

# 岩石动力破裂及其电磁辐射信号特征分析

黄海霖<sup>1</sup>, 李青锋<sup>2\*</sup>, 李丙研<sup>2</sup>, 吴昊<sup>2</sup>, 唐佩<sup>2</sup>

(1. 湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 为提高电磁辐射预测煤岩体动力灾害的准确性, 设计霍普金森杆冲击试验, 监测收集岩石破裂时产生的电磁辐射信号, 并对信号使用小波变换的迭代阈值方法进行去噪, 将处理后的电磁辐射信号结合砂岩承受冲击荷载后的应力特征, 总结出砂岩冲击破坏时电磁辐射的产生规律。结果表明: 根据砂岩遭受冲击后的破坏形态, 可将其分为冲击压缩破坏与冲击拉伸破坏; 产生破裂时电磁辐射有较大增强, 随后随着应力波波谷传递至试件开始降低, 而拉伸破坏的试件在此时发生拉伸破坏也会导致较大的电磁辐射波动, 在应力波震荡过程中裂隙逐渐扩展, 电磁辐射会逐渐增大直至试件完全破坏不再产生电磁辐射; 裂隙扩展阶段电磁辐射强度增大, 岩石破裂后电磁辐射的强度降低, 且具有幅值小、频域窄、主频低等特征。

**关键词:** 煤岩体; 电磁辐射; 霍普金森杆; 动载试验; 小波去噪

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2023)04-0051-09

## Dynamic Rupture of Rocks and Analysis of Their Electromagnetic Radiation Signal Characteristics

HUANG Hailin<sup>1</sup>, LI Qingfeng<sup>2\*</sup>, LI Bingyan<sup>2</sup>, WU Hao<sup>2</sup>, TANG Pei<sup>2</sup>

(1. School of Earth Science and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

(2. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of electromagnetic radiation prediction of dynamic disasters in coal rock mass, the Hopkinson rod impact experiment is designed, the electromagnetic radiation signal generated when the rock is broken is monitored and collected, and the signal is denoised by using the iterative threshold method of wavelet transform, and then the treated electromagnetic radiation signal is combined with the stress characteristics of the sandstone after the impact load, and the electromagnetic radiation generation law is summarized when the sandstone is destroyed by impact. Results show that according to the failure form of sandstone after impact, it can be divided into impact compression failure and impact tensile failure. When the rupture is generated, the electromagnetic radiation will be greatly enhanced, while the stress wave trough is transmitted to the specimen begins to decrease, and the tensile failure of the specimen at this time will also lead to a large fluctuation of electromagnetic radiation. The electromagnetic radiation during the subsequent stress wave oscillation process of the fracture expansion process will gradually increase until the test piece is completely destroyed and cannot produce electromagnetic radiation. The intensity of electromagnetic radiation increases during the fracture expansion stage, and the intensity of electromagnetic radiation decreases after rock rupture, and it has the characteristics of small amplitude, narrow frequency domain and low main frequency.

**Keywords:** coal rock mass; electromagnetic radiation; Hopkinson rod; dynamic load test; wavelet denoiseration

中国工程院战略研究表明, 我国将坚持以煤炭、电力为中心, 油气和新能源全面发展的能源战略, 2050

收稿日期: 2023-03-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274117)

\* 通信作者, E-mail: lqf66@hust.edu.cn

年以前以煤炭为主导的能源结构难以改变<sup>[1]</sup>.然而随着我国煤炭开采的深度与强度不断加强,煤与瓦斯突出、冲击地压及顶板垮落等煤岩动力灾害事故发生的频次和强度随之增加,对矿井安全生产、人员生命和财产安全构成严重威胁<sup>[2]</sup>.因此,研究岩石变形破坏过程产生的电磁辐射信号特征,对于监测煤炭开采过程及预测煤岩动力灾害事故的发生有重要的科学意义和现实意义.

相关研究人员受地震电磁前兆启发,总结岩石动载冲击破裂电磁辐射信号的部分特征,探究电磁辐射在煤岩动力灾害事故中的预防作用,并取得一定的研究成果.赵扬锋等<sup>[3-5]</sup>通过试验,得到完整岩石试样在单轴压缩下产生的电磁辐射只在峰值应力附近出现高幅值波动,砂岩试样的应力-应变曲线出现较长的弹性上升阶段和较短的塑性变形阶段,电磁辐射随应力水平的提高而增大等结论;姚精明等<sup>[6-9]</sup>通过建立模型及试验系统,提高了预测预报冲击地压的准确性;李洋<sup>[10]</sup>在煤岩电磁辐射信号降噪处理上应用自适应非线性滤波的方法,在一定程度上提高了电磁辐射的信噪比.

然而,目前研究从电磁辐射信号处理与分析角度看,采集到的信号干扰较多,去噪的准确度不够高;从电磁辐射信号特征来看,缺乏破裂全过程的详细描述,会影响到最终的预测结果.因此,本文设计霍普金森杆冲击实验,监测收集岩石破裂时产生的电磁辐射信号,并根据前人的研究成果<sup>[11-17]</sup>,在全局阈值的基础上对电磁辐射信号进行 5 层分解,再利用迭代阈值对信号进行去噪处理;然后将处理后的电磁辐射信号结合砂岩承受冲击荷载后的应力特征,总结出砂岩冲击破坏时的电磁辐射产生规律,以期提高电磁辐射在预测煤岩动力灾害方面的准确性.

## 1 动载试验方案及步骤

### 1.1 试验原理及方案

霍普金森杆实验主要用于研究材料在冲击荷载下的应力-应变关系及其破坏机理.根据一维波理论,被测试样的平均应力  $\sigma(t)$ 、试样在时间  $t$  内的应变  $\varepsilon(t)$  为

$$\sigma(t) = \frac{E_E A_E}{2A_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)]; \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{c_E}{I_s} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] dt. \quad (2)$$

式中:  $E_E, A_E, A_s$  分别为弹性杆的弹性模量、横截面积和岩石试件的横截面积;  $c_E$  为弹性杆的纵波波速;  $I_s$  为岩石试件长度;  $\varepsilon_i(t), \varepsilon_R(t), \varepsilon_T(t)$  分别为  $t$  时刻的入射应变、反射应变和透射应变.

