

地下矿山微震响应空间探测概率特征与数据补偿方法

王常彬¹, 曹安业², SI Guangyao³, 王冰⁴, 杨旭⁵, 张宁², 岳阳²

(1. 中国矿业大学 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 澳大利亚新南威尔士大学 矿物与能源资源工程学院, 澳大利亚 悉尼 2035; 4. 陕西彬长小庄矿业有限公司, 陕西 西安 710065; 5. 中国矿业大学 计算机科学与技术学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 深部复杂地质环境高强度开采造成煤岩动力灾害频发, 但地下矿山微震监测台网在数据探测完整性仍存在不足, 极大增加了灾害预警的误报漏报风险。因此, 将地震学中基于概率的完整性震级评价方法 (PMC) 应用于某井工煤矿, 分析了各微震台站的震动波拾波能力, 探究了台网对采场微震响应探测概率的空间分布特征, 并提出了基于探测概率的微震活动补偿方法。结果表明: 相比于地震学中经典的最小完整性震级评价, PMC 具有不依赖古登堡-里克特关系、计算简单、评价精度高的特点, 更适用于地下矿山台网布置受限、震源来源复杂、震动波高噪音、强衰减的微震监测环境。微震台站对震动波的拾波能力受其所在区域采动煤岩体环境影响, 对不同距离、不同能级微震事件的拾波概率具有显著差异: 震源与台站距离越短、震源能级越高, 台站对震动波到时标定的概率则越大。微震台网对微震事件的探测能力与震源能级直接相关, 探测概率受台站布置影响在采场空间呈现高度非均匀分布特征。针对微震台网探测数据不完整的问题, 提出了基于探测概率的微震活动补偿方法, 还原了超前工作面煤体微震能级与频次的空间分布特征, 其高能释放区域所在超前巷道位置与动力显现频发区域基本吻合, 验证了采场微震数据补偿结果的有效性。研究成果可为地下矿山高质量微震监测与高效灾害防治提供理论与数据基础。

关键词: 煤岩动力灾害; 探测概率; 微震监测; 完整性震级; 微震数据集完整性

中图分类号: TD313; P631.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)05-2413-10

Characteristics of spatial detection capability for seismic response and data compensation method in underground mines

WANG Changbin¹, CAO Anye², SI Guangyao³, WANG Bing⁴, YANG Xu⁵, ZHANG Ning², YUE Yang²

(1. State Key Laboratory of Coal Exploration and Intelligent Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Minerals and Energy Resources Engineering, University of New South Wales, Sydney 2035, Australia; 4. Shaanxi Binchang Xiaozhuang Mining Co., Ltd., Xi'an 710065, China; 5. School of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Coal and rock dynamic hazards frequently occur in deep and complex geological environments undergoing intensive mining activities. Nevertheless, the seismic monitoring in underground mines still has deficiencies in data integrity, which significantly increases the erroneous or missed hazard pre-warnings. Therefore, this study introduces the Probability-

收稿日期: 2024-07-01 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0759

基金项目: 江苏省创新支撑计划国际科技合作/港澳台科技合作-重点国别产业技术研发合作资助项目 (BZ2023050); 国家自然科学基金资助项目 (52304105, 52227901)

作者简介: 王常彬 (1991—), 男, 辽宁沈阳人, 助理研究员, 硕士生导师, 博士。E-mail: changbin.wang@cumt.edu.cn

通讯作者: 曹安业 (1982—), 男, 江苏盐城人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: caoanye@163.com

引用格式: 王常彬, 曹安业, SI Guangyao, 等. 地下矿山微震响应空间探测概率特征与数据补偿方法[J]. 煤炭学报, 2025, 50(5): 2413-2422.

WANG Changbin, CAO Anye, SI Guangyao, et al. Characteristics of spatial detection capability for seismic response and data compensation method in underground mines[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2413-2422.



移动阅读

based Magnitude of Completeness (PMC) method in an underground coal mine. PMC method assesses the seismic wave picking capabilities of geophones, explores the spatial characteristics of seismic event detection probability within the seismic network, and proposes a detection probability-based seismic compensation method. The results show that: PMC offers advantages over the classic Minimum Magnitude of Completeness approach in seismology, including independence from the Gutenberg-Richter law, simpler computation, and higher evaluation accuracy. These attributes make PMC particularly suitable for seismic monitoring in underground mines constrained by network layout, complex seismic sources, significant signal noise, and attenuation. The picking capabilities of geophones for seismic waves are influenced by local coal and rock environments, leading to substantial variations in picking probabilities for seismic events of different distances and energy levels: The shorter the distance between the seismic source and the geophone, and the higher the source energy level, the greater the probability that the geophone can identify the arrival time of the seismic wave. The detection capability of the seismic network is directly linked to the energy levels of seismic events, resulting in a highly heterogeneous spatial distribution within the mining area due to geophone layout. By applying the detection probability-based seismic compensation method, the study reconstructs the spatial distribution characteristics of seismic energy levels and frequencies ahead of the longwall face, revealing a close correspondence between areas of high-energy release and locations prone to dynamic failures, which validates the seismic compensation results. The research outcomes contribute theoretical and data foundations for enhancing the quality of seismic monitoring and improving hazard early-warning in underground mines.

Key words: coal and rock dynamic hazards; detection probability; seismic monitoring; magnitude of completeness; seismic data integrity

0 引 言

随着我国地下矿山生产重心逐渐转向深部,由深部复杂地质环境和高强度开采造成的岩爆、矿震、冲击地压等煤岩动力灾害频发,严重威胁矿井安全高效生产^[1-2]。作为最主要的煤岩动力灾害监测预警手段,矿山微震监测技术近年来得到了长足进步^[3-4]。然而,深部复杂多变的采场环境使微震监测数据质量及可靠性仍存在较大不足,极大增加了煤岩动力灾害的误报、漏报风险^[5-6]。如何全面、准确地获取微震监测信息是实现煤岩动力灾害灾源精准辨识的关键与前提。

微震数据探测完整性是考量微震监测数据质量的关键指标,定义为微震台网探测到的微震事件数量与实际开采过程中产生的微震事件数量之比^[7-8]。台网的微震数据探测完整性越高,微震数据集越能反映采场煤岩体真实的破裂演化过程,基于微震监测的灾害预警效能就越高。然而,研究表明在超前工作面区域、采空区、断层构造等区域,微震数据探测完整性最低仅有约 50%^[9]。这种局部缺失大量微震数据的现象将极易导致以能量-频次为主的微震分析出现严重偏差造成预警失败^[10]。由于微震台网监测数据完整性偏低,造成煤岩动力灾害风险区域未探测到大量的微震活动积聚,预警准确性大幅降低。

