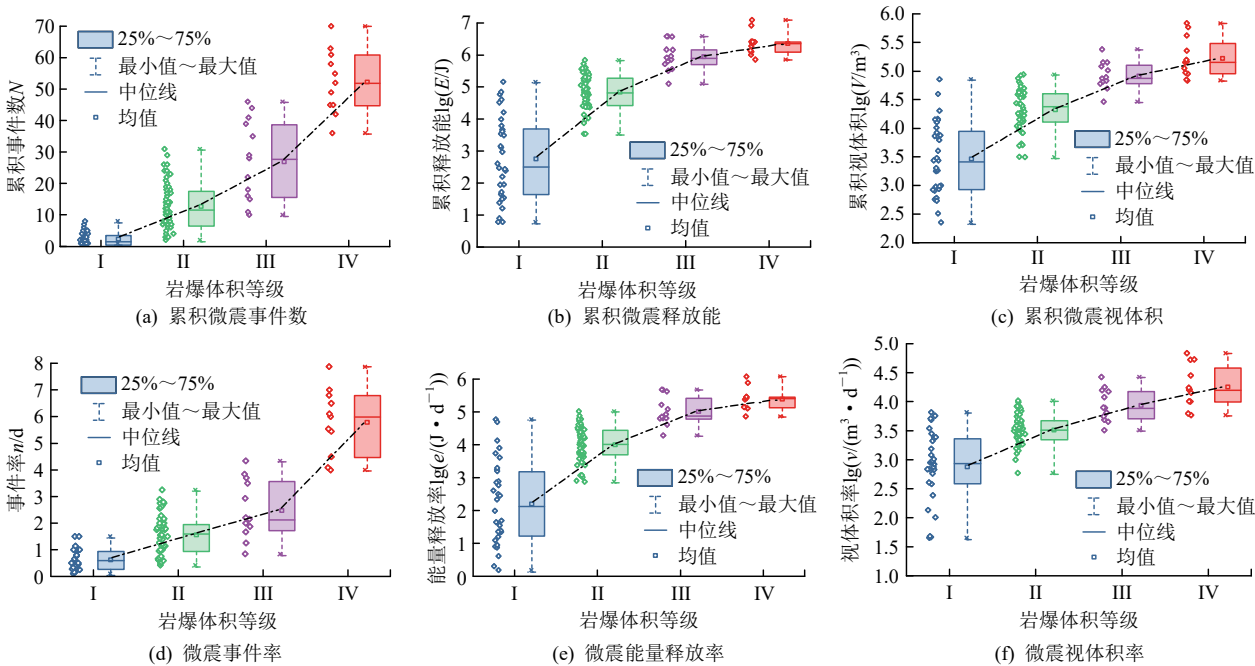


图 11 不同岩爆体积等级的微震参数分布箱型图

Fig.11 Box diagram of microseismic parameter distribution for different classes of rockburst volume

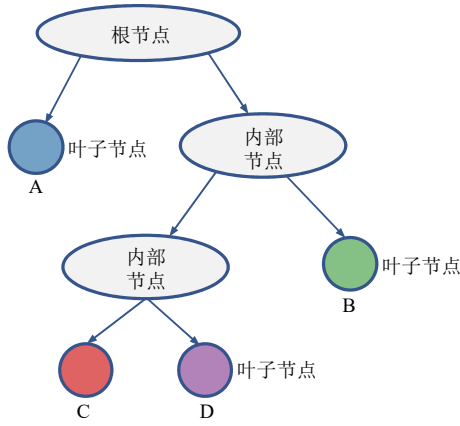


图 12 决策树模型节点逻辑关系示意图

Fig.12 Logical relation diagram of decision tree model nodes

CART 算法选择具有最小 *Gini* 系数值的分割点作为最优分割点，*Gini* 系数值越小，样本的“纯净度”越高，划分效果越好。对于岩爆样本构成的集合为 S ，其 *Gini* 系数为

$$Gini(S) = 1 - \sum p_j^2 \quad (5)$$

式中： p_j 为岩爆体积等级为 j 的案例出现概率，设 m_j 为在岩爆样本集合 S 中 j 岩爆等级的样本数， s 为集合 S 的样本数，则 $p_j = m_j / s$ 。

