采动疏水作用下煤体冲击破坏前兆特征试验研究

朱广安[1],苏晓华[1],韩进鹏[2],徐自豪[1]
(1. 西安科技大学 能源与矿业工程学院,陕西 西安 710054;2. 山东黄金矿业股份有限公司 新城金矿,山东 烟台 261499)

摘要: 为提高富水工作面采动疏水作用下冲击地压监测预警的准确性及针对性,采用不同围压下自然与饱水煤样真三轴加卸载声发射试验,结合现场微震数据以及随机森林(RF)算法,研究了水-力耦合作用下的损伤演化机理及前兆指标敏感性. 结果表明:水-力耦合作用对冲击地压的发生影响显著,饱水煤样在破坏阶段受孔隙水压力与围岩应力叠加影响,内部裂隙扩展贯通加速,表现出比自然煤样更剧烈的"阶梯状"能量释放与损伤演化特征. 确定了富水条件下冲击地压监测预警特异性前兆指标,断层总面积$A(t)$值与微震活动水平(b值)的高低对临界失稳响应最为敏感,在破坏前两者变化幅度分别为1 349%与57%. 构建了基于权重的多参量耦合预警模型,利用随机森林算法量化了指标重要性:b值>$A(t)$值>矿震活动标度(ΔF值)>某时间段内微震事件的平均震级的变化(Z-map值)>地震活动性$A(b)$值>等效能级参数(EEM值),并赋予权重,据此建立了富水工作面冲击危险等级监测预警指标. 研究结果为富水工作面冲击危险监测预警提供了理论依据.

关键词: 冲击危险;饱水煤样;采动疏水;声发射;前兆指标
中图分类号: TD 324 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2026)03-0761-13

Experimental study on precursory characteristics of coal rockburst failure under mining-induced drainage

ZHU Guang′an[1], SU Xiaohua[1], HAN Jinpeng[2], XU Zihao[1]
(1. College of Energy and Mining Engineering, Xi′an University of Science and Technology, Xi′an, Shaanxi 710054, China; 2. Shandong Gold Mining Co., Ltd., Xincheng Gold Mine, Yantai, Shandong 261499, China)

Abstract: To enhance the accuracy and specificity of rockburst monitoring and early warning under mining-induced dewatering in water-rich working faces, true triaxial loading-unloading acoustic emission (AE) tests were conducted on natural and saturated coal specimens under various confining pressures. Integrating field microseismic data with the Random Forest (RF) algorithm, the damage evolution mechanism and precursory indicator sensitivity under hydro-mechanical coupling were investigated. The results indicate that hydro-mechanical coupling significantly governs rockburst occurrence. During the failure stage, saturated coal specimens affected by the superposition of pore water pressure and rock stress exhibit accelerated internal crack propagation and coalescence,

收稿日期: 2025-12-24 **修回日期:** 2026-02-25 **DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250608
基金项目: 国家自然科学基金项目(52274095);陕西省自然科学基础研究计划项目(2024JC-YBMS-261)
第一作者: 朱广安(1989—),男,江苏省建湖县人,副教授,硕士生导师.E-mail:zhuguangan@163.com
通信作者: 苏晓华(2001—),男,陕西省安康市人,硕士研究生.E-mail:18146853085@163.com
引用格式: 朱广安,苏晓华,韩进鹏,等.采动疏水作用下煤体冲击破坏前兆特征试验研究[J].中国矿业大学学报,2026,55(3):761-773.
ZHU Guang′an, SU Xiaohua, HAN Jinpeng, et al. Experimental study on precursory characteristics of coal rockburst failure under mining-induced drainage[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(3): 761-773.

characterized by more intense "step-like" energy release and damage evolution compared to natural specimens. Specific precursory indicators for rockburst under water-rich conditions were identified, among which the total fault area $A(t)$ and b-value were most sensitive to critical instability, with pre-failure variation amplitudes of 1 349% and 57%, respectively. A weight-based multi-parameter coupling warning model was developed. The RF algorithm quantified the indicator importance as: b-value (seismicity level) > $A(t)$ (total fault area) > ΔF (seismic activity scale) > *Z-map* (mean magnitude change) > $A(b)$ (seismicity) > *EEM* (equivalent energy magnitude). Accordingly, a monitoring and early warning framework for rockburst hazards in water-rich environments is established, providing a theoretical foundation for disaster prevention under similar geological conditions.

Key words: rockburst risk; saturated coal sample; mining-induced drainage of confined water; acoustic emission; precursor indicators

蒙陕矿区具有煤层埋深大、煤层冲击倾向性强及顶板厚层砂岩含水层广泛赋存等特点[1-2]. 顶板含水层疏水后,其原有力学平衡被破坏,诱发应力场重新分布,导致富水区边缘煤体围压急剧升高,显著增加了冲击地压灾害预警的难度[3]. 在冲击危险监测预警技术中[4-8],微震监测法因覆盖范围广、空间分辨率高,被认为是当前冲击地压预测领域最有效且具发展潜力的技术之一[9].

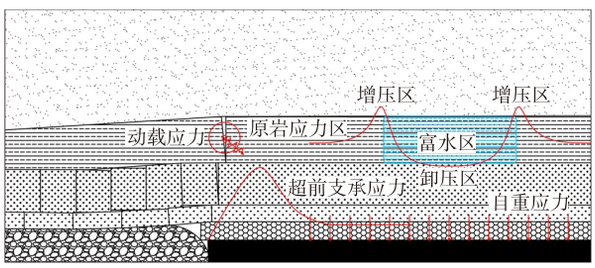
声发射和微震监测技术在煤岩破坏过程中的应用研究已取得显著进展,许多学者对实验室声发射前兆和现场微震特征做了大量研究. 在实验室声发射监测方面,文献[10]通过开展煤样单轴加载声发射试验,确定了b值、缺震、$A(b)$值、断层总面积、活动度S及等效能级共6项煤岩灾变前兆敏感指标,并构建了一套基于微震前兆指标体系的冲击地压综合预警模型;文献[11]研究了岩石破裂过程中能量释放与b值的演化规律,指出b值的异常骤降是宏观破裂发生的重要前兆;文献[12]则通过试验探明了不同饱水状态下岩体的力学强度弱化机制与声发射能量释放路径的改变;文献[13]基于神经网络系统揭示了微震与声发射多参量前兆信息的演化规律;文献[14]通过开展真三轴加载声发射试验,分析了煤体承载破坏过程的应变场与声发射响应规律,总结了煤体失稳破坏的前兆信息;文献[15]优选了b值、$A(b)$值、*Z-map*值、$A(t)$值、矿震时间信息熵Q_t、局部b值(b_L)、算法复杂性AC值、*EEM*值、时空扩散性d_s、震源聚集度S_D等10个监测预警指标,并取得了良好的应用效果. 在现场微震监测方面,文献[16]证实微震能量/频次可表征动载扰动下应力集中,并建立动态微震参数预警模型;文献[17]针对急倾斜巨厚煤层,综合多参量时序演化(日总能量-频次、$A(b)$、S、b、微震活动$P(b)$值及缺震)识别异常前兆时间跨度规律,实现冲击预警;文献[18]提出了震动能量-频次、b值、$A(t)$值、$A(b)$值、缺震等多参量预警指标. 虽然2种尺度下的应力波能量与频率有所不同,但二者在本质上都是煤岩体破裂演化过程中产生,具有相似的物理性质,因此实验室声发射规律及研究成果可以作为实际微震预警的基础[19].

尽管声发射与微震监测技术在冲击地压预警领域已趋于成熟,但现有研究多聚焦于常规地质条件,针对蒙陕矿区埋深大、顶板富水性强这一典型特征的适用性研究不足. 特别是在水-力耦合环境下,传统预警指标的敏感性与适用性尚不明确,且现有多参量预警模型普遍存在等权赋值或过度依赖主观经验的局限性. 鉴于此,本文以陕西建庄煤矿富水工作面为工程背景,对比分析不同围压下自然与饱水煤样的声发射演化特征,揭示了水-力耦合作用下煤样的冲击破坏特征,并优选出6项敏感前兆指标;在此基础上,结合现场实测微震数据,利用随机森林(RF)算法对优选的指标进行重要性量化排序,进而构建多参量耦合的综合预警模型,旨在提升微震监测技术在富水工作面冲击地压监测预警中的准确性.

