

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2013.1463

Li Chengwu, Yang Wei, Xu Xiaomeng, 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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2013.1463

煤体冲击破坏超低频/极低频电磁异常特征分析

李成武 杨 威 徐晓萌 王启飞

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院 北京 100083)

摘 要:为确定煤体冲击破坏过程中是否产生超低频/极低频电磁信号,利用分离式霍普金森压杆(SHPB)实验系统和ZDKT-1型瞬变磁振测试系统,研究不同冲击速度下煤体破裂电磁信号变化规律。通过分析电磁异常信号的Hilbert时频谱特征,确定煤体冲击破坏下的超低频/极低频电磁效应,研究不同冲击速度下电磁信号能量和冲击耗散能之间的关系。结果表明:煤材料在冲击破坏过程中能产生超低频/极低频电磁信号,信号主频在0~30 Hz;电磁信号幅值和冲击速度呈现正线性相关,电磁信号能量和冲击速度为二次多项式关系;冲击耗散能和电磁能增长趋势基本相同,超低频/极低频电磁信号强度可间接反映煤体内部损伤的程度。

关键词:煤体;SHPB;冲击破坏;超低频/极低频;电磁异常

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2014)10-2014-08

Characteristic analysis of SLF/ELF electromagnetic anomaly in the process of coal impact damage

LI Cheng-wu, YANG Wei, XU Xiao-meng, WANG Qi-fei

(Faculty of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to determine whether the impact damage of coal produces SLF/ELF electromagnetic signal in the process of coal and rock dynamic disasters, the change law of electromagnetic signal under different impact speed was studied using Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) experimental system and ZDKT-1 transient magnetic field test system. Subsequently, the Hilbert spectrum signature of abnormal electromagnetic signal was analyzed and the SLF/ELF electromagnetic effect in the process of coal impact damage was confirmed. In addition, the relationship between the impact dissipation energy and the energy of electromagnetic anomaly was studied. Results show that there is SLF/ELF electromagnetic signal in the impact damage process of coal body, and the dominant frequency of electromagnetic anomaly is 0–30 Hz. Furthermore, the amplitude of electromagnetic signal has positive linear correlation with impact velocity, and the relationship between the energy of electromagnetic signals and the impact velocity is quadratic polynomial. Impact dissipation energy and electromagnetic energy have same rising trend with the increase of impact velocity. Therefore, the internal damage of coal can be described by the strength of SLF/ELF electromagnetic signal.

Key words: coal; SHPB; impact damage; SLF/ELF; electromagnetic anomaly

自1933年Stepanov发现断裂电磁辐射现象以来,煤岩破裂电磁异常现象一直受国内外学者关注。

岩石电磁辐射最早从地震工作者发现震前电磁异常开始的。岩石在受载破裂过程中会产生明显的电磁

收稿日期:2013-10-14 责任编辑:许书阁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274206);国家重点实验室开放课题资助项目(SKLCRSM11KFB02)

作者简介:李成武(1969—),男,黑龙江延寿人,研究员,博士生导师。E-mail:lcw@cumt.edu.cn。通讯作者:杨 威(1986—),男,河南信阳人,博士研究生。E-mail:ywbj2008@126.com

异常,这种电磁异常在实验室尺度^[1-2]和地球物理尺度^[3-4]均被检测到。电磁辐射是宽频的,频率从超低频到甚高频,甚至更高^[5-6]。Eftaxias 等^[7-8]分析了地震前超低频电磁异常信号特征。钱书清等^[9]通过大尺寸岩石试样的破裂试验认为 20 ~ 1 000 Hz 频段的信号先于其他频段的信号出现。曹惠馨等^[10]进行了超长波段电磁辐射信号实验研究,认为岩石破裂过程中在超低频段有较强的电磁辐射。而在强度较低的煤体变形破裂电磁辐射研究方面,国内外学者通过大量的理论分析、模拟实验和现场测试,对煤体电磁辐射的产生机理、特征、规律及应用等进行了深入的研究^[11-15]。但现有的研究主要集中在 3 kHz 以上频段,而对 1 kHz 以下低频电磁信号研究较少^[16-18]。低频电磁信号(1 kHz 以下),尤其是 300 Hz 以下超低频/极低频电磁信号具有传播距离远、抗干扰能力强等优点,更适用于煤矿井下复杂环境下冲击地压、煤与瓦斯突出等煤岩动力灾害监测。因此,有必要对煤体破裂超低频/极低频电磁效应进行深入研究。

目前,电磁辐射技术已经成功的运用于煤与瓦斯突出、冲击地压等煤岩动力灾害的预测预报,其技术关键在于电磁信号特征的准确识别。前人研究多采用拉伸、剪切和摩擦等静态或准静态加载方式研究煤岩破裂电磁信号变化规律,而关于动载作用下煤岩破裂电磁信号特征的研究较少。煤矿开采过程中放炮、风镐掘进等使煤体应力得到瞬间释放,是引起煤与瓦斯突出等煤岩动力灾害的主要诱因^[19]。爆破震动、风镐掘进、顶底板岩层突然断开或滑移垮落、断层活化等均能使煤体承受强烈的动载荷作用,其应变率一般为 $10 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ ^[20],动态冲击过程电磁信号特征和静载过程存在较大差别。因此,研究动载作用下煤体破坏电磁信号特征,对提高煤岩动力灾害预测预报准确性更具现实意义。本文借助分离式霍普金森压杆(SHPB)实验系统,采用自主研发的 ZDKT-1 型瞬变磁振测试系统,探究快速冲击作用下煤体破坏超低频/极低频电磁异常信号特征。

