冲击地压危险动态评价方法及应用

蔡　武[1,2],汪林志[1,2],张惟昭[3],刘　舜[1,2],蔡鸿鹏[1,2],张　坤[3],王青振[3],曹安业[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. 山东能源集团西北矿业有限公司,陕西 西安　710018)

摘要: 冲击地压因源头多样性和过程瞬时性,一直是矿业安全作业的世界性难题,并长期制约着煤炭安全高效智能开采. 本文以动静载叠加诱冲理论为基础,构建了冲击地压从孕育、启动、显现至结束的全过程力学解释,包括一种广义刚度启动准则以及塑性变形与载荷增量两种动载诱冲效应;提出了基于先验知识与数据驱动相结合的冲击地压危险动态评价方法,可对冲击地压全过程内在驱动过程中的静载启动机制和动载诱冲效应进行定量刻画. 其中,先验知识驱动涵盖经验、数值模拟等方法的采场应力与地质构造环境等信息,并综合考虑多因素耦合分析方法中的区域划分范围及危险等级,采用Weibull分布和正态分布数学模型将各因素数值化得到静载应力预估值;数据驱动包括基于波速分布的应力集中系数和基于微震损伤重构应力2种参量表征静载效应,以及基于震动波衰减的塑性变形和基于支架工作阻力的载荷增量2种参量表征动载效应. 最后,以陕西正通煤业工作面回采期间的冲击显现案例为工程背景,从冲击显现特征、震源机制分析、力源与应力监测分析、覆岩结构与应力转移等方面检验并验证了该方法及其解释的合理性.

关键词: 冲击地压;全过程机理;危险评价;动静载;先验知识与数据驱动模型
中图分类号: TD 353　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)03-0686-13

Dynamic assessment method of coal burst hazard and its application

CAI Wu[1,2], WANG Linzhi[1,2], ZHANG Weizhao[3], LIU Shun[1,2], CAI Hongpeng[1,2], ZHANG Kun[3], WANG Qingzhen[3], CAO Anye[2]
(1. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. Shandong Energy Group Xibei Mining Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: Coal burst remains a global challenge due to its diverse triggering sources and instantaneous nature, severely restricting the safe, efficient, and intelligent extraction of coal. Based on dynamic and static load superposition theory, a comprehensive force and energy framework was constructed for the entire Coal burst process, from preparation to termination. This framework included a generalized stiffness initiation criterion alongside two effects induced by dynamic loads: plastic deformation and load increments. Furthermore, a dynamic risk assessment method integrating prior knowledge and data driven approaches was proposed to quantitatively characterize static

收稿日期: 2025-12-07　　**修回日期:** 2026-03-21　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250566
基金项目: 国家自然科学基金项目(52374101,W2421032);江苏省国际科技合作/港澳台科技合作计划项目(重点国别产业技术研发合作项目)(BZ2024024)
通信作者: 蔡　武(1988—),男,湖南省桃江县人,研究员,博士生导师.E-mail: caiwu@cumt.edu.cn
引用格式: 蔡　武,汪林志,张惟昭,等.冲击地压危险动态评价方法及应用[J].中国矿业大学学报,2026,55(3):686-698.
CAI Wu, WANG Linzhi, ZHANG Weizhao, et al. Dynamic assessment method of coal burst hazard and its application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(3): 686-698.

load initiation mechanisms and effects induced by dynamic loads. The prior knowledge component estimated static stress by employing Weibull and normal distribution models to digitize empirical and simulated data concerning stope stress, geological structures, and multifactor hazard levels. The data driven component characterized static load effects using stress concentration based on wave velocity and reconstructed stress based on microseismic damage; simultaneously, dynamic load effects were characterized by plastic deformation based on seismic wave attenuation and load increments based on support resistance. Finally, the proposed method was verified using a Coal burst case during retreat mining at the Shaanxi Zhengtong Coal Mine. Its rationality was confirmed through analyses of Coal burst manifestations, focal mechanisms, stress monitoring, and overlying strata stress transfer.

Key words: coal burst; whole process mechanism; coal burst hazard assessment; static and dynamic loading; knowledge-based and data-driven model

冲击地压因其致灾过程的多样性、瞬时性等特征[1],其孕育-启动-显现-结束全过程机理与冲击地压危险评价一直是采矿工程领域亟待突破的科学难题[2-3]. 目前,冲击地压危险评价与监测预警的主要方法包括采矿工程方法、地球物理方法以及多参量综合监测方法[4]. 其中,采矿工程方法主要利用钻屑法、综合指数法、煤岩冲击倾向性分类及数值模拟分析等技术评估地质条件下的冲击地压危险状态[5]. 地球物理方法主要聚焦于微震、地声、电磁异常等多源技术. 多参量综合监测方法主要融合了综合指数模型、震动波层析成像(CT)、微震监测、声电一体及应力监测等多种技术进行预警,形成“矿井地质诊断→区域应力场解析→局部临界状态预警”的冲击地压危险综合评估与监测预警,并借助云平台实现危险区域智能划分、危险等级动态评估、异常信号自主识别及远程协同管控[6-7].

开采具有冲击倾向性的煤层前,需依据煤层赋存地质条件、巷道布置及开采工艺参数等静态因素,实施冲击危险性评价与区域等级划分,属于静态评价,后续采掘过程中不做动态调整. 经典方法如综合指数[4]、可能性指数[8]、多因素耦合划分[9]等,为后续的工作开展提供了基础,但仍存在主观赋权偏差与定量表征不足的局限性.

在理论方面,文献[9]基于多源冲击因素叠加效应进一步刻画了局部危险性;对于不同应力标量叠加的难题,文献[10]提出了相对集中应力系数法予以解决. 此外,文献[11]引入模糊数学理论,结合层次分析法建立了包含权重的冲击地压影响因子评价体系,并运用模糊叠加运算,实现了区域冲击危险等级判定与危险区域划分. 文献[12]提出了基于临界应力指数的评价方法. 文献[13]构建了冲击危险性评估模型,强调在煤层危险性评价中除提升量化精度外,还需综合考虑地质构造特征及巷道工程扰动等多元致灾效应的影响. 文献[14]采用叠加各影响因素对应力增量贡献的方法,来定量评估冲击危险程度. 文献[15]基于动静载叠加诱冲原理,通过系统解析动静载耦合效应,建立了以复合应力阈值为基准的冲击危险分级体系. 文献[16]基于物理过程分解,提出了冲击地压风险判别公式.

在技术方面,主要借助微震CT探测[17]、地应力反演[18]以及地音与电磁波CT[19]等技术,将评价目标分解到时间和空间,实现危险预警与区域划分. 为提升冲击危险区划分精度,文献[20]建立了基于顶板结构的冲击危险评价方法,并结合微震数据,提高评价准确度. 文献[21]利用高斯混合模型分析声发射数据,为冲击危险性评价提供了新思路. 文献[22]提出了基于钻屑量界限方程的冲击危险性判定新方法,通过拟合实际钻屑量数据,细分冲击危险区,有效提高了判定精度并减少误判. 为提高传统冲击危险性评价方法的计算效率,文献[23]采用半定量估算冲击危险主控因素,建立了基于采掘工程平面图的危险区域划分方法.

现有研究成果在实际应用中取得了很好指导作用,但冲击地压危险评价与监测预警仍面临关键挑战:复杂多场耦合环境中,冲击地压全生命周期演化机理及其与多源监测参量的内在联系,特别是全过程驱动因素的量化表征,仍待解决. 同

时，当前研究过于侧重监测数据驱动的多参数融合，未能有效整合先验知识信息（如前期应力场、地质构造环境），以及后期防治措施和采掘扰动等泛化数据信息，这成为了制约冲击地压危险评估与监测预警精度提升的瓶颈.

为此，本文基于动静载叠加诱发冲击地压理论，提出了一种融合先验知识与数据驱动的冲击地压危险动态评价方法. 该方法通过量化刻画目标区域的广义刚度启动静载条件及动载诱冲效应，深入挖掘有效前兆信息，从而实现冲击地压危险的量化评价，并结合陕西正通煤业的冲击显现案例对该方法进行了工程验证.

