

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.02.010

基于声发射信号的煤岩界面识别研究*

张 强^{1,2,3} 张石磊¹ 王海舰¹ 赵 轲¹ 宋振铎⁴

(1. 辽宁工程技术大学 机械工程学院 阜新 123000; 2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室 大连 116023;
3. 重庆大学 机械传动国家重点实验室 重庆 400044; 4. 中国煤矿机械装备有限责任公司 北京 100011)

摘 要:为实现采煤机煤岩截割过程中滚筒高度的自动调节控制,提出一种基于声发射信号的煤岩界面动态识别方法,测试和提取不同煤岩截割比例条件下的声发射特征信号。采用时域分析方法得到不同工况下的时域指标,采用小波分析方法提取煤岩截割的声发射信号特征值,建立不同煤岩截割比例条件下声发射信号的最小隶属度函数,实现煤岩截割比例的实时在线监测。实验室截割实验测试结果表明,滚筒实际煤岩轨迹与截割煤岩轨迹之间差值的平均值、方差、标准差很小。实验结果验证了该识别系统的精确性与可靠性。

关键词:采煤机;煤岩识别;声发射信号;时域分析;小波分析;隶属度函数

中图分类号: TD67; TN911.73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Study on identification of coal-rock interface based on acoustic emission signal

Zhang Qiang^{1,2,3} Zhang Shilei¹ Wang Haijian¹ Zhao Ke¹ Song Zhenduo⁴

(1. College of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

3. Chongqing University, State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing 400040, China;

4. China National Coal Mining Equipment Co. Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract:To realize the automatic adjustment controlling the height of the roller in the cutting process of the shearer, a dynamic identification method of coal-rock interface based on acoustic emission signal is proposed to test and extract the acoustic emission characteristic signals. Using time-domain analysis method gets the time domain indexes under the different conditions, using wavelet analysis method extracts the coal-rock cutting acoustic emission signal characteristic value. The different coal-rock cut ratio under the condition of acoustic emission signal optimal membership function is established to dynamic monitoring coal and rock ratio, then the purpose of coal-rock interface identification is achieved. The results of laboratory tests show that there is little difference between the trajectory of the roller and the coal-rock, and the experimental results verify the accuracy and reliability of the recognition system.

Keywords:shearer; coal-rock interface; acoustic emission signal; time-domain analysis; wavelet analysis; membership function

1 引 言

采煤机是综采工作面的主要开采设备,采煤机的工作效率是决定整个煤矿产量与收益的关键^[1]。然而综采面的煤层走向复杂,在采煤机开采过程中势必会造成煤

岩的混合开采,影响煤炭的纯度,且夹矸和岩石的结构材质较硬,对采煤机的截齿造成严重磨损甚至失效,增加采煤成本,降低采煤机截割效率,不利于煤炭行业的长期发展^[2-3]。由于井下煤层走向复杂,其中的夹矸与岩石的分布具有随机性,没有具体的规律可循,因此如何快速有效地动态识别煤岩分界面,实现采煤机滚筒的自动调高控

制,成为当今煤炭行业亟待解决的问题^[4-5]。

煤岩界面的动态识别是实现采煤机滚筒自动调高和综采自动化的重要手段,更是保障有效避开截割过程中夹矸与岩石断层的关键技术。对此,国内外的专家学者们分别尝试了射线探测法、雷达探测法、粉尘检测识别法、振动测试法和光纤探测法等方法^[6]。王增才等人^[7]利用的射线探测法包括 γ 背散射法与天然 γ 射线法,为煤岩界面的识别提供了理论基础。王昕等人^[8]运用雷达探测法,结合雷达方程分析了雷达波在建立模型中的散射规律,提出了煤岩界面雷达回波强度的计算方法并以此为依据进行煤岩的识别。激光粉尘探测法是通过粉尘中煤与岩石成份含量之比来推断滚筒是否切入顶岩。该方法不能推断顶煤厚度,仅能识别截齿是否切入顶岩^[9-12]。刘俊利等人^[13]提出一种利用采煤机滚筒截割振动信号来进行煤岩界面辅助识别的方法,通过检测采煤机截齿,摇臂,调高油缸压力,转轴及机身的振动信号,经20分析处理来判断采煤机是否切割到岩石,从而识别出煤岩界面。由上分析可得,非接触式探测是解决煤岩识别问题的有效手段。鉴于声波探测在军事、医学、地震勘

