文章编号：1673-3363-(2026)05-1197-11

基于主控因素辨识与震源参量响应建模的强矿震预测方法

王强[1,2]，张冬阳[1]，刘耀琪[1]，曹安业[1,2,3]，张诗画[1]，岳鹏飞[1]，吴学松[4]

（1. 中国矿业大学矿业工程学院，江苏　徐州　221116；2. 中国矿业大学江苏省矿山地震监测工程实验室，江苏　徐州　221116；3. 中国矿业大学深部煤炭资源开采教育部重点实验室，江苏　徐州　221116；4. 中国华能集团华亭煤业有限责任公司，甘肃　华亭　744100）

摘要　为解决目前大埋深、复杂构造、强回采速度等多条件影响下采掘作业冲击危险主控因素定量判识困难以及强矿震预测准确率低的难题，采用理论分析、现场验证等手段构建基于主控因素辨识与震源参量响应建模的强矿震预测方法。以某复杂构造冲击地压矿井回采工作面为研究背景，结合微震事件分布定性分析了回采区域冲击地压危险因素有煤层埋深、煤厚变化、断层、回采速度等，在此基础上，采用层次分析法初步确定冲击危险因素权重，引入熵权法优化主控因素排序以解决层次分析法中因素权重受主观影响的问题。结果表明，埋深、煤层厚度、煤层倾角和回采速度的影响覆盖整个开采过程，而断层只在局部地区影响突出。同时分析发现震源能量与其他震源参数呈对数正相关，尤其在强矿震中这种关系更为突出。震源能量与其他震源参数之间的线性对数关系可用于强矿震的预测。

关键词　冲击地压；危险预测；强矿震；主控因素；震源参量

中图分类号　TD 324　　**文献标志码**　A　　**DOI**　10.13545/j.cnki.jmse.2025.0356

A prediction method for strong mining tremors based on main control factor identification and seismic source parametric response modeling

WANG Qiang[1,2], ZHANG Dongyang[1], LIU Yaoqi[1], CAO Anye[1,2,3], ZHANG Shihua[1], YUE Pengfei[1], WU Xuesong[4]

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu　221116, China; 2. Jiangsu Engineering Laboratory of Mine Earthquake Monitoring and Prevention, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu　221116, China; 3. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining of Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu　221116, China; 4. China Huaneng Group Huating Coal Industry Co Ltd, Huating, Gansu　744100, China)

Abstract　Quantitatively determining main factors controlling rock burst risk and achieving precise predictions of strong mining tremors remain considerably challenging under complex mining conditions involving great burial depth, intricate geological structures, and high extraction rates. Aiming at

收稿日期：2025-09-09　　**责任编辑**：曹胜根

基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC3004603)；国家自然科学基金项目(52274098)；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项目(BZ2023050)

作者简介：王强(1981—)，男，四川省绵阳市人，博士，副教授，从事煤矿冲击地压方面的研究。

通信作者：刘耀琪　　**E-mail**：yaoqi_liu@cumt.edu.cn　　**Tel**：15651467098

中国知网　https://www.cnki.net

addressing these challenges, this study, through theoretical analysis and field validation, established a predictive methodology for strong mining tremors based on main control factor identification and seismic source parameter response modeling. Using a rock burst-prone longwall face under complex geological conditions as a case study, potential risk factors in the goaf area, including coal seam depth, thickness variation, faults, and mining speed, were qualitatively analyzed first on the basis of microseismic event distribution. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was then applied to determine the initial weights of these factors, followed by entropy weighting to optimize the ranking of main control factors and mitigate the subjectivity inherent in AHP. Results indicate that coal seam depth, thickness, dip angle, and mining speed exert influences throughout the entire mining process, whereas faults only have a strong influence in localized regions. Furthermore, a significant positive logarithmic correlation is observed between seismic source energy and other source parameters, particularly in strong mining tremors. Such a linear logarithmic correlation can be utilized for the prediction of strong mining tremors.

Key words rock burst; risk assessment; strong mining tremors; main control factors; seismic source parameters

我国“富煤贫油少气”的能源结构使得煤炭在能源供应中的支撑作用在短期内难以改变[1]。而随着我国浅部资源开采殆尽,未来全面进入深部开采已成为必然趋势[2]。现场方面,近年来发生胡家河(2021年)、龙堌(2020年)、唐山(2019年)、龙家堡(2019年)、龙郓(2018年)等多起冲击地压事故,损失惨重[3]。在科技层面,“冲击地压煤层智能安全高效开采”被列为2023年度中国科协十大产业技术问题之一[4]。冲击地压和风险的精确预警和靶向防治已成为煤炭行业必须解决的难题之一[5-6]。

复杂开采条件下冲击地压主控因素的辨识是制定针对性监防措施、明确冲击地压防治重点的基础[7]。为解决冲击地压主控因素的辨识难题,学界已进行了大量相关研究。例如,Patyńska[8]通过研究冲击事件与地质开采因素的相关性,指出煤层开采深度是影响冲击风险的决定性因素。Gu等[9]研究了东庞煤矿的地质因素和开采技术因素,并建立了冲击危险性动态评估的分层结构模型。Xu等[10]分析总结了大量巷道冲击破坏的基本特征和致灾因素,探讨了冲击释放能量的主要来源和主要控制因素,提出了分类方法和分阶段防治原则。Qiu等[11]结合深部开采工作面的冲击发生特征和开采条件,从应力源和路径两个方面分析了冲击危险程度。陈凡等[12]采用区域划分和层次分析法相结合的思路研究特厚煤层褶皱构造区开采冲击地压危险因素,并采用矿震定位进行了验证。潘俊锋等[13]以陕西省典型矿井为研究对象,通过案例统计分析揭示了冲击地压显现特征,并据此提出了分类防控方法。谭云亮等[14]基于大量矿井灾害评估数据,从客观和主观两个维度归纳出七类主要致灾因素,为冲击地压防治提供了理论依据。

与此同时,由于冲击地压发生过程的瞬时性、能量释放性等特征,冲击地压发生时必然伴随强矿震事件[15]。从冲击地压的完全可防可控角度来看,对强矿震事件的精准预测便可实现冲击地压的预测预警,这对现场具有重要意义。