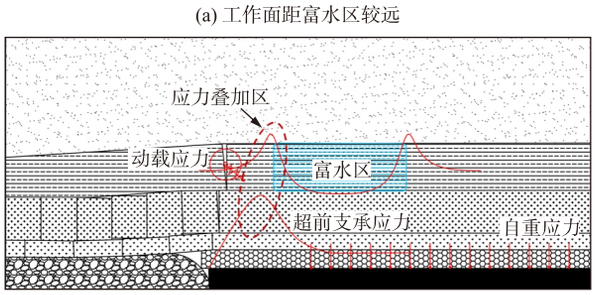
1 工程背景

富水工作面回采期间围岩应力演化过程如图1所示. 由图1可知,顶板富水区的疏水扰动导致影响域内煤岩体卸压,并在其边缘形成应力集中,呈现出显著的增压区与卸压区分布特征[20]. 这种应力集中强度与埋深及疏水强度呈正相关,并逐

步演化为稳定的静载应力场．当该静载场与采动动载发生叠加耦合时，将显著提高冲击地压的发生概率[21]．



(a) 工作面距富水区较远



(b) 工作面推进至富水区附近

图 1　富水工作面回采期间围岩应力演化示意[20]

Fig. 1　Schematic diagram of surrounding rock stress evolution during mining in water-rich working face

陕西建庄煤矿 $4^{-2}302$ 工作面为典型的冲击地压矿井富水工作面，受顶板含水层的影响，工作面周围存在大面积富水区域，导致工作面煤体整体含水率较高．该工作面现主采 4^{-2} 煤层，工作面走向长度 2 080 m，倾斜宽度 198～300 m，埋深 450～740 m，平均煤厚 7.5 m．在工作面回采至 430～740 m 段时，累计监测到 1 742 次微震事件，其中能量≥10^3 J 的微震事件 274 次；该工作面富水区分布及微震事件空间展布特征如图 2 所示，图中Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ分别代表原岩应力区、增压区与卸压区．

图 3 为工作面回采期间不同区域微震事件震动频次及日累计能量随时间变化特征．分析发现，不同区域微震监测数据存在显著差异，相较于区域Ⅰ，区域Ⅱ的微震日频次与最大累计能量分别增加了 56.25% 与 75.12%，而进入富水区域后则趋于常态，因此，当工作面推采至富水区边缘临近区域时，冲击危险性将显著增强．

综上所述，本研究设计三轴加卸载试验方案，通过综合分析试验数据与工作面回采期间微震监测结果，筛选出富水工作面有效的微震监测预警指标，以期为富水条件下工作面冲击地压有效防控提供理论依据．

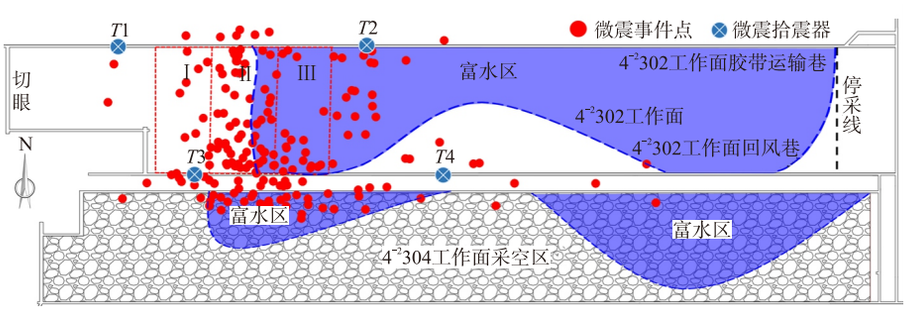


图 2　工作面富水区、微震事件及监测台站分布

Fig. 2　Distribution of water-rich areas in the working face, microseismic events, and monitoring station distribution

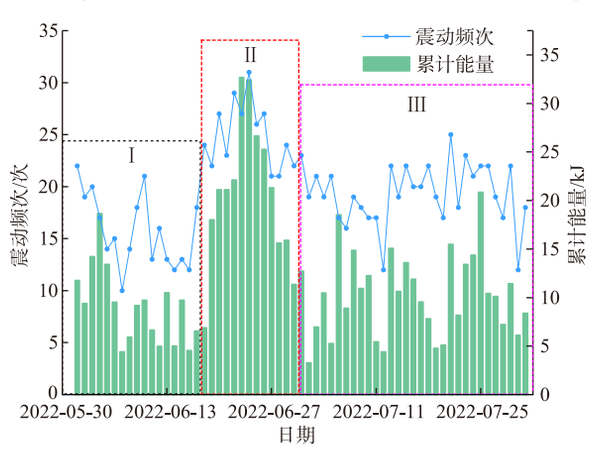


图 3　工作面回采区域微震事件特征

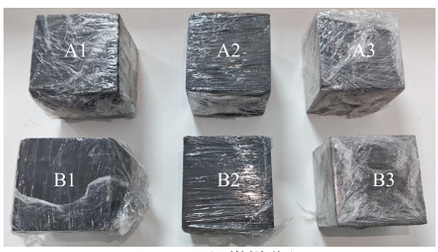
Fig. 3　Characteristics of microseismic events in the working face mining area

2　三轴加卸载试验设计

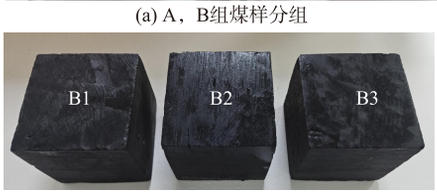
2.1　煤样选取及加工

试验煤样取自 $4^{-2}302$ 富水工作面，严格按照标准加工为 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试件（图 4）．试验采用分组对照设计，将试样随机划分为 A，B 这 2 组（编号分别为 A1～A3，B1～B3）以消除煤岩非均质性造成的试验结果离散性．

为精准还原富水区煤体的原位赋存状态，选取现场矿井水对 B 组试样实施饱水处理．试验采用自然浸泡法，每隔 12 h 进行质量监测，若连续 2 次称重偏差≤0.01 g 则判定煤样饱水．



(a) A，B组煤样分组



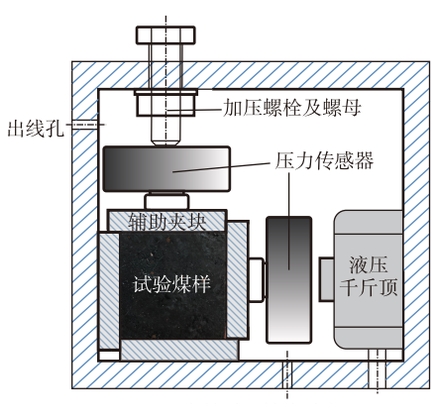
(b) B组煤样泡水实物图

图 4　煤样试验分组及煤样泡水实物图

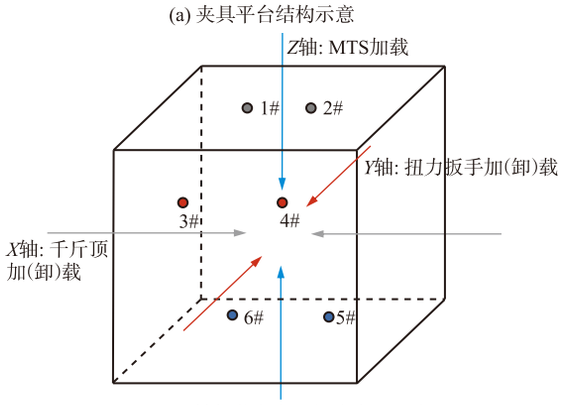
Fig. 4　Coal sample testing grouping and physical diagram of coal samples soaked in water

2.2　三轴加卸载试验及声发射监测系统

在 X，Y 和 Z 轴方向分别采用旋进螺母及扭矩倍增器、液压千斤顶及手动压力泵、MTS 万能试验机进行加卸载，如图 5a 所示．采用美国物理声学公司生产的 PCI-II 型全波形采集系统，试验共布置 6 个声发射传感器，探头布置方位以及应力加卸载方向示意见图 5b.



