

煤样常规压缩声发射特征及破坏前兆信息

段会强^{1,2,3,4}, 刘业娇^{1,2,3,4}, 郝雄雄^{1,2,3,4}, 代明星^{1,2,3,4*}

1. 内蒙古科技大学矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010

2. 内蒙古自治区矿业工程重点实验室, 内蒙古 包头 014010

3. 内蒙古自治区煤炭安全开采与利用工程技术研究中心, 内蒙古 包头 014010

4. 内蒙古煤炭绿色开采与绿色利用协同创新中心, 内蒙古 包头 014010

摘要: 回采巷道中煤岩的稳定性对工作面安全生产具有重要影响,而确定煤岩破坏的前兆信息有助于避免巷道失稳和实现安全高效生产。为此,通过常规压缩试验获得了煤样变形破坏过程中的声发射信息,并研究了声发射信号在时域和频域的演化特征,分析了不同声发射参数对煤样破坏的预测能力。研究结果表明:在单轴和三轴常规压缩条件下,煤样主破裂面产生前的声发射振铃计数和撞击计数发展过程均可分为孕育期、发展期和活跃期;在主破裂面产生后,常规单轴压缩声发射振铃计数和撞击计数进入沉寂期,常规三轴压缩声发射振铃计数和撞击计数进入平稳期。当煤样发生较大局部破坏时,声发射振铃计数率和撞击计数率明显增大,累积振铃计数和撞击计数曲线出现拐点,这些信息可以作为煤样破坏的前兆特征。声发射信号主频分为1#、2#、3#和4#四个频段,其中,2#频段对应煤样的主要破坏模式,4#、3#和1#频段分别对应小、中等和大尺度微裂纹的产生。时频域联合预测的准确性高于单参量的时域或频域预测。按照响应时间,声发射振铃计数率和撞击计数率出现最早,累积振铃计数和累积撞击计数次之,最后是累积振铃计数+1#频段和累积撞击计数+1#频段。研究结果可为回采巷道围岩稳定性评估及防治冲击地压等实际动力灾害问题提供理论指导。

关键词: 煤样; 声发射; 振铃计数; 撞击计数; 主频; 破坏前兆

中图法分类号: TD315

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2026)05-0854-11

Acoustic Emission Characteristics and Failure Precursor Information of Coal Specimen Under Conventional Compression

DUAN Hui-qiang^{1,2,3,4}, LIU Ye-jiao^{1,2,3,4}, HAO Xiong-xiong^{1,2,3,4}, DAI Ming-xing^{1,2,3,4*}

1. School of Mining and Coal/Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China

2. Inner Mongolia Key Laboratory of Mining Engineering, Baotou 014010, China

3. Inner Mongolia Research Center for Coal Safety Mining and Utilization Engineering and Technology, Baotou 014010, China

4. Inner Mongolia Cooperative Innovation Center for Coal Green Mining and Green Utilization, Baotou 014010, China

Abstract: The stability of coal masses in the mining roadway has a significant impact on the safe production of working face, and determining the precursor information of coal masses failure is helpful to avoid roadway instability and achieve safe and efficient production. To this end, this study obtains the acoustic emission (AE) information of coal specimen in deformation and failure process through conventional compression tests, explores the evolution characteristics of AE signal in time and frequency domains, and analyzes the prediction ability of different AE parameters on coal specimen failure. The research results show that under uniaxial and triaxial compression conditions, the development process of AE ring-down and hit counts before the formation of the main fracture surface in coal specimens can be divided into an incubation period, a development period, and an active period. After the main fracture surface is formed, the AE ring-down and hit counts enter a silent period under conventional uniaxial compression, while they fall into a stable period under conventional triaxial compression. When significant local damage occurs to the coal specimen, the AE ring-down and hit count rates increase significantly, and the inflection points appear on cumulative ring-down and hit count curves, which can serve as the precursor characteristics of coal specimen failure. The dominant frequencies of AE signal are divided into four bands: No.1, 2, 3 and 4. Among them, the No.2 frequency band corresponds to the main failure mode of coal specimen, while the No.4, 3 and 1 bands correspond to the formation of small, medium and large sized microcracks, respectively. The accuracy of joint prediction in the time-frequency domain is higher than that of single-parameter time-domain or frequency-domain prediction. According to the response time,

收稿日期: 2025-11-03

修回日期: 2026-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52464019)

第1作者简介: 段会强(1986-),男,博士,副教授,研究方向: 矿山岩石力学及灾害防治。E-mail: duanhuiqiang11@163.com

*通讯作者: Author for correspondence. E-mail: 1947937114@qq.com

the AE ring-down and hit count rates appear the earliest, followed by the cumulative ring-down and hit counts, and finally the "cumulative ring-down and hit counts + No. 1 frequency band". These results can provide theoretical guidance for stability assessment of mining roadway surrounding rock or prevention and control of actual dynamic disasters such as rockburst.

Keywords: Coal specimen; acoustic emission; ring-down count; hit count; dominant frequency; failure precursor

随煤矿开采强度和深度的增加,扰动应力和地应力增大,煤体失稳破坏导致的灾害事故显著增多,严重影响了煤矿的安全高效生产。煤体在受载破坏过程中,其内部将不断产生微裂纹从而产生声发射现象,声发射信号蕴含着煤岩内部破裂发展的丰富信息,是其变形破坏的重要表现形式^[1-5]。对于声发射信号的分析,可以从时域参数和频域波形两方面进行^[6-8]。时域参数分析主要揭示岩石材料破坏过程中的一些特征值变化^[9-11]。比如,杨永杰等^[12]研究了煤岩常规压缩破坏的声发射振铃、能量和撞击计数等时域参数特征。贾蓬等^[13]研究了热损伤花岗岩在单轴压缩作用下的声发射振铃计数和能量随时间的演化规律。张田录等^[14]研究了煤巷结构在垂直应力加载条件下的声发射特征。频域波形分析能够深入挖掘岩石材料声发射波形信号中蕴含的丰富信息,所提取的频谱特征可以更全面地反映其破坏机制^[15-17]。比如,Li等^[18]研究了单轴加载条件下岩体的声发射波形特征。曾鹏等^[19]通过粗砂岩单轴压缩声发射试验,提出了基于声发射信号频段占比与岩石应力关系的多频段声发射信号主频识别判据模型。何满潮等^[20]通过瞬时应变型岩爆模拟试验对花岗岩声发射频谱特征演化规律进行了研究,获得了不同应力值时声发射信号的主频值及二维频谱图的变化特征。张艳博等^[21]研究了饱水花岗岩单轴压缩破坏过程中声发射波形信号主频和次主频带的数量及分布特征,并提出了主频比的概念。曾斌鹏等^[22]研究了红砂岩在加速蠕变阶段起点和终点的主频特征。常新科等^[23]对细砂岩进行了单轴压缩、定角压剪和巴西劈裂试验,在分析声发射波形后得出:低频信号是细砂岩破坏时的一种固有属性,与加载方式和试验方法无关,中频和高频信号对应剪切滑移过程与剪切破坏模式。赵奎等^[24]研究了花岗岩在持续高温作用下的声发射主频演化规律及多重分形特征。朱凌等^[25]研究了次生胶结岩体加卸载下的声发射主频演化类型,认为次生胶结物面积会对声发射主频演化类型产生影响。可以看出,当前已经有许多专家对脆性岩石试样声发