我国矿山微震学专家对台网灵敏度、监测范围和精度已开展了一定研究,如陈法兵等^[11]利用广义逆奇

异值分解技术计算震源参数精度的参量空间协方差矩阵,从而实现微震台网震源参数监测精度评价;巩思园等^[12-13]基于遗传算法建立了微震台网优化布置的模型,并结合煤矿条件下提出最优通道个数原则,显著提高了震源监测精度;苗勇刚等^[14]利用全数字微震监测研究了某铜矿监测精度与灵敏度,揭示了矿山微震监测的质量分布规律;崔宇等^[15]利用主成分分析法构建了微震监测台网综合优化分析模型,选取 8 个指标实现了对微震台网监测能力进行了全面评价。然而,矿山微震监测在数据探测完整性方面仍处于初步探索阶段,亟待对其进行更深入研究,对进一步提高微震预警准确率至关重要。

地震学领域学者对地震台网的天然地震探测完整性研究为探究矿山微震数据完整性提供了宝贵借鉴。其中,最常用的方法为最小完整性震级评价法,即基于天然地震的古登堡-里克特关系,将地震数量和震级偏离幂律函数关系的临界点作为评价地震台网监测数据完整性的评价指标,称为最小完整性震级^[16-17]。然而,最小完整性震级评价法并不适用于地下矿山微震监测数据,原因有:①古登堡-里克特关系是基于单一大型地质构造运动引发的天然地震所提出,不符合地下矿山微震活动的统计学特征;②最小完整性震级评价法需先将数据集内少量非天然地震与噪音信号剔除,但地下矿山微震数据中包含大量由开采活动引起的爆破、钻孔施工等噪音和人为微震事

件, 筛选工作量巨大; ③ 受地下矿山微震台站布局限制, 台网对采场不同区域的监测能力差异巨大, 仅用最小完整性震级这一单一数字指标难以描述微震完整性的空间分布特征。地下矿山微震监测人为干扰更剧烈、信号感知要求更高、台网布置限制更多, 因此在不筛选信号的基础上实现对微震数据完整性的空间特征刻画, 是准确评价地下矿山微震数据完整性特征的关键。

近年来, 由 SCHORLEMMER 等^[18]提出的基于概率的完整性震级评价方法 (以下简称 PMC) 因具备不依赖古登堡-里克特关系、计算简单、评价精度高的特点逐渐被地震学领域学者采纳。PMC 方法是一种统计学方法, 利用历史地震数据分析台网各台站对不同能级与震源距地震的震动波拾波能力, 实现对台网对不同能级地震定位概率的计算。由于 PMC 方法是基于地震能级和震源距离进行分析, 既不受微震活动离散性影响, 也不受震源类型的约束, 可实现对任意研究区域的探测概率评价。目前, 国内学者已基于 PMC 方法对河南、广西、上海、长三角等地区的地震台网探测概率进行了分析, 有效探测出了台网监测能力薄弱区, 为优化台网布置、提高地震数据集完整性提供了有力参考^[19-22]。由于 PMC 方法的优势十分适合地下矿山微震台网的监测数据特点, 将 PMC 方法应用于地下矿山微震数据完整性研究, 对提升微震监测质量、提高煤岩动力灾害预警效能具有重要意义。

因此, 笔者利用地震学中基于概率的完整性震级评价方法开展地下矿山微震监测系统探测能力研究。以陕西某冲击地压矿井回采工作面 1 个月的微震监测数据为研究对象, 分析各微震台站的震动波拾波能力, 探究台网对采场微震响应探测概率的空间分布特征。在此基础上, 提出基于探测概率的微震活动补偿方法, 还原采动煤岩体真实微震响应特征, 为地下矿山高质量微震监测与高效灾害防治提供理论与数据基础。

1 地下矿山基于概率的完整性震级评价方法 (PMC)

1.1 微震监测台站拾波概率 (P_D)

地下矿山微震台网中每个台站的拾波能力都与震动波信号强度、附近的地质条件和采掘扰动密切相关。台站成功感知微震活动意味着该台站通道接收的震动波波形足够清晰, 并用于到时拾取以计算震源位置和破裂参数。通常来说, 距离高能级微震事件较近的台站接收到的地震波受传播路径内地质条件干扰因素较少, 信号清晰度更高, 则用于到时标定的概

率较大; 若台站距离微震事件较远且震源能级偏低, 其接收的震动波强度因长距离传播而剧烈衰减, 同时较长的传播路径使其更容易受到地质条件影响, 造成波形不清晰、信噪比偏低, 则不会优先考虑用于到时标定。因此, 微震台网台站的拾波能力可以通过采场历史微震数据的震源与台站距离和震源能量的关系来表示, 称为 D-M 图。图 1 为基于某地下煤矿微震台站 3 个月监测数据的 D-M 图示意, 其中绿色点表示用该台站拾波的微震事件, 红色点表示未用该台站拾波的微震事件。若 D-M 图某区域绿色点较多, 则代表台站拾取该区域对应台站-震源距离和能级的微震事件波形到时的能力较强; 若某区域红点较多, 代表台站拾取该区域对应台站-震源距离和能级微震事件的波形到时较为困难, 微震信号拾取能力较弱。

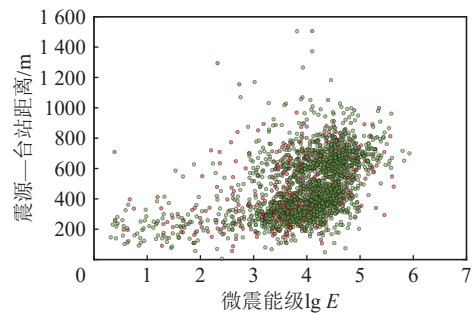


图 1 某地下煤矿微震台站 D-M 示意

Fig.1 D-M of a geophone in an underground coal mine

为量化台站对不同台站-震源距离和能级微震事件的拾波能力, 需要统一 D-M 图中横纵坐标单位。在地下矿山环境中, 震源能级大小 ($\lg E$)、震动波质点峰值速度 (r) 和台站-震源距离 (R) 之间的关系可以表示为

$$\lg E = c_1 \lg r + c_2 \lg R + c_3 \quad (1)$$

式中: c_1 、 c_2 和 c_3 为经现场观测确定的常数; R 为台站-震源距离, m; r 为震动波质点峰值速度, m/s。假设有 2 个不同能级微震事件被同一台站感知, 台站-震源距离不同但 r 相同, 则这 2 个微震事件的能级差异可用下式计算^[18]:

$$\Delta \lg E^* = c_2 |\lg R_1 - \lg R_2| \quad (2)$$

式中: R_1 、 R_2 为台站距离 2 个微震事件距离, m。

式 (2) 建立了一种能级差与震源距的转换关系, 这表明 D-M 图中 2 点在纵向的距离可以用能级表示。

假设只考虑震源-台站距离的变化对于微震能级的影响, 则根据欧几里得几何空间关系, 得到图 2 中以能级表示的 2 个微震事件平面距离 R_M :