(a) 夹具平台结构示意



(b) 三轴加载方向及探头布置示意

图 5　三轴加卸载平台及声发射探头布置示意

Fig. 5　Triaxial loading and unloading platform and acoustic emission probe layout diagram

2.3　试验方案

结合富水区回采的工程背景及顶板疏水引起的应力场重构特征，本试验旨在重现工作面向富水区推进过程中的煤体应力演化全过程．具体包含 3 个阶段：1）初始地应力模拟阶段：将煤样加载至预设的三向应力水平并保持稳压，直至煤样内部应力达到平衡状态；2）巷道掘进模拟阶段：对 σ_X（模拟侧向水平应力）实施瞬时卸载，以模拟巷道开挖；3）回采扰动模拟阶段：采用 σ_Y 持续卸载、σ_Z 同步加载的复合应力路径，模拟工作面回采过程．试验加载路径设计如图 6 所示（σ_X，σ_Y，σ_Z 分别对应 X 轴、Y 轴、Z 轴的应力），具体试验流程如下：

Ⅰ-初始应力加载阶段：加载系统与声发射监测系统同步校准后，将试样以 0.5 mm/min 的速率加载至设定的初始应力状态．

Ⅱ-保压阶段：保持 X，Y，Z 三轴向位移恒定不变，并维持该稳定状态持续 150 s，使煤样受力稳定，煤体内部应力重新分布．

Ⅲ-卸载阶段：保持 Y，Z 轴位移恒定，对 X 轴单侧进行快速卸载，以此模拟巷道掘进导致的围岩瞬时卸荷效应．

Ⅳ-破坏阶段：采用双向扰动加卸载路径，Y 方向以 0.5 mm/min 的速率缓慢卸载，模拟煤层采动引起的应力释放过程；同时，Z 方向以 1.0 mm/min 的速率持续加载，直至煤样发生瞬时失稳破坏．

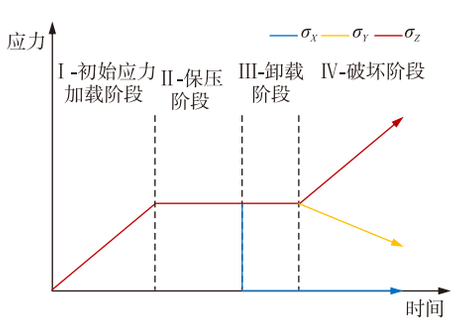
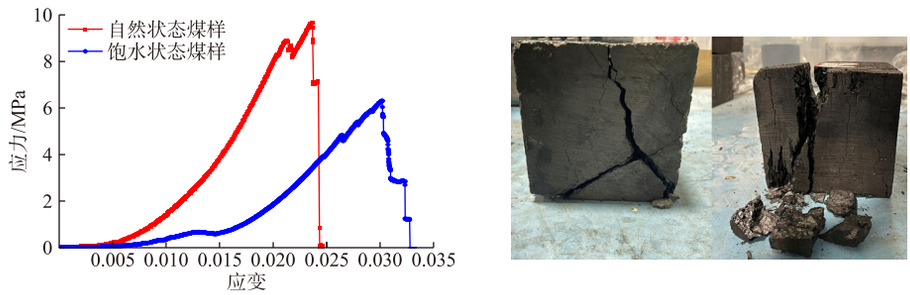


图 6　三轴加卸载试验应力路径

Fig. 6　Triaxial loading and unloading test stress path

如图 7 所示，试验测得自然煤样与饱水煤样的单轴抗压强度分别为 9.68 和 6.31 MPa，与自然煤样相比，饱水煤样强度下降 34.78%．为真实还原富水工作面的高应力赋存环境，将 Z 轴方向的预加载应力设定为 10 MPa．同时，结合该区域水平地应力测试结果为 10.9～20.5 MPa，将 X，Y 轴方向初始加载应力梯度设置为 10，15，20 MPa，试验关键参数详见表 1.



(a) 自然与饱水煤样应力-应变曲线　　(b) 自然与饱水煤样破坏图

图 7　自然与饱水煤样应力-应变曲线及破坏图

Fig. 7　Stress-strain curve and failure diagram of natural and water-saturated coal samples

表 1　煤样含水率及应力加载情况

Table 1　Water content and stress loading of coal specimens

编号	含水状态	三轴应力设定值		编号	含水状态	三轴应力设定值	
		σ_Z/MPa	σ_X,σ_Y/MPa			σ_Z/MPa	σ_X,σ_Y/MPa
A1	自然	10	10	B1	饱水	10	10
A2		10	15	B2		10	15
A3		10	20	B3		10	20

3　试验结果分析

本试验重点聚焦煤样冲击破坏阶段(Ⅳ)声发射事件特征. 为保证数据统计的有效性,将声发射活动较低的卸载阶段(Ⅲ)与保压阶段(Ⅱ)的声发射活动数据进行合并处理. 试验分析主要分为两方面:一是分析自然与饱水煤样在不同围压条件下,应力-时间-声发射事件的演化规律;二是量化分析Ⅰ、Ⅱ+Ⅲ阶段与Ⅳ阶段的声发射累计能量及其占总能量的比例关系,明确能量演化与煤样破坏进程的对应性.

3.1　不同围压下煤样声发射动态演化特征

图 8 为自然与饱水煤样在不同围压下三轴加卸载应力-时间-声发射事件关系曲线. 对比图 8 可知,随围压增大,自然与饱水煤样的破坏应力峰值与声发射绝对能量峰值呈现递增的趋势,且破坏前声发射能量在短期内呈现阶梯状跃升;从声发射定位特征看,声发射事件集中在破坏阶段(Ⅳ)并逐步向煤样中部区域扩展且分布密度显著提升. 声发射事件演化特征表明,煤样的破坏过程本质是内部裂隙的动态扩展演化. 初期为内部微裂隙逐渐萌生;随后在持续加载作用下,微裂隙不断扩展、贯通,进而形成较大尺度的裂隙,这一过程会导致频繁的能量释放或单次较大能量释放,最终导致煤样整体失稳破坏. 在岩石破裂过程中,应力集中达到一定程度后,声发射信号的频发与能量的突变是岩石破坏失稳前的典型特征[22],这与上述观察到的能量阶梯式跃升现象相吻合.

进一步对比图 8a 和 8d 可知,水致软化效应削弱了煤体的宏观承载力;相关研究表明,水分不仅软化了煤体,并且还催生了大量微裂隙[23]. 煤样吸水后,内部原生微缺陷增多;在 Z 轴载荷与孔隙水压的作用下,饱水煤样内部裂纹与微裂隙的扩展会更加频繁且剧烈,表现为同围压下饱水煤样的破坏应力峰值低于自然煤样,而破坏阶段的声发射事件更多,破坏瞬间的单次声发射能量也更大.

综上所述,高围压条件下,煤样内部裂隙的应力集中效应加剧,裂隙扩展剧烈程度与贯通速率显著提升,破坏时声发射能量明显提高;2 种不同状态煤样均表现出显著的能量积聚特征,能量释放过程均较为剧烈,且声发射事件均主要集中于破坏阶段(Ⅳ). 此外,由于水的作用,饱水煤样冲击破坏的前兆特征更加明显,表现为声发射能量增长速率更快,破坏时能量释放更剧烈. 该特征为富水条件下冲击地压微震预警提供了更明确的信号指示,可为预警指标筛选提供试验支撑.

3.2　不同围压下煤样声发射累计能量分布特征

统计煤样在各阶段的累计能量如图 9 与表 2 所示. 随着围压升高,2 类煤样能量释放模式的演化趋势具有一致性,破坏阶段(微裂隙快速扩展、贯通至宏观裂纹形成阶段)的声发射能量释放总量远高于前 3 个阶段(累计能量占比普遍超过 70%). 对比发现,饱水煤样的能量集中与突发释放特征较自然煤样更为剧烈,阶段性更为显著.