本次试验采用动静组合加载系统对 4 组岩石试样进行高应变率动力加载,试验设备和试样安装见图 1.岩石试样为自然状态下的砂岩,将此块砂岩使用切割机加工成直径为 50 mm、长度为 100 mm 的圆柱体,使其处在干燥状态下,并将试样分别编号为 d-1, d-2, d-3, d-4;对各试样在动载压力加载过程中的应变及电磁辐射信号进行监测.

### 1.2 试验步骤

1) 准备岩石试样,轻轻擦拭干净岩石,将岩石夹紧在入射杆和透射杆之间,如图 1b 所示,并在试样下方垫部分泡沫,起到固定岩石的作用.

2) 在入射杆上距试样约 1.0 m 位置粘贴应变片,通过动态应变测试系统采集入射杆的动态应变.

3) 将电磁辐射接收天线对准试样中部,与试样保持 30 mm 的距离放置固定.在放置好后,盖上电磁屏蔽网,以减少外部振动带来的干扰.

4) 将动态应变片通过电桥连接到应变仪,并通过数据线连通示波器,电磁辐射传感器直接通过数据线连通示波器.检查试验系统中各仪器是否正常运行,设定岩石破裂所需的应力.

5) 启动霍普金森杆动载系统,以入射杆的动态应变作为触发源,并设定监测参数,监测岩石破裂过程中的应变及电磁辐射信号.

6) 待冲击岩石后,结束试验,清理岩石破裂的碎屑,整理实验台,按上述步骤进行下一组试验.

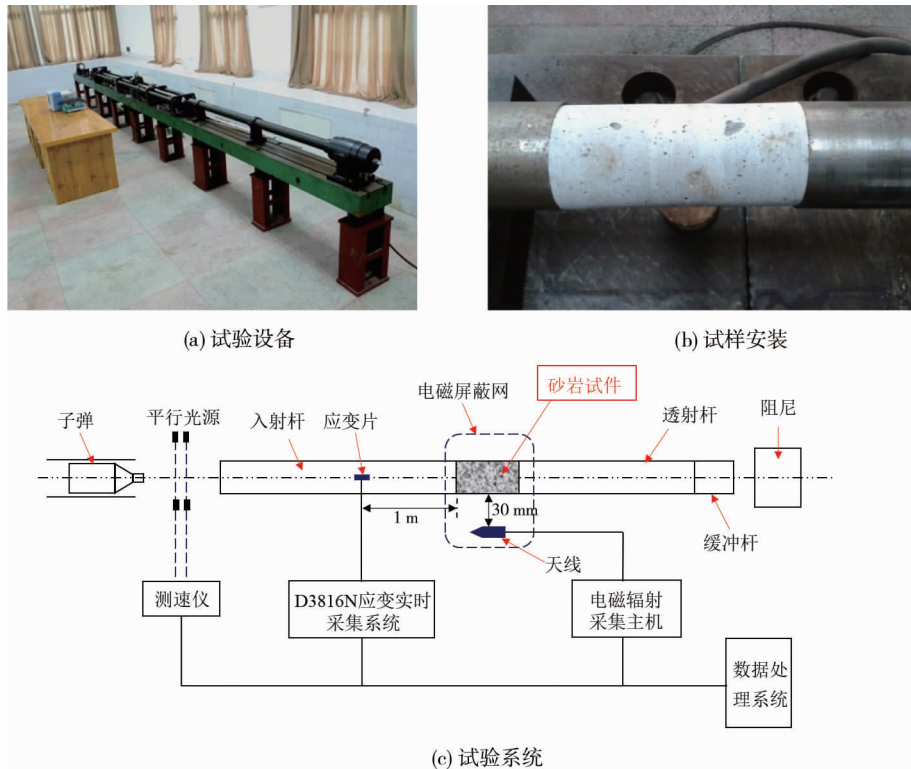


图 1 试验设备与试样安装

### 1.3 岩石破裂情况

各岩石试样经过动载冲击后均破裂,最终的破裂形态及裂纹扩展如表 1 所示.

表 1 岩石试样破裂情况

岩石试样编号	岩石试样破裂形态	岩石试样裂纹扩展	试件破坏特征
d-1			试件经过压缩冲击时发生纵向和横向破裂,表现为拉剪复合破坏
d-2			试件经过拉伸冲击时发生横向破裂
d-3			试件经过拉伸冲击时发生横向破裂
d-4			试件经过压缩冲击时发生纵向和横向破裂,表现为拉剪复合破坏

由表 1 可知:试验过程中,岩石在受到冲击荷载的瞬间发生破裂,且破裂的面并未呈现出规律性,如试样 d-1 和 d-4 分别从横向与纵向发生破裂,而试样 d-2 和 d-3 的破裂则相对单一,只出现横截面上的破裂,故试验收集的各试样之间破裂产生的电磁辐射信号具有随机性,因此应对随机产生的电磁信号进行分析,总结出一般规律.

## 2 电磁辐射信号去噪

该试验在霍普金森杆实验室中进行,冲击波应力大,每组试验时间短,试样在此过程中产生的电磁辐

射信号易被随机噪声所覆盖. 聂百胜等<sup>[18]</sup>把电磁辐射信号采集过程中的干扰源分为采集系统内部噪声和外部噪声两类. 系统内部噪声主要是设备间产生的散粒噪声与热噪声, 这些噪声大多以短尖脉冲的形式出现, 其相位、幅值均有较大的随机性; 系统外部噪声大多以 50 Hz 的工频干扰与谐波为主. 因此, 在分析动载冲击破裂电磁辐射信号之前, 需先对所采集的信号进行去噪处理.