1 冲击地压全过程机理

由动静载叠加诱冲机理可知，采场围岩的支承压力（静载）与采掘过程中的动载（采掘活动、覆岩运动、断层滑移等）叠加，并超过煤体的冲击临界载荷值时，便诱发冲击地压（图 1），其表达式为：

$$F_{\mathrm{S}}+F_{\mathrm{d}}\geqslant F_{\mathrm{bmin}}, \tag{1}$$

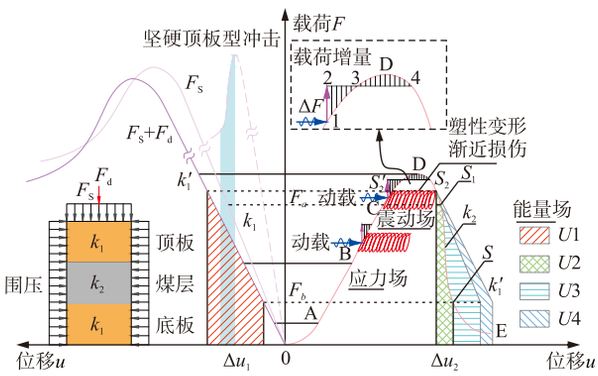
式中：F_{S} 为静载应力；F_{d} 为动载应力；F_{bmin} 为煤体冲击临界载荷.

由冲击地压全过程机理可知，随着采掘推进，工作面前方煤体的载荷-位移关系如图 1 右侧曲线所示；顶底板围岩系统因力学强度显著高于煤层，其载荷-位移关系可由左侧曲线表征. 煤体位移速率与系统整体位移速率的比值 $\Delta u(t)$ 为

$$\Delta u(t)=\frac{u_2'(t)}{u'(t)}=\frac{1}{1+\dfrac{k_2}{k_1}}, \tag{2}$$

式中：$u_2'(t)$ 为煤体位移速率；$u'(t)$ 为系统位移速率；k_1 为围岩刚度；k_2 为煤体刚度. 其中，峰前加载刚度为正，峰后屈服刚度为负.

由式（2）可知，当刚度满足 $k_1+k_2=0$（对应图中 S_1 点）时，$\Delta u(t)$ 趋于无穷，标志着冲击启动. 当叠加动载时，释放能量增加至（U_3+U_4），岩体刚度 k_1 等价于下降至 k_1'，进而使得冲击启动点从 S_1 提前至 S_2. 本质上，k_1' 是系统静载损伤状态与动载强度耦合作用的宏观反映：外部动载扰动（如顶板断裂、断层滑移等）是瞬态能量输入. 动载越大，叠加后系统释放的额外能量（U_3+U_4）越显著，在载荷-位移曲线中等效表现为加载系统等价刚度 k_1' 的劣化降幅越大. 因此，动静载叠加诱发冲击地压的启动条件为 $k_1'+k_2=0$，称之为冲击地压的广义刚度启动条件.



注：图中 $U1$ 为冲击过程中围岩释放弹性能；$U2$ 为冲击过程中煤层对围岩释放弹性能的消耗；$U3$ 为冲击过程中系统整体释放的剩余弹性能；$U4$ 为额外输入能量；F_a 为冲击前的载荷值；F_b 为冲击后的载荷值；A、B、C、D、E 分别为载荷-位移曲线上的点.

图 1 顶板-煤层-底板冲击地压系统模型及全过程机理

Fig. 1 Roof-coal-floor coal burst model and the associated whole process mechanism

远场矿震动载可视为循环加卸载，弹塑性煤岩体会产生疲劳损伤及塑性应变. 随着动载时间的增加，可类比于循环加卸载的次数增多，使得疲劳损伤程度加剧. 此时，位于峰前 S_2' 应力状态的煤体可发展至峰后 S_2 状态对应的冲击启动临界条件. 即为塑性变形动载诱冲效应.

断层滑移、顶板破断等产生的瞬间动载，其作用机制可等效为施加瞬时载荷增量 ΔF，若面积 S_{123} 大于 S_{3D4}，则处于峰前 1 应力状态的煤体在叠加该动载下，其应力水平可达到准静载作用下峰后 4 处应力状态对应的冲击启动条件. 此类动载诱冲效应为载荷增量动载诱冲效应.

上述所提及的 2 类动载诱冲效应共同特点是均在高静载或接近临界的应力环境下，通过动载扰动促进煤岩系统更快达到冲击启动条件. 二者的差异主要体现在作用模式和主控机制上：塑性变形型动载一般对应远场矿震波或采掘扰动，其作用模式相当于循环加卸载，表现为煤岩体内部损伤累积、刚度非线性衰减和永久塑性变形不断增长，当峰前累积的塑性变形超过准静载条件下的冲击启动临界应变值时，即可诱发冲击启动；载荷增量型动载一般对应断层滑移、顶板破断等瞬时错动或下沉位移，其作用模式相当于施加瞬时载荷增量，当输入的动载能量大于煤岩峰前应力状态发展至峰后冲击启动所需的耗散能，并存在剩余弹性能释放时，即可诱发冲击启动.

需要指出的是，高位岩层破裂在不同条件下可能同时表现出 2 类动载效应：其传播震动波可促使煤岩体发生累积性塑性损伤，而其瞬时破断过

程又可能形成明显载荷增量．因此，2类动载诱冲效应并非彼此割裂，而是对动载作用模式的2种典型归纳．一般而言，静载条件决定系统是否接近临界，塑性变形型动载促使系统逐步逼近临界状态，而载荷增量型动载是触发冲击启动的主要直接因素．

2　冲击地压危险动态评价方法

动静载叠加诱冲机理综合考虑了区域环境与采动静载应力和动载扰动叠加的影响，冲击地压“孕育—启动—显现—结束”全过程的力能解释涵盖一种广义刚度启动静载条件和两种动载诱冲效应（塑性变形和载荷增量）．因此，如何采用多物理场监测参数量化表征上述静载启动条件和动载诱冲效应是实现冲击地压危险动态评价的关键，特别是通过融合先验知识与数据驱动，挖掘有效前兆信息，最终实现冲击地压危险的精准量化评估与智能预警．其中，先验知识包括前期应力场、地质构造环境以及后期防治措施和采掘扰动等泛化数据信息（图2）．

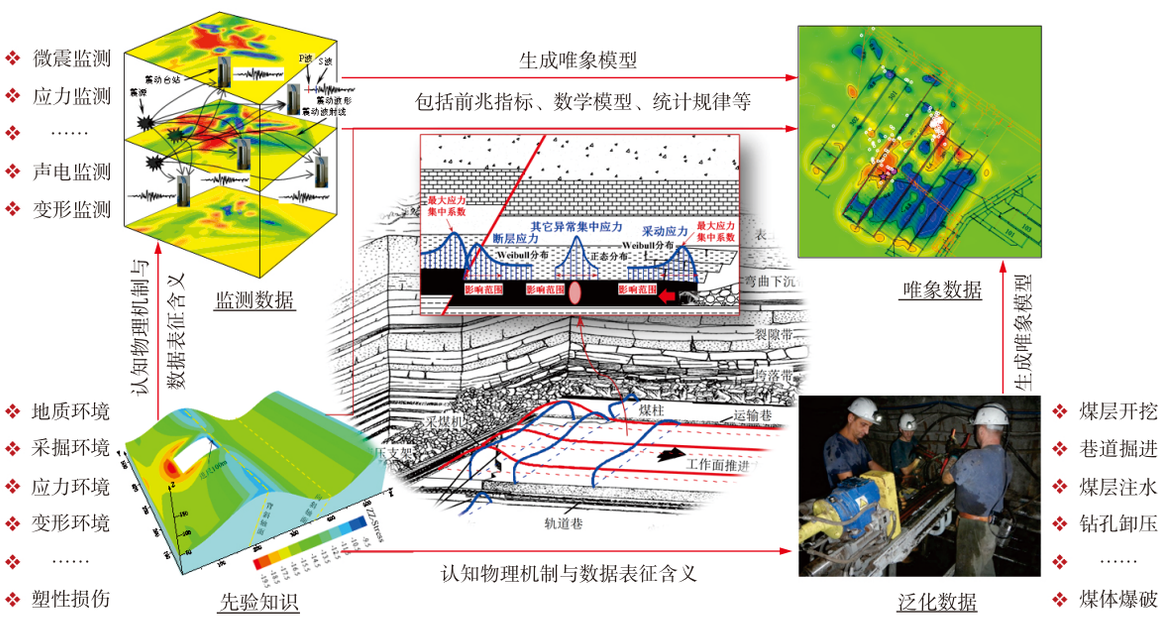


图2　基于先验知识与数据驱动的冲击地压危险动态评价方法

Fig. 2　Dynamic assessment method for coal burst hazards based on knowledge-based and data-driven model