CART 算法采用二分递归划分，在内部节点上进行布尔测试，判断条件为真时划为左分支，否则划为右分支。选择的分类属性也即微震参数 x_i ，利用微震参数 x_i 的取值 A (也即分割点) 可将岩爆样本集合 S 划分为 2 个子集 S_1 与 S_2 ，则此次划分的 *Gini* 系数可由下式确定，即

$$Gini_{split}(S, A) = \frac{s_1}{s} Gini(S_1) + \frac{s_2}{s} Gini(S_2) \quad (6)$$

式中： s ， s_1 ， s_2 分别为岩爆样本集合 S ， S_1 ， S_2 的样本数。

通过不断递归划分，决策树的 *Gini* 系数会随着树生长逐渐减小。当 *Gini* 系数无法减小 (即叶节点中的样本数为 1 或者样本属于同一类) 或达到其他停止条件时，算法停止，形成一棵二叉决策树。

需要说明的是，所构建的岩爆数据库微震数据完整，不需考虑数据缺失所引起的影响^[38]，但岩爆等级 I~IV 的样本数分别为 32, 50, 14 和 12，采用上述算法构建的决策树可能会导致类非平衡问题，即部分等级的分类准确率过小。为避免该问题，对上述决策树的生成过程进行改进，并通过构建一系列决策树来实现彼此间的对比分析，最终选出最优结果。首先，以划分后 *Gini* 系数值较小的若干个分割点作为候选分割点，候选分割点个数根据岩爆样本的数量确定，基于候选分割点建立一系列对应的候选

决策树，其次计算各候选决策树对应的总准确率和局部准确率，其中正确率的计算公式如下：

$$P_j = \frac{x_j}{X_j} \quad (7)$$

$$P_{1-J} = \frac{\sum_{j=1}^J x_j}{\sum_{j=1}^J X_j} \quad (8)$$

式中： x_j 为分类结果中 j 等级岩爆案例吻合的个数， J 为岩爆等级数量； X_j 为 j 等级的案例数； P_j 为 j 等级岩爆案例分类正确率， P_{1-J} 为总正确率。

对局部准确率做出一定的限制，一般应大于 50%，以总准确率最大的决策树作为最佳决策树，若总准确率相同时，选择高等级中局部准确率较大的决策树为最佳决策树。

基于上述方法编制相关程序，构建了用于确定各微震参数判别阈值的决策树。限于篇幅，以微震事件数为例，阈值确定的结果如图 13 所示 (注：图中 *samples* 为分割后的剩余案例个数，*value* 为分割后各等级案例分布情况，如 *value* = [29, 6, 0, 0] 表示 I 级案例 29 个，II 级案例 6 个，III 级和 IV 级案例 0 个；*class* 为分类后的岩爆规模等级标识，取值为 P_j 对应的等级 j)。决策树将岩爆样本集数据按照树状结构分成各个分枝，遍历各分枝可确定各微震参数对应的阈值，即从决策树结果的根节点到叶子节点的每一条路径可给出各岩爆体积等级对应的微震参数分布区间，从而可确定岩爆体积等级的单微震参数判据，汇总结果见表 3。

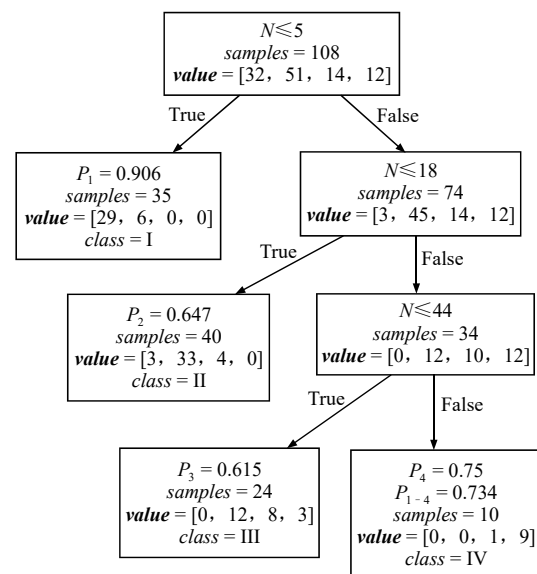


图 13 确定微震事件数判别阈值的决策树

Fig.13 Decision tree for determining the discrimination threshold of the microseismic event number

