

DOI: 10.11779/CJGE201709014

动载作用下煤体损伤特性的电磁显现特征

王金贵¹, 张 苏^{*1}, 解北京²

(1. 福州大学环境与资源学院, 福建 福州 350116; 2. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘 要: 电磁是煤岩动力灾害预测的重要手段, 掌握电磁信号特征与煤体损伤程度间的关系是灾害预测的关键。通过原煤 SHPB 试验及瞬变电磁监测, 分析煤体冲击破裂过程中的电磁信号(0~3 kHz 频段)特征, 从破裂耗能及破碎程度两方面分析试件损伤特性, 并探求电磁信号特征(幅值、能量)与煤体破裂损伤特性间的关系, 研究发现: ①分形维数与最终破裂程度规律相似, 利用分形维数来定量评价煤体破裂程度是可行的; ②煤岩冲击破裂电磁信号呈瞬时脉冲状, 持续时间仅为微秒级, 信号幅值及能量总体随着破碎程度的增大而增大; ③煤岩冲击破裂电磁信号的幅值及能量与其损伤程度(分形维数)符合较好的线性关系, 利用电磁信号特征监测煤岩损伤程度是可行的; ④受煤岩材料固有缺陷的不确定性及其共振破坏现象的影响, 煤岩的损伤程度与冲击耗散能间的相关性较弱。研究成果对于利用电磁信号特征评价煤体损伤程度进而预测动力灾害的发生具有重要意义。

关键词: 煤岩; 动载冲击; 损伤特性; 电磁

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)09-1662-08

作者简介: 王金贵(1987-), 男, 讲师, 博士, 主要从事煤岩动力灾害防治等方面的教学和科研。E-mail: wpjngui@126.com。

Electromagnetic appearing characteristics of damage properties of coal under impact loading

WANG Jin-gui¹, ZHANG Su¹, XIE Bei-jing²

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2. Faculty of Resources and Safety Engineering,

China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The electromagnetic technology is an important means for predicting coal or rock dynamic disasters. The relationship between characteristic of electromagnetic signals and degree of damage is the premise of accurate prediction. Through coal SHPB experiments and transient electromagnetic monitoring, the characteristics of electromagnetic signals (0~3 kHz) of coal are analyzed in the process of rupture. The damage properties are analyzed from the degree of crushing and rupture energy. Then the relationship between the characteristics of electromagnetic signals (amplitude, energy) and the properties of coal damage is studied. The results show that the laws of fractal dimension and eventual rupture degree are similar. The fractal dimension can be used to quantitatively evaluate the extent of fracture specimens. The electromagnetic signals have transient pulse characteristics, and last only a few microseconds. The amplitude and energy of signals increase with the fragmentation degree. They exhibit a good linear relationship. The characteristics of electromagnetic signals can be used to monitor the damage degree of coal. Owing to the presence of the defects of inherent uncertainty coal materials and the resonance damage phenomenon, the correlation between damage degree and rupture energy is weak. The research results are important to the evaluation of the damage degree and to the prediction of dynamic disasters of coal or rock by use of the characteristics of electromagnetic signals.

Key words: coal; impact loading; damage property; electromagnetic

0 引 言

历经长期、高强度的开采, 中国的大部分矿井进入大采深时期。随之而来的是地应力和煤层瓦斯压力明显增大, 地质条件也日益复杂, 煤岩动力灾害日益严重^[1-2]。动力灾害实质是煤岩体原有应力平衡状态被

打破而破坏失稳所致, 煤岩破裂过程往往伴随着电磁

基金项目: 国家自然科学基金项目(51604083); 福州大学贵重仪器设备开放测试基金项目(2017T018)

收稿日期: 2016-07-11

*通讯作者(E-mail: zhangsu88@126.com)

的异常波动^[3-5]。任学坤等^[6]通过对预制裂纹岩板进行单轴压缩试验,发现预制裂纹岩板电位和电磁辐射随载荷的变化而变化。孔彪等^[7]研究高温处理后的砂岩变形破裂过程中的电磁信号特征,发现电磁信号与应力值正相关,且经过不同温度处理的试件伴随的电磁信号存在差异。姚精明等^[8]通过煤岩单轴压缩试验,研究了该过程中电磁信号的多重分形谱宽度 ΔD_q 与试样所受的应力水平密切相关。宋大钊等^[9]研究了煤岩受载破裂过程中电磁信号频谱的变化特征,发现随着所受应力的增加,电磁信号主频从0~60 kHz下降至0~20 kHz。综上所述,煤岩破裂电磁信号特征与变形破裂过程密切相关。