2.1　基于先验知识驱动的静载应力预估

实践表明，采掘空间周边煤体的静载荷主要来源于上覆岩层荷载、构造集中应力、煤柱集中应力以及支承压力．据此推导出不同静载工况下应力集中系数参考值及其叠加计算公式为：

$$\sigma_j=\prod_{i=1}^{n}\sigma_{ij}=k_1k_2\lambda_1\lambda_2\eta_1\eta_2\eta_3\eta_4\gamma H,\qquad(3)$$

式中：σ_j为某区域煤体所受静载荷；角标i和j分别代表影响因素和区域范围；σ_{ij}为第i类静载荷分量；γ为上覆岩层容重，取25 000 N/m^3；H为上覆岩层厚度，m；其它参数见表1．

表1　基于先验知识驱动的静载预估模型参数

Table 1　Model parameters of static stress evaluated by the knowledge-driven model

符号	含义	取值情况
λ_1	褶曲轴部应力系数	地应力实测所得，无褶曲时取1
λ_2	断层附近应力集中系数	地应力实测所得，无断层时取1
k_1	巷道周边煤体内固定支承压力集中系数	邻近工作面经验所得，非该区域取1
k_2	开采工作面超前移动支承压力集中系数	邻近工作面经验所得，非该区域取1
η_1	巷道交叉应力集中系数	依据巷道交叉角度而定，非该区域取1
η_2	顶板岩性变化应力集中系数	邻近工作面经验所得，非变化区域取1
η_3	煤层厚度变化应力集中系数	邻近工作面经验所得，非变化区域取1
η_4	不规则工作面或多工作面开切眼及停采线不对齐等区域应力集中系数	邻近工作面经验所得，非该区域取1

其中表1各因素取值主要依据如下：

①地质构造类系数(λ_1,λ_2)，针对褶曲与断层，主要依据矿井实际测定的区域应力场数据进行计算取值；无构造影响区域取常数1.

②巷道及采动应力集中系数(k_1,k_2)，k_1主要依据邻近工作面相似条件下的极限平衡区宽度及塑性承载特征拟合确定；k_2则结合Winkler弹性地基假设及基本顶结构参数，并通过邻近相似工作面的矿压显现实测规律进行反演校正.

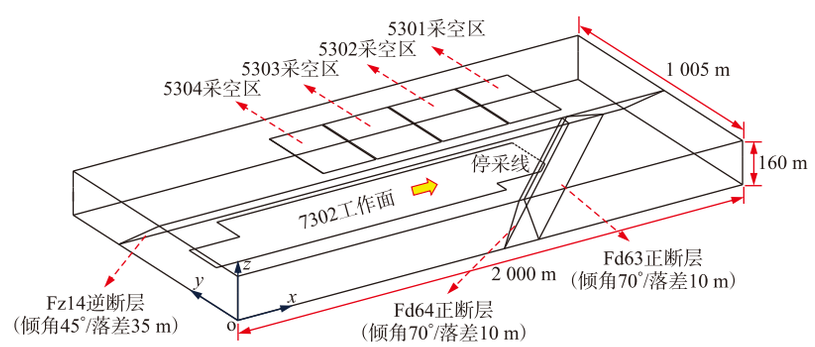
③对于岩性与煤厚变化区域(η_2,η_3)，主要依据覆岩刚度比与应力集中系数关系[24]进行取值和修正.

④对于交叉巷道(η_1)及不规则孤岛边界(η_4)，则严格遵循锐角交叉应力集中系数＞直角＞钝角等经典岩石力学原则，并结合同矿区相邻采区的微震监测先验经验进行类比取值. 非异常区域均默认取1.

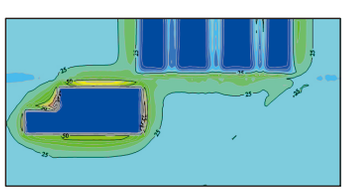
综上，各类集中系数均是在岩石力学理论(如弹性地基理论、极限平衡理论)基础上，结合同矿区相邻工作面的实测经验类比标定而得，具有较高的工程可靠性.

井下特殊地质构造及采动影响会导致围岩应力异常，煤体应力状态由原岩应力转变为集中应力(图1). 结合多因素耦合分析方法中的分区范围及危险等级评判，采用Weibull分布和正态分布数学模型将各因素数值化(具体计算与操作流程见文献[23])，并采用式(3)计算进行叠加，进而可预估获得静载应力分布.

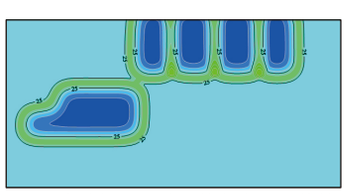
如图3所示为某煤矿7302工作面回采期间应力分布的数值模拟与基于先验知识驱动的结果对比分析效果. 其中，图3a为数值模型，图3b为7302工作面回采710 m后的垂直应力分布，图3c为对应的基于先验知识驱动的静载应力预估结果，两者结构相似度指数(SSIM)为0.881，证实了本文方法的有效性.



(a) 数值模型图



(b) 数值模拟结果



(c) 基于先验知识驱动的静载应力预估结果

图3 基于先验知识驱动的静载应力预估效果

Fig. 3 Result of static stress evaluated by the knowledge-driven model

2.2 基于数据驱动的静载应力表征

2.2.1 微震损伤重构静载应力

类似于受载煤岩的应力应变曲线，工作面前方采动应力形态也包括弹性变形区域(AB)、峰前应变硬化区域(BD)和峰后应变软化区域(DE). 在软化区域内，煤体刚度k_2为负，并不断劣化. 在实际工程中，为了寻找满足刚度启动条件($k_1+k_2=0$)的临界点，本文采用如图4所示的损伤参数D对煤岩刚度劣化及损伤程度进行量化表征. 在物理机制上，我们将理论中满足$k_1+k_2=0$所需的宏观刚度极度劣化状态，等效为实际工程中的最大损伤速率(默认临界损伤参数$D_c=0.95$)，其表达的物理含义详见文献[25]. 通过现场数据动态追踪最大损伤速率的演化过程，即可量化判定冲击启动的临界状态与位置. 该损伤参数D与历史微震事件密切相关[26]，并可定义为：

$$D=1-\exp\left(-\frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_F}\right), \tag{4}$$

式中：ε_E为累积Benioff应变，ε_F为ε_E的平均值，计算公式如下：

$$\varepsilon_F=-\frac{\max\{\varepsilon_E\}}{\ln\{1-D_c\}}. \tag{5}$$

根据连续介质损伤力学，可计算出基于微震损伤参数重构的静载应力（σ_{sss}）：

$$\sigma_{sss}=E_c\cdot\alpha_{MS}\cdot N_{MS}\cdot(1-D) \tag{6}$$

式中：E_c为弹性模量；α_{MS}为应变与微震的相关系数；N_{MS}为微震频次；为了准确获得$\max\{\varepsilon_E\}$，尽可能接近真实的ε_F，根据现场经验，建议使用较长时间的历史微震数据（至少3个月）.