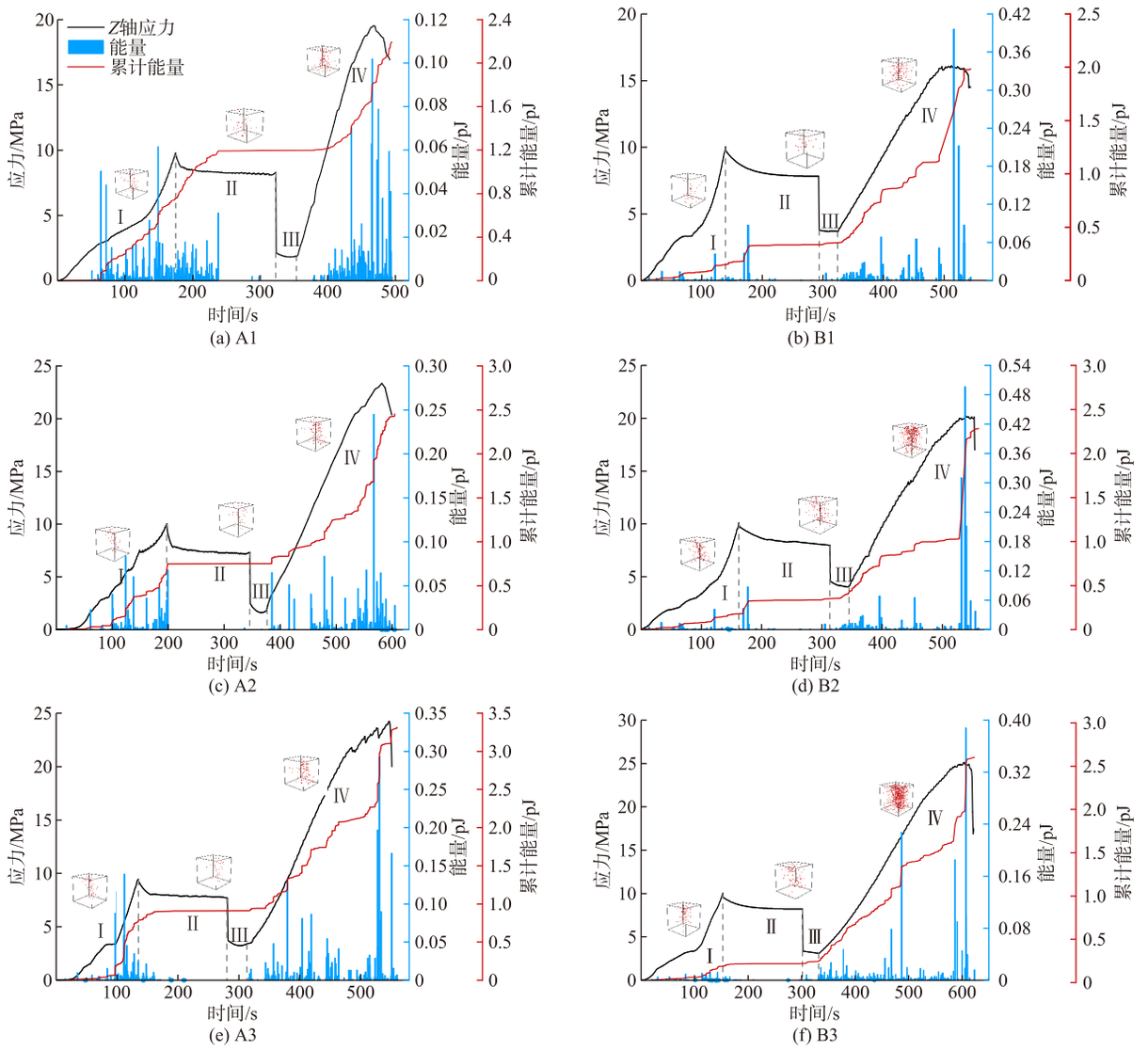


图 8 煤样应力-时间-声发射事件演化特征

Fig. 8 Evolution characteristics of stress-time-acoustic emission events of coal samples

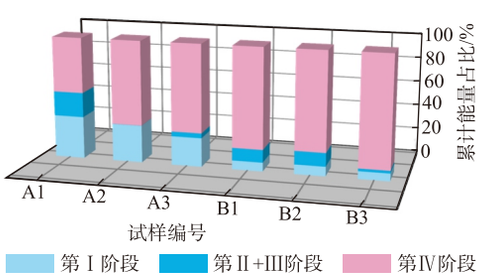


图 9 煤样各阶段累计能量占比

Fig. 9 Cumulative energy share of coal samples at each stage

从作用机制来看，煤样吸水后，水分通过水致软化效应降低煤体力学强度，并通过孔隙水压力作用改变内部应力状态，使得裂隙在载荷作用下更易扩展并贯通形成宏观破裂面；当围压进一步升高时，该效应被显著加剧，导致饱水煤样内部裂隙扩展速率加快、微裂隙生成频次提高，进而引发更大规模的弹性能量集中释放.

表 2 煤样各阶段累计能量及占比

Table 2 Accumulated energy and proportion of coal samples in each stage

试样编号	累计能量/pJ(占比/%)		
	Ⅰ阶段	Ⅱ，Ⅲ阶段	Ⅳ阶段
A1	0.757(34.54)	0.441(20.10)	0.995(45.37)
A2	0.748(30.50)	0.003(0.12)	1.700(69.38)
A3	0.788(23.66)	0.131(3.94)	2.410(72.41)
B1	0.146(7.29)	0.208(10.38)	1.650(82.34)
B2	0.179(7.84)	0.252(11.05)	1.850(81.11)
B3	0.163(6.30)	0.055(2.15)	2.360(91.54)

综上，与自然煤样相比，饱水煤样在三轴加卸载过程中，声发射事件数量更密集、累计释放能量更高；尤其在高围压环境下，饱水煤样的能量集中效应更突出，破坏阶段的能量释放频次与总量均

显著提升，这意味着其在工程实践中更易诱发冲击地压事件.

4　高围压下饱水煤样冲击破坏前兆指标确定

4.1　微震前兆信息指标筛选

由于煤样破坏过程中其内部的裂隙发育与能量释放是非均匀的，在煤样达到破坏前，指标值会出现显著的变化，这一变化可作为煤样破坏的前兆信息. 基于文献[10,17,24]及试验声发射数据，初步选取包括 b 值、$A(b)$ 值、$Z\text{-}map$ 值、$A(t)$ 值、矿震活动标度 ΔF 值、等效能级参数 EEM 值、矿震时间信息熵 Q_t 值、矿震活动度 S 值及缺震在内的 9 项指标，开展饱水煤样冲击破坏前兆的适用性验证.

基于试验实测数据，构建自然煤样 A2 与饱水煤样 B2 的各前兆指标-应力-时间曲线动态耦合演化特征图(图 10). 本文选取 2 项具有典型代表性的前兆指标展开针对性重点解析，其余指标的筛选准则与分析可依此逻辑类推.

其中，b 值为表征矿震强度分布特征的核心参数(基于“G-R”幂率关系)：低能级矿震事件占比越高，b 值越大，预示强震发生概率越低；高能级矿震事件占比越高，b 值越小，强震发生风险越高. $Z\text{-}map$ 值则反映特定区域内短期矿震平均能级与长期平均能级的偏离程度，可通过该指标识别矿震活动强度的时空异常分布，进而揭示区域应力积累与释放的不均衡状态.

通过对比自然煤样 A2 与饱水煤样 B2 破坏应力曲线与前兆指标的耦合关系可知，2 种煤样在加载阶段，随着载荷的不断增大，b 值在较大范围内上下波动，在达到应力峰值前 b 值均出现明显的下降趋势，并一直持续到煤样完全破坏. 因此 b 值可以作为饱水煤样的破坏前兆指标.

自然煤样破坏前，$Z\text{-}map$ 值仅在特定范围内波动，未呈现可识别的规律性变化，故其不适合作为自然煤样冲击破坏的前兆指标；而饱水煤样的 $Z\text{-}map$ 值在破坏阶段呈现持续下降趋势，尽管破坏前数值变化幅度较小，但随载荷增加，下降趋势特征明确，因此 $Z\text{-}map$ 值可作为饱水煤样冲击破坏的有效前兆指标.

同理，参照上述指标分析逻辑及已有前兆指标研究方法[18,25-29]，通过对比分析其余 7 项指标的演化特征，最终确定适用于饱水煤样冲击破坏的前兆指标为：b 值、$A(b)$ 值、$Z\text{-}map$ 值、ΔF 值、EEM 值以及 $A(t)$ 值. 该 6 项指标在煤样失稳破坏前均呈现出显著的异常演化特征，具备良好的前兆指示性，可为后续富水工作面微震预警提供指标支撑.