探、海底探测等领域应用广泛^[14-16],本文提出了一种基于声发射信号的煤岩界面动态识别方法。通过实验室模拟实验,采用时域分析、频域分析的方法分析采煤机不同煤岩比例条件下截割的声发射信号,得到相应工况下的特征值样本,接着将这些样本作为采样参数建立隶属度函数,通过函数反推出不同信号下的煤岩比,从而确定煤岩界面分布,为煤岩识别研究提供了新的依据方法。

2 实验台构建

为实现煤岩界面动态识别过程中的声发射信号采集工作,搭建如图1所示的煤岩截割实验台,实验台所用的截割电机与蜗轮蜗杆减速器之间的传送方式采用传送带的连接方式,这是为了有效防止由于截割阻力过大导致截割电机堵转造成过载烧毁的现象;带有截齿的滚筒截割速度是通过变频器来调节截割电机的转速来实现;实验所用的蜗轮蜗杆减速器装备的减速比为38:1,可以达到降低采煤机滚筒的转速,增大滚筒的负载转矩的功能。

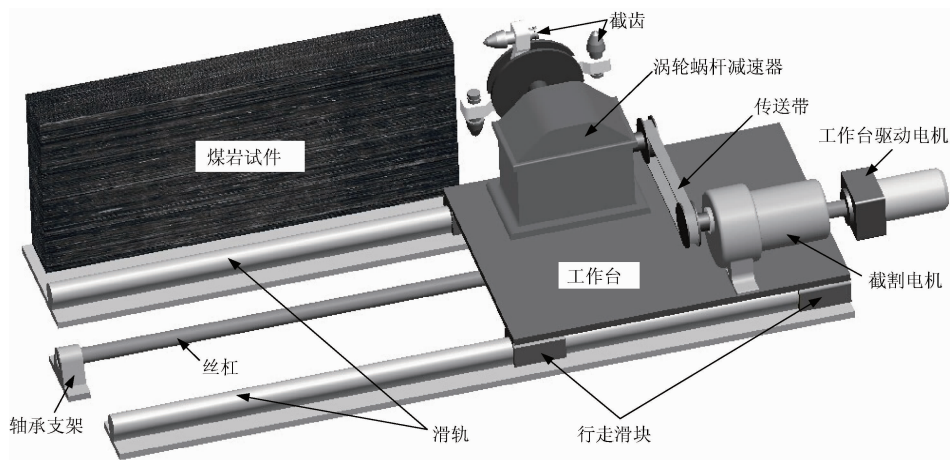


图1 煤岩截割实验台

Fig. 1 Experimental platform for coal-rock cutting

煤岩截割实验台由煤岩试件、截齿蜗轮蜗杆减速器、传送带、驱动电机、截割电机、行走滑块、滑轨等组成。根据实验材料相似原则,笔者采用沙子、水泥、煤块浇筑5块尺寸为600 mm×200 mm×500 mm的不同煤岩比例试件,将浇筑的材料均匀搅拌后放入准备好的不同比例模具中进行塑性以及干燥处理。实验截割滚筒直径为180 mm,驱动电机额定功率为100 W,额定电流为0.4 A,额定转速为30 r/min,输出转矩为300 kg·cm。声发射信号采用SAEU2S声发射系统进行采集。

3 数据测试与分析

3.1 声功率谱信号测试

在煤岩截割过程中,提取出可靠准确的声功率谱信号是决定实验可信与否的关键,在实验过程中,滚筒在截割煤和截割岩石时,由于煤岩的结构组织不同,采煤机的切割状态必然不同,随之接收到的声信号也会有较大差别^[17]。本文分别对煤岩比1:0、2:1、1:1、1:2、0:1五种实验条件下的声发射信号进行采集与分析,由于实验数据众多,各选取每种工况下一组声波信号,如图2所示。

