基于声发射主频熵演化的煤岩组合体冲击破坏与前兆预警研究

赵善坤[1,2],胡　波[3,4],李云鹏[1,2],贺光会[5],吕　坤[1,2],曹建波[5],李德建[3,4],刘发义[5],王　尚[1,2],周志斌[1,2],高海南[1,2],李浩男[1,2]

(1. 中国煤炭科工集团 煤炭科学技术研究院有限公司,北京　100013;2. 煤矿灾害防控全国重点实验室,北京　100013;3. 中国矿业大学(北京)隧道工程灾变与智能建养全国重点实验室,北京　100083;4. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院,北京　100083;5. 晋能控股装备制造集团有限公司,山西 晋城　048001)

摘要: 为了揭示深部煤岩巷道开挖卸载诱发冲击破坏的灾变机理,利用真三轴应变岩爆试验系统开展了针对5种煤岩比例组合体的真三轴单面卸载冲击破坏试验. 结合四目高速摄影系统与声发射(AE)技术,分析了煤岩组合体的宏观破坏模式、AE能量演化规律及频谱信息熵特征. 结果表明:与单一岩性试样的破坏特征不同,煤岩组合体表现出伴随多次碎屑剧烈弹射的渐进式破坏特征,且在宏观破坏前存在小规模颗粒喷射等明显前兆. 在临近破坏前,组合体试样的AE累积能量曲线呈现“瞬时陡升-短暂持平”的台阶状特征. 结合信息熵理论发现,组合体声发射熵值呈现“低熵阶梯跃升,临界振荡破坏”的变化规律,临近破坏时低频信号的爆发导致主频带显著展宽,而熵值的剧烈振荡反映了系统内软弱煤层损伤演化(诱导熵减)与坚硬砂岩弹性约束(诱导熵增)之间的动态演化. 基于此,构建了冲击地压双级预警指标:以熵值振荡上升点为一级预警,以熵值滑动方差的突增峰为二级临界预警. 实测验证表明,该方法能精准捕捉煤岩组合体宏观失稳前的前兆信号. 该研究可为深部巷道冲击地压的灾变机理研究与早期预警提供有效的理论依据与技术支撑.

关键词: 煤岩组合体;真三轴;冲击地压;主频熵;前兆特征

中图分类号: TD 324　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)03-0652-14

Study on rockburst and precursory warning of coal-rock composite based on acoustic emission dominant frequency entropy evolution

ZHAO Shankun[1,2], HU Bo[3,4], LI Yunpeng[1,2], HE Guanghui[5], LYU Kun[1,2], CAO Jianbo[5], LI Dejian[3,4], LIU Fayi[5], WANG Shang[1,2], ZHOU Zhibin[1,2], GAO Hainan[1,2], LI Haonan[1,2]

(1. CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, Beijing 100013, China; 3. State Key Laboratory of Tunnel Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 4. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 5. Jinneng Holding Equipment Manufacturing Group, Jincheng, Shanxi 048001)

收稿日期: 2025-12-16　　**修回日期:** 2026-03-27　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250587

基金项目: 国家自然科学基金项目(52474230);国家重点研发计划项目(2024YFC2909500);天地科技创新创业资金专项重点项目(2024-TD-ZD010-01)

第一作者: 赵善坤(1982—),男,辽宁省葫芦岛市人,研究员. E-mail:zhaoshankuncom@163.com

通信作者: 胡　波(1998—),男,浙江省东阳市人,博士研究生. E-mail:Hub0129@163.com

引用格式: 赵善坤,胡　波,李云鹏,等. 基于声发射主频熵演化的煤岩组合体冲击破坏与前兆预警研究[J]. 中国矿业大学学报,2026,55(3):652-665.

ZHAO Shankun, HU Bo, LI Yunpeng, et al. Study on rockburst and precursory warning of coal-rock composite based on acoustic emission dominant frequency entropy evolution[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(3): 652-665.

Abstract: To reveal the mechanism of rockburst induced by excavation unloading in deep coal-rock roadways, true triaxial one-face unloading experiments were conducted on coal-rock composite specimens with five different coal-rock ratios using a true triaxial strain rockburst experimental system. By integrating a four-cameras high-speed photography system with acoustic emission (AE) monitoring, the macroscopic failure modes, AE energy evolution laws, and spectral information entropy characteristics of these composites were analyzed. The results indicate that, unlike the failure of single lithology specimen, coal-rock composite exhibits progressive failure characteristics by multiple violent fragment ejections. Furthermore, distinct precursors, such as small-scale particle spalling, were observed prior to macroscopic instability. As failure approaches, the cumulative AE energy follows a distinct step-like pattern, defined by instantaneous surges followed by brief plateaus. Based on information entropy theory, the AE dominant frequency entropy of the composites reveals an evolution law of "low-entropy stepwise increments and critical oscillation failure". A surge in low-frequency signals near the failure point significantly broadens the dominant frequency band. The intense entropy oscillations reflect the dynamic competition between damage evolution in the soft coal (inducing entropy reduction) and the elastic confinement provided by the hard sandstone (inducing entropy increase). Consequently, a two-level early warning model for rockburst is proposed: the initial point of entropy oscillation serves as the primary warning, while the peak surge in the sliding variance of entropy acts as the secondary critical warning. Experimental validation confirms that this model accurately captures precursory signals before macroscopic failure. This research provides a theoretical and foundation for understanding rockburst mechanisms and improving early warning systems in deep underground engineering.

Key words: coal-rock composite; true triaxial; rockburst; dominant entropy; precursor characteristics

煤炭是保障我国经济高速增长的"压舱石"和"稳压器"[1-2]. 近年来,随着中东部地区浅部资源的日渐枯竭,煤炭资源开发整体向深部和西部地区转移已成为新常态[3-5]. 在深部巷道开挖时,容易引发冲击地压、煤与瓦斯突出等动态灾害[6-9]. 这些灾害对工人安全构成严重威胁,并可能造成重大财产损失. 它们的特点是突发性、随机性和强烈性[10-11]. 因此,关注深部巷道开挖中的卸载过程至关重要.

文献[12]提出,真三轴五面加载条件可以更好地模拟深部巷道开挖所引发的动力灾害,因其再现了开挖卸载前后应力状态的转变. 文献[13-14]进行了大量真三轴加卸载试验,研究了不同中间主应力和卸载速率对开挖卸载所诱发动力学灾害的影响. 文献[15]进行了煤的三轴试验,发现煤矿动态灾害现象包括局部颗粒喷射、碎片剥落、大规模颗粒喷射、板材弯曲,并最终导致破坏. 文献[16]基于真三轴卸载动力扰动试验,分析了真三轴卸载叠加动力扰动条件下的深部围岩微裂纹演化及失稳破坏规律. 文献[17]开展了不同加载速率下的煤岩真三轴单面临空试验,揭示了加载速率对煤岩动力破坏的影响机制. 可见,真三轴卸载试验能够更好地模拟深部巷道开挖前后围岩的应力转化过程.

然而,实际工程中的地质构造由不同岩性单元组成,仅依靠单一岩性试样研究深部巷道围岩的力学性能具有局限性[18-20]. 文献[21]对煤、砂岩及煤岩组合体进行了单轴加卸载试验,对比分析了试样能量密度、弹性模量及单轴抗压强度等力学参数的演化规律,从而获得了煤岩组合体的力学响应、能量演化与变形破坏特征. 文献[22]研究了加载速率和循环加载对煤岩组合体力学性能的影响. 煤岩组合体在巷道动力灾害(如冲击地压、岩爆等)演变机制研究中受到广泛关注[23-24]. 文献[25-26]通过开展不同煤岩比试样的真三轴加卸载试验,深入探讨了煤岩比例对组合体冲击破坏特征和能量演化规律的影响. 文献[27]对煤岩组合体在静态荷载和动态荷载组合作用下进行了三轴试验,研究了煤岩组合体的冲击破坏模式、动态响应特性和AE信号演化规律.

文献[28-29]通过自主研发的地声过程模拟试验系统,开展了系列真三轴加卸载试验,探究了中间主应力和组合倾角对于组合体破坏的影响.但目前关于煤岩组合体真三轴卸载冲击破坏前兆信息的研究仍较少.