射信号时域和频域特征及破裂前兆信息进行了大量研究,但针对峰后延性较大的煤样开展的相关研究却很少。基于此,本文对煤样进行常规压缩声发射试验,研究声发射信号在时、频域的演化特征,探寻煤样破坏的前兆信息,研究内容能为回采巷道围岩稳定性评估及防治冲击地压等现场实际动力灾害问题提供理论指导。

1 常规压缩试验

1.1 取样及制样

试验煤样取自兖矿集团杨村煤矿16_上煤。在井下选取完整、不含明显节理的大块煤岩并密封包装,然后运至实验室进行加工。煤样加工严格按照国际岩石力学学会(ISRM)及《工程岩体试验方法标准》(GB/T50266-99)中的相关规定进行。采用ZS-100B型取芯机垂直煤样层理进行慢速钻取,然后用DQ-4型切割机将煤样两端面切割平整,最后用AHM-200型打磨机对煤样两端面进行打磨,最终加工成直径50 mm、高度100 mm的标准圆柱体试样。煤样加工完成后,在干燥的室内自然干燥并编号。

1.2 试验方法

煤样常规压缩试验在MTS815.02电液伺服岩石力学试验系统上进行,如图1所示。声发射设备采用AE21C系统,采样频率为1.0 MHz,前置放大器增益为38 dB,门槛值为30 dB。首先对煤样进行了常规单轴压缩试验,然后又分别进行了围压为5 MPa和10 MPa的常规三轴压缩试验,试验过程采用位移控制模式,位移加载速率为0.003 mm/s。



图1 MTS815.02岩石力学试验系统
Fig. 1 MTS815.02 rock mechanics testing system

1.3 试验结果

典型煤样常规压缩应力—应变曲线如图 2 所示,试验结果如表 1 所示。

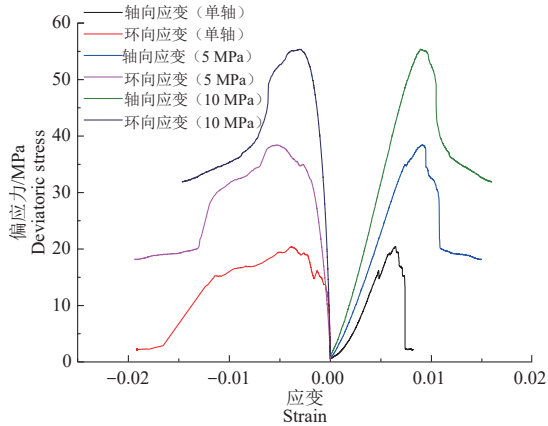


图 2 煤样常规压缩偏应力—应变曲线

Fig. 2 Deviatoric stress-strain curves of coal specimen under conventional compression

由图 2 可以看出,单轴条件下,煤样应力—应变曲线比较粗糙,且峰后残余强度很低;在 5 和 10 MPa 围压条件下,煤样应力—应变曲线比较光滑,且峰后残余强度较高。表明围压能够有效提高煤样的各向同性,降低煤样内部的原生损伤,限制煤样内部随机微裂隙的发育,从而提高煤样的峰值强度和峰后残余强度,且围压越高这种作用越明显。

由表 1 可以看出,随围压的增加,煤样常规压缩强度和弹性模量逐渐增大,但泊松比呈减小趋势。

2 声发射信号时域特征

2.1 振铃计数特征

在单轴、5 和 10 MPa 围压条件下,煤样常规压缩声发射振铃计数特征如图 3 所示。

由图 3(a)可知,单轴压缩条件下,根据累积声发射振铃计数曲线的拐点,煤样声发射振铃计数发展过程可分为孕育、发展、活跃和沉寂期

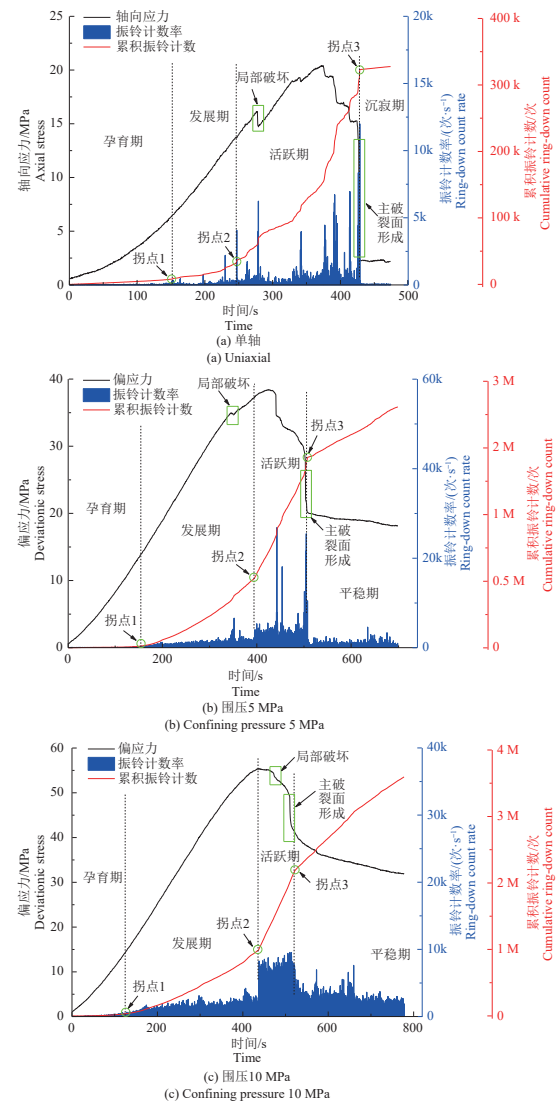


图 3 煤样常规压缩声发射振铃计数率、累积振铃计数、应力与时间的关系

Fig. 3 Relationship of ring-down count rate, cumulative ring-down count and stress versus time for AE from coal specimens under conventional compression