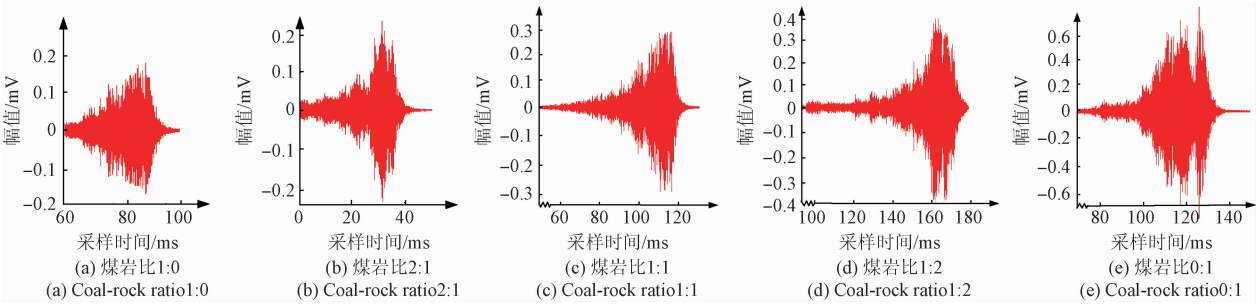


图 2 5 种工况下的声波信号
Fig. 2 Acoustic wave signals under five conditions

3.2 数据分析与处理

为实现声波信号由时域到频域的转换,将上述 5 组声发射信号进行快速傅里叶变换,图 3 所示为 5 组不同煤岩比例工况下经过傅里叶变换后的频谱图。

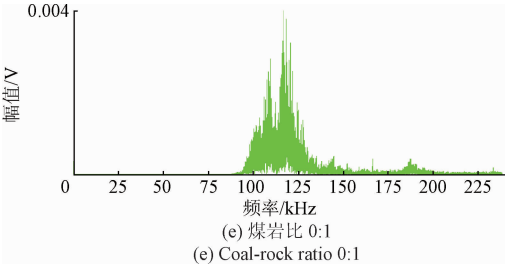


图 3 声发射信号频谱图
Fig. 3 Acoustic emission signal spectrum

由图 3 可知 5 组声发射信号主要分布在 100 ~ 200 kHz,并在 125 kHz 左右达到峰值,且随着煤岩比的降低,其幅值近似成线性变化,如图 4 所示。

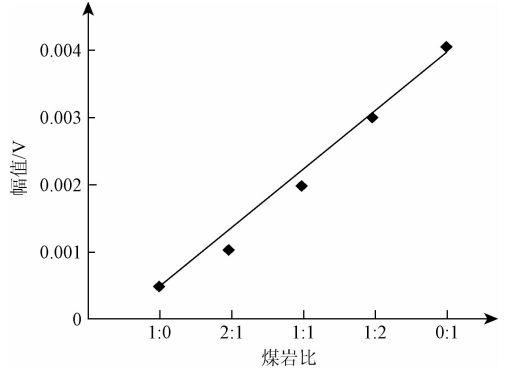
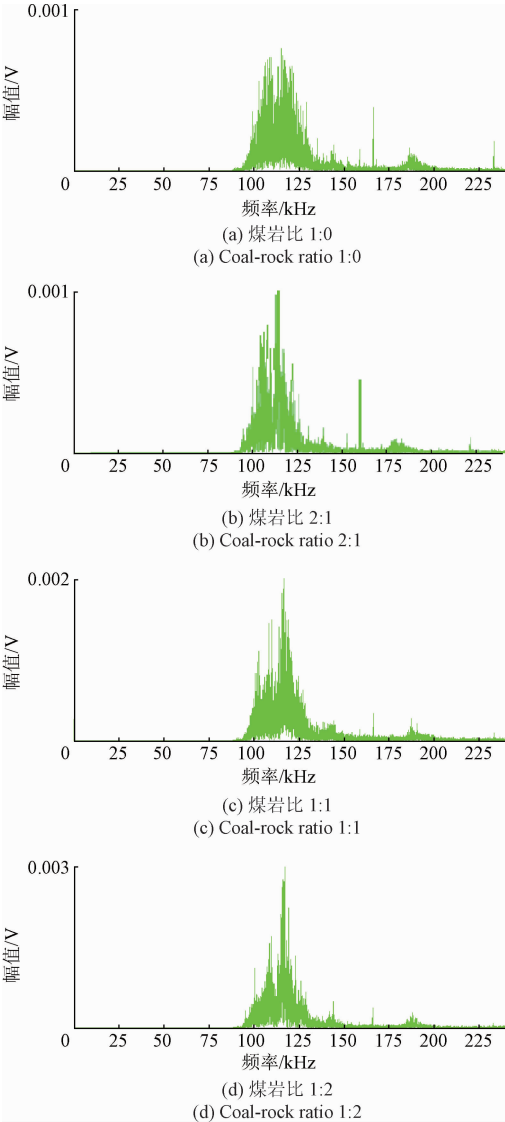