学者们借助微震监测技术,提出采用频率、能量、震源半径等震源参数从破裂强度、扰动规模和应力调整程度等方面描述震源的破坏程度。例如,Wang等[16]搜集了某煤矿80 d的矿震数据,分析了矿震事件次数和平均释放能量在预测动力灾害方面的效率。Yu等[17]通过研究震源参数(包括能量密度、能量指数等)的时序演变特征,探讨了这些参数作为冲击地压前兆信息的可行性,同时深入分析了矿震活动与岩体微破裂演化之间的关联机制。Wojtecki等[18]利用震源参数评估了波兰上西里西亚煤盆地复杂煤层条件下煤层爆破开采的有效性。Ma等[19]采用微震能量、地震矩和视应力等震源参数揭示了灾害类型和微震路径的演化特征。李家卓等[20]研究了深部开采强动载波形的分类特征及震源参量响应规律,揭示了顶板运动型、煤柱失稳型和断层错动型动载的时频特性、能量释放特征和破裂模式。杨景等[21]基于波速层析成像技术提出了多指标融合赋权的冲击危险综合评价方法,实现冲击危险区域的识别、定位及危险等级判定。Liu等[22]以锦屏二级水电站隧洞为研究对象,系统分析了日微震频次、能量均值、累计视体积及b值等参数的演化规律,指出多参数联合分析方法可有效提升岩爆预测的准确性。上述研究体现了从单一参数向多参数融合预测的发展趋势。然而,现有多参数模型在构建时,或对参数进行简单叠加而未深入考

中国知网 https://www.cnki.net

虑其物理内涵的互补性与差异性，或直接采用机器学习等“黑箱”模型进行关联预测，虽能取得一定效果，但往往忽略了不同震源参量的内在物理含义，导致模型的可解释性不强，且难以量化各参数对预测结果的权重，限制了预测模型的精准化和普适性。

因此，本文以某复杂构造工作面为背景，借助微震响应分析了工作面开采期间冲击危险因素，剖析了震源能量、地震矩等不同震源参量间的响应关系，研究提出了一种综合权重评估方法解决冲击危险因素权重难以确定的问题，方法融合了层次分析与熵值理论，量化了各因素权重，结合震源参数的响应特征，基于主控因素识别与震源参数响应构建了矿震预测模型，并基于此开展了实例验证研究。

1　工程背景

江苏某矿主要开采 7#，8#煤层，其中煤系地层及下部岩层均呈现弱冲击倾向性，上覆岩层则具有强冲击倾向性，本文将该矿井 7434 工作面作为研究对象。如图 1 所示，7434 工作面位于 7#煤层，南为 7432 采空区，西北两侧为实体煤区域，工作面开采深度为 793～900 m。

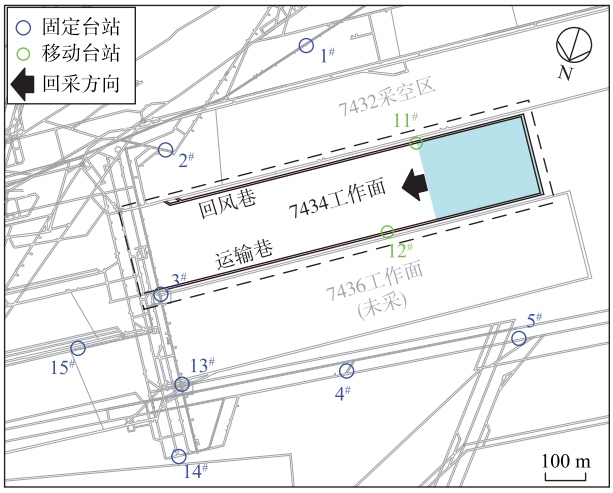


图 1　7434 工作面布置和微震台站分布图

Fig. 1　7434 working face layout and seismic station distribution map

工作面上覆若干层砂质泥岩、粉砂岩以及细粒砂岩等，并且受埋深、断层等因素叠加影响，工作面条件复杂，冲击危险性较高，亟待开展冲击危险因素辨识及预警工作。

2　冲击危险因素分析及震源参量响应规律

研究表明受构造影响的应力异常区，回采期间多诱发强矿震或者冲击地压事件[23]。因此，可以通过强矿震发生前的微震事件分布来初步确定应力异常区域等冲击危险区域。以 2018 年 2 月至 2019 年 12 月期间 7434 工作面开采期间监测到的微震数据为基础，对地质和技术两方面冲击危险因素进行统计分析。

2.1　冲击危险因素定性分析

如图 2 为煤层埋深对微震分布的影响特征示意图。据图可知，不同开采深度均存在微震事件局部集中的现象。统计数据显示，在 790～830 m，830～870 m 以及 870～910 m 等 3 个深度区间内，微震事件数量依次为 80，165 和 118 个，其占比分别为总事件数的 22%，45% 和 33%。此外，开采深度超过 830 m 的区域微震事件的累积和分布也明显增加，可见微震事件的分布随煤层埋藏深度的增加呈增加趋势。通过对比开采初期与末期的微震事件分布特征，分析可知两时期微震事件呈现出差异化的聚集与离散规律，这一现象表明煤层埋深并非决定冲击地压危险程度的惟一控制因素。

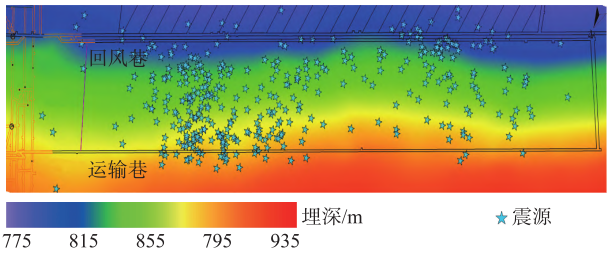


图 2　煤层埋深的影响

Fig. 2　Influence of coal seam depth

图 3 为微震事件随煤层厚度变化的分布特征。可以看出，研究区域煤层呈现西薄东厚的空间展布规律。在煤层厚度超过 4.4 m 的开采区域共监测到 243 个微震事件（占微震事件总数的 67%）。在煤层厚度超过 4.6 m 的区域，仅观测到 20 次微震事件。可总结为，在煤层厚度波动较大的区域，微震活动较为集中，说明煤层厚度的变化程度对微震活动的分布有很大影响。由此可见，煤层厚度对冲击地压危险性的控制作用相对较弱，而厚度变化与微震事件的空间分布特征表现出显著的相关性。

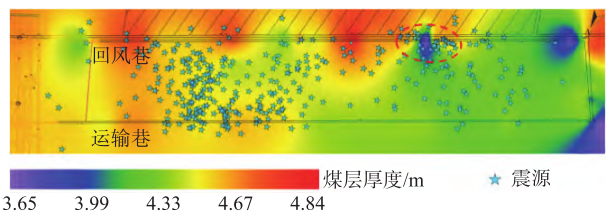


图 3　煤层厚度变化的影响

Fig. 3　Influence of changes in coal seam thickness

中国知网　https://www.cnki.net

如图 4 为煤层产状变化对微震事件走向及倾向方向分布的影响特征。通过分析图 4(a)可发现,研究区域内微震事件主要聚集于煤层倾角 20°~25°的区间,该范围内累计发生 329 次微震事件,占监测到微震事件总数的 90.6%。然而,在开采初期,微震活动更多分散在倾角较大的区域,这表明倾角与微震活动分布有局部相关性。然而,倾角很难对整个区域的微震事件的分布产生较大影响。