基于此,电磁已成为煤岩动力灾害预测的重要手段,在灾害过程中煤体是抵抗灾害启动、发展的重要因素,因此获取电磁信号特征与煤体损伤程度间的关系是灾害预测的关键。研究表明,煤岩材料在不同破裂速率下的特征差异很大,考虑煤岩动力灾害往往表现为煤体应变率 $1\sim 10^2\text{ s}^{-1}$ 的强烈冲击破坏,当前主要利用霍普金森冲击压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)来模拟研究灾害时煤体的破裂特性^[10-12],同时利用瞬变磁振系统监测该过程中的电磁信号。梳理发现,以往研究主要集中于煤体冲击破裂电磁信号特征(幅值、频谱及能量等)与冲击速度、能量间的关系^[13],已研究表明煤体破裂电磁信号特征与煤体所受冲击载荷有关,冲击速度越快,信号幅值越大,主频越高,信号能量越强。然而研究亦发现,SHPB冲击能量与材料损伤能量存在较大差异^[14],即SHPB冲击杆的入射能量无法准确代表煤体损伤程度。以往侧重于电磁信号特征与冲击能量间的关系研究并不能很好地建立煤体冲击破裂电磁信号与其损伤特性间的关系,而掌握电磁信号特征与煤体损伤特性间的关系,对于利用电磁信号特征评价煤体损伤程度进而预测动力灾害的发生具有重要意义。

综上所述,有必要开展动载破裂电磁信号与煤体破坏能耗密度及碎粒分形维数等损伤特性间的关系研究。本文通过原煤SHPB试验及瞬变电磁监测,分析煤体冲击破裂过程中的低频电磁信号(0~3 kHz频段)特征,并从煤岩冲击破裂的耗能及最终破碎程度分析其损伤特性,建立电磁信号特征(幅值、能量)与煤体破裂损伤特性(能耗密度、分形维数)间的关系,探寻利用电磁信号预测煤体损伤程度可行性。

1 试验简介

1.1 试验系统及装置

本试验在中国矿业大学(北京)岩石动力学国家

重点实验室完成,试验系统包括SHPB冲击装置和ZDKT-1型瞬变磁振测试仪2个独立单元,系统示意图见图1。

SHPB装置的杆件直径均为50 mm,其中子弹长度为400 mm,输入杆和输出杆长度为2000 mm,弹性模量均为200 GPa。该系统利用高压气体驱动子弹以一定速度撞击输入杆,在输入杆内产生一个应力脉冲,称为入射波。入射波沿着输入杆向试件传播,经过输入杆应变计被记录下来。但入射波传播到试样位置时,推动试样开始变形,并在输入杆中产生一个反向应力脉冲,称为反射波,到达输入杆应变计时也被记录下来。另一部分脉冲透过试样进入输出杆向前传播,称为透射波,经过输出杆应变计时被记录下来。利用试验记录下的3个典型脉冲信号(图2),可以计算材料的动态应力、应变参数。

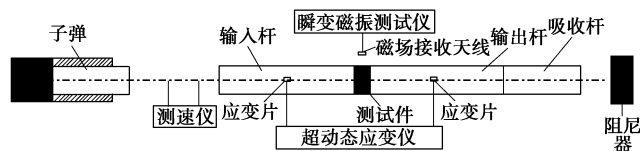


图1 试验装置系统示意图

Fig. 1 Sketch diagram of experimental apparatus system

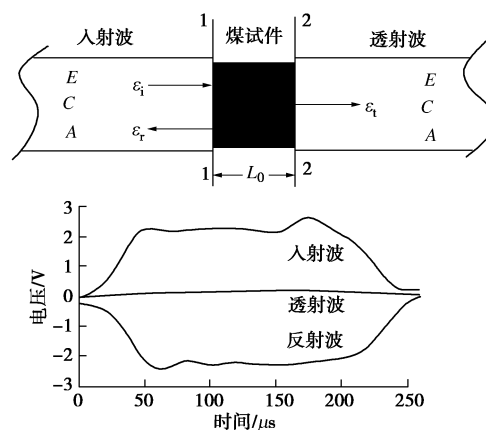


图2 典型的波形曲线

Fig. 2 Typical waveforms

ZDKT-1型瞬变磁振测试仪主要由磁场接收器和瞬变磁振测试仪(采集频率3 kHz)组成。电磁辐射信号幅值及能量均随传播距离的增大而衰减^[13],为了控制尽量小的信号衰减,理论上磁场接收器离试件愈近愈好;但以往煤岩SHPB冲击试验发现,试件经冲击后会出现一定程度的胀裂崩出。为了防止胀裂试件撞击磁场接收器而引发干扰信号,又保证将信号能量衰减控制在较低水平,综合考虑并经大量实践后,试验中将磁场接收天线水平对准试件中部,保持距离在4 cm,见图3。



图3 煤岩瞬变磁振接收天线

Fig. 3 Receiving antenna of coal-rock transient magnetic resonance

1.2 试件的制备

试验测试煤样(无烟煤)采自四川芙蓉矿。为满足试件均匀性假设、减小惯性和界面摩擦效应^[15]的影响,将试件设计为长径均为 50 mm 的圆柱体,打磨试件使两端面的不平行度小于 0.02 mm,并用凡士林润滑试件及各杆件的各接触界面。共制作 6 个原煤试件,分成 3 组实施不同速度级别(4, 6, 9 m/s)的冲击破坏,破坏程度见图 4,从图 4 中可看出,原煤试件经冲击后成爆裂式破碎,破碎程度较高。