图 4 频谱幅值变化曲线
Fig. 4 Spectral amplitude variation curve

在实验测试中,声发射信号源错综复杂,需要对信号进行进一步去噪处理,因此,采用小波分析方法对煤岩截割特征信号进行特征提取。小波分析包含多分辨率分析和小波包分析两方面,多分辨率分析在处理信号的时候常对信号的低频部分进行分解,高频部分保持不变,因此,对在一些特定的时间或是特定的频率信号进行分析时,需要尽可能地提高频域分辨率。这时采用小波包分析可以有效克服多分辨率分析的局限



性,可以对信号更加精准的分析,无论是高频还是低频都可以进行多层面划分处理^[18]。将其表示为分解树的形式如图5所示。分解关系表示为 $S = d1 + d2 + d3 + a3$ 。

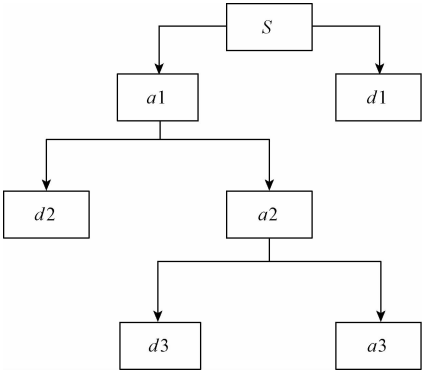
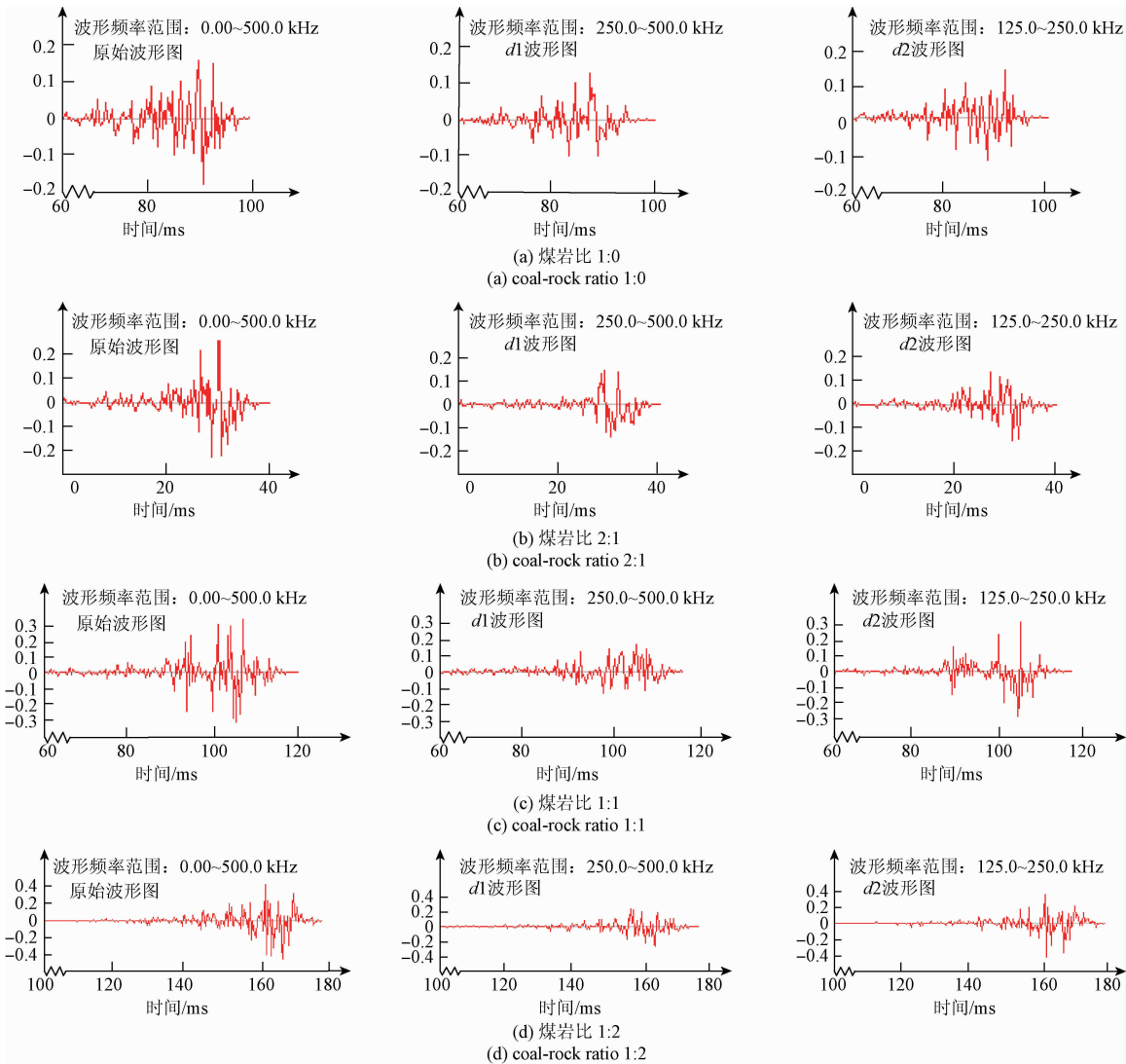