$$R_M = \sqrt{\Delta \lg E^2 + \Delta \lg E^{*2}} \quad (3)$$

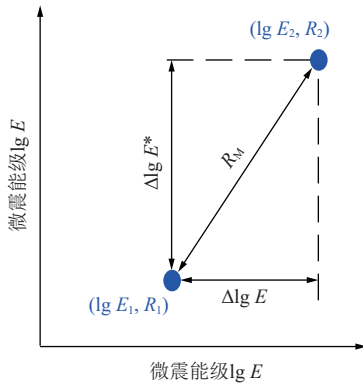


图2 纵坐标单位转换为微震能级后 D-M 图中
2 点距离关系示意

Fig.2 Distance relationship between two dots in D-M map after converting the y-axis unit to energy magnitude

$$\Delta \lg E = \lg E_1 - \lg E_2 \quad (4)$$

式中: $\lg E_1$ 与 $\lg E_2$ 分别为 2 个微震事件的能级。

随后, 将 D-M 图进行网格化处理。对于任意网格点 i , 统计其给定搜索半径范围内已拾波微震事件 (绿点) 与未拾波微震事件 (红点) 数量, 以用于计算台站对于网格点 i 对应的台站-震源距离 R_i 和能级 $\lg E_i$ 微震事件的拾波概率 $P_D(\lg E_i, R_i)$ 。假设在给定搜索半径范围内已被拾波的微震事件数量为 N_+ , 未被拾波微震事件数量为 N_- , 则 $P_D(\lg E_i, R_i)$ 可表示为

$$P_D(\lg E_i, R_i) = \frac{N_+}{N_+ + N_-} \quad (5)$$

对于 D-M 图中没有任何微震数据点的区域, P_D 为 0。由于 D-M 图中的微震事件呈高度离散非均匀分布, 需对 P_D 进行进一步限定: ① 对于具有相同震源距的 2 点, 较小能级点的 P_D 不应大于较高能级点; ② 对于具有相同能级的 2 点, 具有较大震源距的点其 P_D 不应大于具有较小震源距的点。图 3 为某地下煤矿微震台站拾波能力分布示意。可以看到 P_D 分布遵循震源-台站距离越短、震源能级越高, 震动波到时标定概率越大的原则, 可准确量化描述微震台网网站的震动波拾波概率。

1.2 微震活动台网探测概率 (Q)

在得到各微震监测台站的拾波概率后, 便可计算微震台网对采场微震事件的探测概率。根据 Geiger 定位算法, 至少 4 个台站标定了震动波到时才能对震源进行定位^[23]。因此, 假设在采场内 (x, y) 处发生一能级为 $\lg E$ 的微震事件, 微震台网捕获该微震事件的概率 $Q(x, y, \lg E)$ 等于该微震事件被 4 个及以上台站拾波的概率, 也等于 1 减去该微震事件被 3 个及以下台站拾波的概率:

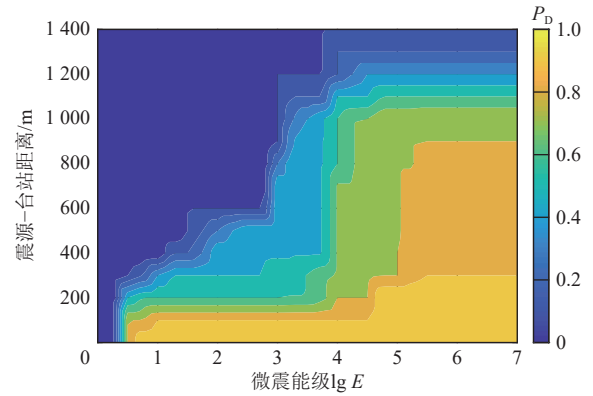


图3 某地下煤矿微震台站拾波概率 (P_D) 分布示意

Fig.3 Contour map of wave detecting capacity for a geophone (P_D) in seismic network in underground mines

$$Q(x, y, \lg E) = 1 - \sum_{n=0}^3 Q^n \quad (6)$$

式中: Q^n 为由 n 个台站探测到微震事件的概率。假设台网中共有 m 个台站, 则计算 Q^n 的台站组合数量为

$$C_m^n = \frac{m!}{n!(m-n)!} \quad (7)$$

对于 C_m^n 个组合中的第 k 个台站组合, 其探测到微震事件的概率 $Q^{n(k)}$ 可计算为

$$Q^{n(k)} = \prod_{p=1}^n P_D^{G(p)} \prod_{q=1}^{m-n} (1 - P_D^{\bar{G}(q)}) \quad (8)$$

式中: $G(p)$ 为第 k 个台站组合中第 p 个台站; $P_D^{G(p)}$ 为第 p 个台站对于微震事件的拾波概率; $\bar{G}(q)$ 为不在第 k 个台站组合中的第 q 个台站。因此, Q^n 等于 C_m^n 个台站组合的 $Q^{n(k)}$ 加和:

$$Q^n = \sum_{k=1}^{C_m^n} Q^{n(k)} \quad (9)$$

将采场区域进行网格划分, 然后根据式 (6) 对每个网格点、每个能级的台网探测概率进行计算, 便可得到如图 4 所示的微震活动台网探测概率分布云。由此可以看出, 相较于基于古登堡-里克特关系的单一最小完整性震级指标评价方法, PMC 法可得到采场任意区域及任意能级微震活动探测概率, 实现了对地下矿山微震响应全域探测概率特征的准确描述。

1.3 基于 PMC 的采场微震活动补偿方法

在基于 PMC 方法得到微震台网对不同能级微震事件的探测概率分布后, 可进一步补偿采场真实发生的微震频次和能量, 推测采动煤岩体真实微震响应特征。假设在某区域探测到 z 个微震事件, 能级分别为 $\lg E_1, \lg E_2, \dots, \lg E_z$, 其对应的台网探测概率为 $Q(x_1, y_1, \lg E_1), Q(x_2, y_2, \lg E_2), \dots, Q(x_z, y_z, \lg E_z)$, 则推

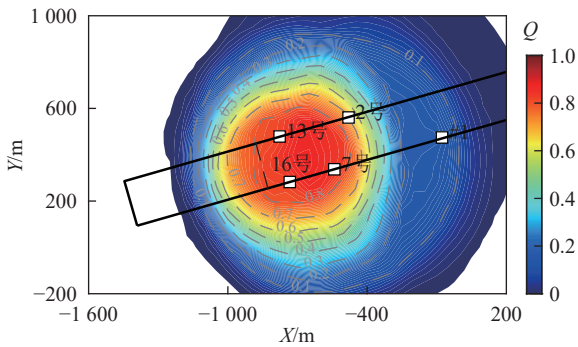


图 4 某地下煤矿微震台网对工作面区域发生的 $\lg E=3$ 能级事件探测概率分布示意

Fig.4 Spatial distribution of detection capability of a seismic network for seismic events with $\lg E=3$ in a longwall at an underground coal mine

断出实际发生在该网格区域的微震事件理论数量为

$$z' = 1/Q(x_1, y_1, \lg E_1) + 1/Q(x_2, y_2, \lg E_2) + \dots + 1/Q(x_z, y_z, \lg E_z) \quad (10)$$