煤岩破裂过程所产生的电磁辐射信号为非线性、非平稳信号, 本文采取改进的小波迭代阈值去噪方法, 在原信号的基础上加入白噪声, 再进行信号分析. 根据电磁辐射信号在小波变换后不同尺度上不同的特点, 利用阈值可以根据小波分解尺度的不同以及系数的变化进行调整, 去除电磁辐射信号中的噪声, 保留有用信号并进行小波重构, 得到去噪信号. 小波阈值去噪过程如图 2 所示.

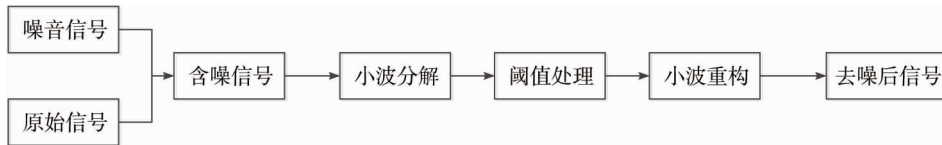


图 2 小波阈值去噪过程

以 d-1 组试验为例, 动载试验采集到的入射杆上的动态应变和电磁辐射如图 3 所示.

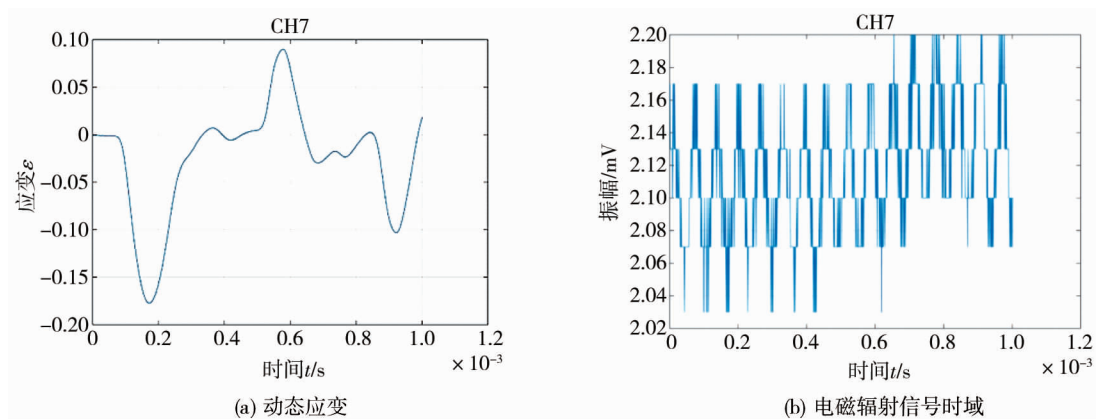


图 3 d-1 组入射杆上的动态应变和电磁辐射

对信号进行傅里叶变换, 横轴为时间, 纵轴为频率, 用颜色深浅表示幅度即得到信号的时频分布, 用能量谱密度描述信号或时间序列的能量如何随频率分布. 原始信号的频谱、能量谱见图 4, 从该信号的频谱图、能量谱可以看出, 原始信号比较嘈杂, 真正的电磁辐射信号几乎被掩盖.

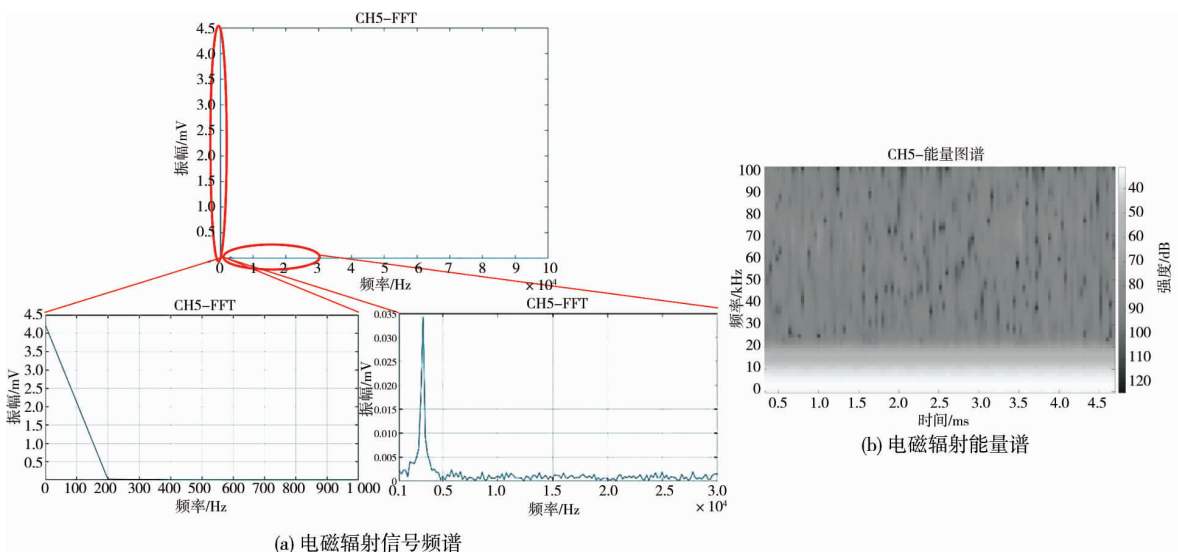


图 4 d-1 组电磁辐射信号及其频谱、能量谱

利用 MATLAB 中的 awgn 函数将白色高斯噪声添加到信号中,结果如图 5 所示.接下来采用 sym8 作为小波基函数对信号进行 5 层分解,利用迭代阈值分别对信号进行去噪处理后得到的电磁辐射信号波形.