图5 小波包分解树

Fig. 5 Wavelet packet decomposition tree

对于一个确定的系统,当系统工作时,其对应的相频特性、幅频特性以及传递函数都是确定的,而本实验主要针对的是声信号的幅频特性,其主要表现为对各种频段的输入信号具有不同的增强和抑制作用,当输入信号的强度发生变化时,因为系统对一定频率部分有显著的增强作用,对另一部分有抑制作用,所以当输入信号发生变化,在频带相同的情况下其信号具有较大差别能量,转化为实际情况就是那些频带的信号强度变化敏感。

由于采用离散小波变量、并考虑到其噪声干扰较大、防止小波分解及重构时发生失真的现象,因此本次实验采用 Daubechies 小波函数,经过多次的相关实验确定,对实验所得声发射信号进行3层分解^[19]。因 $a3$ 、 $d3$ 波形图幅值很小都在0.1 mV以下不适从中提取特征值信号,故只列出分解后的原始声发射信号以及 $d1$ 、 $d2$ 波形图如图6所示。



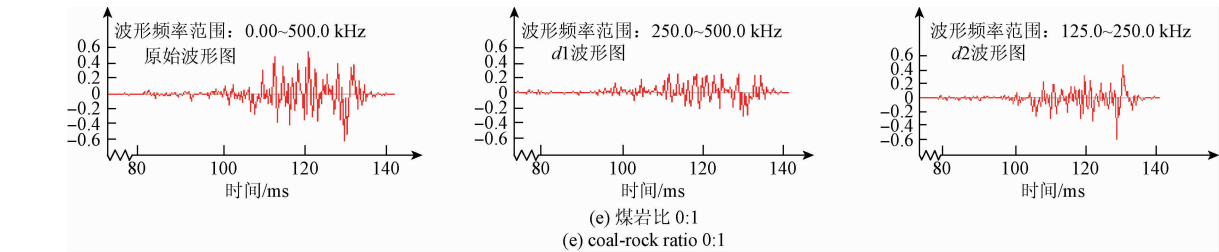


图 6 声信号小波分解后各尺度重构波形

Fig. 6 Reconstructed waveform of each scale after wavelet decomposition of acoustic signal

由图 6 分析可得, $d1$ 、 $d2$ 波形图幅值较大, 其所占能量相对较高, 所以对其进行特征值的提取是十分可靠的。根据图 6 提取特征值建立其数据信号的特征值样本如表 1 所示, 再根据这些特征样本值建立起声发射信号在不同煤岩比条件下的模糊隶属度函数模型。

表 1 声发射信号特征值样本值

序号	signal (mV)				
	煤岩比				
	1:0	2:1	1:1	1:2	0:1
1	0.186	0.251	0.327	0.382	0.415
2	0.175	0.246	0.318	0.371	0.409
3	0.163	0.235	0.301	0.365	0.405
4	0.157	0.224	0.289	0.357	0.401
5	0.151	0.218	0.274	0.349	0.396
6	0.145	0.207	0.266	0.341	0.391
7	0.141	0.199	0.259	0.336	0.388
8	0.138	0.187	0.251	0.331	0.381
9	0.134	0.174	0.244	0.326	0.376
10	0.131	0.162	0.237	0.319	0.371