如图 4(b)所示,7434 工作面的煤层走向倾角介于 3°~5°之间,在走向倾角大于 4°和 4.5°的区域内分别监测到 142 个和 75 个微震事件,分别占微震事件总量的 39%和 21%。值得注意的是,微震事件在不同走向倾角区间呈现出相对均匀的分布特征,这一规律表明走向倾角与微震事件的空间分布之间不存在显著的相关关系。因此,在对后续权重进行量化时,应适度考虑煤层的倾角变化。

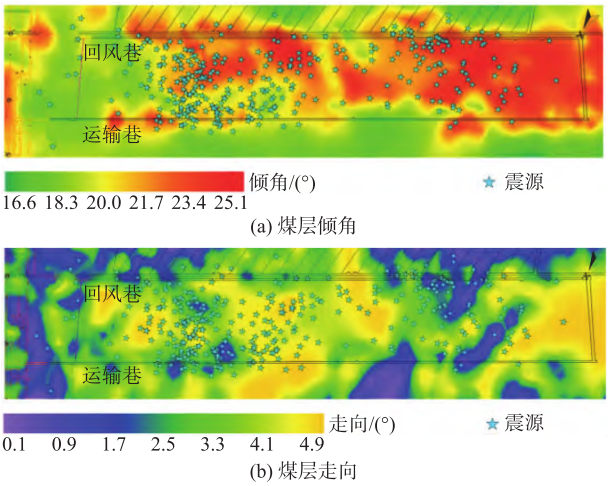


图 4 煤层产状的影响

Fig. 4 Influence of coal seam provenance

如图 5 为 7434 工作面开采过程中断层分布对微震事件分布的影响情况,其中断层分布包含断层密度和断层强度,以此揭示断层分布对微震分布影响的关联性。其中,可以通过统计工作面开采区域范围内单位面积的断层条数来表征断层密度参数[见式(1)],由此可以分析得出断层发育程度以及断层对于采掘活动的影响程度;同时可采用断层强度[见式(2)][24]评估断层规模对开采作业的影响程度。

$$D = \frac{N}{S} \tag{1}$$

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{n} l_i h_i}{S} \tag{2}$$

式中:D 为断层密度;N 为划定网格区域的断层数量;S 为被统计工作面的面积,m^2;I 为断层强度;l_i 为工作面统计单元内第 i 个断层的延展长度,m;h_i 为工作面统计单元内第 i 个断层的落差,m。

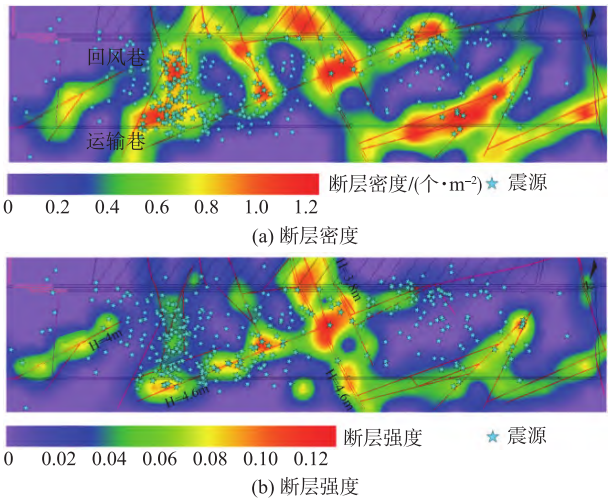


图 5 断层分布的影响

Fig. 5 Influence of fault distribution

如图 5 所示,当工作面断层密度较高时微震事件会存在集中分布的现象,这一现象表明断层密度极大程度影响了工作面微震事件的分布,同时微震事件分布趋势与断层强度的关联性较弱。因此相较于断层强度,断层密度与微震事件的空间分布特征呈现出更显著的相关性,可作为冲击危险的主要影响因素。

如图 6 为 7434 工作面推进速度对于微震事件发生频率的影响直方图。据图可知,在 2018 年 10 月~2019 年 3 月以及 2019 年 7 月~12 月两个回采区间,工作面采掘推进速度与微震频次呈正相关。基于此可知,工作面开采速度仅针对局部地区产生较为显著影响,而对整个工作面范围的影响则有很大差异。因此,在确定强矿震或者冲击地压危险的主要控制因素时,应分区域考虑开采速度的影响。