未被监测到的微震事件数量为 $z' - z$ 。理论推测的微震事件能量之和可以计算为

$$E_{\text{sum}} = E_1/Q(x_1, y_1, \lg E_1) + E_2/Q(x_2, y_2, \lg E_2) + \dots + E_z/Q(x_z, y_z, \lg E_z) \quad (11)$$

式中: E_1, E_2, \dots, E_z 为第 1 个, 第 2 个 \dots , 第 z 个微震事件的能量, J 。

例如, 在采场某网格区域中检测到 10 个能级为 3, 即能量为 1 kJ 的微震事件, 且它们对应的探测概率 Q 为 0.5, 则可推断该网格区域实际发生的微震事件频次与能量为 20 和 20 kJ。通过对采场进行网格划分并根据式 (10)、式 (11) 逐个推算每个网格区域内的微震活动频次和能量, 实现采场全域煤岩体真实微震响应的精细化表征。需要说明的是, 该补偿方法聚焦于可对采场或巷道围岩构成影响的微震活动, 因此对过小能量的微震事件不做分析, 一方面其对采场或巷道围

岩的作用与参考意义过小, 另一方面其较低的探测概率可能导致某一区域微震活动在补偿后出现频次突然增高的不合理现象。此外, 对于微震台网没有探测到微震活动的区域, PMC 方法无法进行微震活动补偿。

2 工程实践

2.1 工程概况

以某地下煤矿为研究对象, 探究工作面实际开采过程中的微震台网探测概率特征。该矿位于陕西省黄陇侏罗纪煤田彬长矿区, 开采煤层为近水平煤层, 平均厚度为 16.25 m。研究对象 102 工作面为所在盘区的第 2 个工作面, 尺寸为 180 m \times 1 790 m, 平均开采深度为 700 m, 采用综采放顶煤开采工艺。102 工作面北部为 40 m 区段煤柱与 103 工作面回风巷, 南部为 75 m 区段隔离煤柱与 101 工作面采空区, 东部与西部为盘区大巷, 其四邻关系如图 5 所示。

由于开采深度较大、煤岩层具有强冲击倾向性、且煤层顶板为多层复合厚硬砂岩层, 该矿具有较高的冲击危险性。在 2022 年 9 月期间, 共发生动力显现事件 4 次, 其中 3 次发生在 102 回风巷超前工作面 50 m 范围内, 1 次发生于 102 运输巷侧的 103 回风巷, 发生位置超前 102 工作面约 100 m, 造成底鼓、锚网开裂等破坏, 严重影响了矿井正常安全生产。

该矿配备了波兰 SOS 微震监测系统对采动煤岩体破裂损伤情况进行实时观测。微震台网在 102 工作面所在盘区布置有 32 个单分量台站, 台站响应频率为 1~600 Hz, 采样率为 500 Hz, 最大数据传输速率为 1 MB/s。102 工作面回采期间, 有 4 个台站布置于超前工作面两巷并随工作面推进而移动, 其余台站则固定布置于工作面周围巷道进行探测。对 102 工作面于 2022-08-09—2022-09-11 期间台网监测到的 3 995 个微震事件进行分析, 台站分布及其可用情况

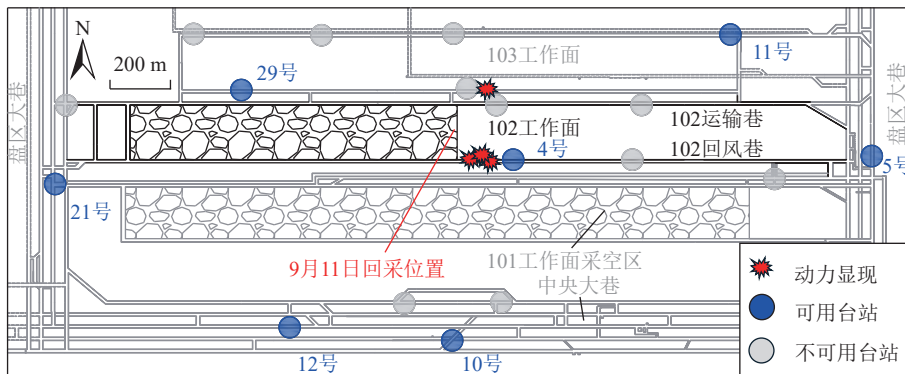


图 5 102 工作面四邻关系示意

Fig.5 Longwall (LW) 102 layout and surrounding conditions

如图 5 所示。在此期间,超前工作面两巷中布置的 13、16 和 22 号台站受采动影响导致噪音较大而难以用于到时标定,只有 4 号台站可稳定用于震源定位,同时布置于工作面周围巷道的台站也只有部分可用,因此 102 工作面回采期间微震活动的准确探测难度极大增加。

图 6 为 102 工作面在 2023-08-09—2023-09-11 期间微震事件频次、累计微震事件数量与能级的关系曲线。若基于古登堡-里克特关系,则根据最大曲率法可确定微震事件频次与能级关系曲线中峰值点对应的能级 $\lg E=3$ 为最小完整性震级(如图 6 黑色曲线及峰值红点),这表明 $\lg E \geq 3$ 的微震事件理论上可被台网完全探测。然而,由图中蓝色曲线可知,累计微震事件数量与能级关系曲线在 $\lg E \geq 3$ 能级范围呈内凹状,并非典型古登堡-里克特关系中的直线。出现这种现象的原因有:① 102 工作面煤岩体的微震响应不严格遵循古登堡-里克特关系;② 102 工作面微震数据集在 $\lg E \geq 3$ 的能级范围均存在不同程度的数据缺失。因此,相比自然地震的古登堡-里克特关系,地下矿山微震数据集的统计学关系更为复杂,且存在大量未探测数据的可能。

2.2 微震监测台站拾波概率特征

根据 1.1 节所述方法对 102 工作面回采期间各台

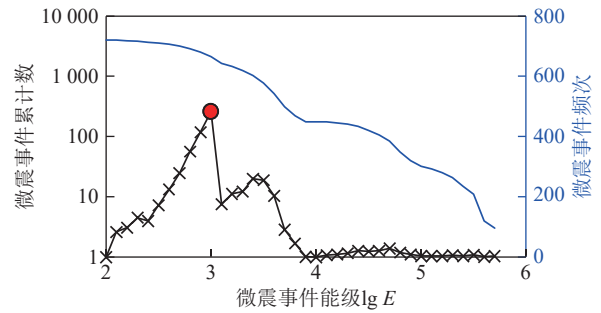


图 6 102 工作面微震事件能级与累计数及事件频次关系
Fig.6 Relationship of energy levels with cumulative and non-cumulative numbers of seismic events in LW102