3.3 隶属度函数模型构建

模糊熵是随机变量不确定性程度的一种度量, 在模糊理论当中它用来表示模糊集或模糊系统信息的模糊程度。模糊熵值越大则表示模糊集的模糊度越大, 熵值越小则表示模糊度越小^[20]。设模糊集 $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$ 的隶属度函数为 $\mu(t)$, t 取值为 0 或 1 时, 模糊集并无模糊性为分明集其模糊熵值为 0, 因此当 $t \in (0, 1)$ 时其模糊熵的函数表达式为:

$$F(T) = \frac{1}{n \ln 2} \sum_{i=1}^n [U(\mu(t_i)) + V(\mu(t_i))] \tag{1}$$

式中: $U(t) = t \ln t$, $V(t) = (1 - t) \ln (1 - t)$ 。

本文将煤岩截割比状态下的模糊集设为 $\{1: 0, 2: 1, 1: 1, 1: 2, 0: 1\}$, 将其用一个集合 $Q = \{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5\}$ 表示。对应的各模糊子集的隶属函数为 $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5$ 其隶属函数图如图 7 所示。

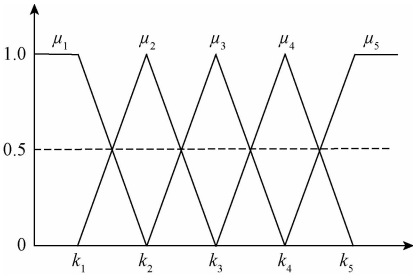


图 7 煤岩截割比例隶属度函数

Fig. 7 Membership function of coal-rock cutting ratio

依据最小模糊度原则, 在熵表达式(1)的基础上建立隶属度参数优化模型:

$$\begin{aligned} \min \quad & F(Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5) = \\ & \frac{1}{N \ln 2} \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^N [U(\mu_j(t_i)) + V(\mu_j(t_i))] + \\ & \frac{1}{N} \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^{N_j} [1 - \mu_j(t_{ij})] \end{aligned} \tag{2}$$

式中: N 表示模糊系统所有的样本特征值数目, N_j 表示域中 Q_j 里的样本数目; t_i 表示模糊系统中第 i 个样本值; t_{ij} 表示域中 Q_j 里的第 i 个样本值。

$$\mu_1(t) = \begin{cases} 1, & t \leq k_1 \\ \frac{k_2 - t}{k_2 - k_1}, & k_1 < t \leq k_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$
$$\mu_2(t) = \begin{cases} \frac{t - k_1}{k_2 - k_1}, & k_1 < t \leq k_2 \\ \frac{k_3 - t}{k_3 - k_2}, & k_2 < t \leq k_3 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$
$$\mu_3(t) = \begin{cases} \frac{t - k_2}{k_3 - k_2}, & k_2 < t \leq k_3 \\ \frac{k_4 - t}{k_4 - k_3}, & k_3 < t \leq k_4 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$\mu_4(t) = \begin{cases} \frac{t - k_3}{k_4 - k_3}, & k_3 < t \leq k_4 \\ \frac{k_5 - t}{k_5 - k_4}, & k_4 < t \leq k_5 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$
$$\mu_5(t) = \begin{cases} 1, & k_5 < t \\ \frac{t - k_4}{k_5 - k_4}, & k_4 < t \leq k_5 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

与式(1)相比,式(2)前半部分对应整个系统的模糊熵,这个部分可以在优化过程中使系统的模糊熵达到最小,从而减小系统的模糊度。后半部分在其模糊熵基础上增加了相应的约束相,因为隶属度为1时,是最理想的状态,而约束项 $1-\mu_j(t_{ij})$ 可以在降低系统模糊度的同时使各个单独的隶属度函数在各自论域中也达到最理想状态。因此建立优化模型后降低了系统整体模糊度,使每个样本值更加接近于它的实际域,更加精准的表述其隶属度函数^[21]。