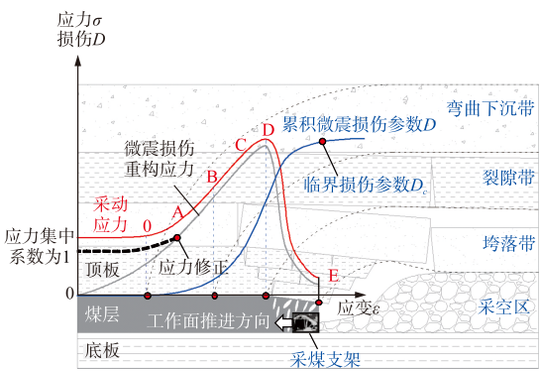


图4　基于微震损伤重构静载应力计算示意

Fig. 4　Schematic of mining-induced static stress derived by seismicity-derived damage parameter

在获得目标工作面较准确的$\max\{\varepsilon_E\}$后，以周/天为计算步长，实时更新数据库. 同时，根据ε_E的空间分布情况，得到损伤参数D的空间分布，进而达到局部冲击地压危险性动态评价的目的. 计算过程参考前期研究[27]. 如图5所示为某煤矿工作面回采末期基于微震损伤重构应力分布的计算案例，其结果与实际超前支承压力分布具有很好的一致性.

最终推导出基于微震损伤重构静载应力的集中系数（$\varphi_{\sigma_{sss}}$）为：

$$\varphi_{\sigma_{sss}}=\frac{\sigma_{sss}}{\sigma_{sssa}}, \tag{7}$$

式中：σ_{sssa}为σ_{sss}的均值. 需要说明的是，基于微震损伤参数重构静载应力的方法依赖于一定时期内微震事件的时空分布特征. 在远离采掘扰动区域或微震事件较少区域，由于累积损伤表征不足，重构应力值可能偏低甚至趋近于零（图4），但这并不代表该区域处于无应力状态. 事实上，此类区域通常仍承受原岩应力或静载背景值. 为避免因微震事件稀少而低估静载水平，当$\varphi_{\sigma_{sss}}<1$且$D<D_c/3$时，将$\varphi_{\sigma_{sss}}$修正为1，用以表征该区域至少处于背景平均应力水平. 该修正本质上是对微震损伤重构静载应力结果施加背景场下限约束，以提高重构应力场的空间物理一致性. 其中，$D_c/3$为基于工程案例应用所采用的经验阈值，后续仍需结合更多矿区样本进一步优化.

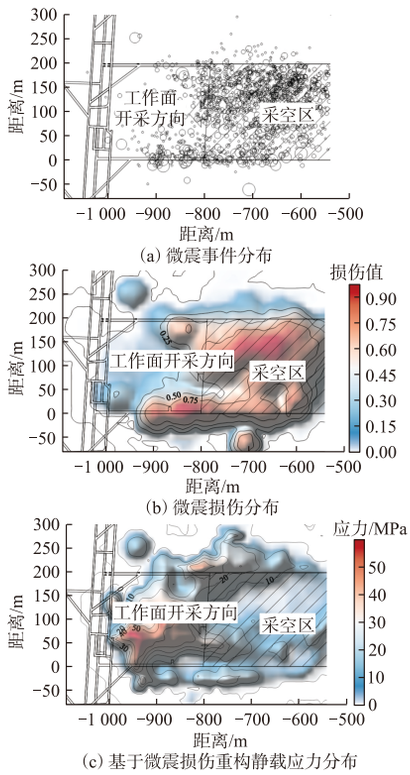


图5　基于微震损伤重构静载应力计算案例

Fig. 5　Case of mining-induced static stress derived by seismicity-derived damage parameter

2.2.2　微震速度层析成像探测

采掘活动导致采场围岩应力发生变化，围岩应力变化引起煤岩地震波速度的不同响应[28]. 实验结果表明，纵波速度（v_P）与所承载的应力之间存在幂律关系：

$$v_P=a\sigma_s^{\varphi}\rightarrow\sigma_s=\left(\frac{v_P}{a}\right)^{1/\varphi}, \tag{8}$$

式中：a和φ为拟合参数. 在此基础上，可推导出静载应力集中系数（$\varphi_{\sigma_{vss}}$）为：

$$\varphi_{\sigma_{vss}}=\left(\frac{v_P}{v_{Pa}}\right)^{1/\varphi}, \tag{9}$$

式中：v_{Pa}为v_P的均值. 因此，纵波速度可用于表征采动静载应力，而微震速度层析成像是反演确定该速度的有效方法. 速度层析成像的求解是一个经典的走时反演问题，它可以采用任意震源到传感器射线路径上的传播距离除以传播时间的数学关系来进行反演.

2.3　基于数据驱动的动载应力表征

2.3.1　塑性变形动载表征

微震监测分析理论认为，微震能量主要由质点峰值速度（v_{PP}）携带[29]，它可以在破坏过程中通过克服裂纹的内聚强度而消耗，或在其传播过程中衰减[31]. 在现场观测中，这种衰减关系可用质点

峰值速度 v_{PPR} 或微震能量 E 表示：

$$v_{PPR}=v_{PP0}\cdot R^{-\beta}, \tag{10}$$

$$E=E_0\cdot R^{-\alpha}, \tag{11}$$

式中：v_{PP0} 和 E_0 分别为质点峰值速度和震源能量；α，β 为衰减系数，β 可以通过拟合未超量程传感器的 v_{PPR} 数据得到. 理想情况下，v_{PP0} 应该由位于震源区的传感器直接测量，但受到现场条件和监测布局限制，主要是由于微震事件的随机性，使得微震传感器的安装位置很难预知. 即使实现了这一点，传感器也可能因为超量程而无法捕捉到最大振幅（v_{PP0}）的全部波形. 因此，v_{PP0} 只能通过拟合远场未超量程传感器的可用数据或通过震源处能量 E_0 间接估计获得.

对于一个微震事件，弹性应变反弹增量与微震能量的平方根成正比[30]. 在合理的假设条件下，v_{PPR} 还与微震能量 E 的平方根成正比[34]. 因此，可获得微震能量、质点峰值速度与应变的关系：

$$v_{PPR}\propto\sqrt{E}. \tag{12}$$

因此，微震事件引起的动载应力（σ_{sds}）可通过对微震能量取平方根进行估计. 计算时，先将反演区域划分为离散网格，然后将所有微震事件产生的动载应力累加到第 i 个网格中的 σ_{sds}：

$$\sigma_{sdsi}=\sum_{j=1}^{N_{MS}}\left(\sqrt{E_j}\cdot R_{ij}^{-\alpha/2}\right)=\sum_{j=1}^{N_{MS}}\left(\sqrt{E_j}\cdot R_{ij}^{-\beta}\right), \tag{13}$$

式中：N_{MS} 为在一定时间间隔内发生的微震事件数量. E_j 是第 j 个微震事件的能量. R_{ij} 是第 i 个网格到第 j 个微震事件的距离. 同理，基于微震重构动载应力（$\varphi_{\sigma_{sds}}$）的集中系数可估计为：

$$\varphi_{\sigma_{sds}}=\frac{\sigma_{sds}}{\sigma_{sdsa}}, \tag{14}$$

式中　σ_{sdsa} 为 σ_{sds} 的均值.

2.3.2　载荷增量动载表征

支架工作阻力监测系统用于煤矿综采工作面，实现支护阻力的在线监测. 该系统通过安装于支架左柱、右柱的压力表数值变动，实时反映支架受力变化状况及循环增阻情况. 借助这些数据，能够判断直接顶与老顶的初次垮落步距，分析周期来压的活动规律，同时还可评估支架的使用状态、承载能力以及对顶板的适应程度等.