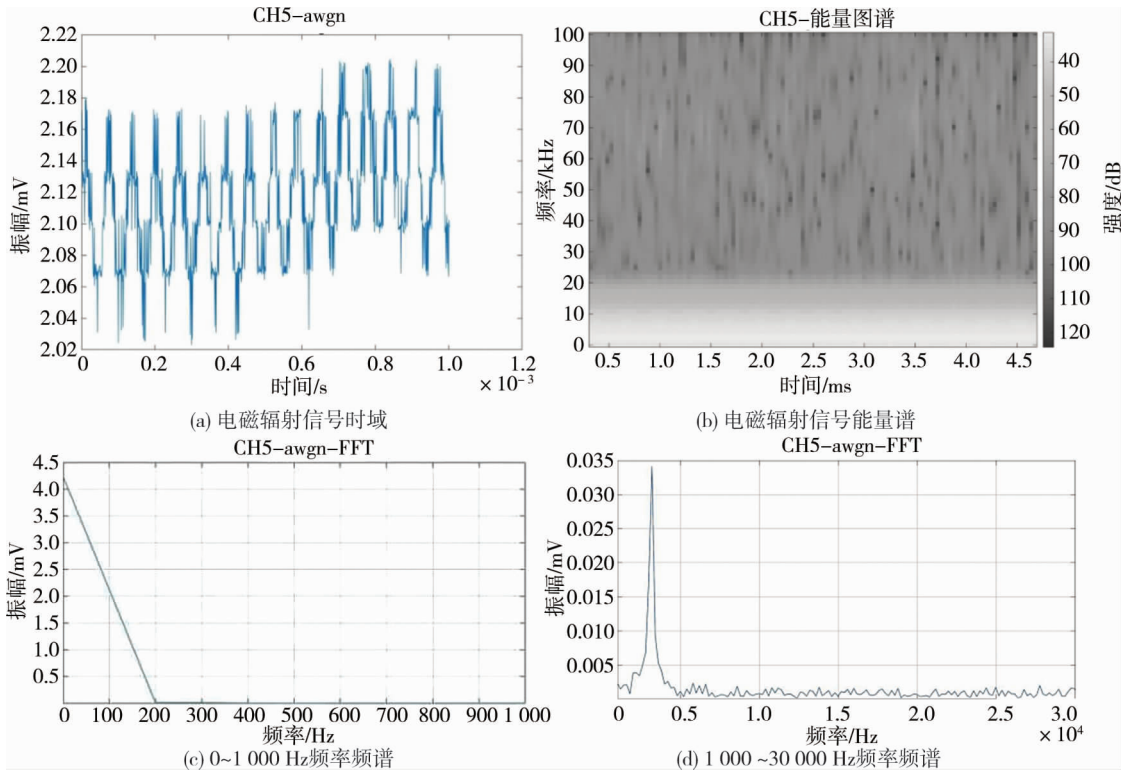


图 5 d-1 组加噪后电磁辐射信号及其频谱、能量谱

对信号进行小波阈值去噪之后,得到信号的时域、频域及能量谱如图 6 所示.观察图 5b 和图 6b,可以看到去噪前的信号能量图谱中能量分布较为分散,除了在 0~20 kHz 频段之外,其余频段依然有许多噪音的能量密度分布;而分解去噪的电磁辐射信号能量密度明显集中在 0~20 kHz 频段内,去噪过滤掉了大部分的噪音.

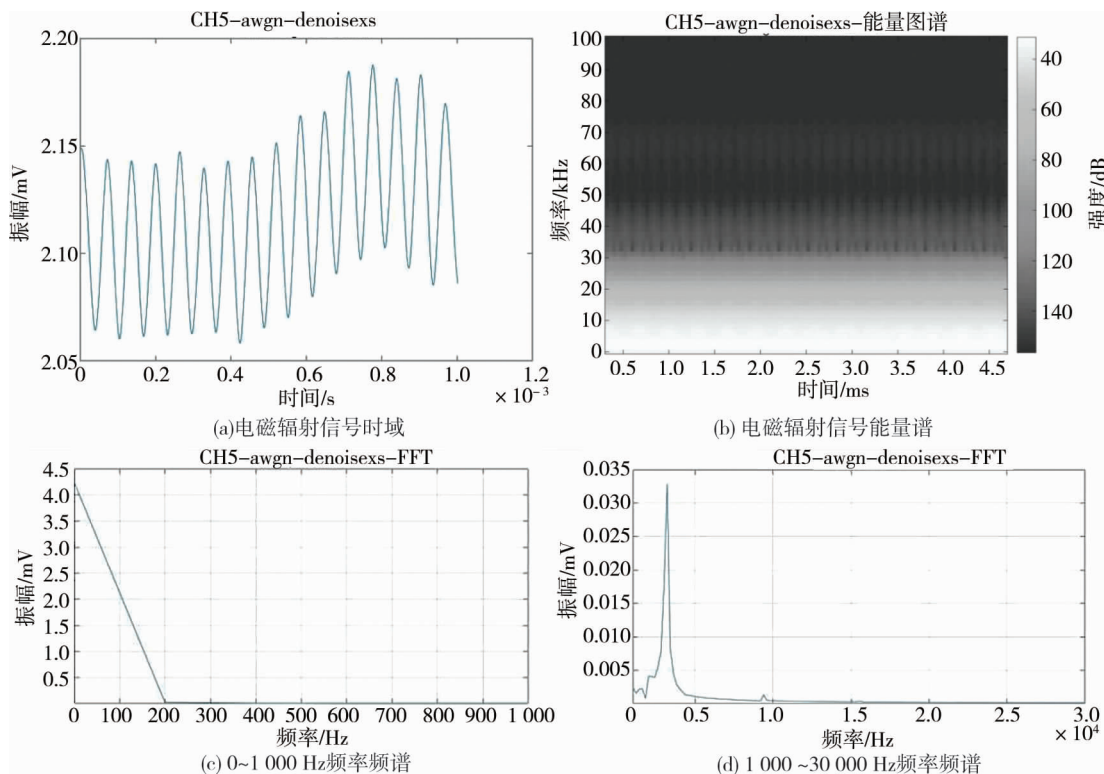


图 6 d-1 组信号分解去噪后的能量谱与频谱

### 3 砂岩动载冲击破裂电磁辐射信号分析

利用上述去噪方法,对 4 组煤岩动载冲击破裂试验所产生的信号进行去噪处理,得到各组试验去噪后的电磁辐射信号,并通过傅里叶变换得到其频谱图,分析其应变、电磁辐射及裂隙变化情况,结果如图 7~图 10 所示。