1 煤体冲击破坏实验系统

1.1 实验系统

实验是在中国矿业大学(北京)深部岩石力学和地下工程国家重点实验室完成。该实验系统是由 SHPB 实验装置和 ZDKT-1 型瞬变磁振测试系统 2 个独立系统构成。实验系统如图 1 所示。

实验所采用的是 $\phi 50 \text{ mm}$ 钢杆 SHPB 实验装置包括:动力系统、撞击杆、输入杆、输出杆、吸收杆和测量记录系统等。撞击杆为 $\phi 50 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的圆柱

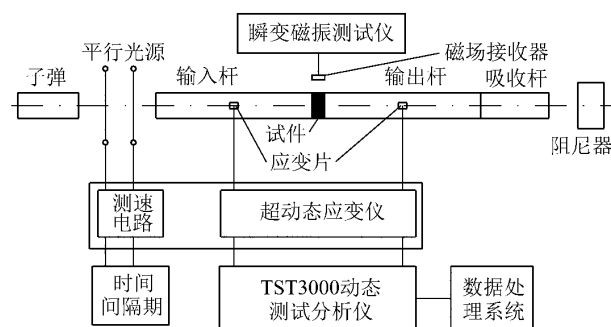


图 1 实验系统

Fig. 1 Experimental system

体。输入杆和输出杆均为钢质压杆,直径为 50 mm,被测试样夹在输入杆和输出杆之间。撞击速度测量采用光电法,根据撞击杆飞行时截断两束白光的时间间隔和光束间距确定撞击杆的飞行速度。输入杆和输出杆上应变计记录的应变脉冲经超动态应变仪放大后由瞬变波形存储器采集存储,采样速率为 10^7 s^{-1} 。

SHPB 实验技术是建立在弹性压杆一维应力假定和试件内部应力均匀化假定之上。实验中撞击杆以一定速度沿轴向撞击输入杆,在输入杆中产生压缩应力波。假定输入杆和输出杆仅发生弹性变形,杆中应力波做一维传播。当应力波到达试样时,如果试样的波阻抗小于压杆的波阻抗,将反射一个波返回到输入杆中,并经过试样透射一个波进入到输出杆中。压杆中的脉冲信号通过应变片来测量,通过测定压杆上的应变来推导试件材料的应力-应变关系^[21]。

ZDKT-1 型瞬变磁振测试系统(图 2)包括:磁场接收器、瞬变磁振测试仪及计算机。实验过程中磁场接收器正对煤试件,并且与试件保持同一水平,水平距离为 40 mm。磁场接收器由 1 000 匝线圈绕在磁棒上组成,线圈直径为 100 mm,内阻为 21.8Ω ,电感为 11.39 mH,电容为 $13.61 \mu\text{F}$ 。实验测得磁场接收器的有效接收频段为 0 ~ 2 200 Hz。瞬变磁振测试仪采用美国国家仪器公司(NI)的 cRIO-9074 嵌入式机器控制与监控系统采集数据。NI cRIO-9074 集成了 400 MHz 工业实时处理器和 2 百万门 FPGA,具有用于嵌入式操作的 128 MB DRAM 和用于数据记录的 256 MB 非易失性存储器。瞬变磁振测试仪采样频率为 3 000 Hz,前置放大器增益为 80 dB。

ZDKT-1 型瞬变磁振测试系统主要依据法拉第电磁感应定律,当煤体破裂会产生瞬变的电磁场,电磁场的瞬间产生和消失会引起磁场接收器中的磁通量发生变化,进而会使绕在磁棒上的线圈产生感应电动势。感应电信号由瞬变磁振测试仪采集,并经前置放大器放大及 A/D 转换处理,最后通过网络传输到计算机。通过监测感应电动势大小来反映煤体破裂

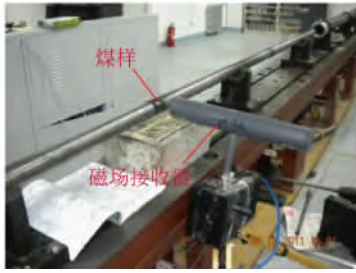


图2 瞬变磁振测试仪位置

Fig. 2 Location of ZDKT-1 transient magnetic field tester
产生电磁信号的大小。

1.2 煤样制备

煤样选自平顶山天安煤业股份有限公司十矿丁_{5.6}-21180 机巷掘进工作面大块煤体。煤试件在中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室加工得到。根据 Davies 和 Hunter^[22] 所推荐的最佳长径比计算公式,笔者用取芯机取出直径为 50 mm 试件,经打磨机打磨成高为 50 mm、直径为 50 mm 的标准试件。为使试件满足受力的“均匀性”假定,试件两端不平行度在 0.02 mm 以内^[23]。为了减少界面摩擦效应,在弹性杆与试件界面间涂抹黄油润滑^[24]。

1.3 实验方案

为研究不同冲击速度下电磁信号特征,笔者选取了 12 组煤样进行测试,冲击速度为 4.534 ~ 19.361 m/s,冲击实验方案见表 1。

表 1 SHPB 冲击实验方案
Table 1 Experimental schemes of SHPB

实验编号	试件尺寸/ (mm × mm)	冲击速度/ (m · s ⁻¹)	破坏情况
1-1	φ50 × 50	4.534	粉碎
1-2	φ50 × 50	5.001	粉碎
1-3	φ50 × 50	6.709	粉碎
1-4	φ50 × 50	6.980	粉碎
1-5	φ50 × 50	7.990	粉碎
1-6	φ50 × 50	8.714	粉碎
1-7	φ50 × 50	9.004	粉碎
1-8	φ50 × 50	10.758	粉碎
1-9	φ50 × 50	12.730	粉碎
1-10	φ50 × 50	14.503	粉碎
1-11	φ50 × 50	17.559	粉碎
1-12	φ50 × 50	19.361	粉碎