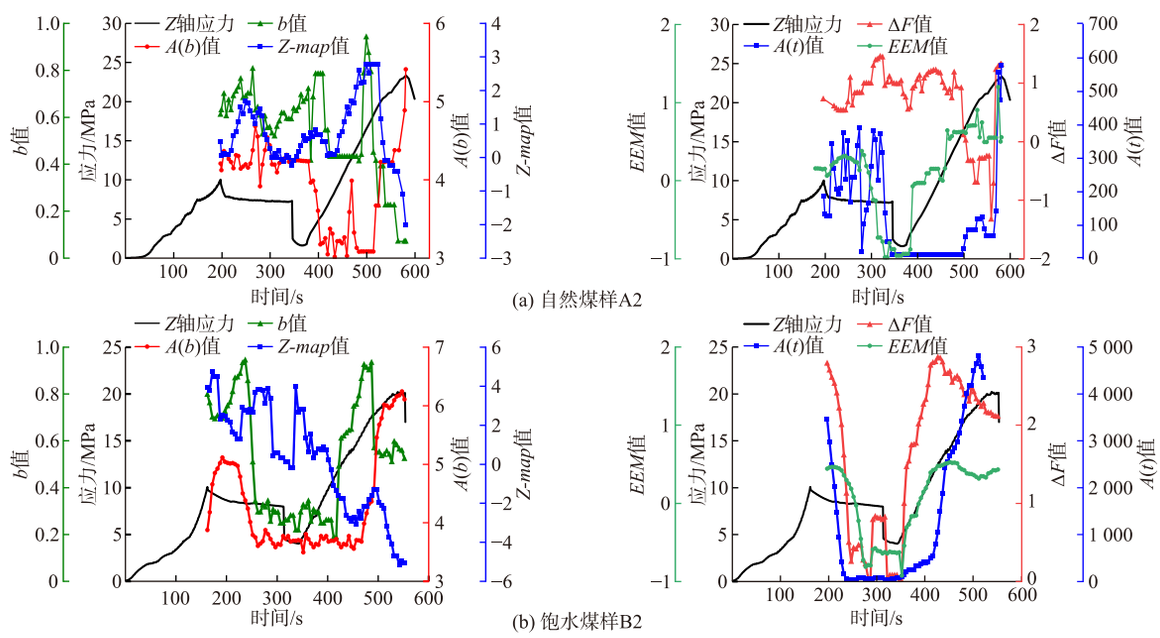


图 10　煤样各前兆指标与应力-时间曲线耦合关系

Fig. 10　The coupling relationship between various precursory indicators of coal samples and stress-time curves

4.2　高围压下饱水煤样冲击破坏前兆指标分析

基于筛选的 6 项前兆指标，结合富水工作面回采前疏放水作业导致的应力场重构及富水区边缘应力升高这一工程背景，利用 B3 煤样在高围压饱水条件下的声发射数据，对各指标的适用性进行了验证分析，结果如图 11 所示. 试验结果揭示了高围压环境下各指标在失稳破坏前的不同演化特征：断层总面积 $A(t)$ 值呈剧烈增长态势，相对初始

值增幅高达 1 349%，对煤样失稳的响应最为剧烈；ΔF 值与 EEM 值亦表现出强敏感性上升趋势，增幅分别达 218% 和 144%. *Z-map* 值表现为大幅度的负向偏移，变化幅值达 134%；b 值在破坏前波动收敛趋稳，并于煤样破坏前瞬间发生 57% 的显著骤降. $A(b)$ 值随载荷增加呈稳步上升特征，破坏时达到峰值，但增幅仅为 42%，敏感性相对较弱.

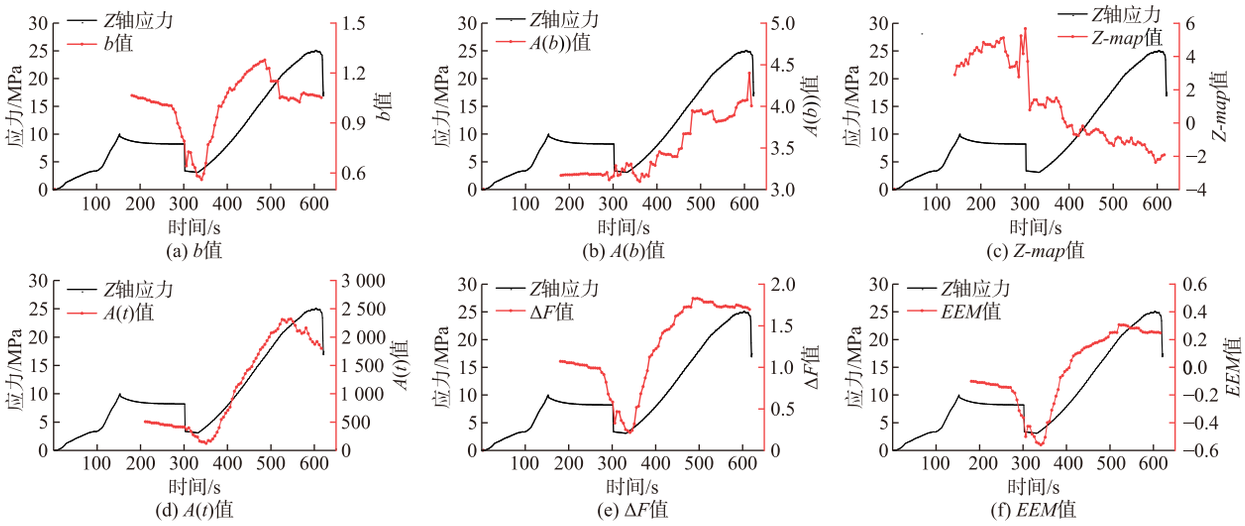


图 11 饱水煤样各前兆指标与应力-时间曲线耦合图

Fig. 11 Coupling diagram of precursor indexes and stress-time curves of water-saturated coal samples

综合 B3 煤样在高围压饱水工况下的试验结果分析，所选 6 项前兆指标均保持了良好的表征效能. 其中，b 值在临近失稳阶段呈现波动收敛但在破坏瞬间显著骤降的特征，断层总面积 $A(t)$ 值则表现出最为剧烈的响应幅值，故建议确立二者为该工况下冲击危险判识的核心预警指标. 其余 4 项指标存在响应滞后或变幅较小的局限，$A(b)$ 值的相对增幅仅为 42%，敏感性较弱，易受环境噪声掩盖；而 ΔF 值、*EEM* 值及 *Z-map* 值的变化幅度(134%～218%)虽具一定显著性，但相较于 $A(t)$ 值(1 349%)与 b 值(57%)仍存在显著差距，且多呈现渐进式演化特征，缺乏高能量事件发生前典型的前兆突变特征. 因此，建议采用“主-辅”指标协同的多参量融合策略，以提升富水工作面冲击地压监测预警的鲁棒性与精准度，为深部高围压富水区的灾害防控提供理论与参数支撑.

4.3 现场验证

4^{-2}302 工作面微震监测台网如图 2 所示，监测台站随着工作面的回采同步前移. 基于该工作面 4—7 月回采实测微震数据，系统解析了微震时空演化特征及大能量事件前的指标响应规律. 在此基础上，针对“自然区域”与“富水区域边缘”2 类典型区段，统计了不同能级微震事件的频次及其累积释放能量，具体结果详见表 3.