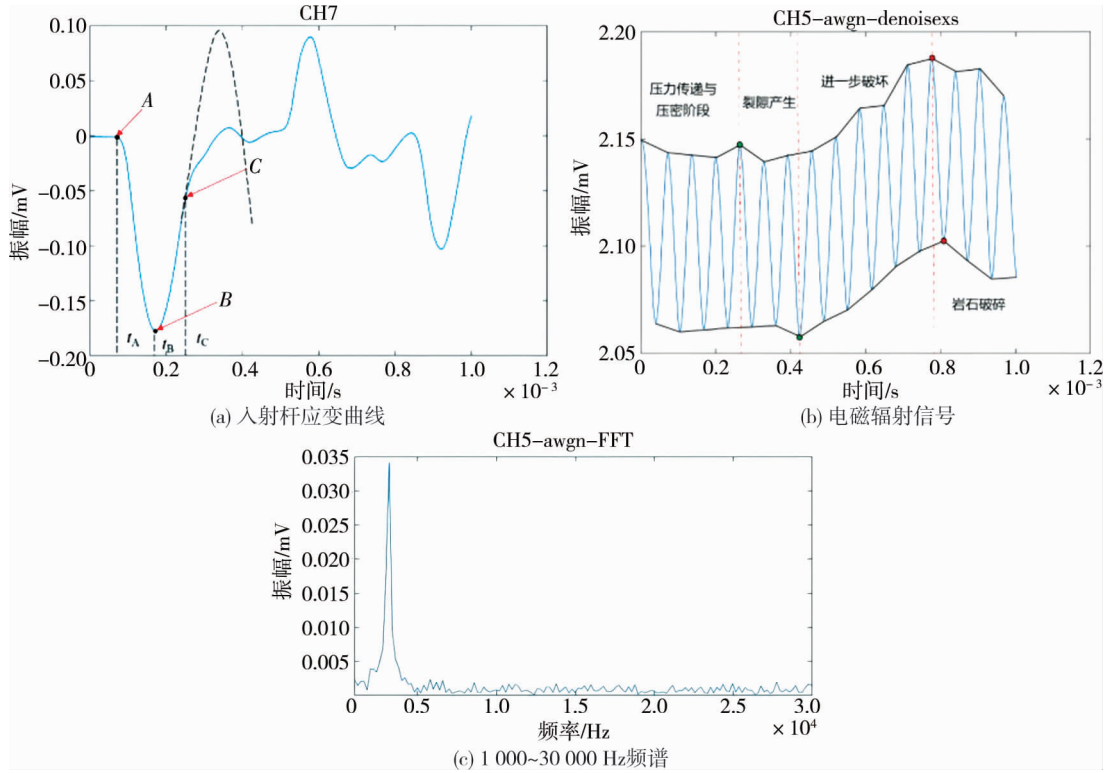


图 7 d-1 组入射杆应变曲线及电磁辐射去噪后信号变化

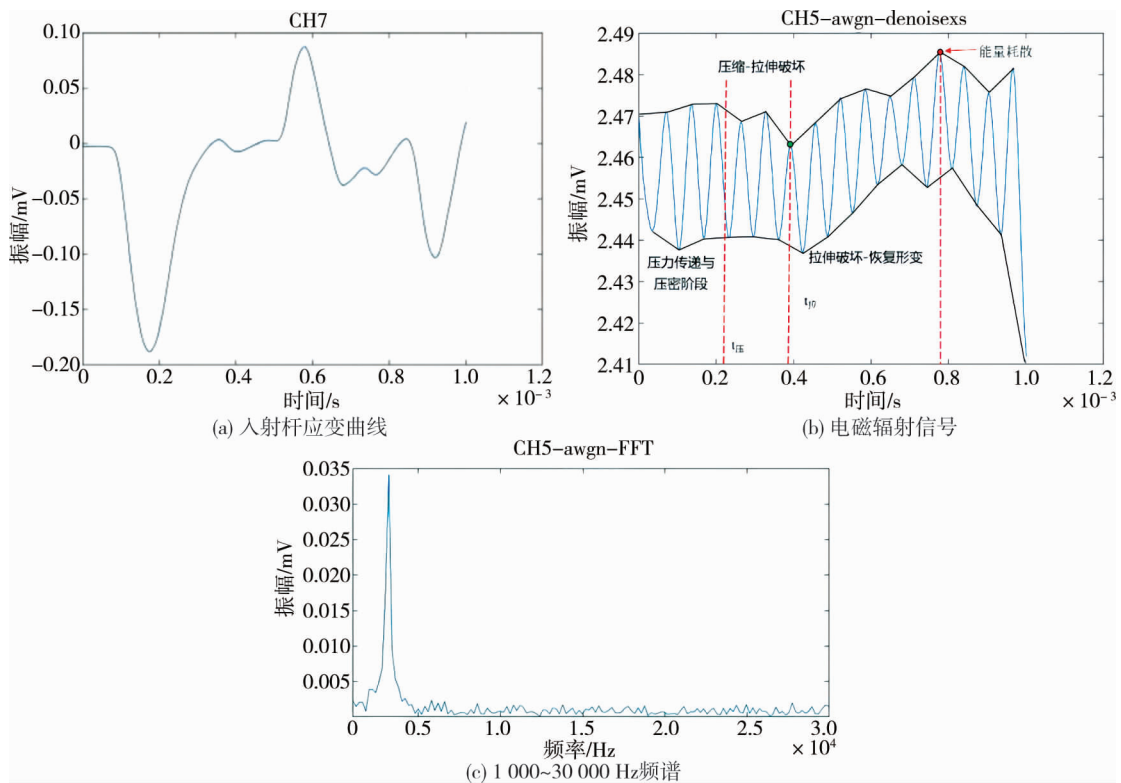


图 8 d-2 组入射杆应变曲线及电磁辐射去噪后信号变化

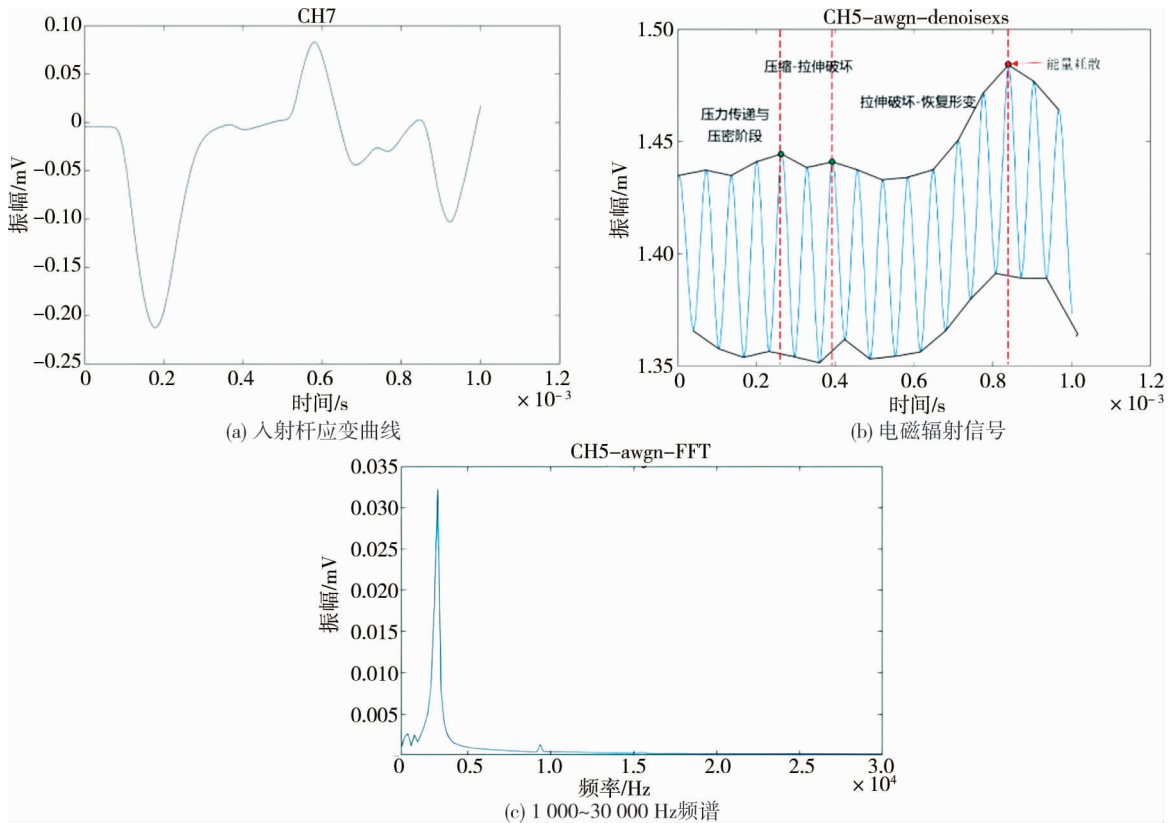


图 9 d-3 组入射杆应变曲线及电磁辐射去噪后信号变化

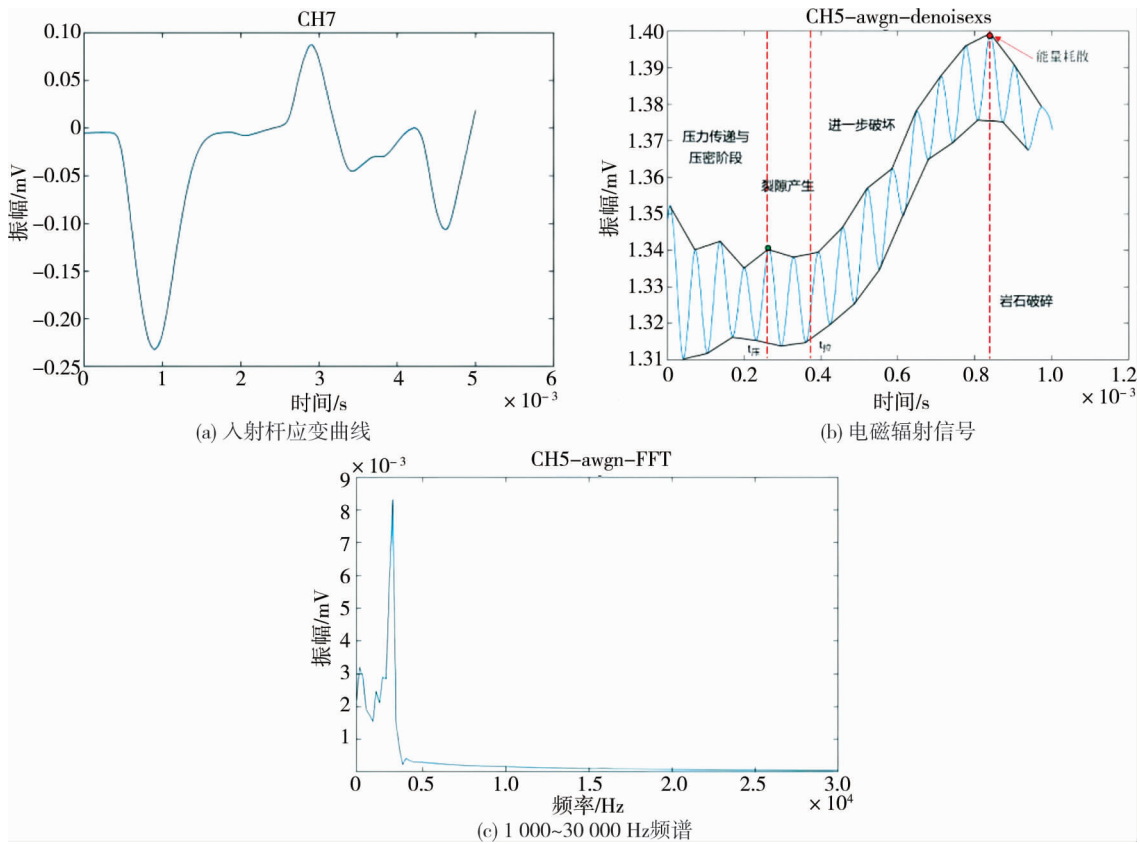


图 10 d-4 组入射杆应变曲线及电磁辐射去噪后信号变化

图 7a~图 10a 是应变片所采集到的应力波在入射杆处的传播过程;图 7b~图 10b 为电磁辐射信号图,图上标注异常事件,图中圆点表示有明显电磁辐射信号产生;图 7c~图 10c 为 1 000~30 000 Hz 电磁辐射

频谱图。

根据应变和电磁辐射信号波动情况,并结合岩石动载冲击破裂机理,可以大致将 d-1 和 d-4 试样冲击压缩破坏形成信号的过程归为一类,这一过程有 4 个阶段:

1) 第一阶段为冲击压力传递与裂隙压密阶段.采集的动态应变片粘贴在入射杆上距试样 0.44 m 处,因电磁辐射数据采集由动态应变触发,此时试件从原始状态接收到应力波,材料压缩,材料内部微裂纹放电并伴随压缩效应产生.试样处于加载初期,由于砂岩试样内部存在裂隙等微观结构,砂岩试样开始加载后其内部微观结构逐渐被压密,应力应变曲线呈上“凹”形。

2) 第二阶段为裂纹产生阶段.在经历压密阶段后,试样中的微观结构进一步压密.试件在承受最大冲击荷载后,裂纹开始萌生。

3) 第三阶段为裂隙进一步破坏阶段.裂纹进一步发育扩展,破裂面两侧岩石的相互摩擦以及应力波在破碎石块中的不断震荡,形成压电效应,使得岩石电磁辐射强度不断增强。

4) 第四阶段为破裂爆发后结束阶段.随着应力波能量的耗散,岩石完全碎裂成大小不一的碎片,电磁辐射强度达到最大后,逐步降低。

d-2 和 d-3 试样冲击拉伸破坏形成的信号也可以分为 4 个阶段:

1) 第一阶段为冲击压力传递与裂隙压密阶段.此时试件产生的电磁辐射主要来源于试件压缩时微裂隙尖端破裂放电以及压电效应产生的电荷运动。

2) 第二阶段为压缩-拉伸破坏阶段.此阶段中试件经历了由压缩到拉伸的阶段,由于压电效应的存在,试件从压缩状态恢复形变时,试件表面电荷消失,电磁辐射强度降低,直至试件拉伸至最大程度并产生拉伸破坏.应力-应变曲线呈正比例关系,试样变形主要为弹性变形。