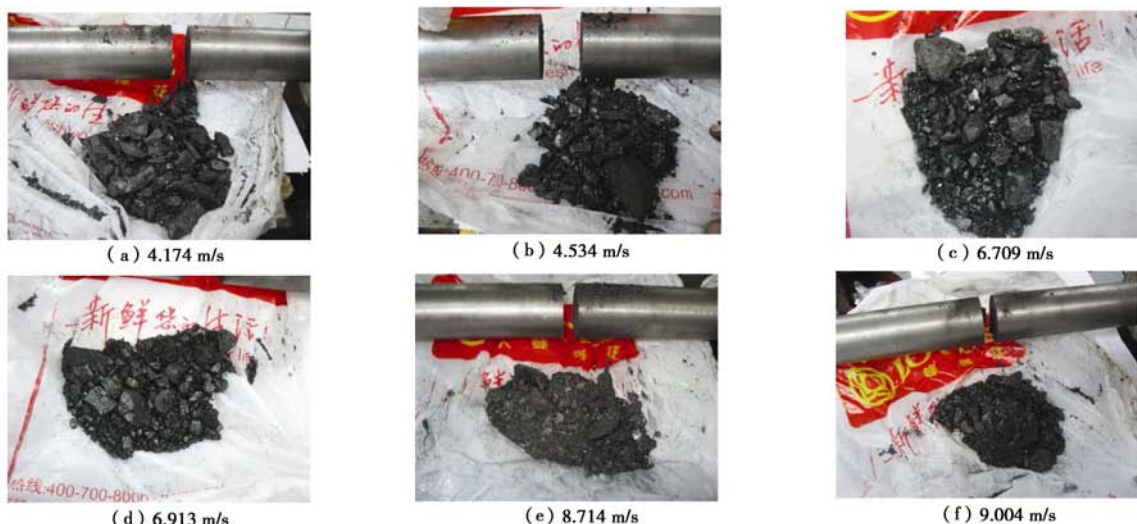


图4 试件破碎效果图

Fig. 4 Broken images of specimens

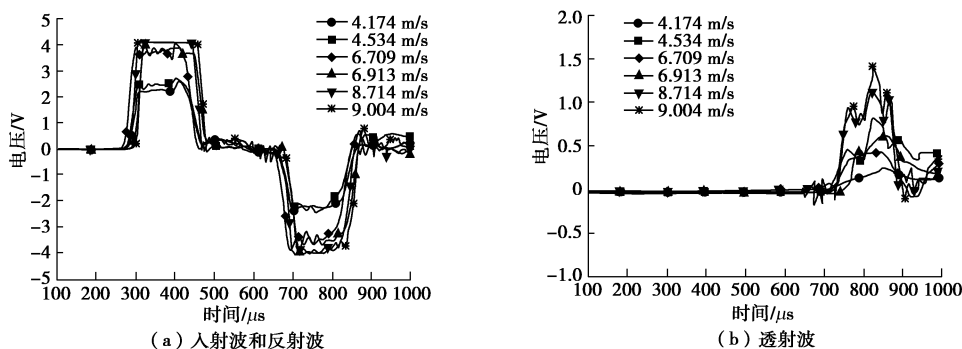


图5 应力波形图

Fig. 5 Stress waveforms

2 煤岩冲击损伤特性

煤岩动力灾害实质上是煤岩体原有应力平衡状态被打破而破坏失稳所致,该过程中煤体是抵抗灾害启动、发展的重要因素,掌握煤体受冲击过程中的损伤失稳特征对理清灾害机理及其预测至关重要。本文从损伤耗能损伤所耗能量和损伤程度两个角度来描述煤岩的冲击损伤特性。

2.1 煤岩冲击破碎耗散特征

图 5 是 6 组 SHPB 试验过程中的入射波、反射波和透射波波形图。

根据能量守恒分析认为,试件破裂所耗散的能量为入射波能量减去反射波和透射波能量。在霍普金森压杆技术中,各应力波 $\sigma(t)$ 所携带的能量可通过

$$W = \frac{A_0}{\rho_0 c_0} \int_0^t \sigma^2(t) dt \quad \text{计算, 试件破裂所耗散的能量为}$$

$$W_d = W_i - (W_r + W_t) \quad (1)$$

表 1 各试件冲击能量
Table 1 Impact energies of specimens

试件 编号	试件尺寸 /(mm×mm)	冲击速度 /(m·s ⁻¹)	应变率 /s ⁻¹	入射波 /J	反射能 /J	透射能 /J	耗散能 /J	能耗密度 /(J·cm ⁻³)
A1	Φ 50×50	4.174	75.20	64.94	61.45	0.57	2.92	0.03
A2	Φ 50×50	4.534	74.56	79.33	60.06	4.88	14.39	0.15
A3	Φ 50×50	6.709	115.13	175.91	150.18	2.18	23.55	0.24
A4	Φ 50×50	6.913	115.46	184.78	149.36	3.03	32.39	0.33
A5	Φ 50×50	8.714	131.02	223.70	185.65	9.61	28.44	0.29
A6	Φ 50×50	9.004	138.84	224.60	192.84	12.49	19.27	0.20