声发射监测技术能够有效捕捉岩石破坏过程中的微破裂演化信息,解析其时空演化规律,这对识别岩爆及冲击地压的前兆特征具有重要意义[30-32].但传统的振铃计数、能量等时域参数易受阈值设定和信号衰减影响,往往存在前兆识别滞后、抗干扰能力差等局限.相比之下,声发射信号的频谱特征更能本质地反映裂纹的产生机制.岩石破坏伴随着系统从稳态向非稳态的跃迁,信息熵作为衡量系统无序度与复杂度的重要统计物理量,能够有效量化这一过程中信号分布的不确定性[33].研究人员从而利用试验过程中声发射参数的熵值演化探究岩石破坏机制和前兆特征[34-36].如文献[37]基于信息熵理论,开展了花岗岩岩爆试验,分析了试验过程声发射事件空间和时间熵值的演化规律,从而提出基于声发射事件熵的前兆指标;文献[38]则基于声发射能量熵,将平均熵的持续增加和临界激增作为岩石断裂的前兆特征,从而构建了一套新型预警指标.因此,将熵理论引入煤岩组合体卸载冲击破坏过程中的声发射频谱分析,建立主频熵指标,从有序到无序的相变视角揭示冲击失稳的演化机理,可弥补传统单一参数的不足,提升破坏预测的准确性.

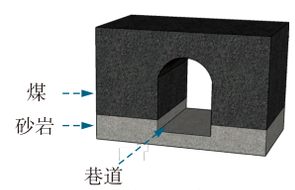
综上所述,针对现有煤岩组合体真三轴冲击破坏前兆预测研究的欠缺及声发射时域参数在破坏预测上的有限性,本文开展了不同煤岩比组合体的真三轴单面卸载冲击破坏试验,以模拟深部开采开挖卸载的应力转化,探究煤岩组合体卸载冲击破坏特征;引入信息熵理论对声发射信号的主频演化进行定量表征,并在此基础上,构建基于主频熵值及其滑动方差的冲击破坏双级预警指标,以期为深部煤岩地层动力灾害的早期识别与精准监测提供理论依据与技术支撑.

1 煤岩组合体单面卸载冲击破坏试验

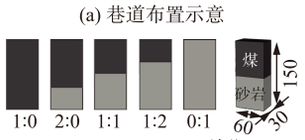
1.1 试样准备

试验所用的煤和砂岩取自中国山西省晋城市胡底矿.根据国际岩石力学与岩石工程学会(ISRM)推荐的方法[39],将煤和砂岩制成∅50 mm×100 mm的圆柱体试样进行单轴压缩试验,测定单轴抗压强度和弹性模量.测得煤的单轴抗压强度和弹性模量分别为11.61 MPa和1.116 GPa;测得砂岩的单轴抗压强度和弹性模量分别为84.676 MPa和9.673 GPa.

同时,采用相同的煤和砂岩,制备了尺寸为150 mm×60 mm×30 mm(长×宽×高)的试样.试验借鉴已有研究中煤岩组合体力学试验所选用的煤岩比例[25-26]及模拟深部煤岩巷道在煤岩地层中可能的空间层位布置.设计了试样的5种煤岩比(体积比),即1∶0(煤),2∶1,1∶1,1∶2和0∶1(砂岩);为便于后续描述,煤岩比为2∶1,1∶1和1∶2的试样称为组合体试样.图1展示了制备的试样.利用游标卡尺,天平和波速仪测得试样的物理参数如表1所示.对于煤和砂岩试样仅测得长边对应两端波速值(上下);对于组合体试样还测得了宽边煤和砂岩对应两端波速值(左右);对于组合体试样还测得了高边煤和砂岩对应两端波速值(前后).



(a) 巷道布置示意



(b) 5种不同煤岩体积比的试样示意

图1 煤岩组合体试样

Fig. 1 Coal-rock composite specimens

表1 煤岩组合体试样的物理参数

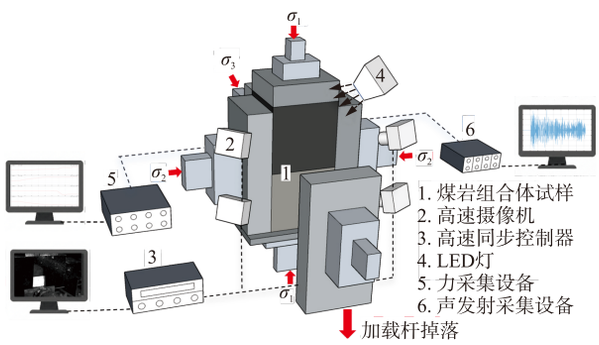
Table 1 Physical parameters of coal-rock composite specimens

煤岩比	尺寸(长×宽×高)/mm×mm×mm	质量/g	波速/(m·s^{-1})				
			上下	左右		前后	
				煤	砂岩	煤	砂岩
1:0	150.16×60.07×30.19	366.17	1 896	2 112		1 772	
2:1	150.24×59.90×30.02	472.31	2 412	1 705	3 052	1 489	3 215
1:1	150.14×59.95×30.03	534.07	2 191	1 663	3 350	1 422	3 243
1:2	150.47×59.89×29.96	589.20	1 832	1 832	3 543	1 372	3 345
0:1	150.14×59.57×30.02	701.11	3 195		3 527		3 717

1.2 真三轴应变岩爆试验系统

本次试验是在隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室的真三轴应变岩爆试验系统中进

行的(图 2). 该试验系统包括真三轴试验机、力采集仪、AE采集仪和四目高速摄影系统. 真三轴试验机的最大工作压力为450 kN,能够在一个方向上进行突卸载,使加载压头迅速下落,以模拟深部条件下开挖引起的快速卸载过程.



注:σ_1,σ_2,σ_3分别为最大、中间、最小主应力.

图 2　真三轴应变岩爆试验系统

Fig. 2　True-triaxial strain rockburst experimental system

1.3　试验加载方式

如图 3a所示,在实体煤巷开挖之前,围岩内的岩体单元处于三维应力状态. 开挖后,岩体单元形成了一个临空面,径向应力(垂直于临空面的应力)降至0 MPa,切向应力(平行于临空面的应力)集中[40]. 因此,岩体单元从六面应力状态转化为五面加载,单面临空状态.

图 3b展示了试验中试样的应力转变过程. 该方案采用“单面瞬时卸载”来模拟巷道开挖瞬间径向应力的解除. 试验初期在试样的6个面上加载以模拟原位应力状态;然后,快速卸载试样σ_3至0 MPa并掉落对应的加载杆和加载夹板模拟临空面的形成;最后,施加轴向荷载σ_1,模拟巷道开挖后切向应力集中. 本文主要研究深部巷道开挖卸荷所引起的动力灾害和声发射频谱特征的演化规律,不考虑中间主应力在此过程中的影响,为此在加载σ_1的过程中保持σ_2的数值不变.

图 3c展示了设计的应力加、卸载方案. 采用该方案模拟巷道开挖前后的岩体应力演化过程. 该过程包括3个阶段:1)初始三轴应力加载以模拟原位条件;2)快速卸载一个面以模拟应力释放和临空面形成;3)进行轴向加载以模拟开挖后的应力集中.

具体的应力水平设计是基于煤和砂岩的单轴抗压强度σ_c值来确定的. 对于煤岩比为1∶0,2∶1,1∶1和1∶2的试样,煤的σ_c值作为参考值;对于煤岩比为0∶1的试样,砂岩的σ_c值作为参考值. 试样所受三向最大、中间和最小主应力(σ_1,σ_2和σ_3)分别为1.0σ_c,0.8σ_c和0.2σ_c. 试验的具体步骤如下:

步骤1:三向应力σ_1,σ_2和σ_3分别加载至0.5σ_c,0.4σ_c和0.1σ_c,加载速率为0.1 MPa/s,保持10 min. 然后,σ_3以20 MPa/s的卸载速率降至0 MPa,暴露试样临空面,保持10 min,同时观察临空面状态.

步骤2:进一步加载三向应力σ_1,σ_2和σ_3,使其分别增加0.5σ_c,0.4σ_c和0.1σ_c,加载速率为0.1 MPa/s,达到应力水平后保持10 min. 然后,σ_3以20 MPa/s的卸载速率降至0 MPa,再次暴露临空面.

步骤3:竖向加载σ_1,加载速率为0.1 MPa/s加载至试样破坏,随后停止.