2 动态响应特征分析

2.1 应变率分析

图 3 为不同冲击速度下应变率时程曲线,应变率

变化持续时间均在 0 ~ 250 μs,曲线均呈先迅速上升至峰值,然后保持在峰值平台,随后迅速下降的趋势。随着速度的增大,应变率曲线上升阶段和下降阶段持续时间越短,峰值也逐渐增大。低冲击速度(4.534 ~ 7.990 m/s)时,峰值平台波动比较大,中等冲击速度(8.714 ~ 12.730 m/s)时,峰值平台波动相对较小,而高冲击速度(14.503 ~ 19.361 m/s)时,峰值平台基本呈现一条直线。根据峰值平台对应的应变率,即可找到煤体材料的近似平均恒应变率^[25]。近似平均恒应变率与相应的冲击速度关系如图 4 所示。可以看出应变率的幅值和冲击速度呈现良好的线性关系,说明实验测得的入射波和应力波基本理论具有较好的一致性,进而表明实验所测数据具有较高的可信度。

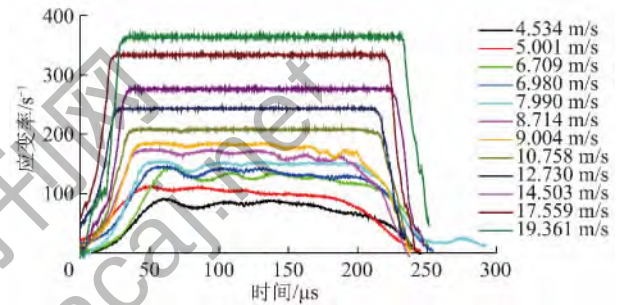


图3 不同冲击速度下应变率时程曲线

Fig. 3 Strain rate trend with time under different impact velocities

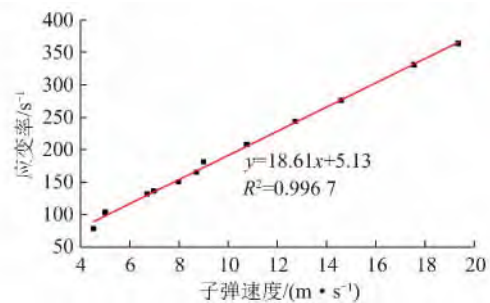


图4 平均恒应变率和冲击速度关系

Fig. 4 Relationship between average constant strain rate and impact velocity

2.2 动态应力应变关系

图 5 为不同冲击速度下的应力应变关系,可以看出,随着冲击速度的增大,极限应力逐渐增大。低冲击速度时,在第 1 个极大值之前曲线斜率(动态弹性模量)偏离较大,和冲击速度关系密切。进入塑性阶段,曲线近似水平,峰后曲线并没出现回弹,如图 5 (a)所示;中等冲击时,初始上升阶段基本是一条直线,不同速率下曲线斜率偏离也不大,能够很好的重叠,一般认为这个阶段煤材料具有线弹性。曲线在上

升到第 1 个极大值后,随着应变的增大,应力先是减小然后又升高到峰值,表现为应变强化的响应性质。峰后曲线成负斜率下降,这和岩石材料呈现较为相似的特征,如图 5(b) 所示;高速冲击时,初始上升阶段和中等冲击速度相似,基本是一条直线,不同速率下偏离也不大,能够很好的重叠。高应变率下,煤体表

现明显的脆性特征,试件在较小的应变下即达到极限应力值,随后随着应变的增大,并没有呈现先下降后上升至第 2 个极值的趋势,而是随着应变进一步增大,应力迅速减小,试件脆性破裂特征逐渐明显,这和岩石材料有明显差别,如图 5(c) 所示。

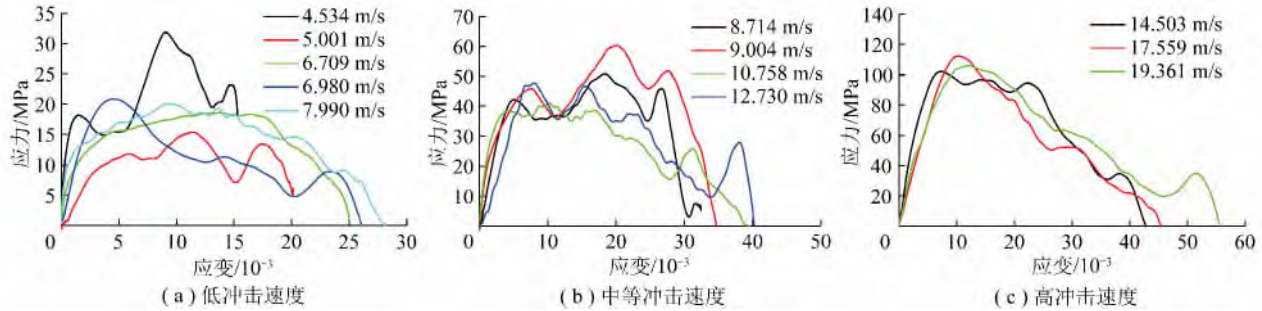


图 5 不同冲击速度的应力-应变关系

Fig. 5 Stress-strain relationship under different impact velocities

2.3 冲击破坏耗散能分析

岩石在承受动载作用时,随着冲击速率(应变率)增加,其非线性变形明显增加,而破碎吸收能是衡量岩石破坏难易程度的重要指标之一^[26]。试样的破碎吸收能根据入射能、反射能和透射能的差值得。而入射能、反射能、透射能根据应力波幅值和入射杆与透射杆参数加以确定。图 6 为应变能和耗散能与冲击速度的关系曲线,可以看出,入射能和反射能与冲击速度均呈现良好的二次多项式关系,而透射能与冲击速度的二次多项式关系并不好,耗散能与冲击速度的关系也近似为二次多项式关系,这和文献^[27]中耗散能和冲击速度的关系是一致的。