在线监测支架工作阻力，确立支架阻力均值与均方差是判断顶板周期来压的核心指标. 时间加权阻力计算公式如下：

$$P_{Ti}=\frac{\sum_{j=1}^{n}\frac{\left(p_{j-1}+p_j\right)\cdot t_{pj}}{2}}{\sum_{j=1}^{n}t_{pj}}, \tag{15}$$

式中：t_{pj} 和 p_j 为监测序列；n 为序列数据的个数；P_{Ti} 为第 i 个时间窗口的时间加权平均压力，一般表示一个生产班，如 6，8，12，24 h. 一般情况下，顶板周期来压判据为：

$$P_{Ti}>\overline{P_T}+\sigma_P, \tag{16}$$

式中：$\overline{P_T}$ 为 P_{Ti} 的均值；σ_P 为标准差. 因此，可根据支架工作阻力的偏差，对周期来压危险状态进行评估，即载荷增量型动载形成的冲击地压危险系数（$\varphi_{\sigma_{lds}}$）可定义为[31]：

$$\varphi_{\sigma_{lds}}=\frac{P_{Ti}-\overline{P_T}}{\sigma_P}=\begin{cases}0 & \varphi_{\sigma_{lds}}<0\\ \varphi_{\sigma_{lds}} & 0<\varphi_{\sigma_{lds}}\leqslant 1\\ 1 & \varphi_{\sigma_{lds}}\geqslant 1\end{cases}. \tag{17}$$

2.4　先验知识与数据驱动融合模型

先验知识与数据驱动融合时采用修正模式进行计算，其公式为：

$$F_{i+}=\sqrt{F_{iq}\times F_{i-}}, \tag{18}$$

式中：F_{i+} 为融合更新后第 i 节点处的应力集中系数；F_{iq} 为模型当前节点 i 的应力集中系数；F_{i-} 即前一模型节点 i 的应力集中系数. 值得注意的是，载荷增量型动载形成的冲击地压危险系数的时空分布模式与其它指标均不同，在实际应用中不进行融合，仅作为独立指标进行辅助补充.

3　工程应用实践

3.1　冲击显现概况

陕西正通煤业位于陕西省西部，截至 2021 年 9 月 29 日，一盘区回采完毕，二盘区最后一个 205 工作面设计回采长度 1 445 m，宽度 180 m，已累计回采 1 380 m；三盘区 301 工作面设计走向长度 1 460 m，宽度 145 m，已累计回采 634 m；205 与 301 工作面回采位置间距 750 m，其中 301 工作面开采煤层平均厚度 12.1 m，平均埋深 986 m，倾角 0°～8°，平均倾角 4°. 采掘布置情况如图 6 所示，301 工作面上覆直接顶和老顶分别为厚度 1.25 m 的泥岩和厚度 10.79 m 的细粒砂岩，直接底和老底分别为 1.4 m 厚的炭质泥和 8.17 m 厚的泥岩.

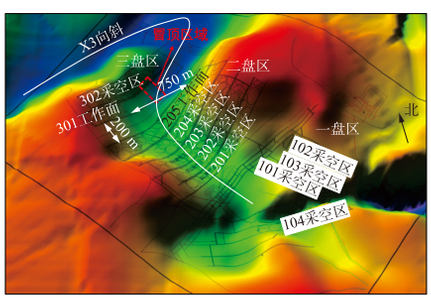
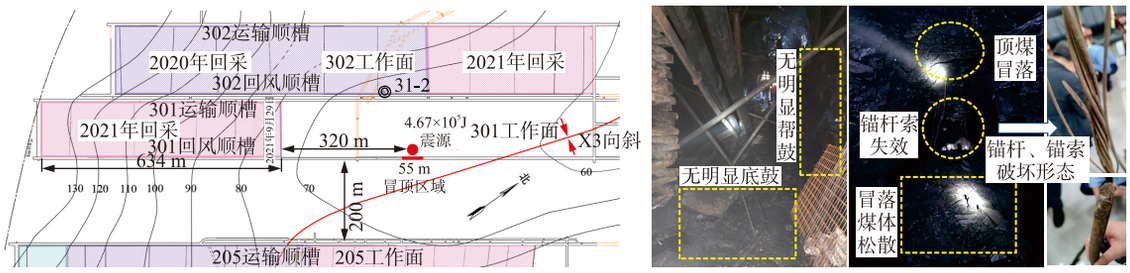


图 6　地质构造与采掘布置情况

Fig. 6　Schematic diagram of the geological structure and mining layout situation

2021年9月29日20:16:57,301工作面前方监测到4.67×10^5 J能量的微震事件,位于水平标高+75 m的煤层中,震源与冲击显现情况见图7. 该事件引发显著的地面震动,显现区距工作面320 m、底板泄水巷115 m、影响范围约55 m. 主要破坏特征为:无明显底鼓和帮鼓;顶板锚杆部分脱落崩断,钢带断裂.



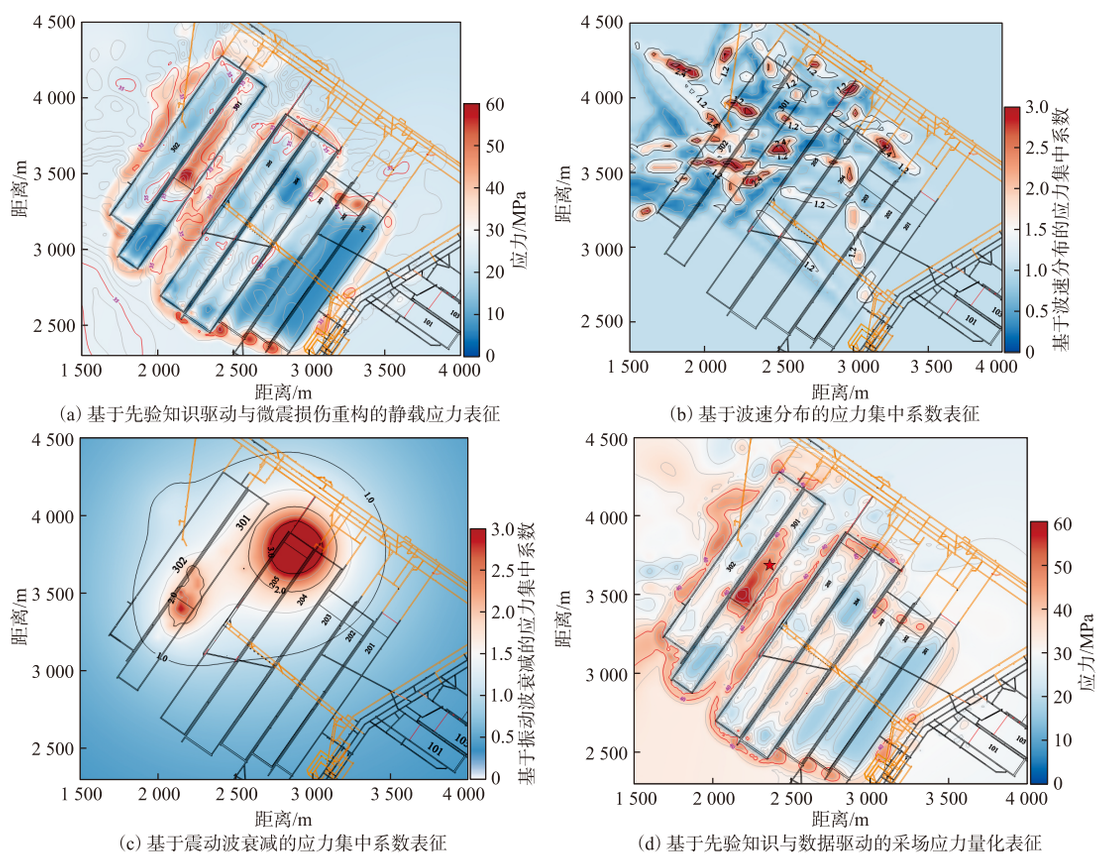
(a) 震源与冲击显现位置　　(b) 冲击显现情况

图7　冲击震源及显现特征

Fig. 7　Schematic of the seismic source location, the area of roof collapse and the manifestation situation

3.2　冲击地压危险动态评价

根据矿压理论,二盘区大面积采空区域及302工作面采空区,使301工作面与二、三盘区边界煤柱形成大型孤岛结构. 该结构具有应力集中程度高、分布范围广的特点. 采用Weibull分布、正态概率密度分布等数学模型,对先验知识驱动下的应力状态、地质构造环境等信息及数值模拟结果进行量化表征,最终获得2021年9月26日的采场应力分布,如图8所示. 由图可知,301工作面与二、三盘区边界煤柱合成的大孤岛在301工作面的开采扰动作用下,其采动超前支承压力影响范围可高达500 m.



(a) 基于先验知识驱动与微震损伤重构的静载应力表征　　(b) 基于波速分布的应力集中系数表征

(c) 基于震动波衰减的应力集中系数表征　　(d) 基于先验知识与数据驱动的采场应力量化表征

图8　基于先验知识与数据驱动的冲击地压危险动态评价

Fig. 8　Dynamic assessment of coal burst hazards based on knowledge-based and data-driven models

如图9所示为基于支架阻力推测的冲击地压危险系数,该工作面在2021年9月15日和9月25日期间出现工作面整体来压,到2021年9月27日,来压基本结束. 因此,覆岩破断引起的工作面来压与此次冲击显现事件的相关性较小.