站拾波概率进行计算。根据式 (1),对该工作面在 2023-08-09—2023-09-11 期间微震事件能级、质点峰值速度和震源距进行拟合分析,最终得到常数 $c_2=2.16$ 。图 7 为 102 工作面回采期间各可用台站的拾波概率特征情况。由图 7 可知,复杂地下采场环境导致不同位置台站的拾波能力具有明显差异。在 102 工作面回采期间,4、5 和 10 号台站具有较好的震动波拾波性能。5 号台站对于发生在距离 1 500 m 范围内 $\lg E \geq 2$ 能级事件的 P_D 均达 0.9 以上,表明该台站几乎可监测到 102 工作面全域的煤岩体微震响应,是主力监测台站。10 号台站的震动波拾波能力稍逊于 5 号台站,虽然对 $\lg E \geq 2$ 能级事件的 P_D 同样可达 0.9

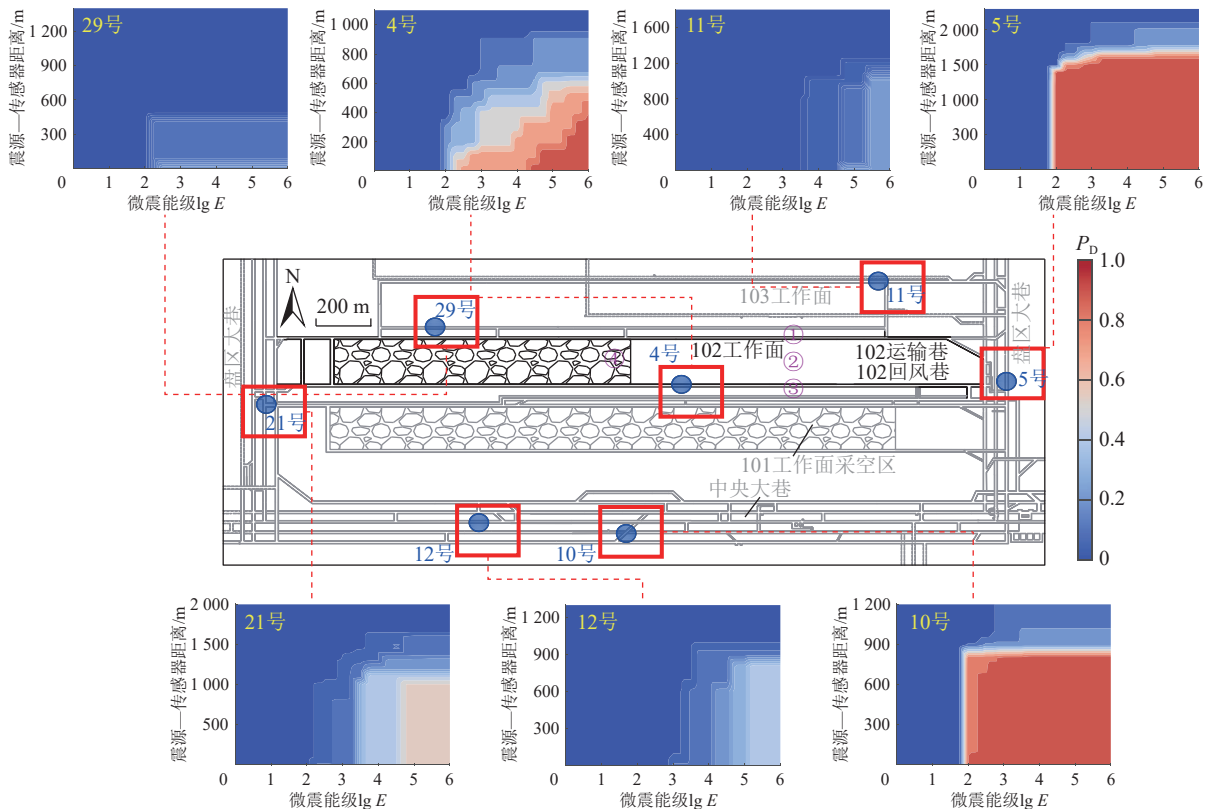


图 7 102 工作面附近各微震台站震动波拾波概率情况

Fig.7 Seismic wave detecting capacity for geophones around LW102

以上,但探测范围缩小至约 850 m,这与 101 工作面采空区导致的震动波信号衰减及复杂波速场有关。4 号台站虽然距 102 工作面最近,但相比于 5 和 10 号台站更易受采掘扰动产生的噪声影响,导致台站的拾波能力受震动波传播距离影响较大。其中, $\lg E=4\sim 6$ 能级微震事件的可拾波距离为 0~900 m,对应的拾波概率 P_D 由 0.9 下降到 0.2 左右,而 $\lg E=2\sim 4$ 能级微震事件的可拾波距离为 0~800 m,对应拾波概率 P_D 由 0.7 下降到 0.1 左右。

与 4、5 和 10 号台站相比,位于中央大巷及盘区大巷的 21、12 号台站拾波能力出现了大幅下降。其中,21 号台站对于发生在约 1 100 m 范围内 $\lg E=3.5\sim 6.0$ 能级微震事件有一定的拾波能力,其 P_D 约为 0.4~0.5,单对于 $\lg E\leq 3.5$ 能级的微震事件几乎不具备拾波能力;12 号台站仅对发生在约 900 m 范围内 $\lg E=5\sim 6$ 能级微震事件有一定的拾波能力,其 P_D 约为 0.4,对于 $\lg E=3\sim 4$ 能级事件,其拾波概率 P_D 迅速降到仅为 0.1~0.3,且几乎对 $\lg E\leq 3$ 能级微震事件不具有拾波能力。位于 102 工作面北侧的 11 和 29 号台站拾波能力较弱,其中 11 号台站仅对发生在 1 000 m 范围内的 $\lg E=5\sim 6$ 能级事件有 $P_D=0.1\sim 0.2$ 的拾波概率,而 29 号台站对发生在 4 000 m 范围内的 $\lg E=2\sim 6$ 能级事件仅有约 $P_D=0.1$ 的拾波概率。以上结果表明, P_D 分布结果可反映震源能量与距离、采动噪声、传播路径甚至安装方式等因素对台站的综合影响,可量化描述采场不同位置台站对微震活动的拾波能力特征。