四个阶段。

在孕育期,煤样内部微裂隙被压密闭合,几乎没有声发射活动,声发射振铃计数率小于 150 次/s,处于很低的水平。当轴向应力增加到 6.54 MPa (32.04% 应力水平)时,累积声发射振铃

表 1 煤样常规压缩试验结果

Table 1 Test results of coal specimen under conventional compression

围压/MPa	试件编号	长度/mm	直径/mm	弹性模量/GPa	泊松比	峰值强度/MPa
Confining pressure	Specimen number	Length	Diameter	Elastic modulus	Poisson's ratio	Peak strength
0	MA.7	97.14	49.54	4.43	0.35	20.41
5	MB.14	95.78	49.54	5.27	0.34	38.42
10	MG.16	95.46	49.50	7.01	0.24	55.37

计数曲线出现拐点 1, 累积声发射振铃计数为 8 844 次。随后进入发展期, 在发展期, 除个别时间段声发射振铃计数率(大于 1 000 次/s)处于较高的水平外, 其他时间段声发射振铃计数率普遍小于 200 次/s, 总体上仍处于较低的水平。当轴向应力增加到 13.69 MPa (67.07% 应力水平) 时, 累积声发射振铃计数曲线出现拐点 2, 累积声发射振铃计数为 35 859 次。随后进入活跃期, 在活跃期, 煤样内部微裂纹开始大量萌生并扩展贯通, 声发射活动显著增强, 并在煤样内部发生较大局部破坏时声发射振铃计数由小于 1 500 次/s 突增至 3 500 次/s 以上; 声发射振铃计数率呈现“相对稳定、间隔突发”的特征, 表明煤样内部每一次较大局部破坏都需要一定的时间

孕育。在峰后第 5 次明显的应力跌落处, 轴向应力为 2.38 MPa (11.66% 应力水平), 累积声发射振铃计数曲线出现拐点 3, 累积声发射振铃计数为 322 768 次, 此时煤样内部形成主破裂面, 声发射振铃计数率出现极大值, 为 11 992 次/s。随后进入沉寂期, 在沉寂期, 声发射活动主要来自主破裂面两侧煤体的摩擦, 所以, 产生的裂纹很少, 声发射振铃计数率趋近于 0, 且基本不再增长。

由图 3(b)和(c)可知, 三轴压缩条件下, 根据累积声发射振铃计数曲线的拐点, 煤样常规压缩声发射振铃计数发展过程可分为孕育、发展、活跃和平稳期四个阶段。煤样常规三轴压缩累积声发射振铃计数曲线拐点信息如表 2 所示。

表 2 煤样常规三轴压缩累积声发射振铃计数曲线拐点信息
Table 2 Inflection point information of cumulative AE ring-down count curves of coal specimens under conventional triaxial compression

围压/MPa Confining pressure	拐点编号 Inflection point number	应力值/MPa Stress value	应力水平/% Stress level	累积声发射振铃计数/次 Cumulative AE ring-down count
5	1	14.78(峰前)	38.47	17 745
	2	37.61(峰前)	97.89	557 158
	3	21.69(峰后)	56.45	1 393 551
10	1	14.79(峰前)	26.71	36 869
	2	55.37(峰前)	100.00	981 194
	3	41.25(峰后)	74.50	2 174 663

在孕育期, 当围压为 5 MPa 时, 声发射振铃计数率小于 400 次/s, 累积声发射振铃计数为 17 745 次。当围压为 10 MPa 时, 声发射振铃计数率小于 500 次/s, 累积声发射振铃计数为 36 869 次。孕育期内声发射振铃计数率很低, 累积声发射振铃计数较小, 表明产生的声发射活动很少。在发展期, 当围压为 5 MPa 时, 除个别时间段声发射振铃计数率(大于 4 000 次/s)处于较高的水平外, 其他时间段声发射振铃计数率介于 1 000~2 500 次/s 之间, 累积声发射振铃计数为 557 158 次。当围压为 10 MPa 时, 除个别时间段声发射振铃计数率(大于 3 000 次/s)处于较高的水平外, 其他时间段声发射振铃计数率介于 800~2 500 次/s 之间, 累积声发射振铃计数为 981 194 次。发展期内声发射振铃计数率较大, 累积声发射振铃计数显著增大, 表明声发射活动开始增强。在活跃期, 当围压为 5 MPa 时, 在大部分时间段内声发射振铃计数率介于 2 500~

4 500 次/s 之间, 但当煤样内部发生较大局部破坏时, 声发射振铃计数率突增至 18 000 次/s 以上, 呈现“相对稳定、间隔突发”的特征; 在峰后第 3 次明显的应力跌落处, 煤样内部形成主破裂面, 声发射振铃计数率出现极大值, 为 25 463 次/s, 累积声发射振铃计数为 1 393 551 次。当围压为 10 MPa 时, 在大部分时间段内声发射振铃计数率介于 7 000~8 000 次/s 之间, 即使当煤样内部发生较大局部破坏时, 声发射振铃计数率也只增加至 10 000 次/s 左右; 在峰后第 2 次明显的应力跌落处, 煤样内部形成主破裂面, 声发射振铃计数率也仅为 7 562 次/s, 累积声发射振铃计数为 2 174 663 次。活跃期内声发射振铃计数率明显增大但相对平稳, 累积声发射振铃计数也显著增大, 表明声发射活动一直非常剧烈。在平稳期, 当围压为 5 MPa 时, 除个别时间段声发射振铃计数率会超过 3 000 次/s 外, 其他时间段声发射振铃计数率基本保持在 1 000~2 000 次/s 之间。当