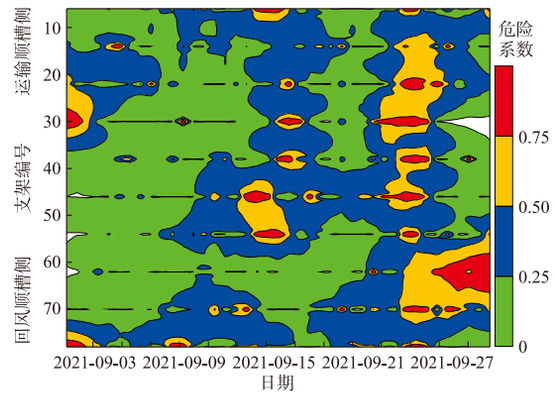


图 9 基于支架工作阻力推测的冲击地压危险系数

Fig. 9 Coal burst hazards coefficient inferred from the support working resistance

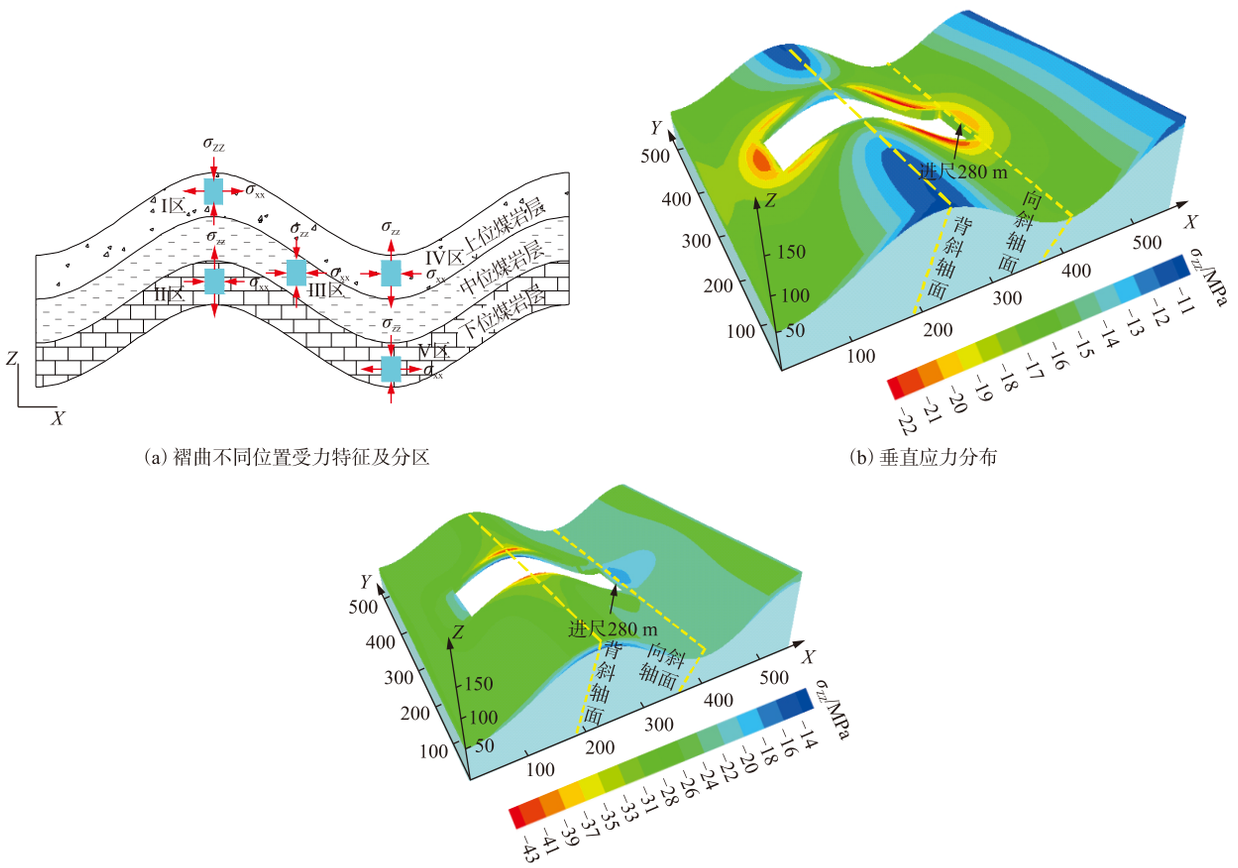
3.3 冲击地压危险评价结果检验

如图 8d 中所示五角星为此次冲击震源位置. 可以看出,该区域的应力集中程度达到 50 MPa,应力集中系数近似为 2(原岩应力为 24.65 MPa),属于危险区域.

3.3.1 力源分析

褶曲构造源于岩层受水平挤压作用发生弯曲变形. 同一褶皱各部位地应力分布差异显著,且为冲击地压高发区. 分析指出,褶皱可等效为三层岩层构件,并根据受力特征可划分出五个区域:背斜受拉区(Ⅰ区)、背斜受压区(Ⅱ区)、翼部强剪切区(Ⅲ区)、向斜受压区(Ⅳ区)和向斜受拉区(Ⅴ区). 各分区受力状态如图 10 所示[32].

该矿最大主应力方向为水平,最大水平应力为 38.23~44.87 MPa,垂直应力为 20.87~25.78 MPa,地应力较大;同时,冲击显现区处于 X3 向斜轴部(撤面道以里 450 m),对应图 10 所示易发冲击地压的向斜受拉Ⅴ区.



(a) 褶曲不同位置受力特征及分区

(b) 垂直应力分布

(c) 水平应力分布

图 10 褶曲构造不同区域应力特征及分布

Fig. 10 Schematic diagram of stress distribution in different regions of fold tectonics

3.3.2 覆岩结构与应力转移影响

由上文分析可知,此次冲击震源发生在煤层中,并与覆岩顶板周期破断引起的工作面来压无关,但与显现区域的应力集中有关.

矿山压力理论表明,采空区面积扩大使得主关键层悬顶距增加,产生弯曲沉降,形成下沉压缩区,实体煤侧产生上弯拉伸区,最终导致应力集中(图 11). 此外,301 工作面采动致其邻近区域应力超出二、三盘区煤柱应力水平. 进一步基于矩张量反演对该次微震事件进行震源机制求解,获得其破坏类

型为压缩破坏，表现为垂直方向压缩与水平方向拉伸的力学破裂机制，其震源机制描述如图 11 所示．

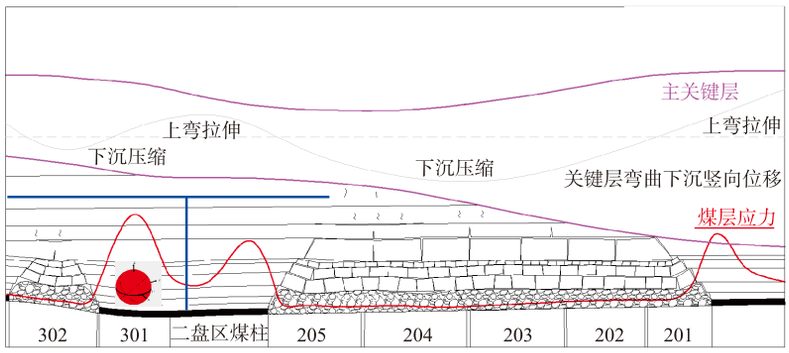


图 11　采场覆岩结构与应力转移分析示意

Fig. 11　Schematic of analysis of overlying coal structure and stress transfer in mining area