式中 A_0 为杆件横截面积; ρ_0 为杆件密度; c_0 为杆件中应力波传播速度; W_d 为试件破裂的耗散能量; W_i , W_r , W 分别是入射波能、反射波能和透射波能。为消除试件尺寸对耗散能的影响, 进一步计算试件破裂的能耗密度, 即单位体积煤冲击破裂所耗散的能量。

结合各应力波形数据及前述公式, 计算得到各组试件冲击破碎过程中的能耗见表 1。观察发现, 入射波能、反射波能和透射波能均随子弹冲击速度同步增大; 但耗散能和能耗密度却不同, 试件破裂耗散能和能耗密度前期 (4, 6 m/s 速度级别) 随入射能的增大而增大, 随入射能进一步增大 (9 m/s 速度级别), 耗散能及能耗密度并不随之上升, 反而在波动变化中有所下降。分析认为主要原因是: ①煤岩体具有丰富层理、节理和孔隙, 导致试件离散性较大, 虽然煤样制备过程中充分考虑了这一特性, 取同一地点大块煤岩、同一冲取方向制备煤样, 但受制其自身不均匀性, 导致应力波在试件中传播具有一定的不确定性; ②冲击应力波到达试件后, 以一定振动频率在试件中传播, 当该应力波频率与煤试件自振频率相近时, 将产生共振现象, 导致试件出现事半功倍的剧烈破坏。因各试件内部孔隙、裂隙和层理存在差异, 导致其松散程度不同, 进而影响其因摩擦作用吸收能量的能力不同, 即因阻尼不同导致自振频率不同, 因共振现象的差异, 导致冲击耗散能及能耗密度存在差异。

进一步分析试件耗散能的组成认为, 耗散能 W_d 主要耗散于破碎耗能 W_1 、弹射动能 W_2 和其它耗能 W_3 3 大部分。其中, W_1 主要消耗在原煤试件中原有裂隙扩展形成新断裂表面, 及在碎块中产生微裂纹等; W_2 主要是试件冲击破坏后飞溅碎块所具有的动能; W_3 主要是指破碎过程中伴随的声能、热能及电磁辐射能等耗散能量。洪亮^[14]通过岩石 SHPB 试验分析发现, W_1 约占 W_d 的 95%, 且符合较好的线性关系, 而 W_2 仅占 W_d 的 5% 左右, 声能、电磁等的能耗与前述耗能不在同一量级, 分析过程中可忽略。

鉴于原煤 SHPB 冲击破坏产生的碎粒数量巨大, 碎粒弹射动能 W_2 很难测试确定, 考虑其在耗散能 W_d

中占比较小, 故在后续分析中, 忽略碎粒弹射动能 W_2 的影响; 同时由于声、热和磁所具有的能量极小, 最终分析中认为破碎耗能 $W_1=W_d$ 。

2.2 煤岩冲击破碎块度分形特征

岩石碎块分形主要有两种方式^[16]:

(1) 碎块的质量 - 频率分布

质量 - 频率关系为

$$N = N_0 (M / M_0)^{-b} \quad , \quad (2)$$

式中, M 为碎块质量, N 为质量 $\geq M$ 的碎块数量, N_0 是指最大质量 M_{\max} 的碎块数量, b 是质量 - 频率分布指数, 计算碎粒质量 - 频率分布的分形维数 $D=3b$ 。

(2) 碎块的尺寸 - 频率分布

尺寸 - 频率关系为

$$M(r) / M_T = 1 - \exp[-(R / \sigma)^a] \quad , \quad (3)$$

式中, $M(r)$ 为直径小于 R 的碎块总质量, M_T 为碎块总质量, σ 是平均尺寸的相关量。当 R / σ 远小于 1 时, $M(r) / M_T = (R / \sigma)^a$, 求得 $dM \propto R^{a-1} dR$, 又因 $dN \propto R^{-D-1} dR$, 且区间碎块数量的增大会增加质量, 即 $dN \propto R^{-3} dM$ 。

于是, 可得

$$R^{-D-1} \propto R^{-3} R^{a-1} = R^{a-4} \quad , \quad (4)$$

$$D = 3 - a \quad . \quad (5)$$

由于计算冲击后煤体的碎粒数量存在较大难度, 本文按方法 2 尺寸 - 频率^[17]关系进行分形计算。分析碎粒分析结果, 求得破碎块度的分形维数^[18], 见表 2。从表中可以看出, 煤岩冲击破碎后的分形维数分布在 1.80~2.14; 且随着冲击速率的增加, 分形维数整体上呈增大趋势, 但后期增大趋势有所放缓, 说明原煤破碎后的碎粒分布具有一定的自相似性^[19]。结合图 5 可知, 分形维数与最终破裂程度规律相似, 说明利用分形维数来定量衡量试件破裂程度是可行的。