2.3 微震活动台网探测概率特征

图 8 为微震台网对 102 工作面不同能级微震活动的探测概率分布情况。由图 8a 可知,微震台网对 $\lg E=3$ 能级微震事件的探测能力极为有限,仅在超前工作面区域 500 m 范围及南部 101 工作面采空区有 $Q_{(\lg E=3)}=0.1\sim 0.2$ 的探测概率,这意味着微震台网将遗漏绝大多数 $\lg E=3$ 能级的微震活动。由图 8b 可知,微震台网对于 $\lg E=4$ 能级的微震事件相比于 $\lg E=3$ 能级有了明显提升,其最高探测概率 $Q_{(\lg E=4)}$ 可达 0.4,并呈现出以 4 号台站为中心、向四周扩散的趋势,可覆盖超前工作面 200 m 范围及邻近 101 工作面采空区部分区域。当超过工作面前方 200 m 范围时,其探测概率 $Q_{(\lg E=4)}$ 逐渐减低、并在工作面前方约 600 m 区域降至 0。该结果表明微震台网对 $\lg E=4$ 能级微震事件有一定的探测能力,但探测概率仍未过半 ($Q_{(\lg E=4)} < 0.5$),该能级微震事件遗漏可能性仍然较高。由图 8c 可知,微震台网对于 $\lg E=5$ 能级微震事件的最大探测概率 $Q_{(\lg E=5)}$ 进一步上升至约 0.6,且其分布特征与 $Q_{(\lg E=4)}$ 类似,仍是以 4 号台站为中心向四周扩散,其探测覆盖超前工作面 700 m 范围及大部分 101 工作面采空区区域。由图 8d 可知,对于 $\lg E=6$ 能级微震事件,微震台网的最大探测概率 $Q_{(\lg E=6)}$ 达到了 0.7,且最大探测概率范围覆盖了超前工作面 200 m 范围区域。此外,102 工作面回风巷及 101 工作面采空区区域的 $Q_{(\lg E=6)}=0.7$ 覆盖范围要大于 102 工作面运输巷区域,这表明微震台网能更完整的监测到 102 工作面回风巷及 101 工作面采空区区域的高能级事件。

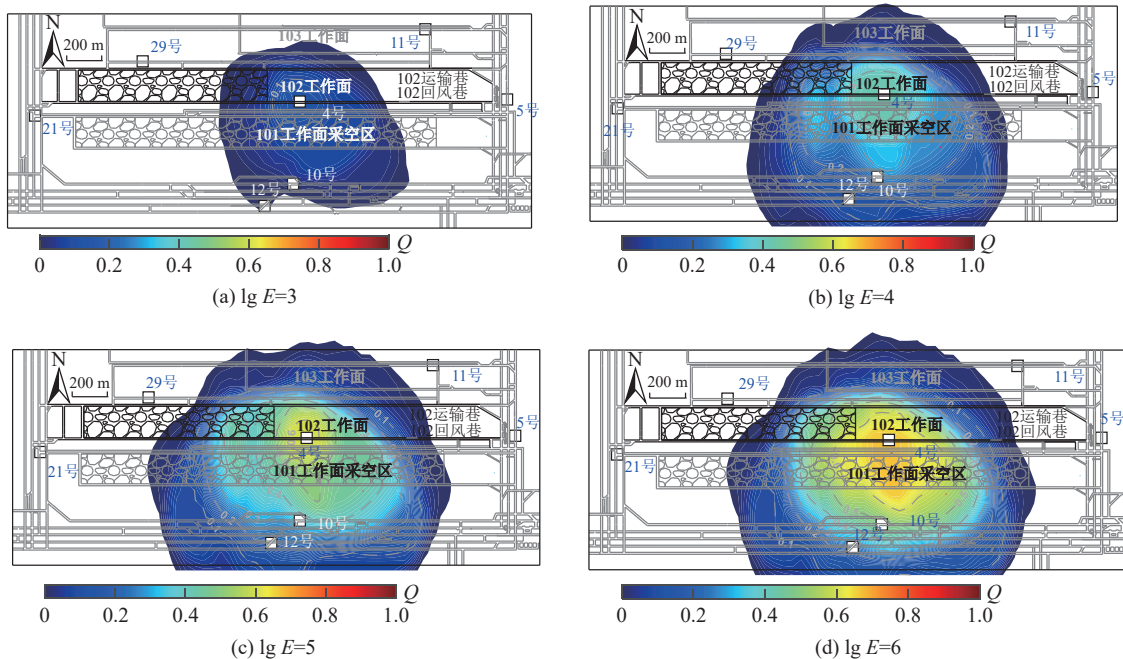


图 8 微震监测系统对发生于 102 工作面不同能级微震事件的探测概率分布

Fig.8 Spatial distribution of detection capability of a seismic network for seismic events in LW102 with different energy levels

以上结果表明,地下矿山微震台网对于不同能级微震事件的探测能力差异较大,且其空间分布呈现高度非均匀特性。结合图 5 中 102 工作面可用台站分布情况,可用台站稀少、大部分台站距离采场较远是造成台网对 102 工作面整体探测概率较低的主要原因。因此,可重点考虑可用台站的数量及空间分布特征,分布在采场周围的可用台站越多,PMC 方法的适应性就越高。

综上所述, Q 可完整描述监测台网对不同能级微震事件的探测概率分布特征,并可清晰定位台网监测的薄弱区域,为进一步优化台网布局及相应监测参数提供有力参考。

为探究微震台网对 102 工作面不同区域微震事件的探测概率特征,选取 4 处典型地点探究 Q 与微震事件能级的关系,选取地点如图 7 中紫色圆圈数字所示,分别为 102 工作面超前 200 m 运输巷侧煤岩体区域、102 工作面超前 200 m 煤岩体区域、102 工作面超前 200 m 回风巷侧煤岩体区域以及 102 工作面后方 100 m 处采空区区域,结果如图 9 所示。

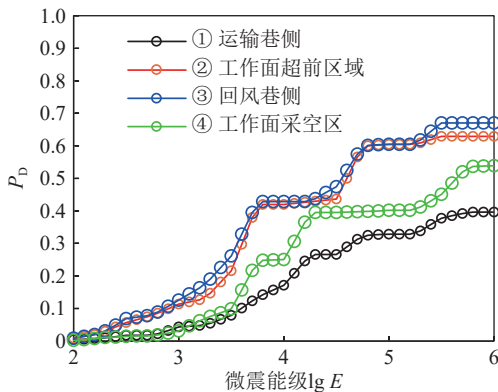


图 9 微震监测系统对 102 工作面不同区域的微震活动探测概率

Fig.9 Seismic detection capability of the seismic network at different locations in LW102

由图 9 中曲线①可知,102 工作面运输巷侧由于缺少可用台站的覆盖,表现为最低的台网探测概率;对 $\lg E=4$ 能级事件的探测概率 Q 低于 0.2,达到最高探测概率 $Q=0.4$ 时对应的事件最小能级为 $\lg E=5.8$ 。由图 9 中曲线②和③可知,较为完整的台站包络使微震台网对 102 工作面超前及回风巷侧煤岩体区域的微震活动探测能力有所提高:对 $\lg E=4$ 能级事件的探测概率 Q 为 0.42,在微震事件能级 $\lg E$ 达到 5.5 时打到最高探测概率,其 Q 分别为 0.63 与 0.67。由图 9 中曲线④可知,台网在 102 工作面采空区后方的微震活动探测能力相对于超前工作面与回风巷侧区域有所下降,但由于 21 和 29 号台站的补充,使得该区域

的微震探测概率仍高于 102 工作面运输巷侧:对 $\lg E=4$ 能级事件的探测概率 Q 为 0.25,达到最高探测概率 $Q=0.4$ 时对应的事件最小能级为 $\lg E=5.8$ 。以上结果表明,在台站布局及各台站拾波能力影响下,微震台网对采场不同区域、不同能级微震活动的探测能力具有显著差异,但在地下矿山不利监测环境下,采场大部分区域都存在不同程度微震事件遗漏的可能。