围压为 10 MPa 时,除个别时间段声发射振铃计数率会超过 5 000 次/s 外,其他时间段声发射振铃计数率基本保持在 2 500~3 000 次/s 之间。平稳期内,由于围压的作用,主破裂面两侧煤体之间摩擦会产生一定尺度的声发射活动,声发射振铃计数率降低但趋于稳定。

在分析煤样常规压缩应力—时间曲线形态和声发射振铃计数特征后可以推断,随围压增加,煤样发生较大局部破坏的次数逐渐减少,且局部破坏的可观测性越来越差,即煤样逐渐由多次局部破坏导致整体破坏向整体渐进破坏模式过渡。

2.2 撞击计数特征

在单轴、5 和 10 MPa 围压条件下,煤样常规压缩声发射撞击计数特征如图 4 所示。

由图 4(a)可知,单轴压缩条件下,根据累积声发射撞击计数曲线的拐点,煤样常规压缩声发射撞击计数的发展过程可分为孕育期、发展期、活跃期和沉寂期四个阶段。

在孕育期,几乎没有声发射活动,声发射撞击计数率小于 10 次/s,处于很低的水平。当轴向应力增加到 3.70 MPa (18.13% 应力水平)时,累积声发射撞击计数曲线出现拐点 1,累积声发射撞击计数为 235 次。随后进入发展期,在发展期,产生了一定规模的声发射活动,除个别时间段声发射撞击计数率大于 50 次/s 外,其他时间段声发射撞击计数率普遍小于 30 次/s,总体上仍处于较低的水平。当轴向应力增加到 14.71 MPa (72.07% 应力水平)时,累积声发射撞击计数曲线出现拐点 2,累积声发射撞击计数为 5 103 次。随后进入活跃期,在活跃期,煤样内部微裂纹开始大量萌生并扩展贯通,声发射活动增强,并在煤样内部发生较大局部破坏时声发射撞击计数由小于 40 次/s 突增至 80 次/s 以上;声发射撞击计数率呈现“相对稳定、间隔突发”的特征,表明煤样内部每一次较大局部破坏都需要一定的时间孕育。在峰后第 5 次明显的应力跌落处,轴向应力为 2.38 MPa (11.66% 应力水平),累积声发射撞击计数曲线出现拐点 3,累积声发射撞击计数为 13 847 次,此时煤样内部形成主破裂面,声发射撞击计数率为 95 次/s。随后进入沉寂期,在沉寂期,声发射活动主要来自主破裂面两侧煤体的

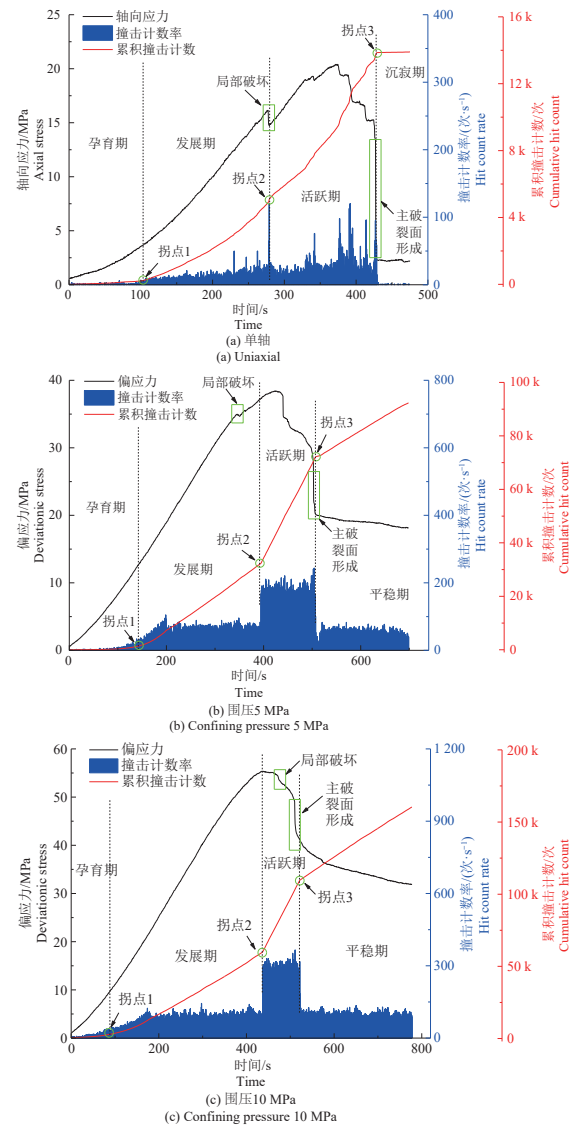


图 4 煤样常规压缩声发射撞击计数率、累积撞击计数、应力与时间的关系

Fig. 4 Relationship of hit count rate, cumulative hit count and stress versus time for AE from coal specimens under conventional compression

摩擦,所以,产生的裂纹很少,声发射撞击计数率趋近于 0,且基本不再增长。

由图 4(b)和(c)可知,三轴压缩条件下,根据累积声发射撞击计数曲线的拐点,煤样常规压缩声发射撞击计数发展过程可分为孕育期、发展期、活跃期和平稳期四个阶段。煤样常规三轴压缩累积声发射撞击计数曲线拐点信息如表 3 所示。

在孕育期,当围压为 5 MPa 时,声发射撞击计数率小于 25 次/s,累积声发射撞击计数为 1 167 次。当围压为 10 MPa 时,声发射撞击计数

表 3 煤样常规三轴压缩累积声发射撞击计数曲线拐点信息
Table 3 Inflection point information of cumulative AE hit count curves of coal specimens under conventional triaxial compression

围压/MPa Confining pressure	拐点编号 Inflection point number	应力值/MPa Stress value	应力水平/% Stress level	累积声发射撞击计数/次 Cumulative AE hit count
5	1	12.12(峰前)	31.55	1 167
	2	37.61(峰前)	97.89	34 132
	3	21.69(峰后)	56.45	71 376
10	1	10.22(峰前)	18.46	2 525
	2	55.37(峰前)	100.00	59 183
	3	41.25(峰后)	74.50	109 426