3 电磁响应特征分析

3.1 动态冲击下电磁信号形态

实验发现,不同冲击速度下煤体破坏过程均测得电磁异常信号,限于篇幅,笔者仅列出 3 组实验的电磁信号形态,如图 7 所示。冲击荷载作用下电磁异常持续时间很短,不超过 3 s,且呈现近似直线上升,然后迅速下降的变化趋势。冲击速度小(4.534 m/s)时,电磁异常变化并不明显,电磁信号幅值在 0.7 mV 左右,如图 7(a) 所示;冲击速度中等(8.714 m/s)时,电磁异常变化较为明显,电磁信号幅值在 1.5 ~ 2.0 mV,如图 7(b) 所示;冲击速度较大(19.361 m/s)时,电磁异常变化非常明显,电磁信号幅值在 4.0 mV 之间,如图 7(c) 所示。同时,原始电磁信号包含大量的噪声,为进一步分析电磁异常信号特征,需要对原始信号进行降噪处理。

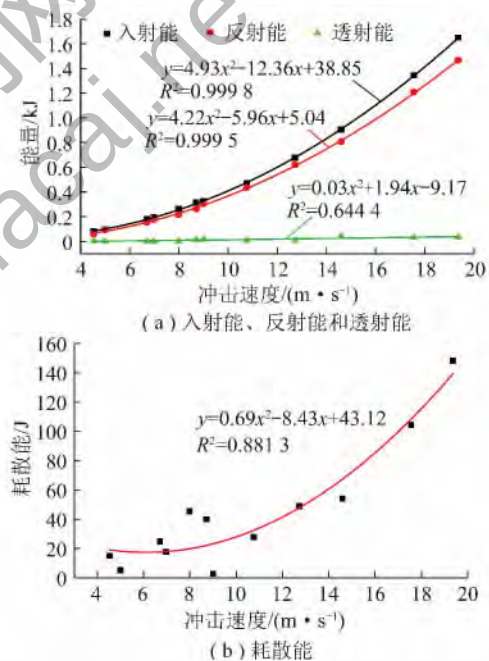


图 6 不同冲击速度下的应变能和耗散能

Fig. 6 Strain energy and dissipation energy under different impact velocities

3.2 电磁信号去噪分析

3.2.1 背景噪音 Hilbert 谱分析

煤岩变形破坏过程中的电磁异常信号十分微弱,大量的干扰和噪声对于微弱电磁异常信号产生较大影响,因此必须研究噪声特性并采取适当的方法进行将其滤除以得到真正的电磁异常信号。经考察,所有实验背景噪音均呈现相同特征,以实验 1-6 为例,从图 7(b) 可以看出,前 60 s 信号均是背景噪音,为了便于分析,本文选择实验 1-6 的 0 ~ 5 s 的数据分析噪

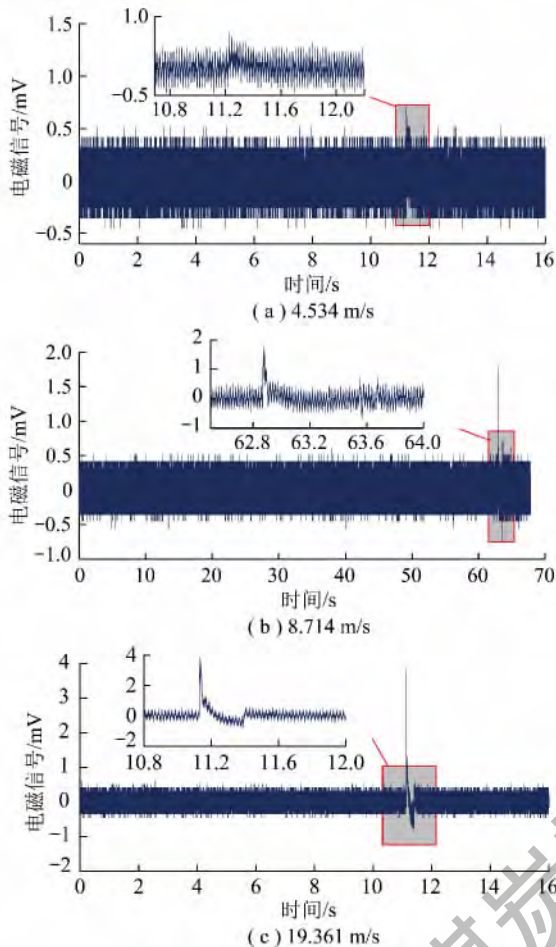


图7 不同冲击速度下的电磁异常

Fig. 7 Electromagnetic anomaly under different impact velocities 声特征。将 0 ~ 5 s 数据经整体经验模态分解 (EEMD) 后求其功率谱^[28], 如图 8 所示。