3 煤岩冲击破裂电磁特征

3.1 电磁信号降噪

由于试验环境及测试系统自身均存在一定的电

表 2 各试件破碎分形维度

Table 2 Fractal dimensions of specimens after being broken											
冲击速率 /(m·s ⁻¹)	筛分孔径 /mm	小于该孔径的质量 /g	小于该孔径颗粒质量分 数/%	分形维数	相关系数	冲击速率 /(m·s ⁻¹)	筛分孔径 /mm	小于该孔径的质量/g	小于该孔径颗粒质量分 数/%	分形维数	相关系数
4.174	10.0	41.18	27.364	1.94	0.98	4.534	10	12.34	8.051	1.80	0.95
	5.0	21.33	14.174				5	7.92	5.167		
	2.0	10.41	6.917				2	3.79	2.473		
	1.0	4.01	2.665				1	1.10	0.718		
	0.5	3.03	2.013				0.5	0.83	0.542		
	0.2	1.48	0.984				0.2	0.37	0.241		
6.709	10.0	113.07	85.124	2.12	0.98	6.913	10	155.27	100.000	2.07	0.99
	5.0	70.49	53.068				5	64.19	41.341		
	2.0	34.92	26.289				2	33.25	21.414		
	1.0	14.25	10.728				1	14.19	9.139		
	0.5	10.64	8.010				0.5	10.76	6.930		
	0.2	5.10	3.840				0.2	5.38	3.465		
8.714	10.0	152.89	100.000	2.14	0.99	9.004	10	146.77	100.000	2.13	0.99
	5.0	100.18	65.524				5	94.24	64.209		
	2.0	47.99	31.389				2	47.25	32.193		
	1.0	20.98	13.722				1	20.09	13.688		
	0.5	15.85	10.367				0.5	15.10	10.288		
	0.2	8.29	5.422				0.2	7.65	5.212		