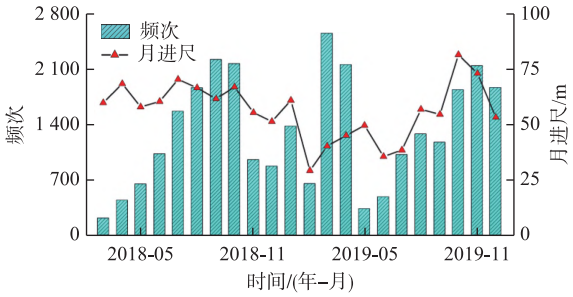


图 6 工作面推进速度的影响

Fig. 6 Influence of the speed of advancement of the working face

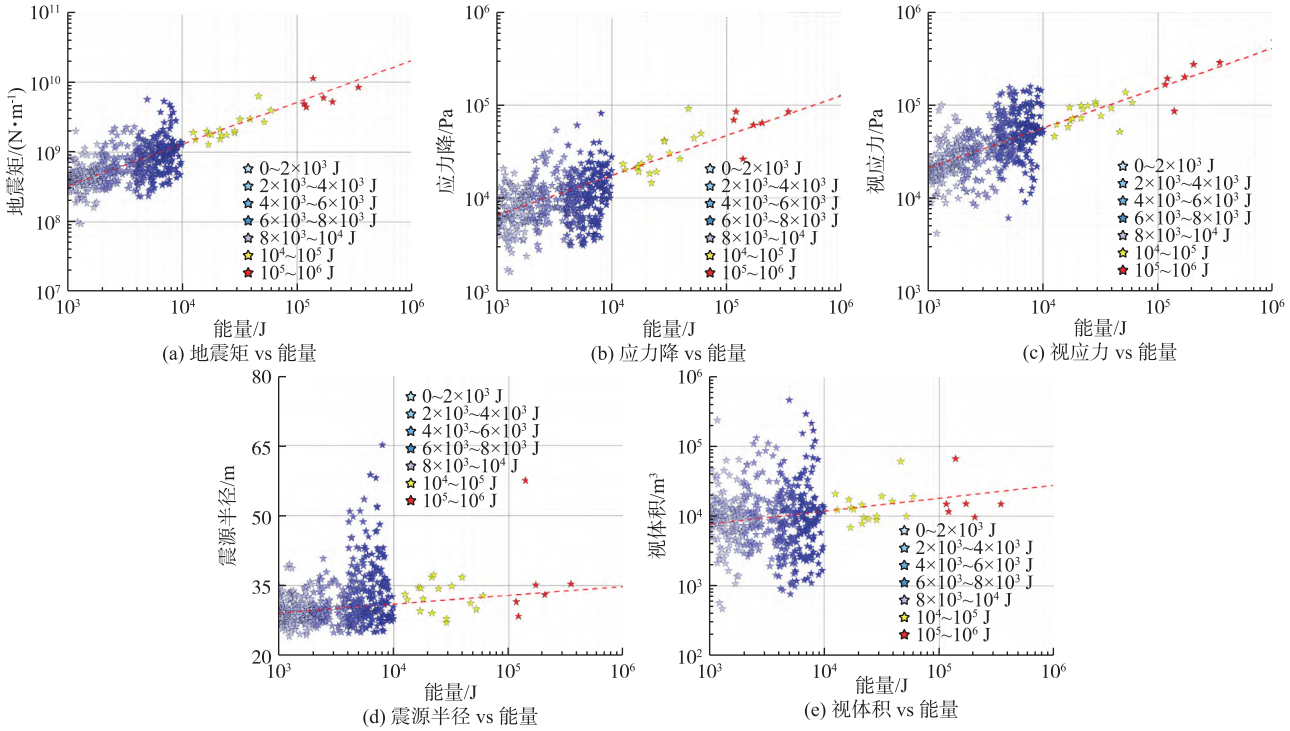
中国知网 https://www.cnki.net

综上所述，工作面采掘过程中不同区域的冲击危险主控因素不同，借助微震事件的分布可初步得出危险因素的影响程度，但无法进一步区分出影响因素的影响强弱，本文后续将采用统计学方法解决这一难题，进而明确冲击危险因素，可为现场针对性制定防控措施提供依据。

2.2　震源参量响应规律分析

震源参量能够反映震源区介质变化特征和震动波传播特性，因此可以作为描述矿震活动的重要指标。每个参数都具有特定的物理意义，从多个维度揭示震源机制和波动性质，其中：震源能量（E_s）能够体现破裂释放的总能量，地震矩（M_0）反映破裂强度，震源半径（r_c）指示破裂影响区域，视体积（V_a）表示非弹性变形范围，应力降（$\Delta\sigma$）体现应力释放程度，而视应力（σ_{app}）则表征震后应力状态。通过系统分析各震源参数与震源能量的相关性，旨在揭示矿震孕育过程中震源参数的分布规律，为构建可靠的强矿震预测指标奠定基础。

图 7 显示了不同能量的微震事件震源参量之间的对应关系。由图不难发现，所有的事件震源参量都与能量成对数正相关关系，但相关性强弱有差异。由表 1 可知，各震源参数与震源能量的关联程度呈现明显差异，其中地震矩和视应力表现出最强的相关性，震源半径次之，应力降紧随其后，而视体积的相关性最为微弱。这一参数相关性强弱排序将为后续构建强矿震预测指标时各参数的权重分配提供重要参考。



(a) 地震矩 vs 能量　(b) 应力降 vs 能量　(c) 视应力 vs 能量

(d) 震源半径 vs 能量　(e) 视体积 vs 能量

图 7　不同震源参量间的响应规律

Fig. 7　Response patterns between different seismic source parameters

表 1　不同震源参量间的拟合关系

Table 1　Fitting relationships between different seismic source parameters

震源参量	拟合公式	标准差（a_i）	标准差（b_i）
M_0 vs E_s	$\lg M_0 = 0.525\lg E_s + 6.967$	±0.026	±0.092
$\Delta\sigma$ vs E_s	$\lg \Delta\sigma = 0.366\lg E_s + 2.687$	±0.029	±0.103
σ_{app} vs E_s	$\lg \sigma_{app} = 0.475\lg E_s + 2.878$	±0.026	±0.092
r_c vs E_s	$\lg r_c = 0.053\lg E_s + 1.307$	±0.037	±0.097
V_a vs E_s	$\lg V_a = 0.051\lg E_s + 3.789$	±0.052	±0.184

此外，图 7 中即便能量等级较为接近的事件但是其他震源参量的量级却有较大差别，例如图 7（d）和（e）中个别事件的能量较为接近，但震源半径和视体积却明显偏离其他事件（尤其是能量大于 10^5 J 的事件）。表明这类事件震源辐射能量较为接近，但由于震源处应力水平和介质结构的差异，震源破裂的影响范围和非弹性变形的体积却明显强于其他事件。反之，在其他震源参量较为接近时，震源能量也会出现偏离的情况。上述两者说明在预测强矿震时仅考虑单个震源参量的局限性，即无法全面预测和评估震源的破坏扰动情况。这也为后续

中国知网　https://www.cnki.net

基于主控因素辨识与震源参量响应建模的强矿震预测方法的提出建立了基础。

3 基于主控因素辨识与震源参量响应建模的强矿震预测方法

3.1 主控因素辨识方法

为克服单一赋权法的局限性,本研究采用层次分析法[25](AHP)与熵权法相结合的综合权重评估方法。将两者结合,既可确保权重分配不偏离工程实际认知,又能利用数据内在规律对主观判断进行修正,从而得到一个主客观统一的、更为科学可靠的综合权重,为后续精准预测奠定基础。

计算步骤如下:

步骤 1:构建层次化分析模型。根据各指标在评价体系中的属性特征和层次定位,建立具有隶属关系的树状结构模型,系统评估各危险因素间的相互作用及其影响程度。步骤 1 可作为后续研究的基础,用于明确不同评价指标之间的层级关系。

步骤 2:建立判断矩阵。为便于各因素间的量化对比,研究采用单层次分析模型,其中矩阵元素 a_i 和 $a_j(i, j = 1, 2, 3, \cdots, n)$ 均表示评价指标,a_{ij} 表示指标 a_i 相对于 a_j 的重要性程度。根据系统分析,比较不同影响因素之间的相对重要程度,构建判断矩阵 $\boldsymbol{P}$。

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} \\ a_{21} & x_{22} & \cdots & a_{2j} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix} \tag{3}$$