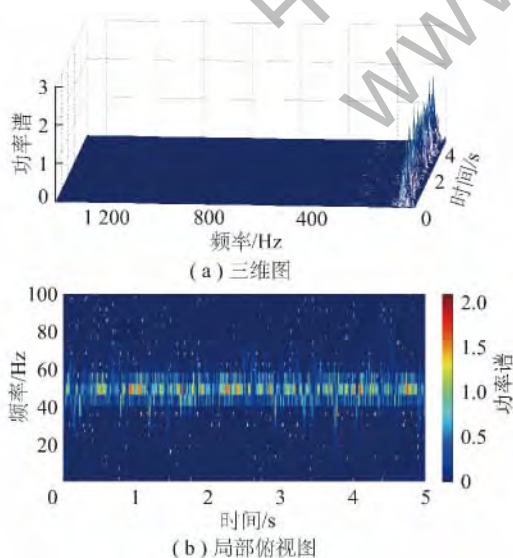


图8 背景噪声功率谱

Fig. 8 Power spectrum of background noise

从图 8(a) 可以看出, 实验室背景噪音信号频率在 100 Hz 以内。为了便于观察, 仅观察 100 Hz 内的

功率谱图, 如图 8(b) 所示。从图 8(b) 可以看出, 40 ~ 60 Hz 内的噪音信号较强, 主频为 50 Hz。经推断背景噪音可能是实验室内电器设备的工频干扰。故实验室条件下的背景噪音主频为 50 Hz。

3.2.2 电磁异常信号 Hilbert 谱分析

截取各个实验包含电磁异常的信号, 为与背景噪音相比较, 信号截取长度也均取为 5 s。对电磁异常信号进行 EEMD 变换, 然后求其功率谱 (图 9)。

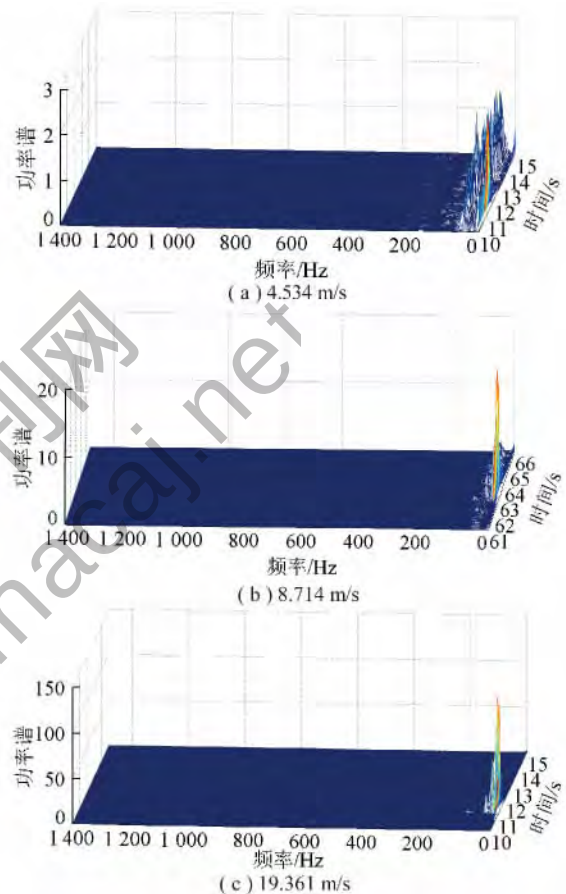


图9 电磁异常信号功率谱图

Fig. 9 Power spectrum of electromagnetic anomalies

由图 9 可以看出, 冲击速度较小时, 产生的电磁异常并不明显, 且电磁异常的功率谱和背景噪音的功率谱相当 (图 9(a))。随着撞击杆速度的增大, 电磁信号和背景噪音区分也逐渐明显, 电磁信号的功率谱逐渐增大 (图 9(b), (c))。通过图 9 观察可知, 电磁信号的频率均在 100 Hz 以内, 为此, 笔者截取 100 Hz 的功率谱进行分析。为了便于考察频率范围, 笔者取图 9 中的 100 Hz 以内功率谱俯视图, 如图 10 所示。从图 10(a) 可以看出, 冲击速度为 4.534 m/s 下的电磁异常主频在 10 Hz 以内。其余冲击速度下电磁信号的频率均为 0 ~ 30 Hz, 10 Hz 以内的信号能量最大, 如图 10(b), (c) 所示。通过以上分析, 可知电磁信号的主频为 0 ~ 30 Hz。