基于上述 102 工作面的微震活动探测概率分布情况,其微震台网布置可在两方面进行提升:① 提高布置于超前工作面两巷的可用台站数量。案例工作面两巷只有 4 号台站可用,导致监测到的绝大部分微震事件仅勉强达到 4 个台站的最低要求,信号质量稍差就会造成标定通道不足而无法定位,最终导致大量微震事件遗漏;② 更多使用接收简单传播路径震动波的台站。在本案例中,可用于定位的多数台站,如 102 工作面后方 12、21 和 29 号台站与工作面隔有大面积采空区与众多巷道,使震动波传播路径更为复杂,信号的信噪比大幅降低,导致到时标定成功率难以提升。

2.4 基于 PMC 的采场微震频次和能量补偿

由图 6 可知,102 工作面发生 1×10^3 J 能级微震事件频次最多,说明采场的微震响应以该能级事件为主。因此,根据 1.3 节中提出的基于 PMC 的采场微震活动补偿方法,对 102 工作面 2022-09-05—2022-09-11 期间发生的大于 1×10^3 J 能级微震活动进行补偿分析,结果分别如图 10 和图 11 所示。经补偿后,102 工作面微震事件数量由 290 个大幅增加至 1 424 个,增幅比为 391%;微震事件总能量由 2.58 MJ 增加至 9.44 MJ,增幅比为 365%。由图 10a 可知,微站台网探测到的高能释放区主要集中于 102 回风巷超前工作面 50 m 范围,最高能级 $\lg E$ 约为 5.5,而在运输巷超前段未探测出高能释放。在经过微震能量补偿后,微震高能释放区贯穿于整个工作面,尤其是覆盖了台网探测能力薄弱的 102 运输巷侧区域,如图 10b 所示。在运输巷超前工作面约 100 m 范围内释放微震能量最高能级 $\lg E$ 约为 6,这与 2022 年 9 月 4 次发生的动力显现事件位置基本吻合。该结果表明补偿的微震能量能够较好还原采场微震响应特征,可真实反映采动煤岩体的损伤破坏状态。

由图 11a 可知,微震台网探测到的微震事件主要分布于 102 工作面运输巷侧煤岩体,在 102 运输巷超前工作面约 50 m 处区域的微震频次达到最高 34 次。经过补偿计算后,微震事件集中区域类似,仍集中于 102 工作面运输巷侧煤岩体,但微震频次最高已逾

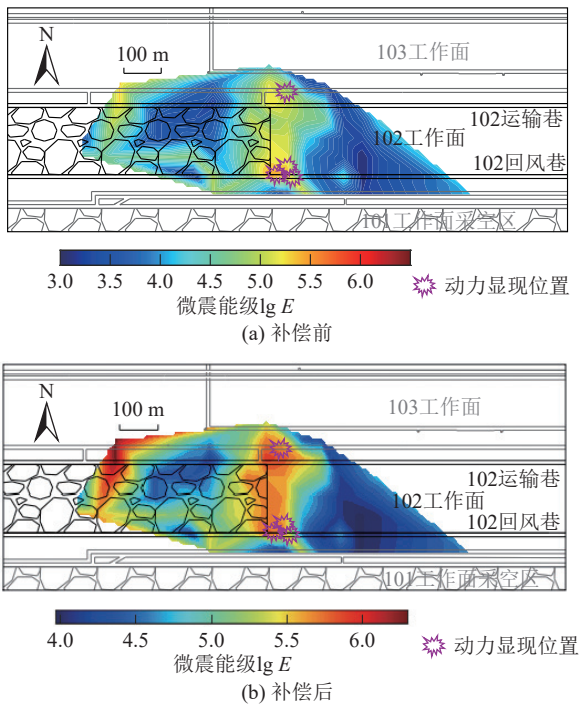


图 10 利用 PMC 概率补偿前后 102 工作面微震能量空间分布情况

Fig.10 Spatial distribution of seismic energy in LW102 before and after PMC-based supplementary method

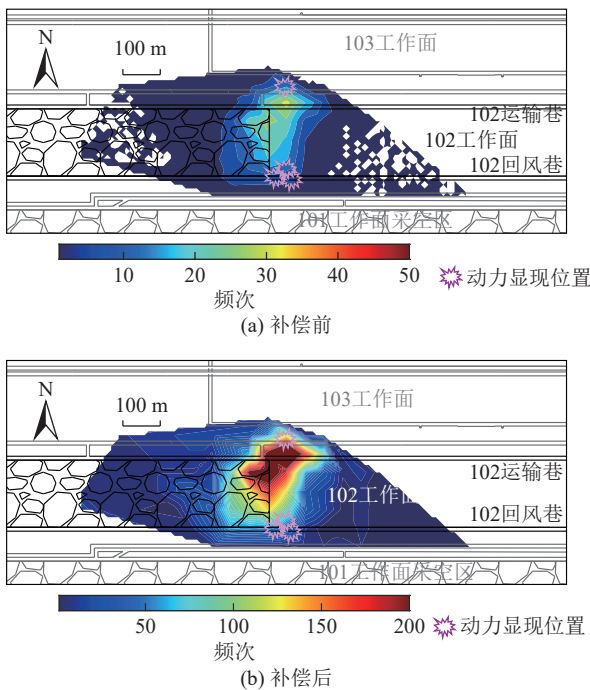


图 11 利用 PMC 概率补偿前后 102 工作面微震事件频次空间分布情况

Fig.11 Spatial distribution of seismic events frequency in LW102 before and after PMC-based supplementary method

200, 并且覆盖了 102 运输巷超前工作面约 150 m 处区域, 如图 11b 所示。补偿后的微震频次仍没有覆盖 102 回风巷区域煤岩体, 难以与 102 工作面 2022 年 9

月回风巷超前工作面区域煤岩体的动力显现相对应。造成这种现象的原因是煤岩体破坏程度通常与高能级微震事件频次有关, 但 PMC 法过多补偿了探测概率较低的低能级微震事件频次, 导致微震活动频次分布与动力显现未表现出明显的对应关系。因此, 补偿后的微震活动能量相比于事件频次能更加真实的反映采动煤岩体的损伤破坏状态。

需要说明的是, 对于远离采场微震活跃区但发生少数微震事件的区域, 基于 PMC 的微震补偿方法并不适用, 因为该区域本就鲜有煤岩微震响应, 补偿后可能会过高地估计微震事件与能量。虽然该种情况在本工程实践中并未出现, 但仍需对补偿方法做进一步地完善与探究。

3 结论与展望

1) 复杂地下采场环境导致不同位置台站的拾波能力具有明显差异。微震监测台站拾波概率 P_D 可反映震源能量与距离、采动噪声、传播路径等多种影响因素对台站的综合影响, 可实现对台站震动波拾波能力特征的量化描述。

2) 微震活动台网探测概率 Q 可准确描述台网对不同能级微震事件的探测概率分布特征, 并能清晰定位监测薄弱区域, 可为进一步优化台网布局及相应监测参数提供有力参考。