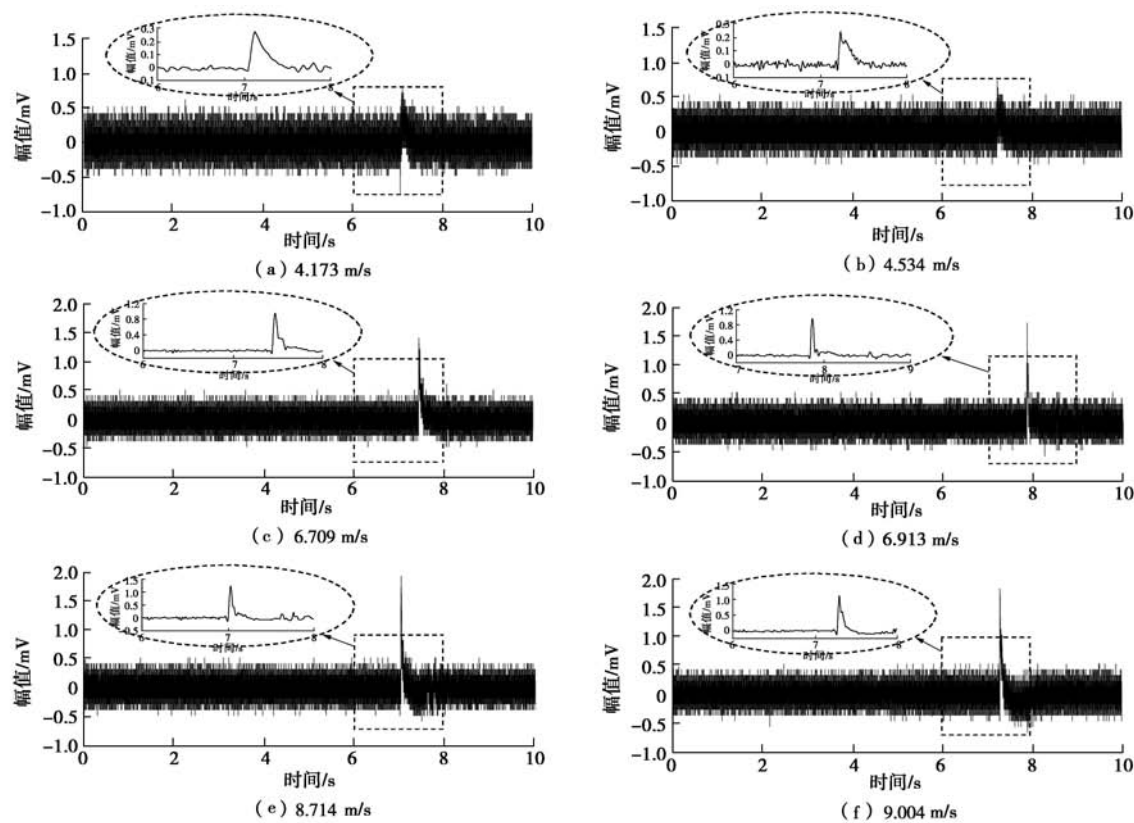


图 6 去噪前后的电磁信号

Fig. 6 Electromagnetic signals before and after denoising

磁噪声,造成采集的测试信号存在较严重的噪声污染,在进行信号特征分析前须对其进行降噪处理。文中利用 Datadomen 软件中的总体经验模态分解法 (ensemble empirical mode decomposition, EEMD) 对信号进行处理,该方法适用于分析非平稳、非线性信号,且通过加噪声进行辅助信号分析有效地克服 EMD

(empirical mode decomposition, EMD) 中的模态混叠问题。

利用前述方法对电磁信号进行降噪,6 组 SHPB 试验去噪前后的电磁信号见图 6,图中局部放大部分为去噪后的电磁信号。从图中看出,利用 EEMD 方法可实现较好地降噪效果;煤体冲击破裂电磁信号呈瞬

时脉冲状, 持续时间仅为微秒级; 信号幅值总体随着冲击速度的增大而上升, 幅值统计见表 3。

3.2 电磁信号能量计算

电磁信号能量特征的求取, 先通过 EEMD 分解, 将原始信号分解成许多固定模量 (intrinsic mode function, IMF), 剔除噪声模量后。再由巴什瓦 (Parseval) 定理 (见下式) 计算剩余各信号模量携带的能量。

$$E_{i,j}(t_j)=\int_T|f_{i,j}(t_j)|^2dt=\sum_{k=1}^m|x_{j,k}|^2, \quad (6)$$

式中, i 为剔除噪声模量后剩余的模量数, m 为采样点数, $E_{i,j}(t_j)$ 为信号分解到第 i 个模量的第 j 个节点处的模量频带能量, $x_{j,k}$ 为信号降噪后的重构信号, $f_{i,j}(t_j)$ 离散采样点的幅值。去噪后的电磁信号的总能量为剩余各模量 i 的能量之和。对 6 组试验的电磁信号按前述方法进行降噪并计算信号能量, 结果见表 3。分析发现, 破裂电磁的幅值和能量与冲击速度呈正相关关系。

表 3 各组电磁信号特征参数

Table 3 Characteristic parameters of electromagnetic signals			
试件编号	冲击速度 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	信号幅值 /mV	信号能量 /(10^{-3}mJ)
A1	4.174	0.279	2.96
A2	4.534	0.249	2.32
A3	6.709	1.002	4.58
A4	6.913	1.095	3.64
A5	8.714	1.307	5.35
A6	9.004	1.335	5.51

4 破裂电磁与损伤特性关系分析

煤岩动力灾害实质上是煤岩体原有应力平衡状态被打破而破坏失稳所致, 该过程中煤体强度是抵抗灾害启动、发展的重要因素, 掌握煤体受冲击过程中的损伤失稳特征对理清灾害机理及其预测至关重要。

利用相关性分析法, 对前述的煤岩冲击破裂电磁信号与煤岩损伤特性进行关联性分析。文中利用煤岩冲击破碎过程中的能耗密度和最终的碎粒分形维数来衡量其损伤特性。图 7 为电磁信号幅值与破坏后碎粒分形维数的关系, 从图中可以看出, 两者符合较好的线性关系, 即煤体破裂过程中伴随的电磁信号强度与其破碎程度相关, 煤体冲击损伤程度越大, 电磁信号幅值越高。图 8 进一步分析了电磁信号能量与破坏后碎粒分形维数的关系, 与信号幅值相似, 信号能量与煤岩破坏后碎粒分形维数亦符合较好的线性关系, 即煤体冲击损伤程度越大, 在破碎过程中释放的电磁信号能量越大。

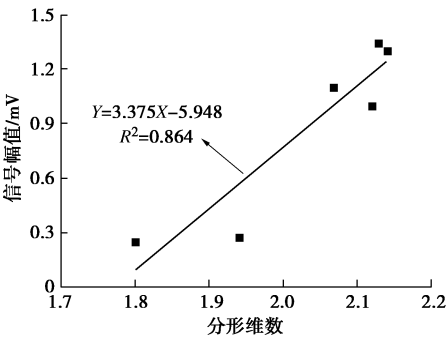


图 7 电磁信号幅值与碎粒分形维数间关系

Fig. 7 Relationship between amplitude of electromagnetic signals and fractal dimension