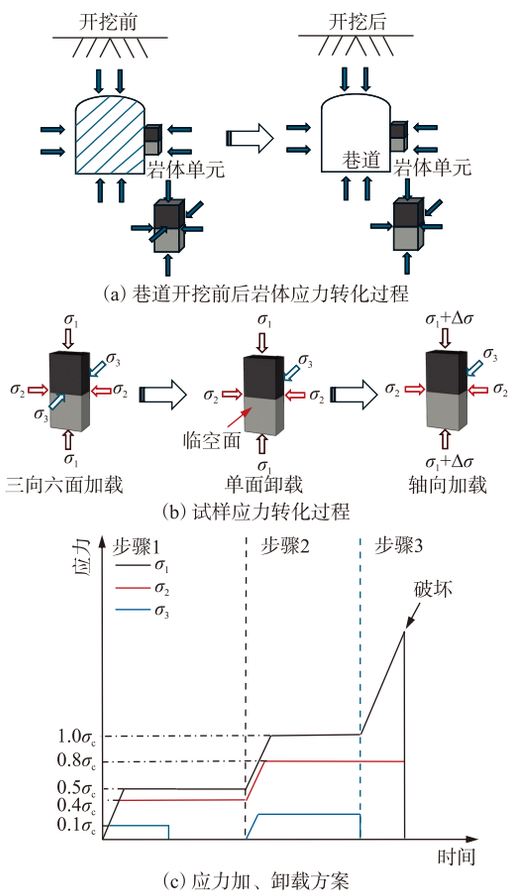


图 3　煤岩组合体真三轴单面卸载冲击破坏试验方案

Fig. 3　The experimental plan for true-triaxial one-face unloading rockburst of coal-rock composite specimens.

2　试验结果分析

2.1　冲击破坏模式

2.1.1　冲击破坏过程

图 4和图 5展示了四目高速摄影系统(采样频率为1 000帧/s)捕捉到的试样破坏过程,将加载压头脱离的时刻(当σ_3降至0 MPa时)定义为t=0 s.

如图4所示，砂岩试样的破坏过程可按顺序分为3个阶段：板状鼓起阶段、板状折断阶段和碎屑剧烈弹射阶段.

如图5所示，煤和组合体试样的破坏过程与砂岩试样相似，涉及相同的板状弯曲、板状折断和碎屑剧烈弹射阶段. 然而，在发生明显的板状弯曲或者板状折断之前，煤和煤岩组合体试样还发生了小规模的颗粒喷射现象.

在试验中，当σ_3突然降至0 MPa时，试样形成临空面，σ_1增加. 这种应力重新分布促进了试样内部微裂纹的产生，并在自由面处引起了局部应力集中，从而引发了小尺度的颗粒弹射，减缓了试样临空面处的局部应力中. 这个阶段，试样基本上不发生宏观破坏现象或者只发生轻微的颗粒剥落. 随着竖向最大主应力σ_1的进一步增加，试样临空面发生了板状弯曲或折断. 最后，由于持续积累弹性应变能的突然释放，最终发生了剧烈的碎屑弹射现象，试样最终破坏.

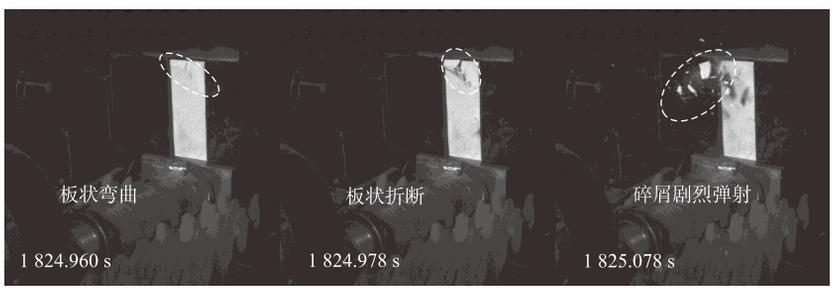
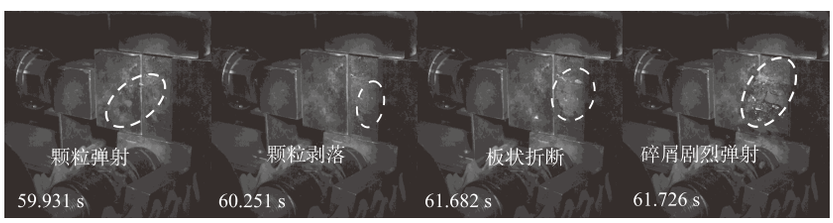
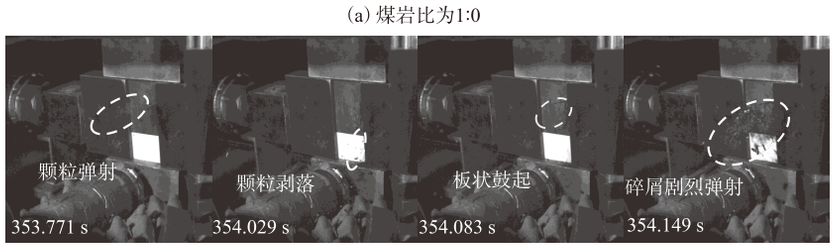


图4 砂岩试样破坏过程

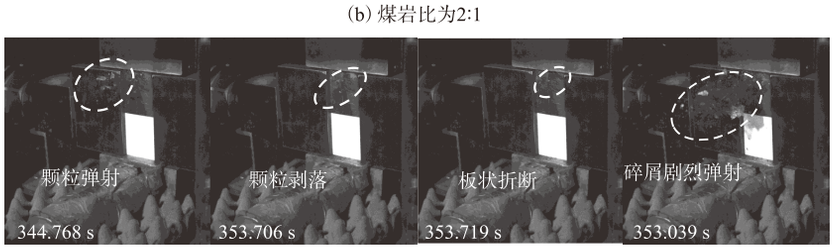
Fig. 4 Failure process of sandstone specimen.



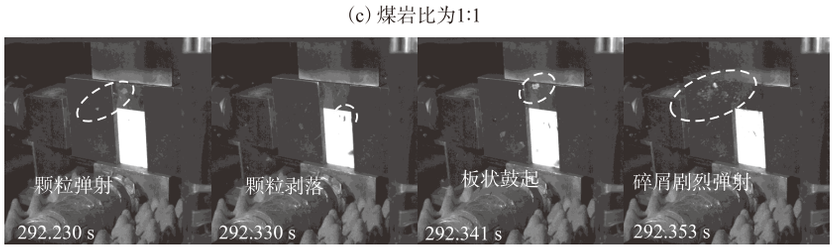
(a) 煤岩比为1:0



(b) 煤岩比为2:1



(c) 煤岩比为1:1



(d) 煤岩比为1:2

图5 不同煤岩比试样破坏过程

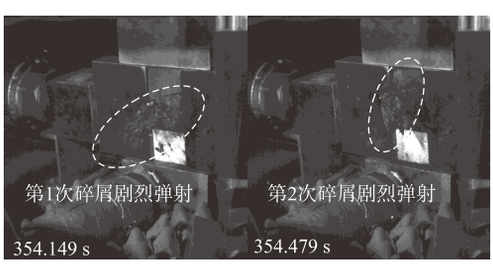
Fig. 5 Failure process of specimens with different coal-rock ratios

将试样发生初始颗粒喷射和板状弯曲或折断之间的时间间隔定义为“平静期”. 对于煤岩比为1∶0,2∶1,1∶1和1∶2的试样,平静期持续时间分别为:1.751,1.032,8.951,0.111 s.

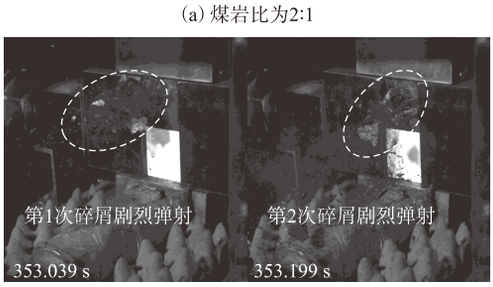
这些结果表明,与砂岩试样相比,煤和煤岩组合体试样在发生冲击破坏前具有明显的前兆现象. 这一现象代表了一种潜在的前兆,可以对其进行监测以预警煤岩地层深部巷道开挖过程中可能会发生的动力灾害.

2.1.2　组合体多次冲击破坏现象

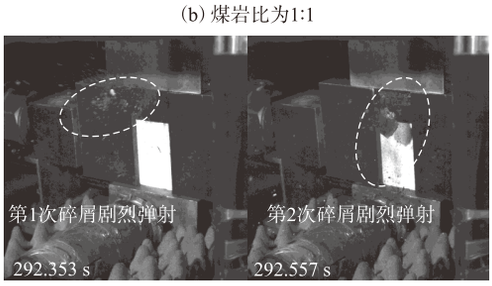
通常,单一岩性试样在卸载过程中会失去稳定性并发生塌陷,且破坏过程中仅发生一次剧烈的碎片喷射[13-14]. 相比之下,组合体试样在破坏过程中表现出多次冲击的阶梯状破坏特征. 如图6所示,煤岩比为2∶1的试样在354.149 s时经历了第1次碎屑剧烈弹射,随后在0.330 s后发生了第2次碎屑剧烈弹射. 煤岩比为1∶1的试样在353.039 s时经历了第1次碎屑剧烈弹射,随后在0.160 s后发生了第2次碎屑剧烈弹射. 煤岩比为1∶2的试样在292.353 s时经历了第1次碎屑剧烈弹射,随后在0.204 s后发生了第2次碎屑剧烈弹射.