通过式(2)的隶属度函数优化模型,依据表一特征样本值对隶属度函数 μ 进行 k 值计算,得到声功率谱特征参数的模糊隶属度函数如图8所示。

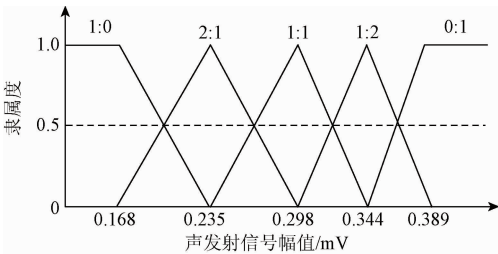


图8 声功率谱隶属度函数

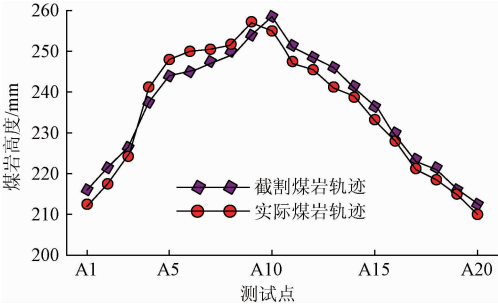


图9 煤岩截割轨迹对比

Fig.9 Comparison of coal-rock cutting trajectory

表2 测试点数据

Table 2 Test points data

测试点	差值/mm	测试点	差值/mm
A ₁	5	A ₁₁	6
A ₂	6	A ₁₂	4
A ₃	3	A ₁₃	6
A ₄	5	A ₁₄	3
A ₅	4	A ₁₅	5
A ₆	6	A ₁₆	3
A ₇	7	A ₁₇	5
A ₈	3	A ₁₈	4
A ₉	6	A ₁₉	3
A ₁₀	7	A ₂₀	4

经计算其平均值为4.75 mm、方差为1.88 mm、标准偏差为1.37 mm。由方差以及标准偏差可以看出,实验数据与平均值差异较小,说明截割煤岩的动态轨迹与实际轨迹基本一致。证明了基于声发射煤岩识别的动态识别系统的精确性与可靠性。

通过对声功率谱隶属度函数的分析,在煤岩截割过程中,本文控制声发射信号的幅值在0.344~0.389 mV,此时所截割的轨迹基本属于煤岩分割轨迹。

4 实验验证

为验证基于声发射信号煤岩动态识别系统的准确性,进行实验室的随机煤岩界面动态识别实验。根据相似性原理,选用煤壁600 mm×400 mm×100 mm内部随机浇筑岩石断层,通过实验室截割实验得到其煤岩轨迹与实际煤岩轨迹如图9所示。

选取轨迹中20个测试点,求两轨迹之间差值的绝对值如表2所示。



图10 截割实验图

Fig.10 Cutting experiment diagram

5 结 论

通过实验采集不同煤岩比例情况下的声发射信号,对信号进行时域分析,对声发射信号采用小波分析的方法提取特征值样本。依据最小模糊度原则建立不同煤岩比的隶属度函数模型,对其进行优化处理,提出一种基于声发射信号的煤岩界面动态识别系统。

通过实验室随机浇筑煤岩式样的截割实验,证明截割煤岩的实验轨迹与实际轨迹基本一致,验证基于声发射信号的煤岩界面动态识别系统的可行性与准确性。为煤岩界面识别的研究提供了新的理论方法。

参考文献

- [1] 方新秋,何杰. 煤矿无人工作面开采技术研究[J]. 科技导报,2008,26(9):57-61.
FANG X Q, HE J. Study on unmanned workface mining technology [J]. Science & Technology Review, 2008, 26(9):57-61.
- [2] 郭荣斌,赵秀才. 自动测试系统的发展趋势[J]. 国外电子测量技术,2014,33(6):1-4
GUO R B, ZHAO X C. Development trend of automatic test system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(6):1-4.
- [3] 郝清玉,朱元忠,陈健. 基于图像多小波变换的煤岩界面识别[J]. 工矿自动化,2015,41(2):50-53.
HAO Q Y, ZHU Y ZH, CHEN J. Coal-rock interface identification based on image multi-wavelet transformation[J]. Industry and Minc Automation, 2015, 41(2):50-53.
- [4] 张新,王正祥,武晨光,等. 煤岩界面识别技术研究[J]. 煤矿机械,2015,36(2):3-5.
ZHANG X, WANG ZH X, WU CH G, et al. Research on coal-rock interface recognition technology [J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(2):3-5.
- [5] 杨文萃,邱锦波,张阳,等. 煤岩界面识别的声学建模[J]. 煤炭科学技术,2015,43(3):100-103.
YANG W C, QIU J B, ZHANG Y, et al. Acoustic modeling of coal-rock interface identification [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(3):100-103.
- [6] 王冷. 基于模糊神经网络信息融合的采煤机煤岩识别系统[J]. 现代电子技术,2015,38(23):106-109.
WANG L. Coal petrography identification system for coal mining machine based on ANFIS and information fusion [J]. Modern Electronics Technique, 2015, 38(23):106-109.
- [7] 王增才,富强. 自然 γ 射线穿透煤层及支架顶梁衰减规律[J]. 辽宁工程技术大学学报,2006,25(6):804-807.
- [8] WANG Z C, FU Q. Attenuation of natural γ ray passing through coal seam and hydraulic support [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25(6):804-807.
王昕,丁恩杰,胡克想,等. 煤岩散射特性对探地雷达探测煤岩界面的影响[J]. 中国矿业大学学报,2016,45(1):34-41.
WANG X, DING EN J, HU K X, et al. Effects of coal-rock scattering characteristics on the GPR detection of coal-rock interface [J]. Journal of China University of Mining-Technology, 2016, 45(1):34-41.
- [9] YANG W C, WANG SH B. Coal-rock interface sensing technology applied for horizon control of mining shearers [C]. 2010 international conference on Electrical and Control Engineering, 2010:587-590.
- [10] 李晋惠,于亚琳,田军委. 多光路光散射扬尘检测方法研究[J]. 电子测量技术,2015,38(10):101-105.
LI J H, YU Y L, TIAN J W. Research on multilaser scattering dust detection method [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(10):101-105.
- [11] 孙彬,李兵. 一种量化的激光位移传感器倾角误差补偿模型[J]. 仪器仪表学报,2015,36(5):996-1004.
SUN B, LI B. A quantitative error compensation model angle of the laser displacement of the inclination sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(05):996-1004.
- [12] 高昊. 基于光散射原理的矿用激光粉尘浓度传感器[J]. 煤矿安全,2016,47(3):98-100.
GAO H. Mine-used laser dust concentration sensor based on light scattering [J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(3):98-100.
- [13] 刘俊利,赵豪杰,李长有. 基于采煤机滚筒截割振动特性的煤岩识别方法[J]. 煤炭科学技术,2013,41(10):93-95.
LIU J L, ZHAO H J, LI CH Y. Coal-rock recognition method based on cutting vibration features of coal shearers drums [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(10):93-95.
- [14] 郭世旭,刘胜,陈秀丽,等. 管道微小泄漏内检测近场声信号特性研究[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(6):834-844.
GUO SH X, LIU SH, CHEN X L, et al. Research on acoustic characteristic of the near field inside the pipe for small leakage detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(6):834-844.
- [15] 王慧晶,林哲,赵德有. 声发射技术在工程结构疲劳损伤监测中的应用和展望[J]. 振动与冲击,2007,