表 3 岩爆体积等级单微震参数判据结果

Table 3 Criteria for discriminating the rockburst volume class based on single microseismic parameter

岩爆体积等级	N	$\lg(E/J)$	$\lg(V/m^3)$	n/d	$\lg(e/(J \cdot d^{-1}))$	$\lg(v/(m^3 \cdot d^{-1}))$
I	<5	<4	<3.9	<1	<3.3	<3.1
II	[5, 18)	[4, 5.5)	[3.9, 4.69)	[1, 2)	[3.3, 4.6)	[3.1, 3.68)
III	[18, 44)	[5.5, 6.34)	[4.69, 5.1)	[2, 4.44)	4.6, 5.11)	[3.68, 4.2)
IV	[44, 70)	[6.34, 7.09)	[5.1, 5.84)	[4.44, 7.87)	[5.11, 5.89)	[4.2, 4.84)
V	>70	>7.09	>5.84	>7.87	>5.89	>4.84

利用表 3 给出的微震参数判据对岩爆样本库进行验证分析, 判别结果如图 14 所示。总体上, 各微震参数的判别总吻合率在 65%~75%范围。另外, 不难看出, 不同的微震参数具有各自优势的判别区间。例如, 累积微震事件数在判别无岩爆时具有更理想的判别效果, 其判别吻合率可达 90.6%; 累积微震视体积对于小型岩爆的判别效果更好, 其吻合率约为 84.3%; 而微震能量释放率在中等岩爆上的判别效果更好, 其吻合率约为 78.6%; 累积微震事件数、累积微震释放能、微震事件率在判别大型岩爆方面更有效, 判别吻合率均为 83%左右。

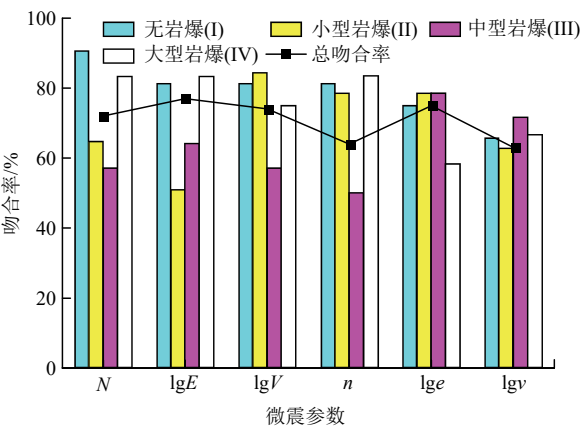


图 14 基于单微震参数判别准则的岩爆体积等级判别结果

Fig.14 The discrimination results of rockburst volume class by the criterion based on single microseismic parameter

5.2 岩爆体积等级的多微震参数综合判别

由上可知, 各微震参数在判别岩爆体积时具有各自不同的优势, 即不同微震参数对于不同等级岩爆的敏感性与区分度有所差异。因此, 采用单微震参数判别岩爆体积等级时存在不确定性, 会导致判别精度低, 且判别的稳定性变差。综合多个微震参数指标有益于提高岩爆体积判别精度与稳定性。

在利用多微震参数去构建岩爆体积判别模型方面存在众多方法。其中, 基于蛛网图的方法简单实用且意义明确, 可将判别结果进行可视化展示, 对

于现场工程施工技术人员而言, 这种图示判别方法的实用性较强, 且操作方便。此外, 蛛网图指标轴可以根据数据收集情况或实际需要进行灵活的调整和扩展, 同时该方法还可与其他判别方法相结合, 构建更加全面和多角度的判别体系, 提高判别结果的准确性和可信度, 因而被广泛应用。依据表 3 所给出的各微震参数判别阈值, 构建了岩爆体积等级的多微震参数综合判别蛛网图, 如图 15 所示。