(a) 煤岩比为2∶1



(b) 煤岩比为1∶1



(c) 煤岩比为1∶2

图6　组合体试样的多次冲击现象

Fig. 6　Multiple impact phenomena of composite specimens

结果表明,尽管组合体试样的破坏过程与煤试样相似,但由于组合体试样中砂岩的约束作用,组合体试样的破坏呈现出渐进的多阶段特点. 这表明组合体试样的冲击破坏模式受材料本身特性和结构相互作用的双重影响.

2.2　声发射能量演化特征

如图7a～7d所示,煤和组合体试样的AE能量累积曲线整体呈现阶梯状增长. 在试样应力状态发生变化时(加载或卸载),累积能量曲线表现明显阶梯状的跃升,AE能量大量积累,试样表现出较高的声发射活性,内部损伤累积. 在试样应力保载阶段,累积能量曲线表现较为平坦,AE能量累积较少,试样表现出较低的声发射活性. 累计能量在破坏瞬间达到了峰值.

相比之下,砂岩表现出显著的突发性破坏特征. 如图7e所示,砂岩试样在试验的前90% 阶段(0～100 min),AE能量水平较低,累积能量曲线增长平缓. 然而,在临近破坏的瞬间,砂岩试样的AE能量增至10^9 aJ量级,累积能量曲线呈近乎垂直的陡增. 这一试验结果揭示了砂岩破坏是由主裂纹瞬间贯通导致的失稳,其能量释放具有极高的集中性和突发性.

进一步分析组合体试样临近破坏时刻的AE累积能量曲线可以看出,组合体试样的AE累计能量虽也在破坏时刻达到了峰值,但在在最终宏观失稳前约60～90 s的临界时间内,其累积能量曲线出现了一个显著的前兆性能量台阶. 如图7b～7d所示,在试样最大主应力σ_1持续加载至试样破坏的过程中,AE累积曲线出现了具有“瞬时陡升—短暂持平”典型特征的前兆性能量台阶. 这与煤和砂岩试样临近破坏时刻AE能量演化规律不同.

当σ_1持续增加,试样中强度较低的煤层率先达到屈服强度. 煤样内部裂隙的局部贯通或临空面碎屑弹射导致弹性应变能的瞬间释放,从而使得试样AE累积能量曲线上形成了陡升的台阶. 此时组合体中的煤样实际已发生结构性损伤,但由于砂岩仍具有极大的刚度和完整性,对损伤的煤样施加了变形约束,限制了试样整体失稳破坏的发生,从而在曲线上形成短暂的持平段.

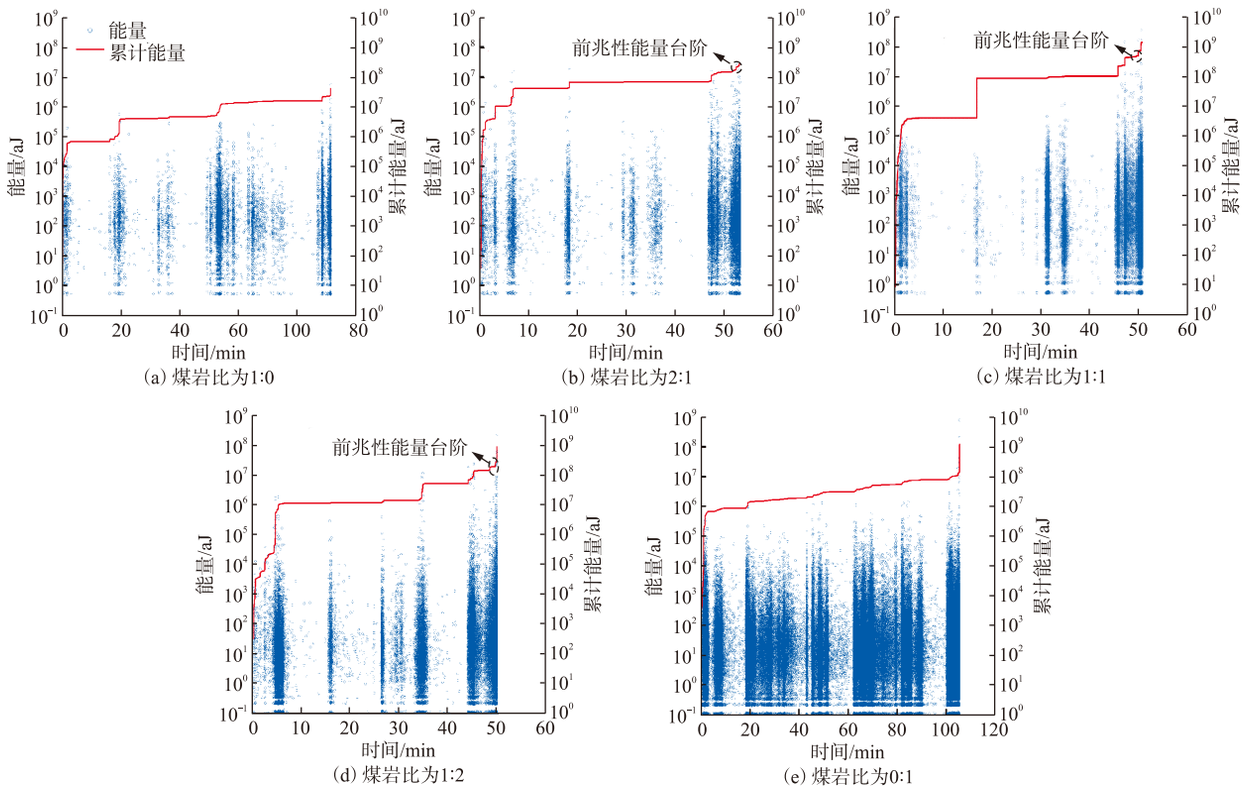


图 7 不同煤岩比试样的 AE 能量特征

Fig. 7 AE energy characteristics of specimens with different coal-rock ratios

2.3 声发射频谱特征分析

声发射信号属于非平稳信号，快速傅里叶变换（FFT）是分析非平稳信号的频谱分析方法[15, 41]. 岩石所产生声发射信号的频谱特征可以反映岩石的受力状态、结构和力学性质. 许多在时域中难以察觉的现象，通过声发射的本征频谱能清晰地识别. 通过 AE 监测系统，提取原始声发射波形信号，如图 8a 所示. 接着使用 Matlab 编写程序对提取的原始声发射波形信号进行 FFT 变换，得到该声发射波形的二维频谱图，如图 8b 所示，主频为二维频谱图中最大幅值对应的频率.

选取各试样从加载到破坏全过程中的所有声发射波形信号，经过 FFT 变换后，获得不同时刻的主频信息，并分析主频在加载过程中的演化规律.

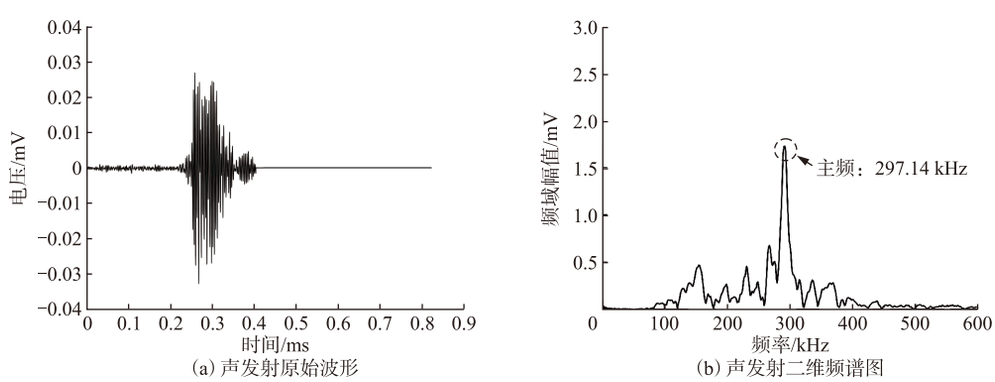


图 8 声发射主频信号提取

Fig. 8 Dominant frequency extraction of acoustic emission signals

图 9a～9e 展示了试样在试验过程中的声发射主频与幅值演化特征. 可以看出声发射信号幅值主要分布在 50～100 dB 范围，主频分布在 50～450 kHz 范围. 根据分布特点，可以将声发射信号划分为 3 个幅值区间，即 50～＜70 dB（低幅）、70～＜85 dB（中幅）和 85～100 dB（高幅）；主频主要分布区可划分为 3 个主频段，即低频段（50～＜200 kHz）、中频段（200～＜300 kHz）和高频段

(300～450 kHz). 声发射信号的主频特征与裂纹尺度及产生机制密切相关:通常,低频信号对应大尺度裂纹的发育或剪切滑移;而高频信号则对应微裂纹的萌生或张拉破坏.