3) 在台站布局及各台站拾波能力影响下, 微震台网对采场不同区域、不同能级微震活动的探测能力具有显著差异。在地下矿山不利监测环境导致采场大部分区域存在不同程度微震事件遗漏的可能, 部分区域对于 $\lg E=6$ 的高能微震事件探测概率不足 0.4。

4) 基于 PMC 的微震活动补偿方法还原了采场的真实微震响应特征, 补偿的微震能量相比于微震事件频次更能体现采动煤岩体的损伤破坏状态, 其高能释放区与工作面历次动力显位置现形成较好对应。

5) 深入研究地下矿山微震台网的数据探测完整性特征对提高煤岩动力灾害预警效能至关重要。研究采用的 PMC 完整性震级评价方法可为合理评价与优化微震台网监测质量提供重要参考和依据。由于本研究是 PMC 方法在地下矿山的初次尝试, 后续将开展非微震活跃区、复杂地质构造区、复杂采场立体空间等地质异常区的微震数据探测完整性探究, 并研发基于探测概率补偿的微震预警分析方法。

参考文献(References):

[1] 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.
- [2] 曹安业, 窦林名, 白贤栖, 等. 我国煤矿矿震发生机理及治理现状与难题[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(5): 1894–1918.
- CAO Anye, DOU Linming, BAI Xianxi, et al. State-of-the-art occurrence mechanism and hazard control of mining tremors and their challenges in Chinese coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 1894–1918.
- [3] 袁亮, 姜耀东, 何学秋, 等. 煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 306–318.
- YUAN Liang, JIANG Yaodong, HE Xueqiu, et al. Research progress of precise risk accurate identification and monitoring early warning on typical dynamic disasters in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 306–318.
- [4] 李楠, 王恩元, GE Maochen. 微震监测技术及其在煤矿的应用现状与展望[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(S1): 83–96.
- LI Nan, WANG Enyuan, GE Maochen. Microseismic monitoring technique and its applications at coal mines: Present status and future prospects[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(S1): 83–96.
- [5] 窦林名, 田鑫元, 曹安业, 等. 我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 152–171.
- DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al. Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 152–171.
- [6] 齐庆新, 赵善坤, 李海涛, 等. 我国煤矿冲击地压防治的几个关键问题[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(10): 135–143, 151.
- QI Qingxin, ZHAO Shankun, LI Haitao, et al. Several key problems of coal bump prevention and control in China's coal mines[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(10): 135–143, 151.
- [7] GIBOWICZ S J, KIJKO A. An introduction to mining seismology [M]. San Diego: Academic Press, 1994.
- [8] MENDECKI A J. Mine seismology reference book: Seismic hazard [M]. Tasmania: Institute of Mine Seismology, 2016.
- [9] WANG C B, SI G Y, ZHANG C G, et al. A statistical method to assess the data integrity and reliability of seismic monitoring systems in underground mines[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(11): 5885–5901.
- [10] WANG C B, SI G Y, ZHANG C G, et al. Variation of seismicity using reinforced seismic data for coal burst risk assessment in underground mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 165: 105363.
- [11] 陈法兵, 王颖, 任文涛, 等. 基于奇异值分解法的微震子网监测能力分析[J]. *地震地磁观测与研究*, 2015, 36(1): 65–71.
- CHEN Fabing, WANG Ying, REN Wentao, et al. The analysis of monitoring capability of microseismic subarray based on singular value decomposition method[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2015, 36(1): 65–71.
- [12] 巩思园, 窦林名, 马小平, 等. 提高煤矿微震定位精度的台网优化布置算法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(1): 8–17.
- GONG Siyuan, DOU Linming, MA Xiaoping, et al. Optimization algorithm of network configuration for improving location accuracy of microseism in coal mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(1): 8–17.
- [13] 巩思园, 窦林名, 马小平, 等. 提高煤矿微震定位精度的最优通道个数的选取[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(12): 2017–2021.
- GONG Siyuan, DOU Linming, MA Xiaoping, et al. The method to identify the optimal channel numbers for increasing the location accuracy of microseismic events in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(12): 2017–2021.
- [14] 苗勇刚, 张长锁, 夏志远, 等. 某铜矿微震监测系统台网设计及精度分析[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2020, 72(6): 30–35.
- MIAO Yonggang, ZHANG Changsuo, XIA Zhiyuan, et al. Network design and accuracy analysis of microseismic monitoring system in a copper mine[J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2020, 72(6): 30–35.
- [15] 崔宇, 李夕兵, 董陇军, 等. 玲珑金矿微震监测台网布设优化[J]. *黄金科学技术*, 2019, 27(3): 417–424.
- CUI Yu, LI Xibing, DONG Longjun, et al. Optimization of microseismic monitoring network layout in Linglong gold mine[J]. *Gold Science and Technology*, 2019, 27(3): 417–424.
- [16] GODANO C, PETRILLO G, LIPPIELLO E. Evaluating the incompleteness magnitude using an unbiased estimate of the b value[J]. *Geophysical Journal International*, 2024, 236(2): 994–1001.
- [17] LIPPIELLO E, PETRILLO G. b-more-incomplete and b-more-positive: Insights on a robust estimator of magnitude distribution[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2024, 129(2): e2023JB027849.
- [18] SCHORLEMMER D, WOESSNER J. Probability of detecting an earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2008, 98(5): 2103–2117.
- [19] 李莎, 阎春恒, 周斌, 等. 广西及邻区地震目录最小完整性震级时空分布研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2023, 43(7): 728–733.
- LI Sha, YAN Chunheng, ZHOU Bin, et al. Research on the spatial and temporal distribution of minimum magnitude of completeness for earthquake catalog in Guangxi and its adjacent areas[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2023, 43(7): 728–733.
- [20] 王鹏, 魏薇, 蔡旭荣, 等. 长三角区域地震监测能力分析[J]. *科技与创新*, 2022(8): 76–78.
- WANG Peng, WEI Wei, CAI Xurong, et al. Seismic monitoring capability analysis in the Yangtze River delta region[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2022(8): 76–78.
- [21] 王鹏, 毕波, 林航毅, 等. 基于 PMC 方法的上海测震台网地震监测能力评估[J]. *地震地磁观测与研究*, 2020, 41(5): 18–24.
- WANG Peng, BI Bo, LIN Hangyi, et al. Evaluation of seismic monitoring capacity of shanghai seismic network based on PMC method[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2020, 41(5): 18–24.
- [22] 高家乙, 闫睿, 谢健健. 河南地区地震目录最小完整性震级探讨[J]. *地震地磁观测与研究*, 2021, 42(5): 21–25.
- GAO Jiayi, YAN Rui, XIE Jianjian. Discussion on the minimum magnitude of completeness in the earthquake catalogue in the Henan area[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2021, 42(5): 21–25.
- [23] GEIGER L. Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only[J]. *Bulletin of St Louis University*, 1912, 8(1): 56–71.