在分级评估体系中,需对同级所有因素的相对影响程度或重要性进行系统分析。同时,依据一致性矩阵(表 2)中的评分标准对各评价指标进行量化处理,最终构建判断矩阵,为危险因素的综合评估提供量化依据。

表 2 层次分析法的标度含义

Table 2 Scale value meaning of Analytic Hierarchy Process

标度	含义
1	同样重要
3	稍微重要
5	明显重要
7	强烈重要
9	极端重要
2,4,6,8	相邻判断的中间值
倒数	因素 i 与 j 比较的 a_{ij},则因素 j 与 i 比较的判断 $a_{ji} = 1/a_i$

步骤 3:确定权重向量。基于步骤 2 构建的判断矩阵 $\boldsymbol{P}$,求解得出最大特征值 $\lambda_{\max}$ 所对应的特征向量 ω,具体计算过程见公式(4)。随后归一处理特征向量,依此计算得出各个评价因素的权重值和所有因素权重占比排序。

$$\boldsymbol{P}w = \lambda_{\max} w \tag{4}$$

步骤 4:一致性验证。为确保权重系数的可靠性,需采用一致性比率 CR[公式(5)]对计算结果进行校验。当 $CR < 0.1$ 时,表明判断矩阵满足一致性要求,可通过检验。

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)RI} \tag{5}$$

式中:CI 为判断矩阵的一致性指标,用于衡量判断矩阵偏离一致性的程度,CI 值越大,说明矩阵的一致性越差;RI 为判断矩阵的随机一致性指标,用于消除矩阵阶数对一致性检验的影响,不同阶数的 RI 值通常查表获得。随后采用熵权法对调整并优化根据层次分析法所计算得出的危险因素权重,具体流程如下:

步骤 1:建立初始数据矩阵。设评价对象数量为 i,评价指标数量为 j,则原始矩阵可表示为:

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} \end{bmatrix} \tag{6}$$

步骤 2:数据非负化。针对评价指标存在反向关系且数值范围适中的情况,需对数据进行归一化操作。同时,熵值计算中会出现对数无意义的情况,为了避免该情况的发生,需要适当对数据进行平移处理,最终计算得出的数据矩阵如下:

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2j} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ij} \end{bmatrix} \tag{7}$$

对于正向指标:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^{\min}}{x_i^{\max} - x_i^{\min}} + 1 \tag{8}$$

对于负向指标:

$$r_{ij} = \frac{x_i^{\max} - x_{ij}}{x_i^{\max} - x_i^{\min}} + 1 \tag{9}$$

步骤 3:第 i 个样本在第 j 个指标下对该指标的权重计算如下:

$$f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} r_{ij}} \tag{10}$$

中国知网 https://www.cnki.net

步骤 4：第 j 个指标 H_j 的熵值计算如下：

$$H_j = -k\sum_{i=1}^{n} f_{ij}\ln f_{ij} \tag{11}$$

步骤 5：根据公式(12)计算指标权重：

$$w_j = \frac{1-H_j}{\sum_{j=1}^{m}(1-H_j)} \quad (j=1,2,\cdots,m) \tag{12}$$

式中，指标 x_j 的变异系数(表示为 $1-H_j$) 与 x_{ij} 值的差异呈正相关关系，随其差异的增大而增大；由此可知 x_j 对综合评价的贡献更大。反之，被评价对象的 x_j 没有差异，则 H_j 等于 1，变异系数为 0；如果 x_{ij} 的差异越小，H_j 越大，变异系数越小，此处 m 代表评价指标的数量。

步骤 6：需重新归一处理各个评价指标的权重，从而得到最终的权重集合 $A=[a_1, a_2, \cdots, a_m]$，作为冲击危险因素的权重排序结果。

3.2　强矿震预测方法

本文 2.1 节探讨了各类影响因素与微震事件分布之间的关联性。其中，识别高能矿震事件的核心指标是震源能量，该指标虽起到极为重要的作用，但其作为单一标准仍存在局限性。该方法无法全面反映震源介质的扰动范围或破裂面的应力变化特征，仅能体现震源破裂过程中辐射的能量强度，与此同时该方法还忽略了其他震源参数对动态危险评估的影响。因此，虽然基于震源能量的标准相对可靠，但它仅仅是识别危险高能事件的充分条件。这种评估方法也有可能忽略潜在的危险事件，无法精确区分具有同等震源能量水平的矿震事件的相对危险性。此处震源参量包括震源能量、地震矩、应力降、视应力、震源半径和视体积，其计算方法和物理含义可参考文献[26]。

本节以确定强矿震事件的能量条件为基础，分析震源参数之间的关联性，确定主要影响强矿震事件的评价指标，构建评价参数及震源能量之间的拟合关系，然后计算相关指标权重，最终依据震源能量与震源参数的相关性建立识别准则。此外，根据目前被广泛接受的危险强矿震事件能量评估标准(表 3)，确定了综合能量指数 (W_z)，换算关系如表 4 所示。

表 3　危险等级划分的能量原则

Table 3　Energy principles for hazard classification

能量/J	危险等级
$E_s < 10^4$	弱
$10^4 \leqslant E_s < 10^5$	中等
$E_s \geqslant 10^5$	强

表 4　危险等级划分的能量指数原则

Table 4　Principle of energy index for hazard classification

W_z	危险等级
$W_z < 4$	弱
$4 \leqslant W_z < 5$	中等
$W_z \geqslant 5$	强

主要通过综合能量指数 W_z 的计算分析震源参数与震源能量之间的拟合函数及其权重，以确定二者之间的相关性。随后，基于各震源参数与震源能量的关联性，推导出每个震源参数对应的能量指数，具体如式(13)所示。

$$W_i = \frac{\lg m_i - b_i}{a_i} \tag{13}$$

式中：m_i 为第 i 个震源参量；a_i 为相应拟合函数的斜率；b_i 为相应拟合函数的截距。此处利用 7434 工作面开采期间的微震数据计算了震源参量(结果详见 2.2 节)，并拟合其与微震能量的关系，得到各震源参量与震源能量的相关性。结果如图 7 和表 1 所示。

在确定各震源参量与震源能量之间的拟合关系后，二者之间的线性相关强度可通过相关系数 R 进一步衡量，相关系数 R 可通过公式(14) 计算。

$$R = \frac{\mathrm{Cov}(X,Y)}{\sqrt{\mathrm{Var}[X]\times\mathrm{Var}[Y]}} \tag{14}$$

式中：$\mathrm{Cov}(X,Y)$ 为两组数据的协方差；$\mathrm{Var}[X]$，$\mathrm{Var}[Y]$ 分别为两组数据的方差。表 5 列出了各震源参量与微震能量之间的相关系数。