如图 9a 所示,煤样的主频分布呈现显著的双频带特征,50～＜200 kHz 的低频带和 250～300 kHz 的中频带同时存在于煤样的整个试验过程. 这反映了煤体内部原生裂隙极其发育,在试验过程中,主要的声发射信号源自原有裂隙的压密、闭合以及剪切滑移裂纹的发育. 尽管煤试样的高幅信号较少,但煤试样在 75～85 dB 中等幅值区间的信号密度极高. 这表明,煤样在发生宏观破坏之前,内部已经发生了广泛且持续的塑性损伤累积.

如图 9e 所示,砂岩试样的主频分布同样呈现双频带特征,150～＜200 kHz 的中频带和 250～350 kHz 的中高频带同时存在于整个试验过程种. 与煤样不同的是,砂岩较高的矿物硬度和致密的胶结结构,使其破裂产生的弹性波频率更高、波长更短. 在加载前期,中高频、低幅值信号的出现,表明砂岩内部正进行着微裂纹的稳定萌生与扩展. 然而,在临近破坏阶段,砂岩的频率分布呈现频带展宽效应:大量 100～150 kHz 的低频信号密集出现,并伴随着中幅信号的爆发. 这种低频高能信号的涌现,标志着微观裂纹聚集形成大尺度的宏观贯通面. 这是砂岩由弹性储能状态转向宏观脆性断裂的典型前兆,证实了硬岩组分在失稳瞬间具有极高的能量释放率.

而对于组合体试样,如图 9b～9d 所示,受砂岩的约束作用,其初始加载阶段的频带分布显著收窄,主要集中在 200～300 kHz 的范围,表明在约束下试样主要发生受限的小尺度破裂. 在临近破坏阶段,组合体试样产生大量 100～150 kHz 低频高幅信号,预示着大尺度破裂的形成. 随着砂岩占比的增加(从煤岩比 2∶1 到 1∶2),声发射信号的主频重心明显上移. 对于煤岩比为 2∶1 的组合体试样,如图 9b 所示,仍保留了较多中低频信号(100～200 kHz),说明在厚煤层中发生冲击破坏时剪切滑移产生的裂纹占比仍较大,破坏保留了一定的延性特征. 而对于煤岩比为 1∶2 的组合体试样,如图 9d 所示,低频信号在加载初期显著减少,主要集中在 300 kHz 附近的高频带;这表明在强砂岩约束下,煤层的低频剪切破坏被抑制,系统的整体失稳转变为由高频张拉断裂主导. 这种由加载初期高频小尺度微破裂向临近破坏阶段低频大尺度破裂的演化,表明组合体中砂岩占比增加会导致煤岩组合体脆性增强,破坏时能量释放更加剧烈.

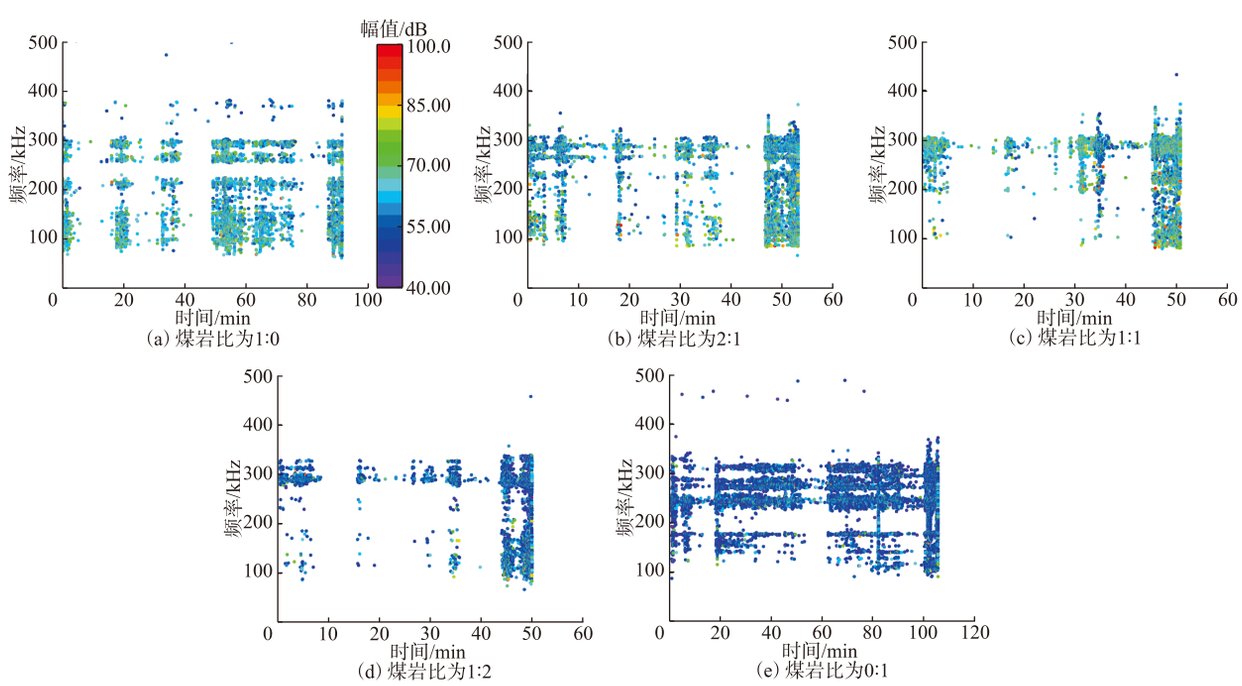


图 9　不同煤岩比试样的声发射主频、幅值与时间关系

Fig. 9　The relationship between the dominant frequency, amplitude, and time of acoustic emission for specimens with different coal-rock ratios

3 基于主频熵演化的前兆分析

3.1 主频熵值计算

1948年,文献[42]提出了信息熵理论.信息熵作为衡量系统无序度与复杂度的重要统计物理量,能够量化声发射信号在时序分布上的不确定性.鉴于此,本节引入信息熵理论,通过声发射波形信息熵的演化规律,进一步揭示煤岩组合体的破坏机制.信息熵理论的表达式为

$$\sum_{i=1}^{n} P_i = 1, \tag{1}$$

$$H(t) = -\sum_{i=1}^{n} P_i \ln P_i, \tag{2}$$

式中:P_i为第i个频率区间内的信号能量占信号总能量的比例;n为频率区间的划分总数;$H(t)$为熵值;t为时间参数,表示应力加载过程中的某一时刻.

为在统一尺度下分析煤岩不同岩性的频率特征,结合试验中试样破裂过程中的主频分布规律,确定的频带范围兼顾了砂岩的高频断裂特征与煤体的低频分布细节.设定主频统计上限为500 kHz.图10给出了煤岩比为1∶1的组合体试样在应力加载和临近破坏阶段的频率分布直方图,图中将频率范围[0,500 kHz]划分为n=25个子区间(每个区间为20 kHz).由图10可见,在加载初期,试样声发射信号频率分布相对集中,主要集中在280~300 kHz的频带范围内,呈现明显的"单峰"特征;随着试样临空面暴露,σ_3降为0 MPa,轴向应力σ_1增加,试样临近破坏.试样的主频分布范围变大,除原有的280~300 kHz频带之外,出现了100~120 kHz的主频带,表现出能量向低频偏移及多峰并存的态势.该划分标准能够灵敏地捕捉到主频带从应力加载阶段的窄频带集中向临近破坏阶段的宽频带演化的过程,即在计算主频熵时,式(1)和(2)中的n取25.