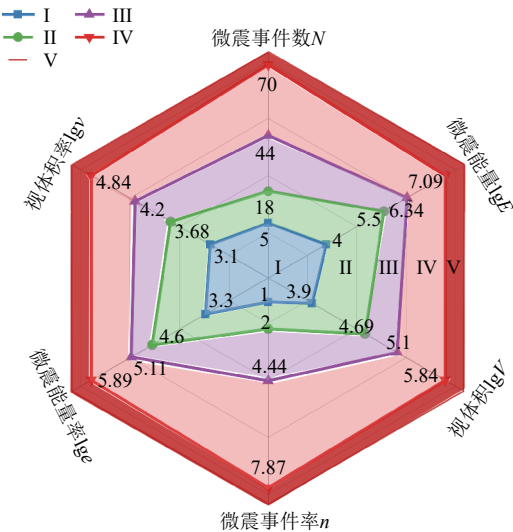


图 15 岩爆体积等级的多微震参数判别蛛网图

Fig.15 Spiderweb diagram for the comprehensive discrimination of rockburst volume calss by multiple microseismic parameters

在实际应用时, 可根据岩爆案例各微震参数在蛛网图中的落点位置确定岩爆体积等级, 但可预料的是这些微震参数取值往往难以落在同一岩爆等级范围内, 此时, 该如何实现岩爆判别? 需要构建一套与之相适应的岩爆蛛网图判别准则, 可利用岩爆样本数据库验证反分析进行确定。通常地, 指向同一等级的指标数越多, 判别结果的不确定性随之下降, 但随着指向同等级微震指标数的增多, 符合条件的案例数亦减少, 使用条件愈发苛刻。以所构建

的锦屏岩爆数据库验证分析结果为例(见图 16), 当指向同等级的微震判别指标为 6 个时, 虽然吻合率(即判别等级与实际岩爆等级一致)可达到 100%, 但案例符合率(即样本库中满足此类判别条件的案例占比)仅为 33%; 指向同等级的微震判别指标为 5 个时, 依然存在吻合率高但符合率较低的问题; 当指向同等级岩爆的微震判别指标从 4 个变为 3 个时, 吻合率下降较小(吻合率约 88%), 但符合率提升较大, 达到 92%。

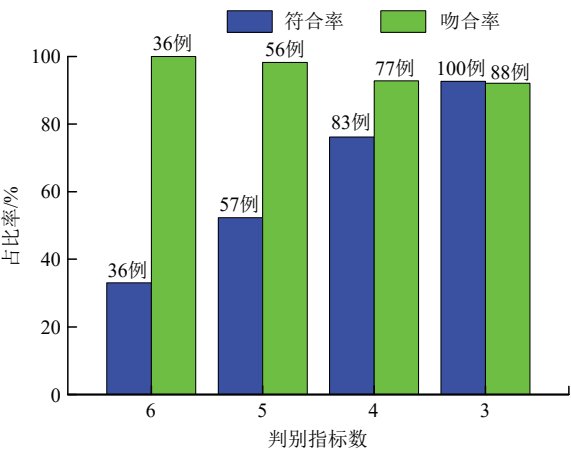


图 16 岩爆体积等级的蛛网图判别结果统计

Fig.16 Statistical results of the discrimination on the rockburst volume class by using spiderweb diagram

根据上述分析结果, 初步给出了岩爆蛛网图判别的一般准则, 如表 4 所示。显而易见, 随着指向

同等级指标数量的增加, 岩爆判别正确率会逐渐提高, 但基于大多数案例符合并吻合的原则可知, 当指向某等级的微震指标数不少于 3 个时, 则可认为该等级为最终的岩爆判别结果, 已能够满足工程应用需求。需要说明的是, 考虑到微震活动的复杂性, 工程中仍存在少部分微震参数取值分布较为离散的岩爆案例, 会导致判别结果存在多解情况。当判别结果为 2 个或以上时(如表 4 所示的[A, A, A, B, B, B], [A, A, B, B, C, C]等少量异常判别组合), 从工程应用偏安全的角度考虑, 倾向于将较高岩爆等级作为判别结果, 取中位或者最高等级作为最终判别结果。