表 5　其他震源参量和震源能量之间的相关性

Table 5　Correlations between other source parameters and seismic energy

震源参量	E_s	M_0	$\Delta\sigma$	σ_{app}	r_c	V_a
相关性系数 R	1.000	0.746	0.658	0.727	0.329	0.228

根据公式(14)计算可知，地震矩、应力降和视应力均和震源能量显著相关，因此这 3 个指标均可作为冲击风险评估的核心评价指标。相比之下，视体积和震源半径与震源能量的相关性较弱，因此可归类为非关键参数，供进一步分析使用。此外，各震源参量对强矿震危险程度的影响权重可通过公式(15)计算得出，计算结果见表 6。

$$w_i = r_i / \sum_{i=1}^{n} r_i \tag{15}$$

式中：w_i 为第 i 个震源参量所占的权重；r_i 为第 i 个震源参量的相关性系数；i 为震源参量的编号；n 为震源参量类型的总数。

中国知网　https://www.cnki.net

表 6 各震源参量所占的权重

Table 6 Weights assigned to each seismic source parameter

震源参量	E_s	M_0	$\Delta\sigma$	σ_{app}	r_c	V_a
所占权重	0.271	0.202	0.178	0.197	0.089	0.062

根据各震源参量的影响权重及其与震源能量的拟合结果,利用公式(16)计算综合能量指数。强矿震事件风险等级通过综合能量指数(W_z)进行评估,相应的风险等级划分标准详见表 4。

$$W_z = \sum_{i=1}^{n} w_i W_i \tag{16}$$

式中:W_z 为综合能量指数;w_i 为综合能量指数中第 i 个震源参量所占的权重;W_i 为第 i 个震源参量所对应的能量指数。

3.3 方法运用步骤

基于主控因素辨识与震源参量响应建模的强矿震预测方法在实施时主要包括 3 个阶段,分别为主控因素辨识、震源参量计算与强矿震预测,3 个阶段逐步递进。方法运用流程如图 8 所示。

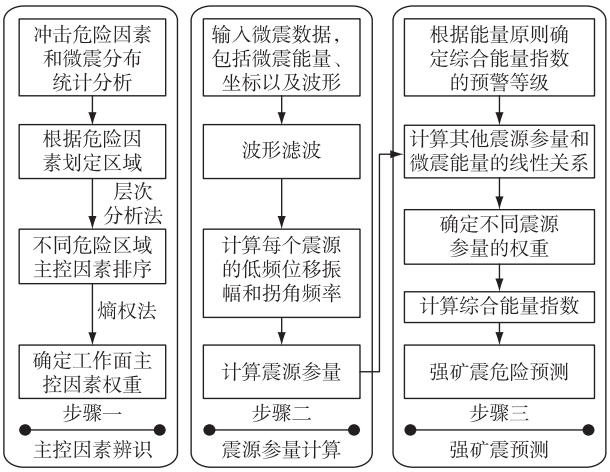


图 8 方法运用流程图

Fig. 8 Flowchart of the methodology

4 预测实例

为精细化评估工作面冲击危险性,本研究对 7434 工作面的区域划分严格遵循地质与开采条件原则:即以主要断层等构造边界、煤层埋深/厚度/倾角的显著变化梯度、以及回采速度与采动应力环境的差异作为分区依据。据此将工作面划分为 6 个特征区域(图 9),该划分确保了各区域内部主导危险因素的相对均一性与区域间的差异性,为后续分区域构建判断矩阵、精准量化因素权重奠定了合理的空间单元基础,并详细列出不同区域各因素影响因子标度值,见表 7。

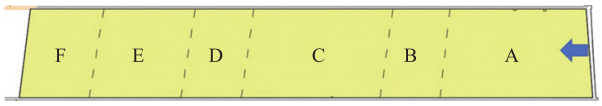


图 9 7434 工作面区域划分示意图

Fig. 9 Schematic of 7434 working face area division

表 7 7434 工作面的冲击危险影响因子标度值

Table 7 Scale value of rock burst impact factors of 7434 working face

区域编号	煤层埋深	煤层厚度	煤层倾角	回采速度	断层
A	1	1	1	3	4
B	1	3	1	3	5
C	1	1	1	6	5
D	1	1	1	4	7
E	1	2	1	6	7
F	1	2	1	6	4

基于影响因素与各区域微震事件分布之间的关联性,结合表 3 中层次分析法的比较尺度标准,建立了各区域影响因素的判断矩阵。这些矩阵分别如表 8~13 所示。

表 8 7434 工作面 A 区域的判断结果

Table 8 Rockburst risk factor judgement matrix for region A of the 7434 working face

P	煤层埋深	煤层厚度	煤层倾角	回采速度	断层
煤层埋深	1	1	1	1/3	1/4
煤层厚度	1	1	1	1/3	1/4
煤层倾角	1	1	1	1/3	1/4
回采速度	3	3	3	1	1/2
断层	4	4	4	2	1

表 9 7434 工作面 B 区域的判断结果

Table 9 Rockburst risk factor judgement matrix for region B of the 7434 working face

P	煤层埋深	煤层厚度	煤层倾角	回采速度	断层
煤层埋深	1	1	1/3	1/3	1/5
煤层厚度	1	1	1/3	1/3	1/5
煤层倾角	3	3	1	1	1/2
回采速度	3	3	1	1	1/2
断层	5	5	2	2	1

表 10 7434 工作面 C 区域的判断结果

Table 10 Rockburst risk factor judgement matrix for region C of the 7434 working face

P	煤层埋深	煤层厚度	煤层倾角	回采速度	断层
煤层埋深	1	1	1	1/4	1/6
煤层厚度	1	1	1	1/4	1/6
煤层倾角	1	1	1	1/4	1/6
回采速度	4	4	4	1	1/2
断层	6	6	6	2	1

中国知网 https://www.cnki.net

表 11　7434 工作面 D 区域的判断结果

Table 11　Rockburst risk factor judgement matrix for region D of the 7434 working face

P	煤层埋深	煤层厚度	煤层倾角	回采速度	断层
煤层埋深	1	1	1	1/4	1/7
煤层厚度	1	1	1	1/4	1/7
煤层倾角	1	1	1	1/4	1/7
回采速度	4	4	4	1	1/2
断层	7	7	7	2	1

表 12　7434 工作面 E 区域的判断结果

Table 12　Rockburst risk factor judgement matrix for region E of the 7434 working face

P	煤层埋深	煤层厚度	煤层倾角	回采速度	断层
煤层埋深	1	1	1/2	1/6	1/7
煤层厚度	1	1	1/2	1/6	1/7
煤层倾角	2	2	1	1/4	1/4
回采速度	6	6	4	1	1
断层	7	7	4	1	1