率小于 40 次/s, 累积声发射撞击计数为 2 525 次。孕育期内声发射撞击计数率很低, 累积声发射撞击计数很小, 表明产生的声发射活动很少。在发展期, 当围压为 5 MPa 时, 声发射撞击计数率逐渐增大并基本保持在 70~100 次/s 之间, 累积声发射撞击计数为 34 132 次。当围压为 10 MPa 时, 声发射撞击计数率逐渐增大并基本保持在 90~120 次/s 之间, 累积声发射撞击计数为 59 183 次。发展期内声发射撞击计数率较大, 累积声发射撞击计数显著增大, 表明声发射活动开始增强。在活跃期, 当围压为 5 MPa 时, 声发射撞击计数率出现了一个比较稳定的平台, 基本保持在 160~180 次/s 之间, 即使在煤样发生较大局部破坏和整体破坏时声发射撞击计数率也只增大到 240 次/s 左右。在峰后第 3 次明显的应力跌落处, 煤样内部形成主破裂面, 累积声发射撞击计数为 71 376 次。当围压为 10 MPa 时, 声发射撞击计数率也出现了一个比较稳定的平台, 基本保持在 280~300 次/s 之间, 即使在煤样发生较大局部破坏和整体破坏时声发射撞击计数率也只增大到 340 次/s 左右。在峰后第 2 次明显的应力跌落处, 煤样内部形成主破裂面, 累积声发射撞击计数为 109 426 次。活跃期内声发射撞击计数率明显增大但相对平稳, 累积声发射撞击计数也显著增大, 表明声发射活动一直非常剧烈。在平稳期, 当围压为 5 MPa 时, 声发射撞击计数率基本保持在 50~80 次/s 之间。当围压为 10 MPa 时, 声发射撞击计数率基本保持在 110~130 次/s。此阶段内, 由于围压的作用, 主破裂面两侧煤体之间摩擦会产生一定尺度的声发射活动, 声发射撞击计数率有所降低但趋于稳定。

在分析煤样常规压缩应力—时间曲线形态和声发射撞击计数特征后可以推断, 当煤样发生

较大局部破坏和整体破坏时, 声发射撞击计数率在单轴压缩下会出现极大值, 但在三轴压缩下增长不明显。

综上所述, 在单轴条件下, 煤样常规压缩声发射振铃计数和撞击计数的发展过程均可分为孕育期、发展期、活跃期和沉寂期四个阶段; 在 5 和 10 MPa 围压条件下, 煤样常规压缩声发射振铃计数和撞击计数的发展过程均可分为孕育期、发展期、活跃期和平稳期四个阶段。但由于声发射振铃计数和撞击计数表示的含义不同, 所以, 按照振铃计数和撞击计数划分的四个阶段所对应的范围并不完全一致。

2.3 裂纹演化与声发射活动关系分析

在单轴、5 和 10 MPa 围压条件下, 孕育期对应的应力水平较低, 基本上与压密阶段和弹性阶段前期相对应。该阶段内的声发射活动主要是由煤样内部颗粒非损伤变形和移位引起, 本质上属于摩擦型声发射信号。发展期对应的应力水平有所提高, 大致与弹性阶段后期和裂纹稳定扩展阶段相对应。此阶段内的声发射活动主要源于煤样内部微小裂纹的萌生, 属于破裂型声发射信号。活跃期处于非常高的应力水平, 与裂纹不稳定扩展阶段相对应。此阶段内的声发射活动主要由大尺度裂纹的萌生、扩展与贯通所主导, 同样属于破裂型声发射信号。此外, 由图 3 和图 4 可知, 随着围压的增加, 发展期对应的应力区间逐渐扩大, 活跃期对应的应力区间逐渐减小。这表明围压对裂纹的萌生、扩展及贯通具有显著影响, 且围压越高, 越有利于裂纹的萌生, 但同时会抑制裂纹贯通的频率, 导致产生较大局部破坏的次数减少。在单轴压缩的沉寂期与三轴压缩的平稳期, 煤样内部已经形成主破裂面。在

后续加载过程中,煤样内部基本不再产生新裂纹,声发射活动主要来自主破裂面两侧煤体的摩擦滑移,声发射活动基本保持稳定且随围压提高而增强,同样属于摩擦型声发射信号。

3 声发射信号频域特征

3.1 声发射原始波形信号去噪方法

声发射信号在采集过程中会受到周围环境的影响,不可避免会掺杂一些噪声。为此,需要对声发射原始波形信号进行去噪处理,去噪方法选择 heursure 混合阈值规则、软阈值函数、Daubechies 小波基。

以煤样常规单轴压缩试验中第 2 001 个冲击波形为例,声发射原始波形信号及去噪后的结果如图 5 所示。

3.2 声发射去噪信号主频提取方法

快速傅里叶变换(FFT)可以将时域波形信

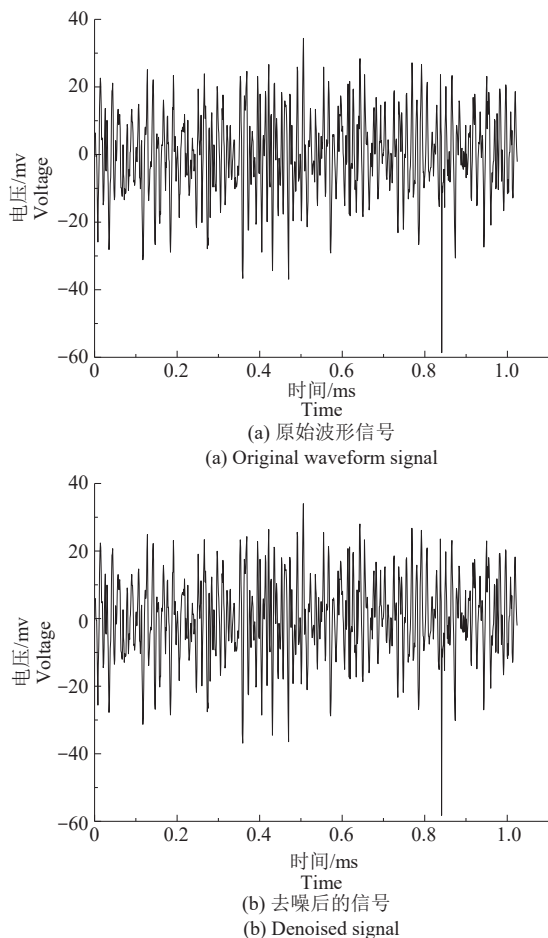


图 5 声发射原始波形信号及去噪结果

Fig. 5 Original AE waveform signals and denoised result

号分解为具有不同频率和振幅的正弦波信号的叠加。FFT 在处理非平稳信号方面具有独特的优势,并显著提高了计算效率,且在岩石声发射信号处理和频域分析方面获得了广泛应用^[26-29]。基于此,本文采用 FFT 对煤样常规压缩声发射信号进行分析,该方法可以将时域表达转换为频域表达,其原理如下:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