对于低位亚关键层，在采空区侧的煤体中形成下沉压缩区，在内部实体煤区域形成上弯拉伸区．关键层断裂前，上弯拉伸区煤体处于垂向拉张卸荷与水平压缩增压状态，易诱发拉张破坏事件；下沉压缩区煤体则主要承受垂向高压集中压缩，易触发挤压性破坏．关键层断裂后，下沉压缩区煤体受顶板回弹拉张主导，易触发拉张破坏；上弯拉伸区煤体则由顶板压缩主导，易诱发挤压破坏事件．因此，微震监测需重点关注临空侧高位顶板岩层的微震活动（图 12），以警示顶板断裂引发的反弹与压缩效应导致内部高应力实体煤压缩破坏；同时，该效应可使工作面支架阻力在采空区侧（301 运输顺槽侧）降低、实体煤侧（301 回风顺槽侧）上升（图 9）．综上，此次冲击显现由采空区侧顶板断裂引发的内部实体煤垂直压缩与采空侧煤体反弹水平拉伸共同作用导致．

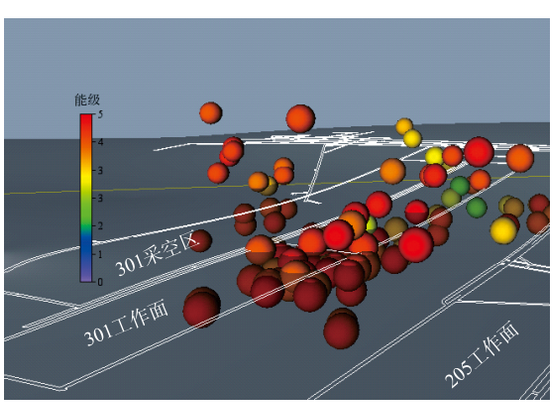
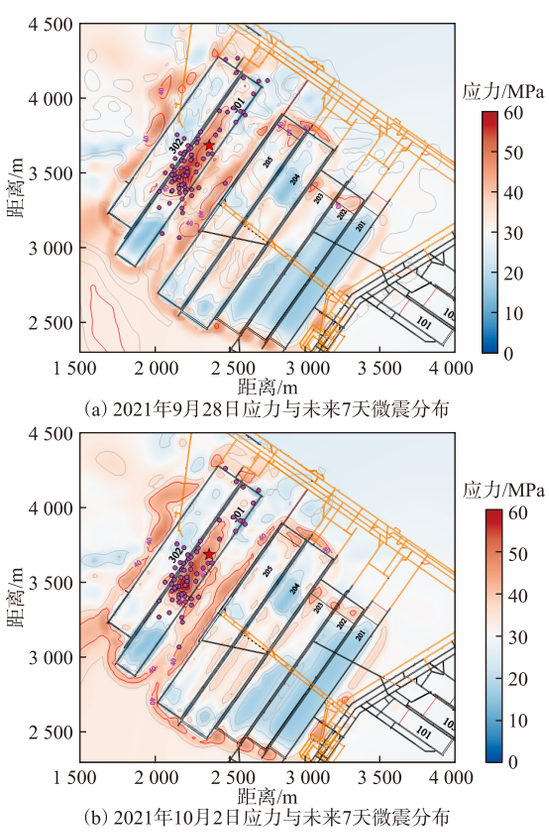


图 12　冲击显现前后微震事件空间分布

Fig. 12　Spatial distribution of microseismic events

3.4　冲击地压危险动态评价应用

冲击地压危险的动态评价与预测应用效果如图 13 所示，五角星标记为 2021 年 9 月 28 日冲击震源和冲击显现位置，散点为未来微震事件分布，应力分布为对应日期前一天的冲击危险预测结果．由图 13 可知，几乎所有微震事件（包括冲击震源事件）均发生在预测的高冲击危险区域，冲击显现发生在临近高冲击危险区域的巷道．



(a) 2021年9月28日应力与未来7天微震分布

(b) 2021年10月2日应力与未来7天微震分布

图 13　冲击地压危险动态评价与预测应用

Fig. 13　Application of coal burst hazard dynamic assessment and forecasting

在实际预警与防冲工程应用中，本文构建的评价方法可通过指标分解与时空融合，实现主控因素的定量判识与前兆信息的有效利用，具体可通过剖析各指标的异常特征锁定高相关性致灾因素．例如：若先验静载预估 σ_j 与微震损伤重构静载

应力σ_{sss}异常而动载σ_{sds}平稳，可判别为静载主导型危险，需采取大直径钻孔卸压；若微震重构动载应力σ_{sds}或载荷增量危险系数$\varphi_{\sigma Ids}$陡增，则分别对应远场动载或覆岩破断动载主导，需针对性采取顶板压裂或强化支护等解危措施.

由于深部煤岩介质的非均质性与现有原位监测手段的局限，本方法主要侧重于通过应力集中系数，实现对冲击地压危险相对程度与临界状态的时空量化圈定. 对于灾害发生瞬间煤岩体内部绝对静动载应力的瞬时值，以及释放冲击能量的验证，在当前的工程技术条件下仍具极大挑战. 这也是未来依托更高精度的多场耦合原位监测技术亟待深入探讨的研究方向.

4 结 论

1)提出了基于先验知识与数据驱动的冲击地压危险动态评价方法. 其中，先验知识驱动包括经验知识、数值模拟等模型驱动下的采场应力与地质构造环境等信息的量化表征，并综合考虑多因素耦合分析方法中的区域划分范围及危险等级，采用Weibull分布、正态分布等数学模型将各因素数值化预估静载应力；数据驱动包括基于波速分布的应力集中系数和基于微震损伤重构应力两种参量表征静载效应，以及基于震动波衰减的累积塑性变形与基于支架阻力的载荷增量两种参量表征动载效应.

2)将先验知识驱动的静载应力预估模型应用于某矿7302工作面，其预估结果与数值模拟应力场的结构相似度指数(SSIM)高达0.881，有力证实了该评估模型在采场静载解析中的可靠性与有效性.

3)以陕西正通煤业工作面回采期间的冲击显现案例为工程背景，从冲击显现特征分析、震源机制分析、力源与应力监测分析、覆岩结构与应力转移分析等方面，检验并验证了基于先验知识与数据驱动的冲击地压危险动态评价方法及其解释的合理性. 结果表明，此次冲击显现是由高应力集中煤体在采空区侧顶板断裂引起的内部实体煤垂直压缩与采空侧煤体反弹水平拉伸共同作用下产生的一次压缩型破坏事件，震动波造成周围弱支护巷道段的局部冲击冒顶显现.

参考文献：

[1] 袁 亮，马衍坤，黄勤豪，等. 煤岩动力灾害模型试验灾变地层模拟材料研制现状与展望[J]. 中国矿业大学学报，2024，53(5)：827-856.
YUAN Liang，MA Yankun，HUANG Qinhao，et al. Development status and prospects of simulation materials for catastrophic prone strata in the physical model experiments on coal and rock dynamic disasters[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2024，53(5)：827-856.

[2] 高明仕，赵世帆，席国军，等. 重复冲击特厚煤层巷道围岩裂隙演化及破坏特征[J]. 中国矿业大学学报，2024，53(4)：634-646.
GAO Mingshi，ZHAO Shifan，XI Guojun，et al. Fracture evolution and failure characteristics of roadway surrounding rock in extra-thick coal seams subjected to multiple coal bursts[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2024，53(5)：827-856.

[3] 钟涛平，李振雷，陈建强，等. 近直立特厚煤层应力调控防冲方法及机制[J]. 中国矿业大学学报，2024，53(2)：291-306.
ZHONG Taoping，LI Zhenlei，CHEN Jianqiang，et al. Method and mechanism of rock burst prevention in the steeply inclined extremely thick coal seam through stress regulation[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2024，53(2)：291-306.

[4] 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.

[5] 窦林名，牟宗龙，曹安业，等. 冲击矿压防治技术[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，2020.
DOU Linming，Mu Zonglong，Cao Anye. et al. Prevention and control technology of rock burst[M]. Xuzhou：China University of Mining and Technology Press，2020.

[6] 窦林名，王盛川，巩思园，等. 冲击矿压风险智能判识与监测预警云平台[J]. 煤炭学报，2020，45(6)：2248-2255.
DOU Linming，WANG Shengchuan，GONG Siyuan，et al. Cloud platform of rock-burst intelligent risk assessment and multi-parameter monitoring and early warning[J]. Journal of China Coal Society，2020，45(6)：2248-2255.