表 13　7434 工作面 F 区域的判断结果

Table 13　Rockburst risk factor judgement matrix for region F of the 7434 working face

P	煤层埋深	煤层厚度	煤层倾角	回采速度	断层
煤层埋深	1	1	1/2	1/4	1/6
煤层厚度	1	1	1/2	1/4	1/6
煤层倾角	2	2	1	1/2	1/3
回采速度	4	4	2	1	1/2
断层	6	6	3	2	1

各区域计算结果汇总如下：

A 区计算结果：$CI = 0.047$，$RI = 1.12$，$\lambda_{max} = 5.047$，$CR = 0.007 < 0.1$，各因素权重 W 为 0.099，0.099，0.099，0.274，0.429。

B 区计算结果：$CI = 0.011$，$RI = 1.12$，$\lambda_{max} = 5.011$，$CR = 0.011 < 0.1$，各因素权重矩阵 W 为 0.076，0.076，0.220，0.220，0.409。

C 区计算结果：$CI = 0.025$，$RI = 1.12$，$\lambda_{max} = 5.025$，$CR = 0.006 < 0.1$，各因素权重 W 为 0.076，0.076，0.076，0.288，0.484。

D 区计算结果：$CI = 0.006$，$RI = 1.12$，$\lambda_{max} = 5.006$，$CR = 0.001 < 0.1$，各因素权重 W 为 0.071，0.071，0.071，0.277，0.510。

E 区计算结果：$CI = 0.021$，$RI = 1.12$，$\lambda_{max} = 5.021$，$CR = 0.005 < 0.1$，各因素权重 W 为 0.058，0.058，0.106，0.377，0.401。

F 区计算结果：$CI = 0.024$，$RI = 1.12$，$\lambda_{max} = 5.024$，$CR = 0.005 < 0.1$，各因素权重 W 为 0.071，0.071，0.141，0.268，0.449。

根据综合分析结果（见表 14），煤层开采深度、厚度、倾角以及工作面开采速度均对 7434 工作面冲击风险有较大的影响。其中，煤层开采深度、煤厚及煤层倾角主要影响局部地质异常的区域，开采速度影响整个工作面；断层则在工作面开采期间某些阶段影响尤为显著。基于以上不同因素与微震分布相关性研究，分析可得，比起煤层开采深度、煤层厚度及倾角，断层和工作面开采速度对于工作面强矿震冲击风险的影响更显著。

表 14　危险因素对 7434 工作面各区域的影响程度

Table 14　Degree of influence of hazardous factors on each area of the 7434 working face

因素	A	B	C	D	E	F
影响程度	0.222	0.203	0.227	0.228	0.228	0.225

工作面不同区域各危险因素权重存在较大差异，共同导致了部分区域冲击危险性急剧升高，发生强矿震的概率显著增强。为全面掌握其冲击危险性，本节根据 3.2 节提及的能量和综合能量指数，考虑各种震源参数影响对强矿震事件进行识别和比较分析，选取 7434 工作面开采期间断层区域附近的 100 次微震事件进行分析。

通过分析 7434 工作面在 2018 年 10 月 21 日和 2019 年 2 月 1 日期间的微震数据，根据能量和综合能量指数确定的矿震事件绘制如图 10，11 所示的危险等级以及分布情况。在基于能量的判别结果中（图 10），所有矿震事件都被归类为弱危险等级。

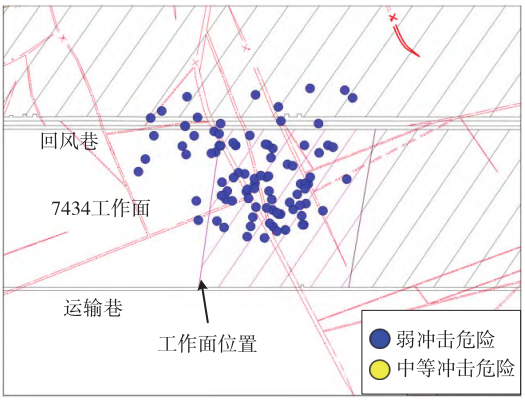


图 10　基于微震能量判识的强矿震事件分布

Fig. 10　Distribution of strong mining tremors based on seismic energy discrimination

如图 11 所示，综合能量指数将 95 个事件划分为弱危险等级，5 个事件划分为中等危险等级。图

中国知网　https://www.cnki.net

12 为强矿震事件与其余微震事件的震源参数比较直方图,由图可知,在 100 个矿震事件中,由综合能量指数法划分为强矿震事件的震源参数值较高,如能量、地震矩、应力降、震源半径和视体积,但视应力除外。以上分析表明,强矿震事件震源处的破裂强度、扰动大小和应力调整明显高于一般矿震事件。此外可知,通过单一震源参数(如视应力)对强矿震事件进行分类可能会导致预测错误。

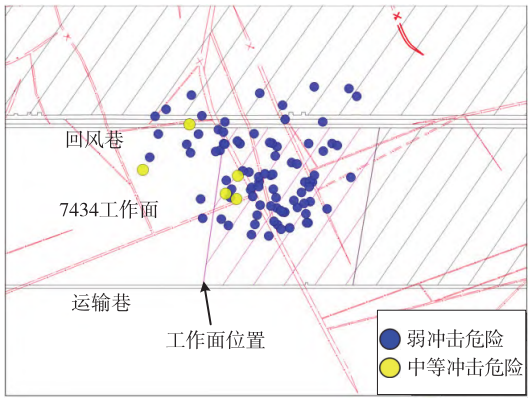


图 11 基于综合能量指数判识的强矿震事件分布

Fig. 11 Distribution of strong mining tremors based on composite energy index determination

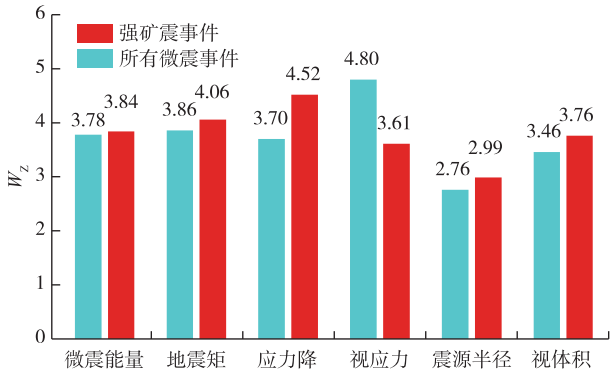


图 12 强矿震事件与其余微震事件的震源参数比较

Fig. 12 Comparison of source parameters of strong mining tremors with the remaining seismic events

5 结 论

1) 研究表明工作面开采速度、煤层开采深度、厚度及煤层倾角均对冲击风险有所影响,且开采速度的影响贯穿整个开采阶段,而断层构造的影响则局限于特定区域。

2) 通过对震源能量与其他震源参数进行线性对数拟合,发现二者之间存在不同程度的对数正相关关系,且在强矿震事件中这种相关性更加显著。

3) 通过分析震源能量和其他震源参数的相关系数,由此可知地震矩、应力降和视应力与震源能量呈现中等相关性,而震源半径和视体积的相关性较弱。基于这些相关系数,进一步确定了各参数对强矿震事件风险的影响权重。

4) 结合震源能量与其他震源参数的线性对数关系及动态风险权重,提出了一种以综合能量指数为指标的强矿震预测方法。通过与基于能量准则的识别结果对比,发现综合能量指数方法的准确性更高。

参考文献:

[1] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197-2211.
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197-2211.