基于上述方法, 对收集所得的 108 个案例进行回溯验证, 判别结果与实际对比分布如图 17 所示。统计表明, 岩爆回判准确率总体达到 85.2%, 显著高于上述单指标判别结果的准确率。这是由于该方法综合了各微震参数的判别优势区间, 且针对微震参数较为离散的案例进行了相应分析与判别约定, 从而提高了综合判别的精度与稳定性。总体上, 所提出的基于蛛网图的岩爆体积等级多微震参数判别方法在绝大多数情况下具有较高的实用性和准确率, 可实现岩爆规模的风险判别。此外, 被误判的岩爆案例大部分属于被高估的情况(其中, 13 例被高估, 3 例被低估), 这与判别规则设置偏安全保守有一定关系。

判别准则			锦屏二级水电站洞室群工程岩爆体积等级判别应用结果			
指向同等级的判别指标个数	判别等级组合	最终判别等级	符合案例数	吻合案例数	符合率/%	吻合率/%
6	[A, A, A, A, A, A]	A	36	36	33	100
5	[A, A, A, A, A, A]; [A, A, A, A, A, B]	A	57	56	53	98
4	[A, A, A, A, A, A]; [A, A, A, A, A, B]; [A, A, A, A, B, C]	A	83	77	77	93
3	[A, A, A, A, A, A]; [A, A, A, A, A, B]; [A, A, A, A, B, C]; [A, A, A, B, B, C]; [A, A, A, B, C, D];	A	92	83	85	90
2 (仅为 2 个)	[A, A, A, B, B, B](异常)	若 A<B, 取 B	8	5	7	63
	[A, A, B, C, D, E](异常)	A	0	0	-	-
	[A, A, B, B, C, D](异常)	若 A<B, 取 B	1	1	1	100
	[A, A, B, B, C, C](异常)	若 A<B<C, 取 B 或 C	7	5	6	71

注: [A, A, A, A, A, A]表示由 6 个微震指标在蛛网图中的落点位置所确定的判别结果组合; A, B, C, D, E 表示岩爆等级且 A<B<C 表示 C 岩爆等级高; 符合率指符合相应判别指标组合案例占总样本集合的比例, 而吻合率是指在符合应用条件案例中判别正确案例所占的比例。

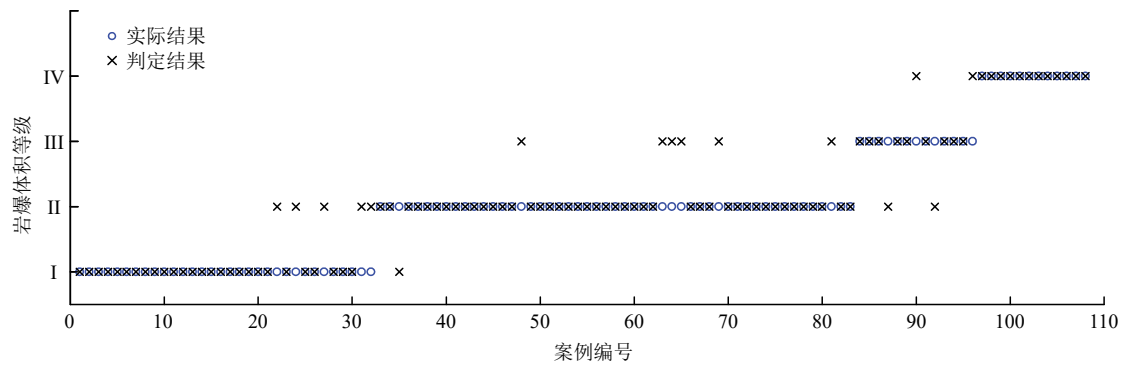


图 17 岩爆样本集判别的验证结果分布

Fig.17 Distribution of the verification results of the discrimination for the rockburst dataset