[7] 何生全，何学秋，宋大钊，等. 冲击地压多参量集成预警模型及智能判识云平台[J]. 中国矿业大学学报，2022，51(5)：850-862.
HE Shengquan，HE Xueqiu，SONG Dazhao，et al.

Multi-parameter integrated early warning model and an intelligent identification cloud platform of rockburst [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(5): 850-862.

[8] 姜福兴，冯　宇，刘　畔.采场回采前冲击危险性动态评估方法研究[J].岩石力学与工程学报，2014，33(10)：2101-2106.
JIANG Fuxing, FENG Yu, LIU Ye. Dynamic evaluation method for rock burst risk before stopping[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 33(10): 2101-2106.

[9] 牟宗龙，窦林名，巩思园，等.煤矿井下冲击矿压分区分级预测方法：CN 201310157614.6 [P]. 2013-08-21.
MU Zonglong, DOU Linming, GONG Siyuan, et al. Classification prediction method of rock burst zone in coal mine:CN 201310157614.6 [P]. 2013-08-21.

[10] 窦林名，贺　虎，何　江，等.冲击危险评价的相对应力集中系数叠加法[J].煤炭学报，2018，43(2)：327-332.
DOU Linming, HE Hu, HE Jiang, et al. New method of rockburst risk assessment using relative stress concentration factor superposition[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 327-332.

[11] 李许伟，窦林名，王占成，等.工作面冲击矿压相对危险区划分的模糊层次综合评价方法[J].矿业安全与环保，2012，39(1)：79-82.
LI Xuwei, DOU Linming, WANG Zhancheng, et al. Fuzzy analytic hierarchy process for zoning of relatively dangerous areas of rockburst in working face [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2012, 39(1): 79-82.

[12] 王爱文，王　岗，代连朋，等.基于临界应力指数法巷道冲击地压危险性评价[J].煤炭学报，2020，45(5)：1626-1634.
WANG Aiwen, WANG Gang, DAI Lianpeng, et al. Evaluation on the rock burst risks of roadway using critical stress index method[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1626-1634.

[13] 张志镇，高　峰，许爱斌，等.冲击地压危险性的集对分析评价模型[J].中国矿业大学学报，2011，40(3)：379-384.
ZHANG Zhizhen, GAO Feng, XU Aibin, et al. Model for estimating rock burst risk in a coal mine based on set pair analysis[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(3): 379-384.

[14] 姜福兴，舒凑先，王存文.基于应力叠加回采工作面冲击危险性评价[J].岩石力学与工程学报，2015，34(12)：2428-2435.
JIANG Fuxing, SHU Couxian, WANG Cunwen. Impact risk assessment of mining face based on stress superposition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(12): 2428-2435.

[15] 贺　虎，郑有雷，张　雄，等.基于动静应力分析的复杂工作面冲击危险评价[J].煤炭科学技术，2019，47(7)：265-270.
HE Hu, ZHENG Youlei, ZHANG Xiong, et al. Rock burst risk evaluation based on dynamic-static stress analysis in complex working face[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 265-270.

[16] 潘俊锋，高家明，闫耀东，等.煤矿冲击地压发生风险判别公式及应用[J].煤炭学报，2023，48(5)：1957-1968.
PAN Junfeng, GAO Jiaming, YAN Yaodong, et al. Risk identification formula for coal burst occurrence and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1957-1968.

[17] 高家明，夏永学，杨光宇，等.复合构造区域煤岩体应力分布及冲击地压危险性评价[J].工矿自动化，2021，47(3)：14-19.
GAO Jiaming, XIA Yongxue, YANG Guangyu, et al. The stress distribution of coal rock mass and the risk evaluation of rock burst in the composite structure area[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(03): 14-19.

[18] 徐隽松，潘鹏志，陈建强，等.基于地应力反演的褶曲区煤层冲击危险性评价研究[J].煤炭科学技术，2023，51(9)：35-45.
XU Junsong, PAN Pengzhi, CHEN Jianqiang, et al. Study on burst risk assessment of coal seam in folded area based on pre-mining stress back analysis [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 35-45.

[19] 刘少虹，潘俊锋，秦子晗，等.基于电磁波CT探测的掘进工作面冲击危险性评价技术研究[J].岩石力学与工程学报，2017，36(增2)：4093-4101.
LIU Shaohong, PAN Junfeng, QIN Zihan, et al. Research on the risk hierarchical assessment of rock burst of heading face based on acoustic emission and electromagnetic wave CT system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Sup 2): 4093-4101.

[20] 王　超，张广超，赵西坡，等.基于顶板结构特征的冲击危险性评价方法及应用[J].采矿与岩层控制工程学报，2024，6(2)：125-135.
WANG Chao, ZHANG Guangchao, ZHAO Xipo, et al. Evaluation method and application of impulse

hazard based on roof structure characteristics [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(2): 125-135.

[21] 崔 峰, 李宜霏, 贾 冲, 等. 基于高斯混合模型的采煤工作面冲击危险性评价[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(10): 85-96.
CUI Feng, LI Yifei, JIA Chong, et al. Rock burst hazard evaluation of coal mining face based on a Gaussian mixture model[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(10): 85-96.

[22] 杜才溢, 张玉江, 孟 鑫, 等. 基于钻屑量界限方程的冲击危险性判定新方法[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(1): 86-91.
DU Caiyi, ZHANG Yujiang, MENG Xin, et al. A new method of rock burst hazard determination based on drilling cuttings limit equation[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(1): 86-91.

[23] 韩 刚, 解嘉豪, 秦喜文, 等. 基于图像识别技术的冲击地压危险区域智能化评价方法[J]. 工矿自动化, 2023, 49(12): 77-86.
HAN Gang, XIE Jiahao, QIN Xiwen, et al. Intelligent assessment method for rockburst hazard areas based on image recognition technology[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(12): 77-86.

[24] 曹安业, 白贤栖, 蔡 武, 等. 覆岩厚度变化应力异常机制及冲击矿压诱发机理[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(3): 512-520.
CAO Anye, BAI Xianxi, CAI Wu, et al. Mechanism for stress abnormality and rock burst in variation zone of roof-stratum thickness [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(3): 512-520.

[25] 蔡 武, 陆 强, 巩思园, 等. 一种基于理论与数据驱动融合的冲击地压风险评估方法: CN 202111337335.9 [P]. 2021-11-12.
CAI Wu, LU Qiang, GONG Siyuan, et al. A method for rock burst risk assessment based on theory and data driven fusion: CN 202111337335.9 [P]. 2021-11-12.

[26] CAI W, DOU L M, SI G, et al. A new seismic-based strain energy methodology for coal burst forecasting in underground coal mines[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 123: 104086.

[27] 蔡 武, 窦林名, 曹安业, 等. 一种基于微震损伤重构的采动应力评估方法: CN 201910404955.6 [P]. 2019-05-16.
CAI Wu, DOU Linming, CAO Anye, et al. A mining stress evaluation method based on seismic damage reconstruction: CN 201910404955.6 [P]. 2019-05-16.

[28] 蔡 武, 窦林名, 李振雷, 等. 矿震震动波速度层析成像评估冲击危险的验证[J]. 地球物理学报, 2016, 59(1): 252-262.
CAI Wu, DOU Linming, LI Zhenlei, et al. Verification of passive seismic velocity tomography in rock burst hazard assessment[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016,59(1): 252-262.

[29] HE J, DOU L M, CAI W, et al. In situ test study of characteristics of coal mining dynamic load[J]. Shock and Vibration, 2015, 2015(1): 121053.

[30] BENIOFF H. Earthquakes and rock creep: (Part Ⅰ: Creep characteristics of rocks and the origin of aftershocks) [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1951, 41(1): 31-62.

[31] CAI W, BAI X, SI G, et al. A monitoring investigation into rock burst mechanism based on the coupled theory of static and dynamic stresses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(12): 5451-5471.

[32] 曹安业, 薛成春, 吴 芸, 等. 煤矿褶皱构造区冲击地压机理研究及防治实践[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6): 82-87.
CAO Anye, XUE Chengchun, WU Yun, et al. Study on mechanism of rock burst in fold structure area of coal mine and its prevention practice[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 82-87.

(责任编辑 仝 腾 宋 爽)