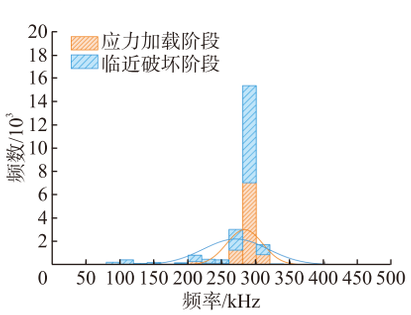


图10 煤岩比为1∶1的组合体试样主频分布

Fig. 10 Dominant frequency distribution of the composite specimen with a coal-to-rock ratio of 1∶1

为进一步验证n取25的合理性,选取n=10和n=50作为对照进行主频熵的计算,计算结果如图11所示.结果表明,区间划分数量n的取值主要影响主频熵的绝对量值,而其演化趋势则表现出一致性.当n=10时,单个子频带的带宽达50 kHz,频率分辨率的不足导致其容易掩盖煤岩破裂过程中主频带的细微迁移特征,使得熵值指标对初期微损伤产生的声发射信号响应较为迟滞,其演化曲线相较于n=25或n=50时更为平滑,不利于前兆信息的早期捕捉.而n=50时虽能捕捉到试样在破裂过程中频带迁移的细微变化,但划分的区间较多,降低了主频熵值的计算效率.相比之下,本文选取的n=25能够兼顾计算效率与特征敏感度,既避免了因划分过细引入的随机噪声干扰,又确保了对频谱相变特征的精准识别,从而能更精准地捕捉到冲击失稳前夕系统混乱度激增的本质规律.

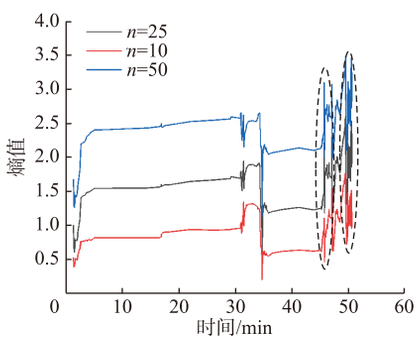


图11 n=10,25,50情况下煤岩比为1∶1的组合体试样主频熵值演化

Fig. 11 Evolution of the dominant frequency entropy values of coal-rock composite specimen with a coal-rock ratio of 1∶1 under n=10, 25, 50

3.2 主频熵值特征分析

图12展示了不同试样在试验过程中声发射主频信息熵的演化特征.作为衡量系统混乱度与复杂度的统计物理量,熵值的演化轨迹深刻揭示了试样内部损伤从"无序萌生"到"有序贯通"或"复杂博弈"的动态过程.

由图12可知,煤试样的熵值始终在3.0左右的区间内维持小幅度波动.这是由于煤内部原生裂隙极其发育且分布随机,试样在加、卸载过程中微裂纹的萌生与扩展缺乏主导方向,这使得声发射信号在频域上的分布极度离散(宽频带).

砂岩试样的初始熵值约为2.0,伴随试验加、卸载过程呈现逐渐上升趋势,最终逼近2.5.这一熵增过程对应了前文所述临近破坏阶段频带的展宽效应.即在加载初期,损伤主要集中在特定的微

裂纹萌生(相对有序)；而接近破坏时，穿晶断裂与沿晶断裂等多种损伤机制由单一主导转变为混合并发．这种多尺度破裂模式的共存使得主频带显著展宽，信号在频域上的分布趋于离散化，导致试样熵值增加．

与单一岩性试样不同的是，组合体试样的熵值在试验过程中呈现“低熵阶梯跃升，临界振荡破坏”的特征．如图 12b～12d 所示，组合体试样的初始熵值低于单一岩性试样，且随着试样中砂岩含量的增加(煤岩比从 2∶1 到 1∶2)，初始熵值呈现降低趋势．这一结果体现了砂岩对试样中软弱煤样的变形约束作用．在砂岩约束下，煤的随机变形和内部裂纹萌生演化受到限制，试样发生单一的张拉破裂，系统在初始阶段表现出较高的“有序性”．

伴随着时间推移和载荷增加，组合体试样的熵值经历了多次振荡跃升．这一现象与前文观测到的“主频带分布从窄变宽”形成了良好的对应．它标志着系统正在突破初始的约束状态，破坏机制由单一的受限破裂向多尺度的复杂破裂演化，系统状态由“有序”逐渐向“无序”迁移．在临近破坏时刻，所有组合体试样的熵值均升高至 2.0 以上，表明系统已进入高度复杂的临界失稳状态．

这种临近破坏阶段出现熵值大幅波动的现象反映了组合体试样内部软弱煤样损伤演化与坚硬砂岩弹性约束之间的动态演化：一方面，煤的局部剪切和塑性屈服倾向于形成贯通面，诱导系统有序化(熵减)；另一方面，砂岩的约束作用限制了宏观滑移的发生，导致局部应力重分布并激发新的随机微裂纹，迫使系统回归无序状态(熵增)．两者在临界状态下的反复变换，表现为宏观上的熵值振荡．这种特殊的动力学响应，是组合体发生冲击地压灾变前特有的前兆信息．

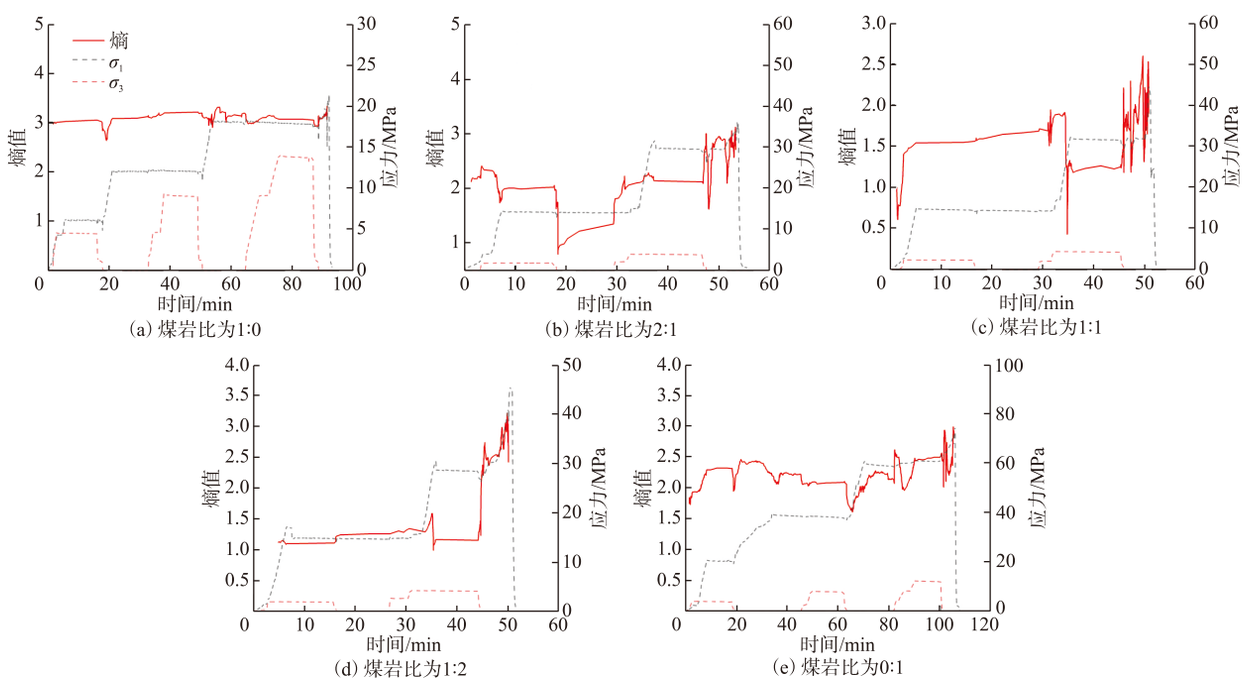


图 12　不同煤岩比例试样的主频熵和应力-时间曲线

Fig. 12　The dominant frequency entropy and stress-time curves of specimens with different coal-rock ratios

相比于基于声发射能量或计数等时域参数的熵值刻画，主频熵在刻画煤岩组合体失稳演化过程中具有更好的稳健性．时域指标在破坏瞬间常伴随有跨数量级的跃升，这会导致熵值呈现统计非平稳性．而组合体在破坏过程中的主频带在 50～450 kHz 的区间内，主频熵能够通过量化主频带由单峰窄频向多峰展宽的迁移过程，揭示系统由有序微破裂向无序多尺度复杂破裂转变的相变本质．特别是临近破坏时熵值的剧烈振荡，深刻反映了软弱煤层损伤演化(诱导熵减)与坚硬砂岩弹性约束(诱导熵增)间的动态博弈机制．

3.3　基于声发射主频熵的冲击破坏多级预警指标

单一岩性的试验结果往往难以准确反映组合体结构的动态失稳特征．因此，基于煤岩组合体信息熵的非线性演化规律，引入信息熵滑动方差作为煤岩组合体冲击破坏前兆的定量识别指标．

设 $H(t)$ 为试验测得的声发射信息熵时间序列，序列长度为 N．采用滑动窗口法对熵值序列进行处理．定义滑动窗口的宽度为 w(本研究取 $w=20$)，则在时刻 t 的熵值方差 $S^2(t)$ 的计算公式为：

$$S^2(t)=\frac{1}{w-1}\sum_{i=0}^{w-1}\left[H(t-i)-\overline{H_w}(t)\right]^2, \quad (3)$$

$$\overline{H_w}(t)=\frac{1}{w}\sum_{i=0}^{w-1}H(t-i), \quad (4)$$

式中：$H(t-i)$为当前窗口的第i个熵值数据；$\overline{H_w}(t)$为当前窗口的熵值算数平均值.