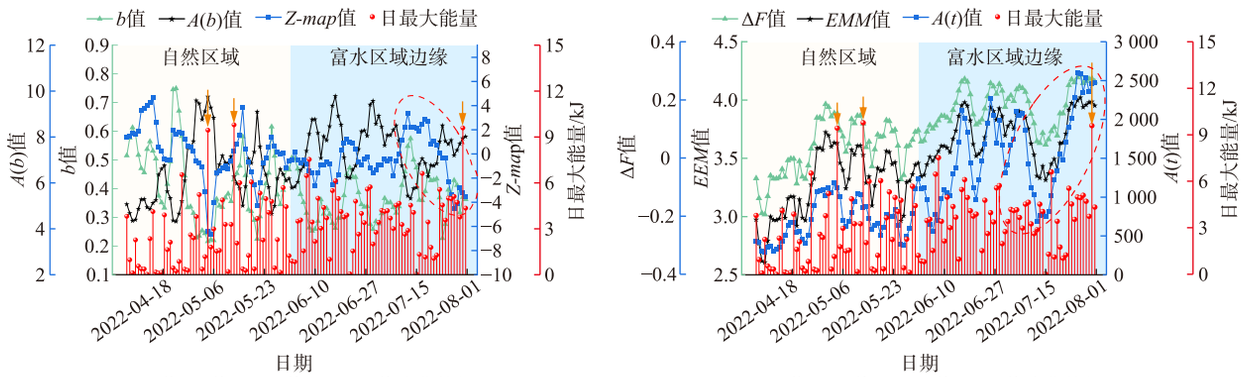
表 3 工作面微震事件累计能量及频次

Table 3 Cumulative energy and frequency of microseismic events at the working face

类别	累计能量 E/kJ(频次/次)			
	自然区域		富水区域边缘	
	4 月	5 月	6 月	7 月
能量＞10^3 J	83(30)	110(36)	220(80)	240(90)
能量为 10^2～10^3 J	27(76)	37(102)	53(135)	81(230)
能量＜10^2 J	3.1(91)	3.1(72)	5.4(122)	8.0(180)

为避免因窗口参数不当导致的指标滞后或虚假波动，本文对计算时间窗与滑移步长进行了优化选取. 经调试，确定以 60 个事件为时间窗、5 个事件为滑移步长，以确保饱水煤体失稳特征识别的准确性. 优化后的各指标演化轨迹与工作面日最大能量如图 12 所示.

综合对比可知，在高能事件(能量＞10^3 J)发生前，各指标呈现典型前兆行为：b 值与 *Z-map* 值在高能事件发生前呈现持续性下降或处于低值区间；$A(b)$ 值、ΔF 值、$A(t)$ 值与 *EEM* 值则表现出明显的上升或维持在高值区. 进一步从空间分布、能量演化及前兆指标特征等方面对比实验室声发射与现场微震研究结果发现：两者高能事件的空间分布主要集中在高应力区域，且煤岩体破坏前存在“能量平静期”；优选的 6 项前兆指标在破坏前演化规律一致，表明多尺度下前兆特征具有高度一致性.



(a) 工作面b值、$A(b)$值、Z-map值演化特征　　(b) 工作面ΔF值、EEM值、$A(t)$值演化特征

图 12　工作面回采至 450～740 m 期间各前兆指标变化特征

Fig. 12　The variation characteristics of each precursory index during the mining of the working face to 450—740 m

4.4　基于随机森林(RF)指标权重确定

鉴于矿井地质构造、开采强度及煤层赋存条件的复杂耦合效应，单一指标往往难以全面表征冲击危险性[30]. 为克服传统等权赋值的主观性缺陷，引入随机森林算法对优选的 6 项前兆指标进行重要性量化.

为确保前兆指标计算的科学性，首先对微震监测数据进行分类筛选与预处理. 基于参考文献[11,16,31]的研究结果，确认矿震与声发射信号均遵循“G-R”幂率分布规律. 研究表明，在大能量冲击事件孕育阶段，伴随围岩应力的集中与重构，微震事件的频度-能级分布将出现显著的统计异常(表现为频次的突增或骤减). 基于此机制，通过解析微震能量-频度曲线的演化特征，识别表征系统状态突变的“能级偏移点”，并将其对应的能量值界定为冲击危险等级划分的临界阈值.

结合 4.3 节已筛选的微震数据集，进一步选取震级处于 $1.0 \leqslant \lg E \leqslant 4.0$($\lg E$ 为能级)区间的微震事件数据，绘制其能量-频度曲线并进行拟合($\lg N$ 为频度)，结果如图 13 所示.

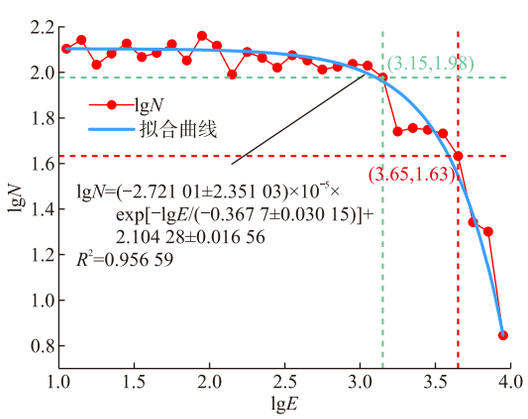


图 13　工作面回采期间微震能级-频度曲线

Fig. 13　Microseismic energy level-frequency curve during working face mining

对图 13 曲线分析可知，该曲线拟合效果优良(拟合度 $R^2=0.956\ 59$)，拟合精度高，充分印证了此前选取的微震能量区间的科学性与合理性，该区间可作为计算“G-R”关系中 b 值的有效能量区间. 曲线在坐标点(3.15,1.98)与(3.65,1.63)处呈现显著能级偏移特征，通过 $\lg E$ 值反推换算为实际微震能量，两处偏移点分别对应 1 412 和 4 466 J. 据此，将这 2 个能量值分别界定为冲击地压弱危险等级与中危险等级的能量临界值，为不同等级风险的初步判定提供量化依据. 进一步对微震数据集进行统计分析发现，仅极少数微震事件的能量突破 9 000 J；综合考虑现场冲击风险管控的实际需求与工程实践经验，将 9 000 J 界定为强冲击危险等级的能量临界值. 最终形成的冲击地压危险等级能量临界值划分结果详见表 4.

表 4　微震能量危险等级划分

Table 4　Risk classification of microseismic energy

能量区间 E/J	危险等级
0～<1 412	1(无冲击危险)
1 412～<4 466	2(弱冲击危险)
4 466～9 000	3(中等冲击危险)
>9 000	4(强冲击危险)

由于前文优选的 6 项声震前兆指标具有不同的物理量纲与数量级，直接进行加权融合会导致数值较大的指标掩盖数值较小的指标特征，造成预警偏差. 同时，各指标与冲击危险性的相关性方向存在显著差异. 断层总面积 $A(t)$ 值、矿震活动标度 ΔF 值、等效能级参数 EEM 值及 $A(b)$ 值在临近破坏前呈上升趋势(正相关)；而 b 值与 Z-map 值在临近破坏前呈下降趋势(负相关).

参考文献[32],为消除各前兆指标量纲与物理单位的差异,并统一各指标与冲击危险性的相关方向(即统一为正向表征),采用极差变换法(Min-Max Normalization)对数据进行标准化处理.该方法将不同尺度的指标数据映射至[0,1]区间,并针对正、负相关指标分别建立映射函数,确保标准化后的指标数值越大,代表冲击危险程度越高.

对于正相关指标($A(t)$值、ΔF值、EEM值、$A(b)$值),标准化公式为:

$$Y_i=\frac{X_i-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}}, \tag{1}$$

式中:Y_i为标准化后的指标值,取值范围为[0,1];X_i为指标实测值;$X_{\max}$,$X_{\min}$分别为该指标在统计监测周期内的最大值与最小值.

对于负相关指标(b值、Z-map值),标准化公式为:

$$Y_i=\frac{X_{\max}-X_i}{X_{\max}-X_{\min}}. \tag{2}$$

此方法实现了特征尺度的统一,确保算法模型能够在同等量级下客观评估各指标对预测结果的贡献度,具体处理流程如图14所示.