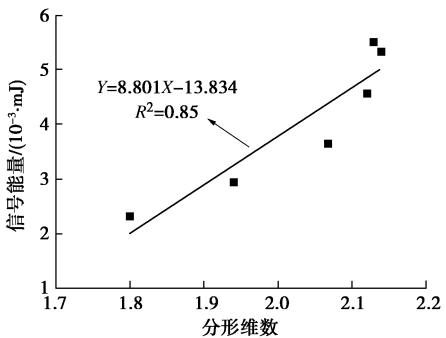


图 8 电磁辐射能与碎粒分形维数间关系

Fig. 8 Relationship between energy of electromagnetic signals and fractal dimension

前述提到, 煤体破裂电磁属于耗散能的一部分, 图 9、10 分析了电磁信号幅值、能量与耗能密度间的关系, 从图中可以看出, 虽然两者间总体也呈正相关关系, 但相关性程度并不高, 分析认为主要原因是: ①煤岩体具有丰富层理、节理和存在大量孔隙, 虽然煤样制备过程中充分考虑了这一特性, 取同一地点大块煤岩、同一冲取方向制备煤样, 但其本身具有一定的不均匀性, 导致在试验过程中应力波在试件中传播具有一定的不确定性; ②冲击应力波到达试件后, 以一定振动频率在试件中传播, 当该应力波频率与煤试件自振频率相近时, 将产生共振现象, 导致试件出现

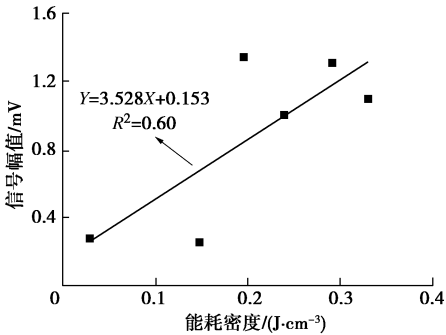


图 9 电磁信号幅值与能耗密度间关系

Fig. 9 Relationship between electromagnetic signal amplitude and energy density

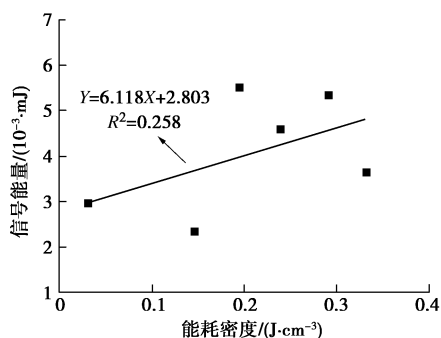


图 10 电磁辐射能与能耗密度间关系

Fig. 10 Relationship between energy of electromagnetic signals and energy density

剧烈破坏。因各试件内部孔隙、裂隙和层理存在差异,导致其松散程度不同,进而影响其因摩擦作用吸收能量的能力不同,即因阻尼不同导致自振频率不同,因共振现象的差异,导致煤岩冲击耗散能与破坏程度间相关性存在差异。

5 结 论

破裂电磁信号是煤岩动力灾害预测的重要手段,而利用电磁信号特征推测煤岩体损伤程度是灾害预测关键。文中通过煤岩 SHPB 试验,探求动载冲击下煤岩的损伤特性(耗散能、分形维数)与破裂电磁信号(0~3 kHz 频段)特征(幅值、能量)间的关系,研究发现:

(1) 分形维数与最终破裂程度规律相似,利用分形维数来定量评价试件破裂程度是可行的。

(2) 煤岩冲击破裂电磁信号呈瞬时脉冲状,持续时间仅为微秒级,信号幅值及能量总体随着破碎程度的增大而增大。

(3) 煤岩冲击破裂电磁信号的幅值及能量与其损伤程度(分形维数)符合较好的线性关系,利用电磁信号特征监测煤岩损伤程度是可行的。

(4) 受煤岩材料固有缺陷的不确定性及其共振破坏现象的影响,煤岩的损伤程度与冲击耗散能间的相关性较弱。

参考文献:

[1] 姜福兴, 史先锋, 王存文, 等. 高应力区分层开采冲击地压事故发生机理研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(6): 1123 - 1131. (JIANG Fu-xing, SHI Xian-feng, WANG Cun-wen, et al. Mechanical mechanism of rock burst accidents in slice mining face under high pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(6): 1123 - 1131. (in Chinese))

[2] 杨伟利, 姜福兴, 杨 鹏, 等. 特厚煤层冲击地压重复发生

的机理研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(11): 2045 - 2050. (YANG Wei-li, JIANG Fu-xing, YANG Peng, et al. Mechanism of repeated rock bursts in extra-thick coal seam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(11): 2045 - 2050. (in Chinese))

[3] 姚精明, 闫永业, 刘茜倩, 等. 基于能量理论的煤岩体破坏电磁辐射规律研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(1): 233 - 242. (YAO Jing-ming, YAN Yong-ye, LIU Xi-qian, et al. Study of EME rules during coal or rock mass failure base on energy theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(1): 233 - 242. (in Chinese))