[2] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.

[3] 曹安业, 刘耀琪, 蒋思齐, 等. 临地堑开采冲击地压发生机制及主控因素研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(1): 36-44.
CAO Anye, LIU Yaoqi, JIANG Siqi, et al. Occurrence mechanism and main control factors of coal burst near graben mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(1): 36-44.

[4] 鞠明和, 姚宝山, 窦林名, 等. 冲击地压物理相似模拟中煤的冲击倾向性影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(12): 2940-2955.
JU Minghe, YAO Baoshan, DOU Linming, el al. Influence of coal bursting liability on physical similarity simulation of coal/rock burst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(12): 2940-2955.

[5] 刘耀琪, 曹安业, 王常彬, 等. 基于震源机制与定位误差校准的冲击地压危险预测方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2065-2077.
LIU Yaoqi, CAO Anye, WANG Changbin, et al. Prediction method of coal burst risk based on focal mechanism and location error calibration[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2065-2077.

[6] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716-725.
YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716-725.

[7] 王联合, 曹安业, 郭文豪, 等. “断层-褶皱”构造区巷道冲击地压机理及失稳规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(1): 69-81.

中国知网 https://www.cnki.net

WANG Lianhe, CAO Anye, GUO Wenhao, et al. Rock burst mechanism and characteristics of roadway in "fault-fold" structure area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(1): 69-81.

[8] PATYŃSKA R. The consequences of the rock burst hazard in the Silesian companies in Poland[J]. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 2013, 10: 227-235.

[9] GU B F, WANG L K, ZHANG M B. Assessment of risk tendency of coal bursting pressure in deep outburst seam[J]. Geofluids, 2022, 5: 1-9.

[10] XU L M, LU K X, PAN Y S, et al. Study on rock burst characteristics of coal mine roadway in China[J]. Energy Sources Part a—Recovery Utilization and Environmental Effects, 2022, 44(2): 3016-3035.

[11] QIU P Q, NING J G, WANG J, et al. Mitigating rock burst hazard in deep coal mines insight from dredging concentrated stress: a case study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 115: 104060.

[12] 陈凡, 曹安业, 窦林名, 等. 基于区域划分与主控因素辨识的冲击危险性评价方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(3): 607-615.
CHEN Fan, CAO Anye, DOU Linming, et al. Method of coal burst hazard assessment based on region division and identification of main impact factors[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3): 607-615.

[13] 潘俊锋, 刘少虹, 马文涛, 等. 陕西煤矿冲击地压发生规律与分类防治[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 95-105.
PAN Junfeng, LIU Shaohong, MA Wentao, et al. Occurrence law and classification prevention of rock burst in coal mines of Shaanxi Province[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 95-105.

[14] 谭云亮, 张修峰, 肖自义, 等. 冲击地压主控因素及孕灾机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 367-379.
TAN Yunliang, ZHANG Xiufeng, XIAO Ziyi, et al. Main control factors of rock burst and its disaster evolution mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 367-379.

[15] 吕鹏飞, 耿伊健, 孙宇霆, 等. 倾斜厚煤层托顶煤掘进巷冲击地压机制与防冲布巷优化研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2025, 7(2): 110-124.
LYU Pengfei, GENG Yijian, SUN Yuting. et al. Study on rockburst mechanism and layout optimization of top-coal roadway in the inclined thick coal seam[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(2): 110-124.

[16] WANG Q K, QIU S L, CHENG Y, et al. Amplification effect of near-field ground motion around deep tunnels based on finite fracturing seismic source model[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(6): 1761-1781.

[17] YU Q, ZHAO D C, XIA Y J, et al. Multivariate early warning method for rockburst monitoring based on microseismic activity characteristics[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 837333.

[18] WOJTECKI L, MENDECKI A J, ZUBEREK W M. Determination of destress blasting effectiveness using seismic source parameters[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(12): 3233-3244.

[19] 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.

[20] 李家卓, 邱航, 窦林名, 等. 深部开采强动载波形分类特征及震源参量响应规律[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2025, 7(2): 77-93.
LI Jiazhuo, QIU Hang, DOU Linming, et al. Classification characteristics of strong motion-carrying waveforms for deep mining and seismic source parametric response law[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(2): 77-93.

[21] 杨景, 牟宗龙, 李家卓, 等. 多指标融合赋权综合预警的冲击危险评价方法[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(3): 81-94.
YANG Jing, MU Zonglong, LI Jiazhuo, et al. Coal burst risk comprehensive early warning method based on multi-index fusion empowerment[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(3): 81-94.

[22] LIU F, MA T H, TANG C A, et al. Prediction of rockburst in tunnels at the Jinping Ⅱ hydropower station using microseismic monitoring technique[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81: 480-493.

[23] 刘耀琪, 曹安业, 王崧玮, 等. 基于微震群震动波能量衰减特性的冲击地压危险预测方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1523-1533.
LIU Yaoqi, CAO Anye, WANG Songwei, et al. Prediction method of coal burst based on attenuation characteristics of seismic cluster energy[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1523-1533.

[24] 邱向荣, 周云霞, 曹代勇. 地质构造量化指标的网格化统计算法研究[J]. 地质与勘探, 2002, 38(4): 64-66.
QIU Xiangrong, ZHOU Yunxia, CAO Daiyong. Gridding statistical arithmetic of quantitative parameters of geological structure[J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(4): 64-66.

[25] LIPOVETSKY S. Understanding the analytic hierarchy process[J]. Technometrics, 2021, 63(2): 278-279.

[26] 曹安业, 陈凡, 刘耀琪, 等. 冲击地压频发区矿震破裂机制与震源参量响应规律[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 722-733.
CAO Anye, CHEN Fan, LIU Yaoqi, et al. Response characteristics of rupture mechanism and source parameters of mining tremors in frequent coal burst area[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 722-733.

中国知网　https://www.cnki.net