式中: $X(\omega)$ 为在频域中表示的原始信号, $x(t)$ 为在时域中表示的原始信号。

图 6 展示了去噪信号通过 FFT 变换后获得的二维频谱图。图 6 中,主频是指二维频谱图中最大幅值所对应的频率^[20]。

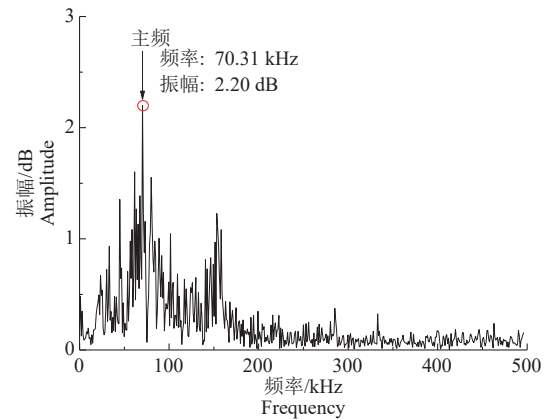


图 6 声发射信号二维频谱图

Fig. 6 Two-dimensional spectrum of AE signals

3.3 主频演化特征

经对声发射原始波形信号进行去噪、提取主频后,获得了煤样常规压缩过程中声发射信号主频的演化特征,如图 7 所示。

由图 7 可知,煤样常规压缩过程中的声发射信号主频分布范围为 30~160 kHz,根据主频的聚集程度可以将其分为 4 个频段,如表 4 所示。

3.4 裂纹尺度与主频对应关系分析

何满潮等^[20]认为,频率成分的复杂性预示着多种破坏模式的发生。由图 7 可知,在单轴、5 和 10 MPa 围压条件下,煤样常规压缩声发射信号不同频段主频出现的时间及分布范围存在明显差异,也即表明煤样在不同的阶段存在不同的破坏模式。在压密阶段和弹性阶段,声发射信号主频存在 2#和 4#两个频段,但主要集中在 2#频段。

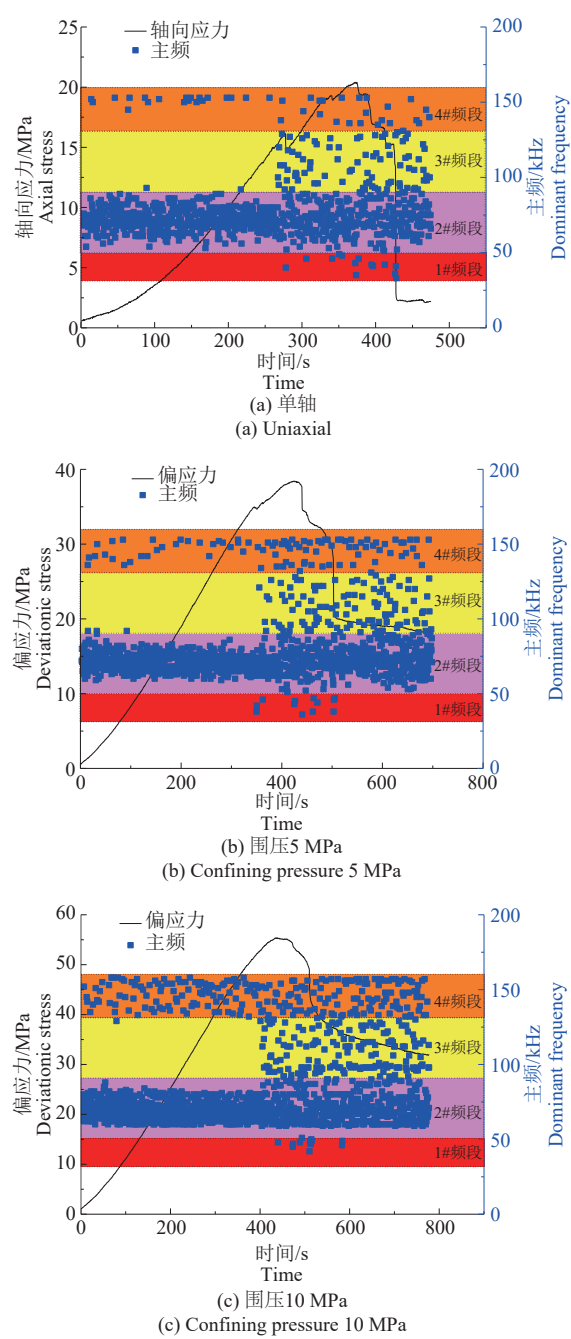


图7 煤样常规压缩声发射信号主频、应力与时间的关系
Fig. 7 Relationship of dominant frequency and stress versus time for AE signals from coal specimens under conventional compression

表4 主频段标号及范围
Table 4 Dominant frequency band labels and ranges

主频段标号 Dominant frequency band label	1#	2#	3#	4#
范围/kHz Range	30~50	50~90	90~130	130~160