6 结论与展望

以锦屏二级水电站深埋引(排)水隧洞工程岩爆灾害数据为基础,从岩爆爆坑体积的新视角出发,开展了基于微震信息的岩爆体积分级与判别方法研究。主要结论如下:

(1) 统计结果表明,岩爆孕育过程中微震信息(包括微震事件数、累积微震能量、累积微震视体积、微震事件率、累积微震能量率与累积微震视体积率)与岩爆爆坑体积之间具有一定正相关性,随着微震参数取值的增大,爆坑体积呈现出逐渐增高的趋势,这表明在地下工程施工过程中通过微震监测手段判别或预测潜在岩爆的体积规模是可行的。

(2) 考虑岩爆体积分级的工程实用性与可预测性,利用层次聚类分析方法,提出了一套岩爆体积等级划分数量及相应阈值确定方案,并基于锦屏岩爆案例给出了其应用流程。该方案简便实用且可应用于其他类似工程,能够为岩爆体积预测判别提供重要支撑。

(3) 根据锦屏岩爆案例,利用决策树方法初步确定了基于单微震参数的岩爆体积等级判据,并进一步构建了一种基于多微震参数的岩爆体积等级判别的蛛网图方法,给出了相应的判别准则。该判别方法操作简单,便于现场施工技术人员应用。工程验证结果亦表明该方法具有较高的适用性和准确率,可实现岩爆体积等级的风险判别,能够为针对性的岩爆防控措施制定提供科学依据。

(4) 需要说明的是,随着深部地下工程岩爆实录资料的不断丰富,岩爆体积分级及判别方法的进一步更新与完善将是下一步研究的重点。另外,岩爆体积等级的判别与预测本质上属于一个多分类问

题,有关此类问题模型构建模型的技术方法亦不在少数(如机器学习、非线性数学等),但限于篇幅,本文未进行这方面的分析及比对研究,将在后续研究中加以考虑。

致谢 本文中所涉及的岩爆案例及微震监测数据均来源于中国科学院武汉岩土力学研究所锦屏水电站微震监测项目部。

参考文献(References):

[1] 冯夏庭. 岩爆孕育过程的机制、预警与动态调控[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1 - 575.(FENG Xiating. Mechanism, warning and dynamic control of rockburst development processes[M]. Beijing: Science Press, 2013: 1 - 575.(in Chinese))

[2] LIU G F, FENG X T, FENG G L, et al. A method for dynamic risk assessment and management of rockbursts in drill and blast tunnels[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(8): 3 257 - 3 279.

[3] LIU G F, JIANG Q, FENG G L, et al. Microseismicity-based method for the dynamic estimation of the potential rockburst scale during tunnel excavation[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(5): 3 605 - 3 628.

[4] 王兰生, 李天斌, 徐进, 等. 二郎山公路隧道岩爆及岩爆烈度分级[J]. 公路, 1999, (2): 41 - 45.(WANG Lansheng, LI Tianbin, XU Jin, et al. Classification of rockburst's intensity and rockburst in Erlang Mountain Highway Tunnel[J]. Highway, 1999, (2): 41 - 45.(in Chinese))

[5] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50287—2008 水力发电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50287 - 2008 Code for geological investigation on hydropower engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.(in Chinese))