基于上述算法，建立煤岩组合体冲击破坏的双级预警指标：

一级预警：当声发射频带显著展宽，熵值由平稳增长转为振荡上升，组合体试样损伤不断累积，接近临界破坏点. 定义试样卸载后，熵值开始振荡上升的点为预警前兆点. 若熵值超过该点对应的基准水平，表明试样内部损伤加剧，接近临界破坏区.

二级预警：随着载荷继续增加，当监测到熵值出现高幅的持续振荡，且滑动方差出现跃升并出现显著峰值时，表明系统已进入临界破坏区. 这是试样发生冲击破坏的临界前兆点.

如图 13 所示，利用上述判别指标对组合体试样数据进行分析. 煤岩组合体由于受到砂岩的约束，在加载初期内部破裂具有较强的方向性与有序性，其主频分布呈现窄带特征，熵值低于 2；但随着试样损伤演化，进入临界破坏区前，试样主频带发生显著频带展宽且熵值跨越 2 这一分界点.

故选用熵值等于 2 的点作为一级预警预报点，得到组合体试样的各级预警时刻如表 2 所示.

表 2 中统计的提前时间是指各级预警信号触发时刻与试样最终发生宏观冲击破坏时刻之间的时间差. 如表 2 所示，基于主频熵值波动的一级预警点平均提前试样宏观破坏时刻 4.96 min，这代表了系统由稳定加载向损伤加速演化的早期预警；而基于滑动方差突增的二级预警点平均提前 1.40 min，这代表系统进入临界失稳状态后的最后响应时长. 统计结果验证了该指标对煤岩组合体卸载冲击破坏预警的有效性，为深部巷道动力灾害的早期监测与工程预警提供了重要的理论依据.

需要说明的是，本文提出的双级预警指标虽在实验室环境下表现出良好的前兆指向性，但其在深部矿井的应用仍面临一定挑战. 首先，在深部矿井开采过程中的机械振动与电磁干扰等背景噪声可能会导致主频熵特征点的识别精度受限. 其次，本文选取熵值等于 2 作为一级预警点，是基于实验室环境下的特征阈值，在不同地质背景下的普适性仍需验证. 然而，本文揭示了煤岩组合体冲击破坏过程中频域响应的相变共性，即主频熵值由平稳增长向临界振荡转变的波动演化规律. 未来研究将侧重于开发结合深度学习与自适应滤波（如小波去噪，经验模态分解）的信号预处理方法，剔除现场环境干扰；并致力于建立基于“相对突变率”而非“绝对阈值”的动态判据体系，从而提升模型在实际复杂工况下的抗干扰能力与鲁棒性.

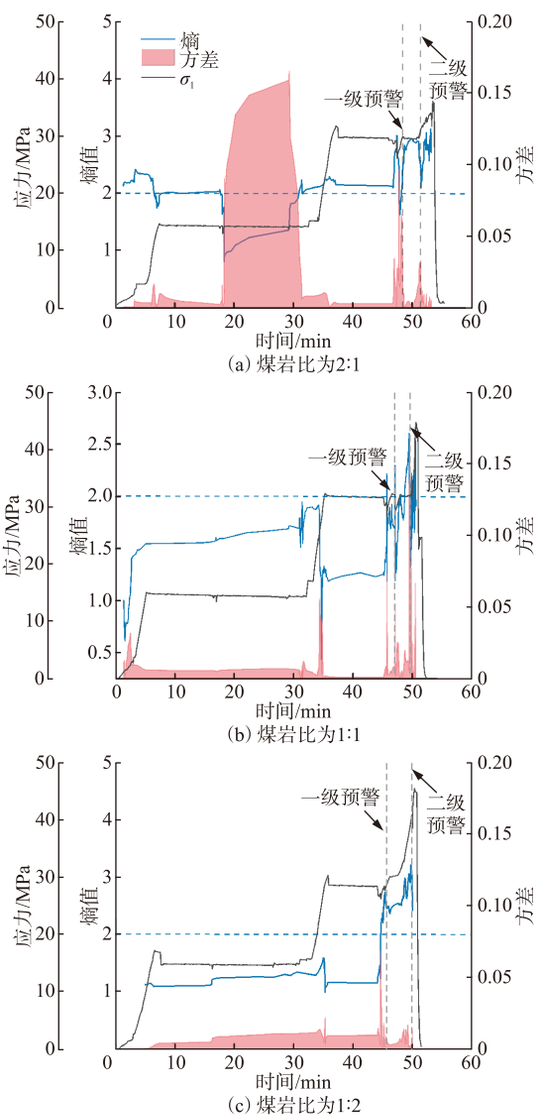


图 13 组合体试样应力、熵值、方差与时间曲线

Fig. 13 The stress, entropy and variance- time curves of the composite specimens

表 2 组合体冲击破坏预警时间

Table 2 Composite specimens rockburst warning time

煤岩比例	一级预警		二级预警		破坏时刻/min
	预警时刻/min	提前时间/min	预警时刻/min	提前时间/min	
2:1	47.85	5.67	51.51	2.01	53.52
1:1	47.09	3.52	49.53	1.08	50.61
1:2	44.65	5.70	49.23	1.12	50.35

4　结　论

1)在煤和组合体试样的宏观冲击破坏前观察到了明显的前兆现象(表现为小规模颗粒喷射).组合体试样表现出伴随多次碎屑剧烈弹射的阶段性破坏过程.煤岩组合体的破坏模式与单一岩性试样不同.

2)不同于煤和砂岩破坏时AE能量的突发性垂直陡增,组合体在临近破坏前,其AE累积能量曲线呈现典型的“瞬时陡升—短暂持平”的前兆性能量台阶特征.

3)煤和砂岩始终处于高熵无序状态,而组合体熵值演化呈现“低熵阶梯跃升,临界振荡破坏”的特征.组合体受约束时频带较窄,临近破坏时低频信号的爆发导致频带显著展宽.熵值的增加对应于声发射主频带的显著展宽;临近破坏阶段熵值的剧烈振荡,则反映了组合体内软弱煤层损伤演化(诱导熵减)与坚硬砂岩弹性约束(诱导熵增)之间的动态演化.

4)构建了基于熵值滑动方差的冲击地压双级预警模型,针对传统能量指标存在的滞后性问题,建立了分级前兆指标:以试样应力卸载后,熵值振荡上升的点为试样破坏预警前兆点(一级预警),以熵值滑动方差的突增峰作为临界破坏的临界前兆点(二级预警).实测验证表明,该指标能够有效捕捉组合体宏观失稳前的失稳信号.

参考文献:

[1] YANG B B, HE M M, XIAO Z S, et al. Effect of horizontal stress on fractal characteristics of rockburst fragments in coal mining [J]. Energy, 2023, 281: 128181.

[2] 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.

[3] 左建平,马宗宇,蒋一铭,等.真三轴深部岩石力学试验系统研制与初步应用[J].中国矿业大学学报,2025,54(6):1371-1387.
ZUO Jianping, MA Zongyu, JIANG Yiming, et al. Development and preliminary application of true triaxial deep rock mechanics testing system [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(6):1371-1387.

[4] 谢和平,高　峰,鞠　杨.深部岩体力学研究与探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.

[5] ZHAO S K, ZHANG M Y, HE G M, et al. Experimental study on fracture behavior of coal-rock specimens with varying sandstone strength using the ultrafast time-resolution method [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2025, 137: 104885.

[6] 钱七虎.岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型[J].岩土力学,2014,35(1):1-6.
QIAN Qihu. Definition, mechanism, classification and quantitative forecast model for rockburst and pressure bump [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 1-6.

[7] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.

[8] 韩　军,梁　冰,张宏伟,等.开滦矿区煤岩动力灾害的构造应力环境[J].煤炭学报,2013,38(7):1154-1160.
HAN Jun, LIANG Bing, ZHANG Hongwei, et al. Tectonic stress environment of coal and rock dynamic hazard in Kailuan mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(7): 1154-1160.

[9] 王恩元,刘晓斐,何学秋,等.煤岩动力灾害声电协同监测技术及预警应用[J].中国矿业大学学报,2018,47(5):942-948.
WANG Enyuan, LIU Xiaofei, HE Xueqiu, et al. Acoustic emission and electromagnetic radiation synchronized monitoring technology and early-warning application for coal and rock dynamic disaster [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(5): 942-948.