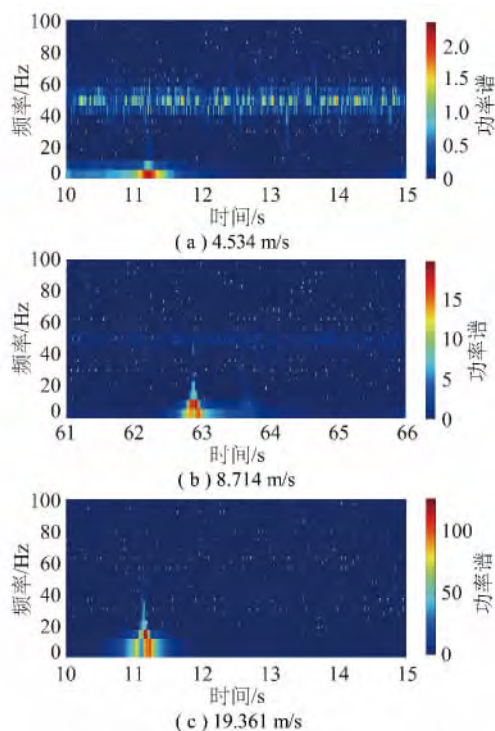


图 10 电磁异常功率谱局部俯视图

Fig. 10 Local vertical view of power spectrum of electromagnetic anomalies

3.2.3 电磁异常信号去噪

为了实现信号去噪,笔者采用 EEMD 低通滤波^[28]。12 组实验数据经 EEMD 分解后,原始信号均被分为 12 个固有模态函数 (IMF) 和 1 个残差分量 residual。为便于区别,分别用 IMF1 ~ IMF12 代表 12 个固有模态函数。统计分析背景噪音和 12 组实验电磁异常信号经 EEMD 变换后各 IMF 的能量百分比,为了便于观察冲击前后信号的 IMF 变化情况,笔者以噪声 IMF 能量百分比为界限,分析电磁异常与噪声信号的异同,如图 11 所示,其中红线代表的是噪声 IMF1 ~ IMF12 的能量百分比。

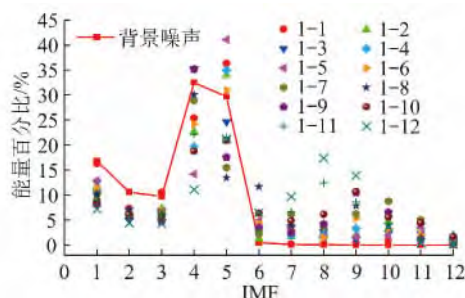


图 11 各实验 IMF 能量百分比

Fig. 11 Power percentages of each IMF in each experiment

从图 11 可看出,12 组电磁异常信号 EEMD 分解后 IMF6 ~ IMF12 能量百分比均大于噪声信号的 IMF6 ~ IMF12, IMF1 ~ IMF4 能量百分比恰恰相反,说

明冲击过程 IMF6 ~ IMF12 的能量在增加,而 IMF1 ~ IMF4 的能量在减小。所以,IMF6 ~ IMF12 应为有用信号分量。对于 IMF5,电磁异常信号功率大部分小于噪声信号,小部分异常信号大于噪声段,而对 IMF5 进行傅里叶变换,发现 IMF5 的主频为 50 Hz,此处认为其主要包含噪声信号。由此可认为电磁异常信号处于 IMF6 ~ IMF12 频段内,这与上文的分析结果一致。

由以上分析,可知电磁异常信号的频段均在 30 Hz 以内,主要分布在 IMF6 ~ IMF12,残差分量 residual 代表信号的趋势项,因此,将 IMF6 ~ IMF12 和分量 residual 加以重构,得出去噪后的电磁异常信号。图 12 为电磁异常信号重构结果。相比冲击破裂电磁异常原始信号,EEMD 低通滤波效果很好。电磁异常上升阶段均呈现近似直线上升的趋势。电磁异常下降阶段趋势和冲击速度的大小有关,冲击速度小时,下降阶段呈现近似负指数衰减的趋势,如图 12(a)所示。冲击速度中等时,下降阶段呈现先近似指数衰减趋势,末尾存在小幅度振荡衰减,如图 12(b)所示。冲击速度较大时,下降阶段迅速衰减至反向最大值,然后直线上升至第二极大值,随后负指数衰减,末尾不存在小幅度振荡,如图 12(c)所示。中等冲击速度下电磁异常持续时间大于低冲击速度和高冲击速度。究其原因,电磁异常的产生主要与塑性变形过程中裂纹扩展、裂纹面的摩擦等有关,由图 5 可知,中等冲击速度下塑性区应变高于其他 2 种冲击速度,煤体裂纹扩展较为充分,由此导致中等冲击速度下电磁异常持续时间较长。

3.3 电磁能和耗散能的关系

动态冲击作用下试件所吸收的能量主要用于以下 3 个方面:① 破碎耗能,产生新的断裂表面和微裂纹以及裂纹扩展等;② 碎块弹射的动能;③ 伴随着裂纹扩展或断面间摩擦的电磁辐射、声发射、红外辐射等能量耗散形式^[29]。以往研究发现,破碎耗能占吸收的 95% 左右,碎块动能较小。与前述机械能相比,电磁辐射等辐射能量级非常小,在传统能量计算中大多会忽略,但是由于这些能量释放是煤岩体内部裂纹扩展、裂纹面的摩擦、煤岩颗粒的滑动的具体表现,包含能够反映煤岩内部损伤程度的丰富信息^[30]。统计 12 组实验去噪后的电磁信号幅值和能量,如图 13 所示。可以看出随冲击速度的增大,电磁信号的幅值呈现线性增大的趋势。而电磁信号的能量与冲击速度为二次多项式关系。此外,随着冲击速度的增大,冲击耗散能和电磁信号能量呈现相同的增长趋势(图 14),冲击耗散能主要用于破碎耗能,由此可看出冲击破坏过程中产生新的断裂表面和微裂纹以及