[6] FENG X T. Rockburst: mechanisms, monitoring, warning and

- mitigation[M]. Oxford, England; Butterworth-Heinemann, 2018: 1 – 556
- [7] LEŚNIAK A, ISAKOW Z. Space-time clustering of seismic events and hazard assessment in the Zabrze-Bielszowice coal mine, Poland[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(5): 918 – 928.
- [8] SRINIVASAN C, ARORA S K, BENADY S. Precursory monitoring of impending rockbursts in Kolar gold mines from microseismic emissions at deeper levels[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(7): 941 – 948.
- [9] TANG C A, WANG J M, ZHANG J J. Preliminary engineering application of microseismic monitoring technique to rockburst prediction in tunneling of Jinping II project[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2(3): 193 – 208.
- [10] XUN W, LI T B, DAI F, et al. Microseismic monitoring of strainburst activities in deep tunnels at the Jinping II hydropower station, China[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(3): 981 – 1 000.
- [11] 冯夏庭, 肖亚勋, 丰光亮, 等. 岩爆孕育过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 649 – 673.(FENG Xiating, XIAO Yaxun, FENG Guangliang, et al. Study on the development process of rockbursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 649 – 673.(in Chinese))
- [12] FENG G L, FENG X T, XIAO Y X, et al. Characteristic microseismicity during the development process of intermittent rockburst in a deep railway Tunnel[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 124: 104135.
- [13] MA C C, LI T B, ZHANG H. Microseismic and precursor analysis of high-stress hazards in tunnels: A case comparison of rockburst and fall of Ground[J]. Engineering Geology, 2020, 265: 105435.
- [14] 戴峰, 李彪, 徐奴文, 等. 白鹤滩水电站地下厂房开挖过程微震特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 692 – 703.(DAI Feng, LI Biao, XU Nuwen, et al. Microseismic characteristic analysis of underground powerhouse at Baihetan hydropower station subjected to excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 692 – 703.(in Chinese))
- [15] YU Y, FENG X T, XU C J, et al. Spatial fractal structure of microseismic events for different types of rockburst in deeply buried tunnels[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(4): 04020025.
- [16] 谢和平, PARISEAU W G. 岩爆的分形特征和机制[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(1): 28 – 37.(XIE Heping, PARISEAU W G. Fractal characteristics and mechanism of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(1): 28 – 37.(in Chinese))
- [17] FENG G L, FENG X T, CHEN B R, et al. A microseismic method for dynamic warning of rockburst development processes in tunnels[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(5): 2 061 – 2 076.
- [18] WANG J X., TANG S B, HEAP M J, et al. An Auto-detection network to provide an automated real-time early warning of rock engineering hazards using microseismic Monitoring[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 140: 104685.
- [19] MAO H Y, XU N W, LI X, et al. Analysis of rockburst mechanism and warning based on microseismic moment tensors and dynamic Bayesian Networks[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(10): 2 521 – 2 538.
- [20] HE S Q, SONG D Z, MITRI H, et al. Integrated rockburst early warning model based on fuzzy comprehensive evaluation Method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 142: 104767.
- [21] YIN X, LIU Q S, HUANG X, et al. Real-time prediction of rockburst intensity using an integrated CNN-Adam-BO algorithm based on microseismic data and its engineering Application[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 117: 104133.
- [22] 周春宏. 雅砻江锦屏二级水电站可行性研究报告[R]. 杭州: 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 2005.(ZHOU Chunhong. Feasibility of Jinping – II hydropower station on the Yalong River[R]. Hangzhou: HydroChina Huadong Engineering Corporation, 2005.(in Chinese))
- [23] 梁鹏, 张艳博, 孙林, 等. 基于 CT 扫描的巷道岩爆洞壁破坏特征实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增 1): 2 612 – 2 622.(LIANG Peng, ZHANG Yanbo, SUN Lin, et al. Experimental study on damage characteristics of tunnel wall after rockburst based on CT scanning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Supp.1): 2 612 – 2 622.(in Chinese))
- [24] 刘国锋, 李志强, 王晓明, 等. 深埋隧道岩爆规模现场快速估算方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(1): 57 – 64.(LIU Guofeng, LI Zhiqiang, WANG Xiaoming, et al. Field rapid estimation method for the scale of rockburst in deep tunnels[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(1): 57 – 64.(in Chinese))
- [25] ZHANG C Q, FENG X T, ZHOU H. Estimation of in situ stress along deep tunnels buried in complex geological conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 52: 139 – 162.
- [26] CHEN B R, FENG X T, LI Q P, et al. Rock burst intensity classification based on the radiated energy with damage intensity at Jinping II