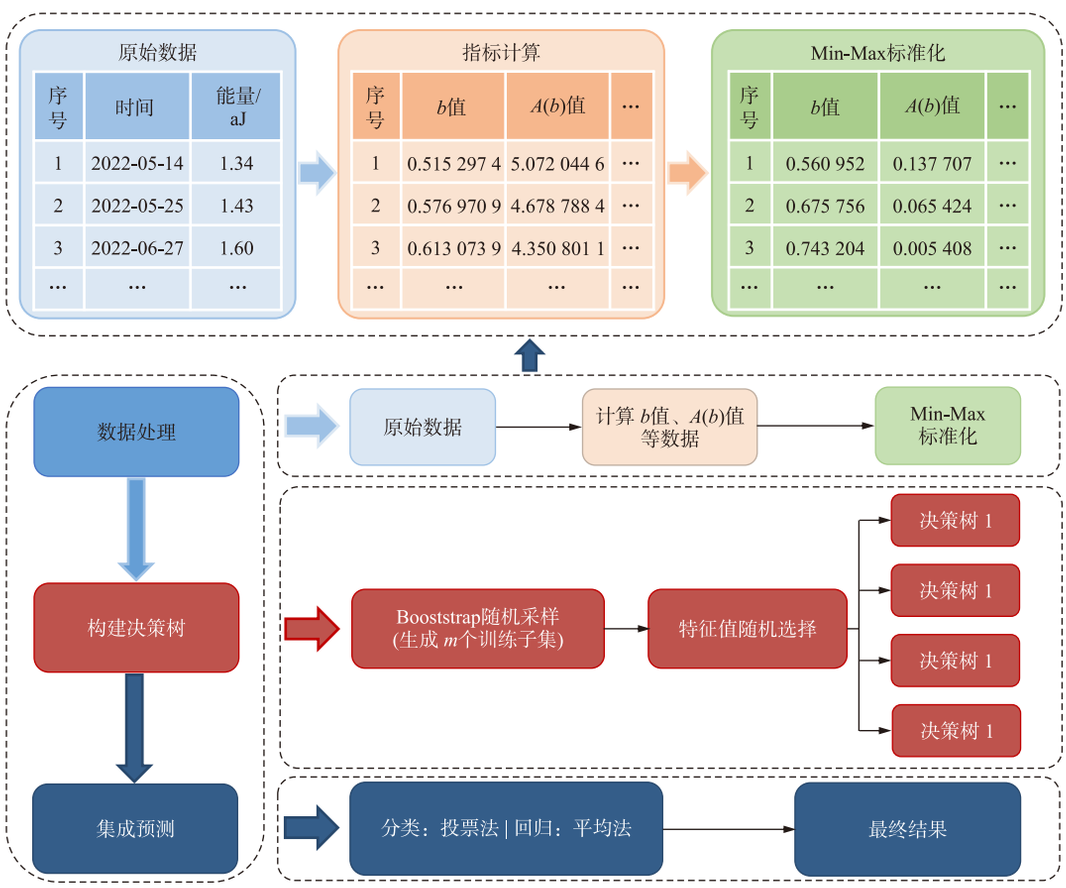


图14 RF算法确定指标权重流程

Fig. 14 RF algorithm process for determining indicator weights

随后采用随机森林算法对其重要性开展分析,该算法输出的指标重要性数值与指标贡献度呈正相关.数值越高,表明该指标对冲击危险性判定结果的影响越大,即指标重要性越高.针对划分的4种冲击危险等级,利用随机森林算法对优选出的6项指标的综合权重值开展耦合分析,最终确定其重要性排序.其重要性分布的可视化结果见图15.

由权重分析结果可知,在富水工作面特定开采条件下,b值与$A(t)$值对冲击危险性的敏感性表现突出;结合完整分析结果,6项前兆指标的重要性从高到低排序依次为:b值>$A(t)$值>ΔF值>Z-map值>$A(b)$值>EEM值.据此,实际工程预警中应优先重点监测b值与$A(t)$值,同时协同关注其他指标,以提升富水工作面冲击地压微震预警的精准性与稳定性.

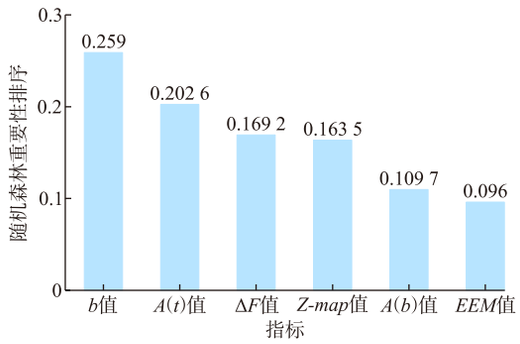


图 15　随机森林指标重要性排序

Fig. 15　The importance ranking of random forest indicators

4.5　富水工作面冲击危险综合预警模型构建

鉴于单一前兆指标在不同地质及开采条件下的响应敏感度存在差异，且易受偶然噪声干扰导致误报或漏报．为实现对富水工作面冲击危险性的精准判识，基于前文随机森林算法量化的指标权重，构建多参量耦合的综合预警指数模型．

1）指标标准化处理

指标的标准化处理依旧采用 4.4 节中的极差变换法．

2）综合预警指数计算模型

依据随机森林算法输出的特征重要性评分（见 4.4 节），将其转化为各指标的加权系数 W_j．构建富水区冲击地压综合预警指数 I_{pre}，计算公式如下：

$$I_{\mathrm{pre}}=\sum_{j=1}^{n}W_j\times Y_j, \tag{3}$$

$$I_{\mathrm{pre}}=W_b\times Y_b+W_{A(t)}\times Y_{A(t)}+W_{\Delta F}\times Y_{\Delta F}+W_{Z\text{-}map}\times Y_{Z\text{-}map}+W_{A(b)}\times Y_{A(b)}+W_{EEM}\times Y_{EEM}, \tag{4}$$

式中：I_{pre} 为综合预警指数，值域为 [0,1]；W_j 为第 j 项指标的权重；Y_j 为标准化后的各指标值．

3）预警准则与等级划分

该综合预警指数融合了多项前兆信息的特征，能够更全面地反映煤岩系统的失稳风险．结合现场历史冲击事件反演数据与工程实践经验，制定如下分级预警准则（表 5）．在实际监测中，系统实时计算 I_{pre} 值，当其超过特定阈值时触发相应等级预警，以保障工作面的安全生产．

在工程适用性方面，该综合预警模型及指标权重体系高度契合富水工作面的特殊工况特征．模型引入 RF 算法客观量化了各微震前兆指标的权重，有效克服了传统经验赋值的局限性，能够精准捕捉工作面推采至富水区边缘时，应力叠加而诱发的煤岩体临界失稳异常．这为西部类似复杂水文地质条件下的矿井防冲减灾提供了依据．

表 5　富水工作面冲击危险综合预警等级划分

Table 5　Classification of comprehensive early warning levels for rock burst risk in water-rich working faces

I_{pre}	危险等级
0～<0.25	无危险（Ⅰ级）
0.25～<0.50	弱危险（Ⅱ级）
0.50～<0.75	中等危险（Ⅲ级）
≥0.75	强危险（Ⅳ级）

5　讨　论

本文立足西部富水矿井特有的“水-冲击”复合工况，揭示了水-力耦合作用下饱水煤体冲击破坏的演化机理与能量释放规律，并在此基础上构建了深度契合特定工况下双场耦合特征的 RF 多参量赋权预警模型，有效克服了传统经验赋值的弊端，提升了现场防冲减灾决策的科学性．

尽管如此，受限于现阶段试验条件与跨尺度应用等难题，本研究仍存在一定局限性：一方面，实验室静态、均匀的饱水试验难以完全还原现场采动疏水降压过程中动态、非均质的复杂环境，且实验室尺度下的煤样声发射前兆规律与工程现场微震特征仍存在尺寸效应，指标演化规律的适用性还需要进一步验证；另一方面，当前预警模型的指标权重主要基于单一工作面的历史样本训练得出．

因此，后续研究将结合现场实测开展多含水梯度与循环加卸载的模拟试验，进一步探究动态疏水过程中的水-力耦合机理，并收集大量类似工况下的微震数据进行模型优化，不断提升预警模型在不同复杂水文地质条件下的适用性与精准度．

6　结　论

1）水-力耦合作用下饱水煤样在破坏阶段受孔隙水压力作用，裂隙扩展与贯通速率显著加快，表现出比自然煤样更为剧烈的“阶梯状”能量跃升与临界“平静期”特征．该特征可作为判识冲击失稳的关键前兆依据．

2）煤样失稳破坏前，b 值与 $Z\text{-}map$ 值呈现显著下降趋势，而 $A(t)$，$A(b)$，ΔF 及 EEM 值呈上升态势．$A(t)$ 值（增幅 1 349%）与 b 值（骤降 57%）对临界失稳响应最为敏感，是富水工况下的核心监测指标．

3）利用随机森林算法量化了指标重要性（b 值 > $A(t)$ 值 > ΔF 值 > $Z\text{-}map$ 值 > $A(b)$ 值 > EEM 值），并构建了包含四级判据的综合预警指数模型，实现了对富水工作面冲击危险性的量化分级预警．

参考文献：

[1] 王 博.陕蒙深部矿区典型动力灾害发生机理及防治研究[D].北京:北京科技大学,2021.
WANG Bo. Mechanism and control of typical dynamic disasters in deep mining areas of Shaanxi and Inner Mongolia[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2021.