由于煤样在压密阶段以微裂隙压密闭合为主,在弹性阶段开始产生少量极小的微裂纹,由此可以推断 2#频段对应微裂隙的压密,4#频段对应小尺度微裂纹的产生。在进入裂纹不稳定扩展阶段后,声发射信号主频主要分布在 2#、3#和 4#三个频段,主频分布范围变宽且离散,但主要集中在 2#频段。在该阶段,轴向应力显著提高,煤样内部微裂纹开始迅速萌生扩展,由此可以推断 3#频段对应中等尺度微裂纹的萌生和小尺度微裂纹的扩展贯通。当煤样发生较大局部破坏或整体破坏时,声发射信号主频出现 1#频段,由此可以推断 1#频段对应大尺度裂纹的形成。在残余强度阶段,1#频段消失表明煤样已经发生整体破坏,而煤样主破裂面两侧摩擦引起的破坏是声发射信号主频还存在 2#、3#和 4#三个频段的主要原因。

由以上分析可知,在煤样常规压缩的不同阶段,均存在 2#和 4#频段,但 2#频段占比最高。2#频段对应于煤样内部的压密闭合,即压缩是造成煤样内部各种尺度裂纹形成和扩展的主要原因。4#频段表明煤样在压缩的各个阶段均有小尺度微裂纹产生,这些微裂纹对煤样破坏起辅助作用。在弹性阶段后,3#频段开始出现并持续至煤样破坏,该频段范围广,占比小于 2#频段但大于 4#频段,该频段对应的中等尺度微裂纹萌生和小尺度微裂纹扩展贯通是煤样破坏的重要原因。1#频段对应大尺度裂纹的形成,只有当煤样内部发生较大局部破坏或整体破坏时才会出现。

4 煤样破坏声发射参数前兆信息

声发射信号是对煤样内部损伤破坏的间接反映,会在煤样发生较大局部破坏或整体破坏时出现突变或异常。所以,声发射信号的突变点或异常点可以作为煤样破坏的前兆信息。对于峰后塑性较强的煤样,其破坏过程是由多个较大局部破坏累加引起的,呈现“阶段性渐进破坏”特征,对其破坏的预测要比对脆性岩石的预测更加困难。为提高预测准确性,首先应考察不同声发射参数在时域和频域内的预测可靠性,然后选择合理的时域和频域参数进行联合预测。

(1)时域预测。如图3和图4所示,当煤样内部发生一次较大局部破坏或整体破坏时,声发射振铃或撞击计数率都会出现突增,所以,可选择

第一次明显的突增点作为煤样破坏的前兆信息。另外,声发射累积振铃或撞击计数曲线具有多个明显拐点,第一个拐点对应的轴向应力较小且基本没有声发射活动,第二个拐点对应的轴向应力较高且声发射活动显著,第三个拐点对应于煤样形成主破裂面,所以,可选择第二个明显的拐点作为煤样破坏的前兆信息。

(2)频域预测。如图 7 所示,3#频段出现表明煤样已经进入了裂纹不稳定扩展阶段,1#频段出现则表明煤样内部发生了较大的局部破坏或整体破坏,所以,这两个频段的出现都可以作为煤样破坏的前兆信息。

(3)时频域联合预测。在综合考虑不同声发射参数发生的时间顺序、连续性和间断性等特点后,选择“声发射累积振铃或撞击计数曲线第二个明显拐点+出现 1#频段”作为煤样破坏的前兆信息。

为对比各参数预测煤样破坏的准确性,引入前兆响应系数 σ 的概念,其计算公式^[30]为:

$$\sigma = \frac{t_b - t_p}{t_b} \quad (2)$$

式中: t_b 为煤样主破裂面形成的时间, t_p 为声发射各参数破坏前兆信息出现的时间。

各声发射参数的前兆响应系数 σ 如表 5 所示。前兆响应系数 σ 越大,表明该参数响应时间

越早。由表 5 可知,在单轴条件下,时域、频域和时频域联合预测的前兆响应系数 σ 最小值分别为 0.347、0.350 和 0.284。在 5 MPa 围压条件下,时域、频域和时频域联合预测的前兆响应系数 σ 最小值分别为 0.215、0.293 和 0.155。在 10 MPa 围压条件下,时域、频域和时频域联合预测的前兆响应系数 σ 最小值分别为 0.144、0.138 和 0.138。以上结果表明,时频域联合预测精度高于单参量的时域和频域预测。另外,随围压的增加,各声发射参数的前兆响应系数 σ 呈减小趋势,表明各声发射参数预测的可靠性随围压的增加而提高。

在单轴、5 和 10 MPa 围压条件下,各声发射参数的前兆响应系数 σ 的极差分别为 0.178、0.149 和 0.049,即随围压的增加,各声发射参数的前兆响应系数 σ 之间的误差越来越小,表明各声发射参数预测结果的趋同性越来越高。另外,在单轴、5 和 10 MPa 围压条件下,按照响应时间排序,发现 1#和 3#频段出现顺序的稳定性较差,所以,单一频域参数不适合作为普适性的预警信息。在综合分析后确定,声发射振铃计数率和撞击计数率可以作为煤样破坏的早期预警信号,累积振铃计数和累积撞击计数可以作为中期预警信号,累积振铃计数+1#频段和累积撞击计数+1#频段可以作为最后的预警信号。

表 5 煤样破坏声发射参数前兆响应系数
Table 5 Precursor response coefficients of AE parameters for failure of coal specimens

围压/MPa Confining pressure	前兆响应系数 σ Precursor response coefficient							
	时域预测 Time domain prediction				频域预测 Frequency domain prediction		时频域联合预测 Time-frequency domain joint prediction	
	振铃计数率 Ring-down count rate	撞击计数率 Hit count rate	累积振铃计数 Cumulative ring-down count	累积撞击计数 Cumulative hit count	1#频段 No. 1 frequency band	3#频段 No. 3 frequency band	累积振铃计数+1#频段 Cumulative ring-down count + No. 1 frequency band	累积撞击计数+1#频段 Cumulative hit count + No. 1 frequency band
0	0.462	0.462	0.423	0.347	0.350	0.372	0.350	0.284
5	0.301	0.215	0.216	0.215	0.304	0.293	0.155	0.155
10	0.144	0.144	0.144	0.144	0.138	0.187	0.138	0.138