[10] 何满潮,苗金丽,李德建,等.深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):865-876.
HE Manchao, MIAO Jinli, LI Dejian, et al. Experimental study on rockburst processes of granite specimen at great depth [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 865-876.

[11] KENETI A, SAINSBURY B A. Review of published rockburst events and their contributing factors

[J]. Engineering Geology, 2018, 246: 361-373.

[12] KAISER P K, YAZICI S, MALONEY S. Mining-induced stress change and consequences of stress path on excavation stability: A case study [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(2): 167-180.

[13] LI C X, LI D J, LIU X L, et al. Experimental study on the influence of intermediate principal stress on failure characteristics of strain rock burst for granite [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(9): 340.

[14] LI C X, LI D J, LIU D Q, et al. Experimental investigation on fractal characteristics of rockburst fragments for granite experiencing initial temperature damage [J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 166: 108842.

[15] LU J, YIN G Z, GAO H, et al. True triaxial experimental study of disturbed compound dynamic disaster in deep underground coal mine [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 2347-2364.

[16] 姜明伟,梁运涛,冯文彬,等.弱动力扰动作用下岩石微裂隙演化特征及灾害防控[J].煤田地质与勘探,2024,52(10):166-176.
JIANG Mingwei, LIANG Yuntao, FENG Wenbin, et al. Evolutionary characteristics of microcracks in rocks under weak dynamic disturbance and disaster prevention and control [J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(10): 166-176.

[17] 涂 敏,赵庆冲,张向阳,等.不同加载速率下煤岩动力破坏特征实验研究[J].采矿与安全工程学报,2023,40(5):1031-1042.
TU Min, ZHAO Qingchong, ZHANG Xiangyang, et al. Experimental study on dynamic failure characteristics of coal and rock under different loading rates [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 1031-1042.

[18] 王晓南,陆菜平,薛俊华,等.煤岩组合体冲击破坏的声发射及微震效应规律试验研究[J].岩土力学,2013,34(9):2569-2575.
WANG Xiaonan, LU Caiping, XUE Junhua, et al. Experimental research on rules of acoustic emission and microseismic effects of burst failure of compound coal-rock samples [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2569-2575.

[19] CHEN Q Z, WEI H R Y, LI X P, et al. Experimental visualization of soil arching evolution and collapse in pile-supported embankments under cyclic loading [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2026, 17(3): 104059.

[20] FENG G L, CHEN B R, XIAO Y X, et al. Microseismic characteristics of rockburst development in deep TBM tunnels with alternating soft-hard strata and application to rockburst warning: A case study of the Neelum-Jhelum hydropower project [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 122: 104398.

[21] 杨 磊,高富强,王晓卿,等. 煤岩组合体的能量演化规律与破坏机制[J]. 煤炭学报,2019,44(12):3894-3902.
YANG Lei, GAO Fuqiang, WANG Xiaoqing, et al. Energy evolution law and failure mechanism of coal-rock combined specimen[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3894-3902.

[22] HUANG B X, LIU J W. The effect of loading rate on the behavior of samples composed of coal and rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 61(10): 23-30.

[23] BAI X, WANG Y, HE G C, et al. Research on a permeability model of coal damaged under triaxial loading and unloading [J]. Fuel, 2023, 354: 129375.

[24] WANG Q, WANG M Z, XU S, et al. Dynamic characteristics and energy absorption mechanism of prestressed anchorage support [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 163: 106759.

[25] 张晨阳,潘俊锋,夏永学,等.真三轴加卸载条件下组合煤岩冲击破坏特征研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(8):1522-1533.
ZHANG Chenyang, PAN Junfeng, XIA Yongxue, et al. Research on impact failure characteristics of coalrock combination bodies under true triaxial loading and unloading conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1522-1533.

[26] 张晨阳,潘俊锋,夏永学,等.真三轴条件下煤岩体冲击破坏的能量演化特征分析[J].煤炭科学技术,2022,50(增2):160-169.
ZHANG Chenyang, PAN Junfeng, XIA Yongxue, et al. Analysis of energy evolution characteristics of coal rock mass impact failure under true triaxial test condition[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(Sup 2): 160-169.

[27] 杨 科,刘文杰,马衍坤,等.真三轴单面临空下煤岩组合体冲击破坏特征试验研究[J].岩土力学,2022,43(1):15-27.
YANG Ke, LIU Wenjie, MA Yankun, et al. Experimental study of impact failure characteristics of coal-rock combination bodies under true triaxial loading and single face unloading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(1): 15-27.

[28] 彭岩岩，郦亦凡，余　虎，等．基于真三轴卸载试验不同倾角组合煤岩力学特性研究[J]．采矿与岩层控制工程学报，2024，6(2)：5-14.
PENG Yanyan, LI Yifan, YU Hu, et al. Mechanical properties of coal and rock with different dip angles based on true triaxial unloading test [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(2): 5-14.

[29] 彭岩岩，邓浩翔，樊　啸．中间主应力对煤岩力学与声发射特征的影响[J]．煤矿安全，2021，52(6)：78-84.
PENG Yanyan, DENG Haoxiang, FAN Xiao. Influence of intermediate principal stress on mechanics and acoustic emission characteristics of coal rock [J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(6): 78-84.

[30] 张宁博，齐庆新，欧阳振华，等．不同应力路径下大理岩声发射特性试验研究[J]．煤炭学报，2014，39(2)：389-394.
ZHANG Ningbo, QI Qingxin, OUYANG Zhenhua, et al. Experimental on acoustic emission characteristics of marble with different stress paths [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 389-394.

[31] 张艳博，梁　鹏，刘祥鑫，等．基于多参量归一化的花岗岩巷道岩爆预测试验研究[J]．岩土力学，2016，37(1)：102-110.
ZHANG Yanbo, LIANG Peng, LIU Xiangxin, et al. An experimental study of predicting rockburst in granitic roadway based on multiparameter normalization [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1): 102-110.

[32] LI J Y, LIU D Q, HE M C, et al. True triaxial experimental study on the variation characteristics of rockburst with the number of fast unloading surfaces [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(8): 5585-5606.

[33] 许传华，任青文．围岩稳定分析的熵突变准则研究[J]．岩土力学，2004，25(3)：437-440.
XU Chuanhua, REN Qingwen. Criterion of entropy catastrophe of stability of surrounding rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 437-440.

[34] SUN J, LIU D Q, HE M C, et al. Experimental study on the differences in acoustic emission precursor between rockburst and brittle failure based on the data mining method [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2026, 58(3): 3479-3500.

[35] REN F Q, SONG T Y, MA K, et al. Experimental investigation on the influence of weak interlayers on sandstone rockburst and associated microcracking mechanism [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 182: 105890.

[36] 张艳博，梁　鹏，刘祥鑫，等．基于声发射信号主频和熵值的岩石破裂前兆试验研究[J]．岩石力学与工程学报，2015，34(增1)：2959-2967.
ZHANG Yanbo, LIANG Peng, LIU Xiangxin, et al. Experimental study on precursor of rock burst based on acoustic emission signal dominant-frequency and entropy [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup 1): 2959-2967.

[37] 王春来，廖泽锋，李长峰，等．花岗岩岩爆声发射时空熵值动态特征实验研究[J]．采矿与安全工程学报，2019，36(3)：626-633.
WANG Chunlai, LIAO Zefeng, LI Changfeng, et al. Experimental investigation of dynamic characteristics of AE spatio-temporal entropy for granitic rockburst [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(3): 626-633.

[38] HUANG Z J, SHEN M X, ZHAO Y, et al. Experimental study on damage evolution and failure precursor characteristics of granite under thermal shock cycles [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2026, 36(1): 125-148.

[39] FRANKLIN J A, VOGLER U W, SZLAVIN J. Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties: Part 1: Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16(2): 143-151.

[40] 何满潮，武毅艺，高玉兵，等．深部采矿岩石力学进展[J]．煤炭学报，2024，49(1)：75-99.
HE Manchao, WU Yiyi, GAO Yubing, et al. Research progress of rock mechanics in deep mining [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 75-99.

[41] 种照辉，喻臣铈，姚强岭，等．不同流体介质压裂试样声发射时域-频域-空间特征研究[J]．岩石力学与工程学报，2025，44(12)：3256-3275.
CHONG Zhaohui, YU Chenshi, YAO Qiangling, et al. Temporal, frequency and spatial characteristics of acoustic emission in specimens fractured with different fluid media [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(12): 3256-3275.

[42] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379-423..

（责任编辑　沈春妮　宋　爽）