[2] 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.

[3] 王 博,朱斯陶,魏全德,等.顶板疏水快速回采工作面冲击地压机理及防治措施[J].煤矿安全,2020,51(7):205-209.
WANG Bo, ZHU Sitao, WEI Quande, et al. Mechanism and prevention measures of rock burst rapid mining face of roof drainage area[J]. Safety in Coal Mines,2020,51(7):205-209.

[4] 潘一山,宋义敏,刘 军.我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J].岩石力学与工程学报,2023,42(9):2081-2095.
PAN Yishan, SONG Yimin, LIU Jun. Pattern, change and new situation of coal mine rockburst prevention and control in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42(9):2081-2095.

[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] 杨 旭,刘亚鹏,曹安业,等.基于微震多维信息融合的冲击地压全时空预测方法[J].采矿与安全工程学报,2024,41(3):511-521.
YANG Xu, LIU Yapeng, CAO Anye, et al. A spatio-temporal prediction method for coal burst based on the fusion of microseismic multidimensional information [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2024,41(3):511-521.

[7] WU S K, ZHANG J W, SONG Z X, et al. Review of the development status of rock burst disaster prevention system in China.[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(11): 3763-3789.

[8] HE X Q, ZHOU C, SONG D Z, et al. Mechanism and monitoring and early warning technology for rockburst in coal mines[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 28(7): 1097-1111.

[9] 窦林名,孙振于,曹安业,等.煤矿冲击地压动静载危险源头分类、辨识与监测方法[J].煤炭科学技术,2025, 53(9): 53-62.
DOU Linming, SUN Zhenyu, CAO Anye, et al. Classification, identification and monitoring methods for static-dynamic stress hazard sources of rock burst in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(9): 53-62.

[10] 窦林名,冯龙飞,蔡 武,等.煤岩灾变破坏过程的声震前兆识别与综合预警模型研究[J].采矿与安全工程学报, 2020, 37(5): 960-968.
DOU Linming, FENG Longfei, CAI Wu, et al. Research on acoustic-vibration precursor identification and integrated early warning model for coal seam disaster-induced failure processes[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(5): 960-968.

[11] AMITRANO D. Variability in the power-law distributions of rupture events: How and why does b-value change [J]. The European Physical Journal Special Topics, 2012, 205(1): 199-215.

[12] RONG H Y, WANG W, LI G C, et al. Mechanical behaviour and acoustic emission characteristics of the reinforced soft muddy rock under various moisture content levels[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2024, 11(1): 84.

[13] DI Y Y, WANG E Y, LI Z H, et al. Predicting microseismic, acoustic emission and electromagnetic radiation data using neural networks [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16(2): 616-629.

[14] 马衍坤,李笑笑,翟少彬,等.含预制钻孔煤体承载破坏应变场与声发射响应真三轴试验[J].中国矿业大学学报, 2024, 53(3): 497-508.
MA Yankun, LI Xiaoxiao, ZHAI Shaobin, et al. The true triaxial test of strain field and acoustic emission response of bearing failure of coal with prefabricated borehole [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(3): 497-508.

[15] CAI W, DOU L M, ZHANG M, et al. A fuzzy comprehensive evaluation methodology for rock burst forecasting using microseismic monitoring [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 80:232-245.

[16] 田向辉,李振雷,宋大钊,等.某冲击地压频发工作面微震冲击前兆信息特征及预警方法研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(12):2471-2482.
TIAN Xianghui, Li Zhenlei, SONG Dazhao, et al. Study on microseismic precursors and early warning methods of rockbursts in a working face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(12):2471-2482.

[17] 崔 峰,张随林,来兴平,等.急倾斜巨厚煤层矿震诱冲机制及时-空特征[J].煤炭学报,2023,48(增2): 449-463.

CUI Feng, ZHANG Suilin, LAI Xingping, et al. Mechanism of rock burst induced by mine earthquake and the time-space characteristics of in steep and extremely thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(Sup 2): 449-463.

[18] LU C P, LIU G J, LIU Y, et al. Microseismic multi-parameter characteristics of rockburst hazard induced by hard roof fall and high stress concentration [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 76: 18-32.

[19] YIN Y C, ZHENG W W, TANG X X, et al. Test study on failure and energy supply characteristics of rock under different loading stiffness[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 142: 106796.

[20] 王　博，姜福兴，朱斯陶，等. 深井工作面顶板疏水区高强度开采诱冲机制及防治[J]. 煤炭学报，2020，45(9)：3054-3064.
WANG Bo, JIANG Fuxing, ZHU Sitao, et al. Induced punching mechanism and prevention of high-intensity mining in roof drainage area of deep well working face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3054-3064.

[21] 卢志国，高富强，杨　磊，等. 深埋巷道动静载叠加诱冲物理模拟试验系统研制与应用[J]. 中国矿业大学学报，2025，54(5)：959-970.
LU Zhiguo, GAO Fuqiang, YANG Lei, et al. Development and application of a novel physical simulation test system for deep coal burst roadway with dynamic-static combined loading[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(5): 959-970.

[22] 纪洪广，张春瑞，张月征，等. 岩石材料破裂过程中声发射信号的应力状态及能量演化研究[J]. 中国矿业大学学报，2024，53(2)：211-223.
JI Hongguang, ZHANG Chunrui, ZHANG Yuezheng, et al. Research on stress state and energy evolution of acoustice mission signal during rock materials fracture process[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(2): 211-223.

[23] 姚强岭，王伟男，李学华，等. 水-岩作用下含煤岩系力学特性和声发射特征研究[J]. 中国矿业大学学报，2021，50(3)：558-569.
YAO Qiangling, WANG Weinan, LI Xuehua, et al. Study of mechanical properties and acoustic emission characteristics of coal measures under water-rock interaction[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(3): 558-569.

[24] 吴佳翼，曹学锋. 地震活动性的定量化问题[J]. 地震，1983(6)：13-16.
WU Jiayi, CAO Xuefeng. Quantitative problem of seismicity[J]. Earthquake, 1983(6): 13-16.

[25] 宇津德治. 对地震频度-震级关系式中参数的估算[J]. 地球与行星物理论评，1980(3)：112-116.
Tokuji Utsu. Estimation of parameters in earthquake frequency-magnitude relationship [J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 1980(3): 112-116.

[26] 罗兰格，侯建明. 地震活动性的标度[J]. 地震，1987(6)：40-45.
LUO Lange, HOU Jianming. Seismicity scale [J]. Earthquake, 1987(6): 40-45.

[27] 朱传镇，王林瑛. 熵的原理与地震活动研究[J]. 地震研究，1988(6)：527-538.
ZHU Chuanzhen, WANG Linying. The principle of entropy and seismological research[J]. Journal of Seismological Research, 1988(6): 527-538.

[28] 吕悦军，陆远忠. 用算法复杂性分析时间序列[J]. 中国地震，1993(3)：39-44.
LYU Yuejun, LU Yuanzhong. Characterization of time sequence by algorithmic complexity[J]. Earthquake Research in China, 1993(3): 39-44.

[29] 谷继成，魏富胜. 地震活动性的定量描述：地震活动度[C]//中国地震学会第三次全国地震科学学术讨论会论文摘要汇编. 中国地震学会，1986：59-60.
GU Jicheng, WEI Fusheng. Quantitative description of seismicity: Seismicity [C]//Summary of Papers of the Third National Symposium on Seismology. China Seismological Society, 1986: 59-60.

[30] 何生全，何学秋，宋大钊，等. 冲击地压多参量综合预警模型及智能识别云平台[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.

[31] 蔡　武，窦林名，李振雷，等. 微震多维信息识别与冲击矿压时空预测：以河南义马跃进煤矿为例[J]. 地球物理学报，2014，57(8)：2687-2700.
CAI Wu, DOU Linming, LI Zhenlei, et al. Microseismic multi-dimensional information recognition and spatio-temporal prediction of impact mine pressure: A case study of Yuejin Coal Mine in Yima, Henan Province [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(8): 2687-2700.

[32] DOU L M, CAI W, CAO A Y, et al. Comprehensive early warning of rock burst utilizing microseismic multi-parameter indices[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, 28(5): 767-774.

（责任编辑　沈　菊　宋　爽）