5 结论

(1)在单轴和三轴常规压缩条件下,煤样主破裂面产生前的声发射振铃计数和撞击计数发

展过程均可分为孕育期、发展期和活跃期;在主破裂面产生后,常规单轴压缩声发射振铃计数和撞击计数进入沉寂期,常规三轴压缩声发射振铃计数和撞击计数进入平稳期。

(2)当煤样发生较大局部破坏时,声发射振铃计数率和撞击计数率明显增大,累积振铃计数曲线和撞击计数曲线出现拐点,这些信息可以作为煤样破坏的前兆特征。

(3)煤样常规压缩声发射信号主频可分为1#、2#、3#和4#四个频段,其频率范围分别为30~50、50~90、90~130和130~160 kHz。其中,2#频段内的主频占比最高,对应煤样的主要破坏模式,4#、3#和1#频段分别对应小、中等和大尺度微裂纹的产生。

(4)不同声发射参数在预测煤样破坏方面存在差异,时频域联合预测准确性高于单参量的时域和频域预测。在单轴、5和10 MPa围压条件下,1#和3#频段出现的时间顺序稳定性较差,所以,单一频域参数不适合作为普适性的预警信息。对于其他声发射参数,按照响应时间排序,振铃计数率和撞击计数率出现最早,可以作为早期预警信号;累积振铃计数和累积撞击计数次之,可以作为中期预警信号;累积振铃计数+1#频段和累积撞击数+1#频段出现最晚,可以作为最后的预警信号。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 马德鹏.岩石三轴卸围压破坏机理及前兆特征基础研究[D].青岛:山东科技大学,2016.
- [3] 何荣兴,张智源,张星宇,等.诱导下岩体裂隙扩展规律研究存在问题及对策[J].中国矿业,2024,33(10):168-176.
- [4] Meng Q B, Zhang M W, Han L J, et al. Effects of acoustic emission and energy evolution of rock specimens under the uniaxial cyclic loading and unloading compression [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(10): 3873-3886.
- [5] 王俊虎.大尺度煤体原位脉动注水润湿降尘特性研究[J].中国矿业,2025,34(03): 284-295.
- [6] 王创业,常新科,杜晓娅.砂岩单轴压缩破坏全过程声发射主频特征分析[J].地下空间与工程学报,2020,16(02):451-462.
- [7] 王重洋,韦四江,翟黎伟,等.基于石膏质类岩石的煤岩组合试样物理力学性质试验研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2022,41(06):36-44.
- [8] 刘城成,王创业,韩天宇,等.单轴压缩下石灰岩声发射主频特征[J].内蒙古科技大学学报,2023,42(01):76-80.
- [9] 张国桥,孙 鹏,吴祥业,等.基于PFC-GBM非均质模型的砂岩裂纹演化细观规律研究[J].中国矿业,2024,33(09):158-169.
- [10] 王创业,常新科,刘沂琳,等.单轴压缩条件下大理岩破裂过程声发射频谱演化特征实验研究[J].岩土力学,2020,41(增1):51-62.
- [11] 殷志强,韩 宁,齐 潮,等.受加载速率影响花岗岩破坏试验及前兆研究[J].中国矿业,2025,34(03):194-204.
- [12] 杨永杰,王德超,李 博,等.煤岩三轴压缩损伤破坏声发射特征[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(01):127-135.
- [13] 贾 蓬,钱一锦,王 茵,等.基于声发射信息的热损伤花岗岩单轴压缩破裂机制及破裂前兆[J].工程科学学报,2023,45(12):2129-2139.
- [14] 张田录,鞠明和,卢方舟,等.静载煤巷破裂失稳致冲的侧向应力影响规律研究[J].中国矿业,2024,3(08):136-146.
- [15] 张安斌,刘祥鑫,张艳博,等.不同含水率泥质粉砂岩破裂声发射特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(03):591-597.
- [16] 王燕升,邓建辉.基于HHT和AE主频统计的岩石破坏进程分析[J].地下空间与工程学报,2018,14(05):1266-1275.
- [17] 张 凯,张东晓,赵勇强,等.损伤岩石声发射演化特征及响应机制试验研究[J].煤田地质与勘探,2024,52(03):96-106.
- [18] Li X L, Chen S J, Liu S M, et al. AE waveform characteristics of rock mass under uniaxial loading based on Hilbert-Huang transform [J]. Journal of Central South University,2021,28(6):1843-1856.
- [19] 曾 鹏,刘阳军,纪洪广,等.单轴压缩下粗砂岩临界破坏的多频段声发射耦合判据和前兆识别特征[J].岩土工程学报,2017,39(03):509-517.
- [20] 何满潮,赵 菲,张 昱,等.瞬时应变型岩爆模拟试验中花岗岩主频特征演化规律分析[J].岩土力学,2015,36(01):1-8+33.
- [21] 张艳博,梁 鹏,孙 林,等.单轴压缩下饱水花岗岩破裂过程声发射频谱特征试验研究[J].岩土力学,2019,40(07):2497-2506.
- [22] 曾斌鹏,龚 鹍,赵 坤,等.红砂岩加速蠕变阶段声发射主频特征[J].矿业研究与开发,2021,41(06):117-120.
- [23] 常新科,吴顺川,程海勇,等.细砂岩声发射全波形特征及频谱分析[J].长江科学院学报,2022,39(07):

- 118-125.
- [24] 赵 奎,李从明,曾 鹏,等.持续高温作用下花岗岩特征应力及声发射特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(07):1580-1592.
- [25] 朱 凌,崔圣华,裴向军,等.基于声发射频谱的次生胶结岩体加卸载损伤特性[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(07):2763-2779.
- [26] 杨永杰,马德鹏,周 岩.煤岩三轴卸围压破坏声发射本征频谱特征试验研究[J].采矿与安全工程学报,2019,36(05):1002-1008.
- [27] 付 斌,周宗红,王海泉,等.大理岩单轴循环加卸载破坏声发射先兆信息研究[J].煤炭学报,2016,41(08): 1946-1953.
- [28] 胡 英,肖 瑶,刘汉香,等.基于声发射时频特征的岩石破裂前兆识别方法[J].科学技术与工程,2022,22(34): 15259-15268.
- [29] 王创业,常新科,刘沂琳.花岗岩破裂全过程声发射时频域信号特征及前兆识别信息[J].长江科学院学报,2020,37(03):82-89.
- [30] 张艳博,梁 鹏,田宝柱,等.花岗岩灾变声发射信号多参量耦合分析及主破裂前兆特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(11):2248-2258.