- hydropower station, China[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(1): 289 – 303.
- [27] FENG G L, LIN M Q, YU Y, et al. A microseismicity-based method of rockburst intensity warning in deep tunnels in the initial period of microseismic monitoring[J]. Energies, 2020, 13(11): 2 698.
- [28] 李 桐, 冯夏庭, 王 睿, 等. 深埋隧道岩爆位置偏转及其微震活动特征[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2 847 – 2 854.(LI Tong, FENG Xiating, WANG Rui, et al. Characteristics of rockburst location deflection and its microseismic activities in a deep tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7): 2 847 – 2 854.(in Chinese))
- [29] 张 航. 基于深度学习的隧道微震信号处理及岩爆智能预警研究[博士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2020.(ZHANG Hang. Research on microseismic signal processing of tunnel and intelligent early warning of rockburst based on deep learning[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.(in Chinese))
- [30] 吴忠广. 深埋隧道硬岩灾变风险评估方法研究[博士学位论文][D]. 北京: 北京科技大学, 2021.(WU Zhongguang. Research on risk assessment method for hard rock catastrophe in deep tunnels[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.(in Chinese))
- [31] YU Y, GENG D X, TONG L H, et al. Time fractal behavior of microseismic events for different intensities of immediate rock bursts[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(7): 06018016.
- [32] FENG X T, YU Y, FENG G L, et al. Fractal behaviour of the microseismic energy associated with immediate rockbursts in deep, hard rock tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 98 – 107.
- [33] Everitt Brian S, Landau Sabine, Leese Morven. Cluster analysis[M]. Oxford, UK: A Hodder Arnold Publication, 2001: 1 – 320.
- [34] 范 涛, 李 萍, 张幼振, 等. 基于聚类的煤矿井下钻孔瞬变电磁异常响应边界成像方法[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(7): 63 – 69.(FAN Tao, LI Ping, ZHANG Youzhen, et al. Imaging method of borehole transient electromagnetic anomaly response boundary in coal mines based on clustering[J]. Coal Geology and Exploration, 2022, 50(7): 63 – 69.(in Chinese))
- [35] SHI C M, WEI B T, WEI S L, et al. A quantitative discriminant method of elbow point for the optimal number of clusters in clustering Algorithm: 1[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2021, 2021(1): 1 – 16.
- [36] QUINLAN J R. Simplifying decision trees[J]. International Journal of Man-Machine Studies, 1987, 27(3): 221 – 234.
- [37] BREIMAN L, FRIEDMAN J H, OISHEN R A, et al. Classification and regression trees[M]. Monterey, California, U. S. A.: Wadsworth International Group, 1984: 1 – 358.
- [38] 刘国锋, 杜程浩, 丰光亮, 等. 基于大样本不完整数据的岩爆致因特征及预测模型[J]. 地球科学, 2023, 48(5): 1 755 – 1 768.(LIU Guofeng, DU Chenghao, FENG Guangliang, et al. Causative characteristics and prediction model of rockburst based on large and incomplete data set[J]. Earth Science, 2023, 48(5): 1 755 – 1 768.(in Chinese))

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章:

- (1) 基于循环荷载损伤定量控制的岩石 CWFS 改进模型研究;
- (2) 三向应力下花岗岩水力剪切和渗流试验研究;
- (3) 岩质边坡阶梯状破坏及岩桥破裂机制研究;
- (4) 基于 LSSVR 与灰色理论的急倾斜巨厚煤层群开采冒落高度与时滞特征研究;
- (5) 基于物理过程不确定性的降雨诱发浅层滑坡易发性快速区划: GIS-FORM 技术开发与应用;
- (6) 煤岩界面粗糙度对超低摩擦效应影响研究;
- (7) 不同围压与水压下红砂岩三轴剪切 – 渗流试验研究;
- (8) 考虑浆液渗流 – 岩体变形耦合作用的裂隙注浆模拟试验系统研制与应用。

土工基础