3) 第三阶段为拉伸-恢复形变阶段.破裂时产生的新表面之间聚集着相反的电荷,形成类似电容充电的现象,电磁辐射信号强度增加.由于这种放电不是瞬时的,所以电磁辐射信号强度表现为逐渐增大而不是突然增大.此后岩石材料依然会在应力波来回震荡的过程中产生摩擦与压缩,同样有电磁辐射产生.另外,断裂的试件快速恢复形变时也会有压电效应的产生。

4) 第四阶段应力波能量完全耗散无法产生电磁脉冲.本阶段裂纹迅速发展,短时间内裂纹迅速贯通整个试样,试样强度骤降发生整体破坏,应力-应变曲线呈现急剧下降。

观察图 7~图 10 可知:d-1 组信号的整体波形及频谱与 d-4 组相似,不过 d-4 组岩石动载冲击破裂过程的电磁辐射信号的幅值比 d-1, d-2 组低 1 mV 左右,与 d-3 组试验相似;d-2 组信号与 d-3 组信号相似,岩石动载冲击破裂过程的电磁辐射信号不呈单调趋势,裂隙扩展阶段的电磁辐射强度增大,岩石破裂后电磁辐射的强度降低,且具有幅值小、频域窄、主频低等特征;不过 d-3 组岩石动载冲击破裂过程的电磁辐射信号幅值比 d-1, d-2 组低 1 mV 左右,但从信号的整体波形及频谱来看,依旧与 d-1, d-2 组试验破裂相似。