- 26(6):157-161.
WANG H J, LIN ZH, ZHAO D Y. Application and prospect of acoustic emission technology in engineering structural damage monitoring [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(6): 157-161.
- [16] 邹兵, 贾招弟, 李伟. 基于声发射技术的气体阀门内漏诊断[J]. 无损检测, 2016, 38(3): 56-59, 70.
ZOU B, JIA ZH D, LI W. Internal leakage diagnosis for gas valve based on AE technique [J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(3): 56-59, 70.
- [17] 于凤英. 基于遗传神经网络的煤岩界面识别方法的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
YU F Y. Research on the method of coal rock interface recognition based on genetic neural network [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007.
- [18] 赵丽娟, 刘旭南, 马联伟. 基于经济截割的采煤机运动学参数优化研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(8): 1490-1495.
ZHAO L J, LIU X N, MA L W. Optimization research on shearer's kinematic parameters based on economical cutting [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8): 1490-1495.
- [19] 张强, 王海舰, 井旺, 等. 基于模糊神经网络信息融合的采煤机煤岩识别系统[J]. 中国机械工程, 2016, 27(2): 201-208.
ZHANG Q, WANG H J, JING W, et al. Shearer's coal-rock recognition system based on fuzzy neural network information fusion [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(2): 201-208.
- [20] 张鑫, 牟龙华. 基于信息融合的矿山电网复合保护[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1947-1952.
ZHANG X, MU L H. Research on compound protection for mine power network based on information fusion [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(11): 1947-1952.
- [21] 张强, 毛君, 田大丰. 基于遗传算法掘进机截割头多目标模糊可靠性优化[J]. 煤炭学报, 2008, 12: 1435-1437.
ZHANG Q, MAO J, TIAN D F. Multi-objective optimization fuzzy reliability design for cutting head of roadheader based on genetic algorithm [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 37(11): 1947-1952.

作者简介



张强, 1980 年出生, 现为辽宁工程技术大学教授, 主要研究方向为矿山机械动态设计及监测技术。

E-mail: lgdix042@126.com

Zhang Qiang was born in 1980, and he is now a professor in Liaoning Technical University. The main research direction is dynamic design and monitoring of mining machinery.



张石磊, 1992 年出生, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为矿山机械检测技术

E-mail: 411417192@qq.com

Zhang Shilei was born in 1992, and he is a M. Sc. candidate in Liaoning Technical University. The main research direction is mining machinery detection technology.