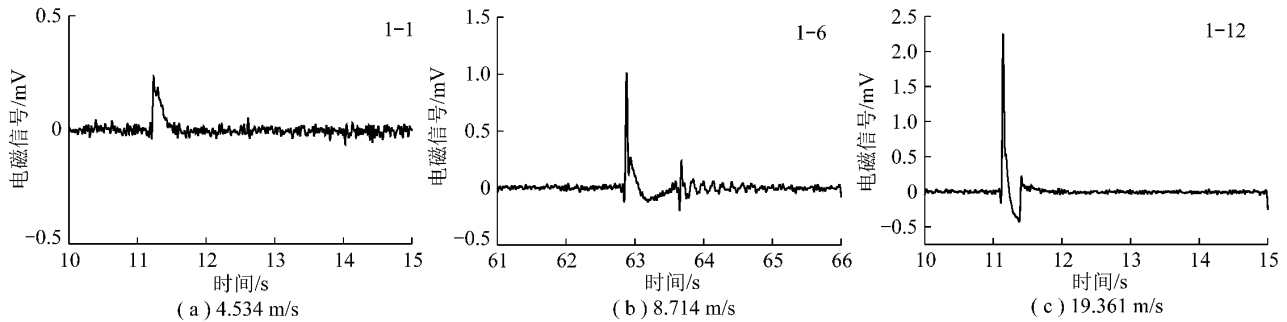


图12 电磁异常的重构信号

Fig. 12 Signal reconstruction of electromagnetic anomaly

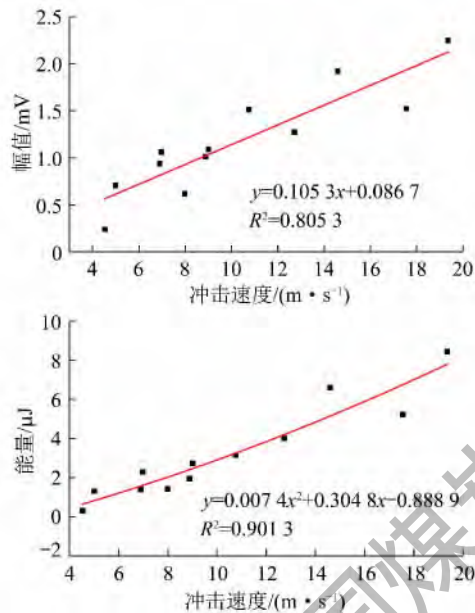


图13 去噪信号幅值、能量和冲击速度关系

Fig. 13 Relationship between amplitude of signal after de-noising, energy and impact velocity

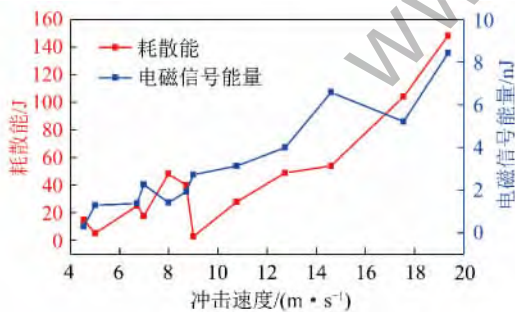


图14 耗散能和电磁信号能量关系

Fig. 14 Relationship between dissipated energy and electromagnetic energy

裂纹扩展等耗能形式与冲击破裂电磁信号关系密切,通过分析煤体冲击破坏中超低频/极低频电磁信号强度的变化规律可间接反映煤体内部的损伤程度。

4 结 论

(1) 不同冲击速度下煤体破坏过程均有电磁异

常信号产生,电磁异常持续很短,不超过3 s,且呈现近似直线上升,然后迅速下降的变化趋势。中等冲击速度下电磁异常持续时间高于低冲击速度和高冲击速度下的持续时间。

(2) 对 SHPB 冲击实验采集信号进行整体经验模式分解(EEMD)和 Hilbert 功率谱特征分析,发现煤体在冲击破坏过程中存在超低频/极低频电磁效应,电磁异常信号主频为0~30 Hz。

(3) 超低频/极低频电磁信号幅值和冲击速度呈现正线性相关,电磁信号能量和冲击速度为二次多项式关系,冲击耗散能和电磁信号能量呈现相同的增长趋势。通过分析煤体冲击破坏中超低频/极低频电磁信号强度的变化规律可间接反映煤体内部损伤的程度。实验结果为利用超低频/极低频电磁信号实现远距离煤岩动力灾害监测提供理论依据。

参考文献:

- [1] Akito Tsutsumi, Nobumasa Shirai. Electromagnetic signals associated with stick-slip of quartz-free rocks[J]. Tectonophysics 2008, 450(1-4): 79-84.
- [2] Yamada I, Masuda K, Mizutani H. Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors 1989, 57: 157-168.
- [3] Zhang Xuemin, Chen Huaran, Liu Jing, et al. Ground-based and satellite DC-ULF electric field anomalies around Wenchuan M8.0 earthquake[J]. Advances in Space Research 2012, 50: 85-95.
- [4] Hayakawa M, Ohta K, Maekawa S, et al. Electromagnetic precursors to the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake[J]. Physics and Chemistry of the Earth 2006, 31: 356-364.
- [5] Potirakis S M, Minadakis G, Eftaxias K. Analysis of electromagnetic pre-seismic emissions using Fisher information and Tsallis entropy[J]. Physica A 2012, 391: 300-306.
- [6] Hayakawa M, Kasahara Y, Nakamura T, et al. On the correlation between ionospheric perturbations as detected by subionospheric VLF/LF signals and earthquakes as characterized by seismic intensity[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 2010, 72: 982-987.
- [7] Eftaxias K, Athanasopoulou L, Balasis G, et al. Unfolding the proce-