以图 7 为例,图 7a 中  $t_A$  为初始应力波刚传递至入射杆观测点的时刻, $t_B$  为应力波第一个波峰传递至入射杆观测点的时刻,此时入射杆观测点处于最大压缩状态.应力波传递至试件与入射杆接触界面时会造成反射.由于入射杆传递一次完整的应力波观测点处所测得的应变曲线应该是个完整的三角函数波形,因此可以将测得的应变曲线在与正弦函数图像开始分离处(即点 C 处)视为入射杆观测点同时接收到了反射波,此处时刻为  $t_C$ .因此,应力波传递至试件的时刻  $t_1$  可以通过计算得出:

$$t_1 = \frac{t_A + t_C}{2}. \quad (3)$$

因此,可求得应力波传递至试件的时刻  $t_1$  为 0.16 ms。

同时,可也求得应力波第一个波峰传递至试件的时刻  $t_{\text{压}}$ :

$$t_{\text{压}} = t_1 + (t_B - t_A). \quad (4)$$

计算得出  $t_{\text{压}} = 0.217$  ms,此时试件受应力波影响压缩量达到冲击荷载峰值。

冲击压力传递阶段主要是压力的传递过程,该过程中未发现明显的电磁辐射信号.随着压力传递到达



岩石试样的自由面,试样开始破裂,裂隙不断扩展,并逐渐汇聚成较大的裂隙.在裂隙扩展阶段,开始出现电磁辐射异常信号,分析发现这些电磁辐射信号幅值普遍较低,最大振幅为 2.186 mV,随后冲击应力下降,电磁辐射信号开始回降,冲击破裂结束.分析裂隙长度与岩石试样裂隙扩展方向,绘制 d-1 组裂隙长度与试样裂隙方向长度比值的曲线图(见图 11).

由图 11 可知,岩石动载冲击破裂过程的电磁辐射信号并不呈单调趋势,裂隙扩展阶段的电磁辐射强度增大,岩石破裂后电磁辐射的强度降低,且具有幅值小、频域窄、主频低等特征,能较好解释现场电磁辐射结果.

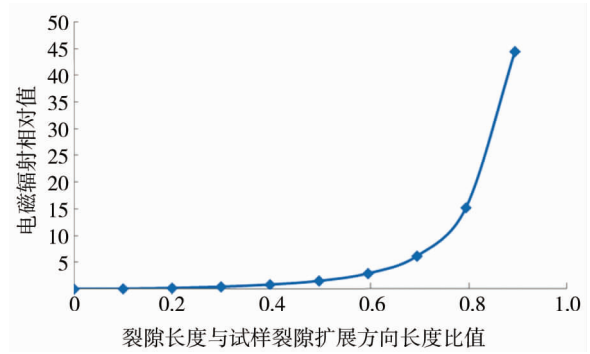


图 11 d-1 组裂隙长度与试样裂隙扩展方向长度比值的曲线

## 4 结论

1) 砂岩遭受冲击后的破坏形态可将其分为冲击压缩破坏与冲击拉伸破坏,冲击压缩破坏的宏观过程:压力传递与压密阶段→裂隙产生阶段→进一步破坏阶段→岩石破碎阶段;冲击拉伸破坏宏观过程:压力传递与压密阶段→压缩-拉伸破坏阶段→拉伸-恢复形变阶段→岩石破碎阶段.

2) 砂岩电磁辐射信号在破裂产生时会有较大程度的增强,而后随着岩石破裂程度的增强,电磁辐射会逐渐增大直至试件完全破坏无法产生电磁辐射,岩石破裂后电磁辐射的强度降低,电磁辐射信号整体呈现先增强后降低的趋势,且具有幅值小、频域窄、主频低等特征.

## 参考文献:

- [1] 袁亮.开展基于人工智能的煤炭精准开采研究,为深地开发提供科技支撑[J].科技导报,2017,35(14):1.
- [2] 乔朕,高建宁.煤岩破裂电磁辐射预测技术研究进展[J].煤矿安全,2020,51(6):196-201.
- [3] 赵扬锋,荆刚,程传杰,等.含裂隙砂岩破裂特征及微震和电荷感应信号规律试验研究[J].振动与冲击,2020,39(23):211-219.
- [4] 解北京,王新艳,吕平洋.层理煤岩 SHPB 冲击破坏动态力学特性实验[J].振动与冲击,2017,36(21):117-124.
- [5] 万国香.应力波作用下岩石电磁辐射与声发射特性研究[D].长沙:中南大学,2008.
- [6] 姚精明,闫永业,税国洪,等.煤岩体破裂电磁辐射分形特征研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊2):4102-4107.
- [7] 刘成禹,林炜,张向向,等.基于电磁辐射的隧道变形多参数模型及其应用[J].工程科学与技术,2023,55(5):118-128.
- [8] 李艳奎.煤岩体破裂过程多参量精准化观测实验及应用研究[D].太原:太原理工大学,2019.
- [9] 李朋园.煤岩破裂过程中多参量前兆特征分析[D].唐山:华北理工大学,2018.
- [10] 李洋.基于电磁辐射的煤岩破裂前兆特征识别的研究[D].唐山:华北理工大学,2018.
- [11] 梁喆,彭苏萍,郑晶.一种微地震采集装置自适应增益算法[J].中国矿业大学学报,2013,42(4):580-585.
- [12] 董林鹭,蒋若辰,徐奴文,等.基于 LMD-SVD 的微震信号降噪方法研究[J].工程科学与技术,2019,51(5):126-136.
- [13] 官月,贾瑞生,卢新明,等.利用经验模态分解及小波变换压制微震信号中的随机噪声[J].煤炭学报,2018,43(11):3247-3256.
- [14] 彭平安,李李管,裴安磊.微震信号无参数自动去噪 PD 算法实现及应用[J].岩石力学与工程学报,2019,38(增刊1):3061-3069.
- [15] 张雪娟.岩石受载实验中电磁辐射信号特征分析及与声发射的相关性研究[D].北京:中国地震局地球物理研究所,2018.
- [16] 刘彪,袁文海,徐浩,等.基于改进小波包阈值的 GIS 局部放电信号降噪方法研究[J].计算技术与自动化,2022,41(3):128-132.
- [17] 袁晓涛.基于小波变换的测井曲线去噪分析与研究[J].化工设计通讯,2022,48(8):36-38.
- [18] 聂百胜,何学秋,何俊,等.电磁辐射信号的小波变换去噪研究[J].太原理工大学学报,2006(5):557-560.