[4] 胡少斌, 王恩元, 李忠辉, 等. 受载煤体电磁辐射动态非线性特征[J]. 中国矿业大学学报, 2014, **43**(3): 380 - 387. (HU Shao-bin, WANG En-yuan, LI Zhong-hui, et al. Nonlinear dynamic characteristics of electromagnetic radiation during loading coal[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2014, **43**(3): 380 - 387. (in Chinese))

[5] 何学秋, 窦林名, 牟宗龙, 等. 煤岩冲击动力灾害连续监测预警理论与技术[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(8): 1485 - 1491. (HE Xue-qiu, DOU Lin-ming, MU Zong-long, et al. Continuous monitoring and warning theory and technology of rockburst dynamic disaster of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(8): 1485 - 1491. (in Chinese))

[6] 任学坤, 王恩元, 李忠辉. 预制裂纹岩板破坏电位与电磁辐射特征的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, **45**(3): 440 - 446. (REN Xue-kun, WANG En-yuan, LI Zhong-hui. Experimental study of characteristics of surface potential and electromagnetic radiation of pre-cracked rock plate during fracture[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, **45**(3): 440 - 446. (in Chinese))

[7] KONG B, WANG E Y, LI Z H, et al. Electromagnetic radiation characteristics and mechanical properties of deformed and fractured sandstone after high temperature treatment[J]. Engineering Geology, 2016(209): 82 - 92.

[8] 姚精明, 董文山, 闫永业, 等. 受载煤岩体电磁辐射动态多重分形特征[J]. 煤炭学报, 2016, **41**(6): 1429 - 1433. (YAO Jing-ming, DONG Wen-shan, YAN Yong-ye, et al. Multi-fractal characteristics of electromagnetic radiation with loaded coal[J]. Journal of China Coal Society, 2016, **41**(6): 1429 - 1433. (in Chinese))

[9] SONG D Z, WANG E Y, SONG X Y, et al. Changes in frequency of electromagnetic radiation from loaded coal rock[J]. Rock Mech Rock Eng, 2016(49): 291 - 302.

[10] 刘晓辉, 张 茹, 刘建锋. 不同应变率下煤岩冲击动力试

- 验研究[J]. 煤炭学报, 2012, **37**(9): 1528 - 1534. (LIU Xiao-hui, ZHANG Ru, LIU Jian-feng. Dynamic test study of coal rock under different strain rates[J]. Journal of China Coal Society, 2012, **37**(9): 1528 - 1534. (in Chinese))
- [11] 李成武, 杨 威, 徐晓萌, 等. 煤体冲击破坏超低频/极低频电磁异常特征分析[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(10): 2014 - 2021. (LI Cheng-wu, YANG Wei, XU Xiao-meng, et al. Characteristic analysis of SLF/ELF electromagnetic anomaly in the process of coal impact damage[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(10): 2014 - 2021. (in Chinese))
- [12] 李成武, 解北京, 杨 威, 等. 基于 HHT 法的煤冲击破坏 SHPB 测试信号去噪[J]. 煤炭学报, 2012, **37**(11): 1796 - 1802. (LI Cheng-wu, XIE Bei-jing, YANG Wei, et al. Coal impact damage SHPB testing signal de-noising based on HHT method[J]. Journal of China Coal Society, 2012, **37**(11): 1796 - 1802. (in Chinese))
- [13] 解北京. 煤冲击破坏动力学特性及磁场变化特征试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013. (XIE Bei-jing. Experimental research on characteristics of coal impact damage dynamics and magnetic field[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013. (in Chinese))
- [14] 洪 亮. 冲击荷载下岩石强度及破碎能耗特征的尺寸效应研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008. (HONG Liang. Size effect on strength and energy dissipation in fracture of rock under impact loads[D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese))
- [15] ZENCKER U, CLOS R. Limiting conditions for compression testing of flat specimens in the Hopkinson pressure bar[J]. Experimental Mechanics, 1998, **39**(4): 343 - 348.
- [16] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 240. (XIE He-ping. Introduction to Fractal-Rock Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1996: 240. (in Chinese))
- [17] 何满潮, 杨国兴, 苗金丽, 等. 岩爆试验碎屑分类及其研究方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(8): 1521 - 1529. (HE Man-chao, YANG Guo-xing, MIAO Jin-li, et al. Classification and research methods of rock burst experimental fragments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(8): 1521 - 1529. (in Chinese))
- [18] 易顺民, 唐辉明. 三轴压缩条件下三峡坝基岩石破裂的分形特征[J]. 岩土力学, 1999, **20**(3): 24 - 28. (YI Shun-min, TANG Hui-ming. The fractal characteristics of fracture of dam foundation rock under triaxial compression in the three gorges project[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, **20**(3): 24 - 28. (in Chinese))
- [19] 谢和平, 高 峰, 周宏伟, 等. 岩石断裂和破碎的分形研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, **23**(4): 1 - 9. (XIE He-ping, GAO Feng, ZHOU Hong-wei, et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, **23**(4): 1 - 9. (in Chinese))