- ture of characterizing recorded ultra-low frequency ,kHz and MHz electromagnetic anomalies prior to the L' Aquila earthquake as pre-seismic ones-Part 1 [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences 2009 9(6):1953-1971.
- [8] Eftaxias K ,Balasis G ,Contoyiannis Y ,et al. Unfolding the procedure of characterizing recorded ultra-low frequency ,kHz and MHz electromagnetic anomalies prior to the L' Aquila earthquake as pre-seismic ones-Part 2 [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences , 2010 ,10:275-294.
- [9] 钱书清 ,任克新 ,吕 智. 伴随岩石破裂的 VLF、MF、HF 和 VHF 电磁辐射特性的实验研究 [J]. 地震学报 ,1996 ,18(3):346-351.
- Qian Shuqing ,Ren Kexin ,Lü Zhi. Experimental research of characteristics of VLF ,MF ,HF and VHF electromagnetic radiation accompanying with rock failure [J]. Acta Seismologica Sinica ,1996 ,18(3):346-351.
- [10] 曹惠馨 ,钱书清 ,吕 智. 岩石破裂过程中超长波段的电、磁信号和声发射的实验研究 [J]. 地震学报 ,1994 ,16(2):235-241.
- Cao Huixin ,Qian Shuqing ,Lü Zhi. Experimental research of long wavelengths electric and magnetic signal and acoustic emission in the process of rock failure [J]. Acta Seismologica Sinica ,1994 ,16(2):235-241.
- [11] He Xueqiu ,Nie Baisheng ,Chen Wenxue ,et al. Research progress on electromagnetic radiation in gas-containing coal and rock fracture and its applications [J]. Safety Science 2012 ,50:728-735.
- [12] Wang Enyuan ,He Xueqiu ,Wei Jianping ,et al. Electromagnetic emission graded warning model and its applications against coal rock dynamic collapses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2011 48(4):556-564.
- [13] He Xueqiu ,Chen Wenxue ,Nie Baisheng ,et al. Electromagnetic emission theory and its application to dynamic phenomena in coal-rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2011 48:1352-1358.
- [14] Frid V. EMR method for rock and gas outburst forecast [J]. Journal of Applied Geophysics ,1997 38(2):97-104.
- [15] Xu Jia ,Ma Fenghai ,Han Jun. Rockburst hazard assessment based on electromagnetic emission in Xingfu Mine [J]. Journal of Coal Science and Engineering (China) 2012 ,18(1):25-28.
- [16] 王恩元 ,贾慧霖 ,李 楠,等. 煤岩损伤破坏 ULF 电磁感应实验研究 [J]. 煤炭学报 2012 37(10):1658-1664.
- Wang Enyuan ,Jia Huilin ,Li Nan ,et al. Experimental study on ULF electromagnetic induction during coal and rock damage failure process [J]. Journal of China Coal Society 2012 37(10):1658-1664.
- [17] 李成武 ,解北京 ,杨 威,等. 煤冲击破坏过程中的近距离瞬变磁场变化特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报 2012 31(5):973-981.
- Li Chengwu ,Xie Beijing ,Yang Wei ,et al. Characteristics of transient magnetic nearby field in process of coal impact damage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2012 ,31(5):973-981.
- [18] Li Chengwu ,Wei Shanyang ,Wang Xueying ,et al. Experiment of dynamic property and transient magnetic effects of coal during deformation and fracture [J]. Journal of Coal Science and Engineering (China) 2012 ,18(3):258-261.
- [19] 李成武 ,许延超. 煤与瓦斯突出主要影响因素主成分分析 [J]. 煤矿安全 2007 38(7):14-17.
- Li Chengwu ,Xu Yanchao. The component analysis of mainly affecting factors of coal and gas outburst [J]. Coal Mine Safety 2007 38(7):14-17.
- [20] 单仁亮 ,程瑞强 ,高文蛟. 云驾岭煤矿无烟煤的动态本构模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报 2006 25(11):2258-2263.
- Shan Renliang ,Cheng Ruiqiang ,Gao Wenjiao. Study on dynamic constitutive model of anthracite of Yunjialing Coal Mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2006 25(11):2258-2263.
- [21] 黄朝军. 应力波作用下石灰岩的损伤与演化实验研究 [D]. 北京:中国矿业大学(北京) 2009:18.
- [22] Davies E D H ,Hunter S C. The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson on pressure bar [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids ,1963 ,11(2):155-179.
- [23] 李胜林 ,刘殿书 ,李祥龙,等. 75 mm 分离式霍普金森压杆试件长度效应的实验研究 [J]. 中国矿业大学学报 2010 39(1):93-97.
- Li Shenglin ,Liu Dianshu ,Li Xianglong ,et al. The effect of specimen length in 75 mm split Hopkinson pressure bar experiment [J]. Journal of China University of Mining and Technology ,2010 39(1):93-97.
- [24] 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.
- [25] 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 Xiaohui ,Zhang Ru ,Liu Jianfeng. Dynamic test study of coal rock under different strain rates [J]. Journal of China Coal Society , 2012 37(9):1528-1534.
- [26] 于亚伦. 高应变率下的岩石动载特性 [J]. 北京科技大学学报 , 1992 ,14(2):128-134.
- Yu Yalun. The dynamic behavior of magnetites and granite under high strain rates [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing ,1992 ,14(2):128-134.
- [27] 黎立云 ,徐志强 ,谢和平,等. 不同冲击速度下岩石破坏能量规律的实验研究 [J]. 煤炭学报 2011 36(12):2007-2011.
- Li Liyun ,Xu Zhiqiang ,Xie Heping ,et al. Failure experimental study on energy laws of rock under differential dynamic impact velocities [J]. Journal of China Coal Society 2011 36(12):2007-2011.
- [28] Wu Z ,Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis 2009 1:1-41.
- [29] 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.
- [30] 宋大钊. 冲击地压演化过程及能量耗散特征研究 [D]. 徐州:中国矿业大学 2012.