



超磁致伸缩声波震源的时频特征与实测研究

王泽伦, 高洪鑫, 于师建, 王永申

引用本文:

王泽伦, 高洪鑫, 于师建, 等. 超磁致伸缩声波震源的时频特征与实测研究[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(5): 225–231.
WANG Zelun, GAO Hongxin, YU Shijian, et al. Study on time-frequency characteristics and field test of giant magnetostrictive acoustic wave seismic source[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(5): 225–231.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.05.028>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

槽波地震勘探研究进展

Progress in research of in-seam seismic exploration

煤田地质与勘探. 2020, 48(2): 216–227 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.02.032>

矿井超浅层高分辨率瞬变电磁探测技术

The high-resolution transient electromagnetic detection technology for ultra-shallow layer in coal mine

煤田地质与勘探. 2020, 48(4): 219–225 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.04.030>

复合煤层中夹矸对槽波探测解释断层落差的影响

Influence of parting in composite coal seam on interpretation of fault throw by channel wave seismic exploration

煤田地质与勘探. 2020, 48(3): 182–187 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.03.026>

基于NMR技术的超声波频率对煤体激励致裂效果的影响

Effect of NMR technology-based ultrasonic frequency on stimulated cracking of coal

煤田地质与勘探. 2019, 47(4): 38–44 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.007>

采煤工作面槽波相对透射系数层析成像技术

Tomography technique of relative transmission coefficient of in-seam wave in coal mining face

煤田地质与勘探. 2017, 45(3): 147–150 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2017.03.027>

文章编号: 1001-1986(2020)05-0225-07

超磁致伸缩声波震源的时频特征与实测研究

王泽伦¹, 高洪鑫¹, 于师建², 王永申³

(1. 辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 华电煤业集团有限公司, 北京 100035)

摘要: 宽频带、大功率、短余振声波震源是高分辨率探测大尺度复杂结构体的关键技术, 为了解决探测距离与其分辨率的矛盾问题, 采用超磁致伸缩材料制作的声波发射器作为震源, 研制了一种新的声波探测仪器。该震源中心频率为 5 kHz, 激励电压 300~600 V, 具有辐射声功率大、余振短(3.5 个周期)、频带宽(1~3 kHz)的特性; 其最大的优点是每次激发的声波信号一致性好, 可以采用单点多次激发, 通过多次叠加的数据处理技术提高信噪比, 较好地解决了声波探测距离与分辨率的矛盾, 并成功地应用于煤矿采场顶煤厚度探测。现场探测结果表明: 大功率声波探测系统能够有效提取 4~7 m 煤岩交界面的反射波信号, 借助于小波多分辨分析信号处理方法, 有效地提高了采场顶煤厚度探测的精度及其可靠性, 为顶煤厚度精确探测提供了一条有效途径。



移动阅读

关 键 词: 超磁致伸缩材料; 声波; 小波分析; 煤厚; 探测

中图分类号: P631.4⁺³⁷ 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2020.05.028

Study on time-frequency characteristics and field test of giant magnetostrictive acoustic wave seismic source

WANG Zelun¹, GAO Hongxin¹, YU Shijian², WANG Yongshen³

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China; 2. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
3. Huadian Coal Group Co., Ltd., Beijing 100035, China)

Abstract: Wide-band, high-power and short-residual acoustic wave sources are the key technology for high-resolution detection of large-scale complex structures, in order to solve the contradiction between detection distance and resolution, a new acoustic wave detection instrument is developed by using the acoustic transmitter made of giant magnetostrictive material(GMM) as the source. The focal center frequency is 5 kHz, and the excitation voltage is 300-600 V, it has the characteristics of large radiated sound power, short residual vibration(3.5 cycles) and frequency band width(1-3 kHz), which solves the problem of the high resolution acoustic wave detection. Its greatest advantage is that the acoustic signal generated each time has good consistency, and can be excited by single point and multiple times. The signal-to-noise ratio can be improved by multiple superposition data processing technology. The problem of high-resolution acoustic detection of M-scale structure body has solved the contradiction between acoustic detection distance and resolution, and has been successfully applied to the detection of top coal thickness in coal mine stope. The field survey results show that the high power acoustic wave detection system can reliably extract 4-7 m of reflected wave signals at the interface of deep coal and rock; The wavelet analysis results show that with the help of wavelet multi-resolution analysis to enhance resolution, the accuracy and reliability of top coal thickness detection in stope are improved, it provides an effective way for accurate detection of top coal thickness.

Keywords: giant magnetostrictive material; acoustic wave; wavelet analysis; coal thickness; detection

声波探测技术是超浅层工程地质勘查、岩土工程、工程岩体稳定性评价等方面的一种重要无损检

测技术手段^[1]。声波是一种由声源振动产生的具有一定频率在探测介质中传播的一种机械波, 声波探

收稿日期: 2020-07-06; 修回日期: 2020-08-09

第一作者简介: 王泽伦, 1994 年生, 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 研究方向为电器智能化理论与技术. E-mail: 13831513682@163.com

引用格式: 王泽伦, 高洪鑫, 于师建, 等. 超磁致伸缩声波震源的时频特征与实测研究[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(5): 225-231.

WANG Zelun, GAO Hongxin, YU Shijian, et al. Study on time-frequency characteristics and field test of giant magnetostrictive acoustic wave seismic source[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(5): 225-231.

测的分辨率取决于声波振动的频率和余振大小，频率越高、余振越小则其分辨率越高。根据声波在介质中传播时其吸收系数与频率平方正比关系的特性，频率越高声波穿透的距离越短，即声波探测的距离与其分辨率是一对矛盾，因此，震源问题成为最关键的问题。对煤矿采场顶煤厚度而言，一般在3~10 m^[2]，要求声波探测仪器能够接收到煤层顶界面的反射波；对煤层底板岩层采动破坏深度而言，根据以往井下钻探经验，通常在10~20 m^[3-4]范围，个别情况甚至更大，期望声波能够穿透这样的裂隙岩体，而且能反映出岩体裂隙连通特征和底板岩层的稳固程度，才能满足现场实际探测需要^[5]；建筑上10~30 m长度的大跨度混凝土结构件比较多，要求声波能穿透结构件并能分辨出其内部是否存在空洞、裂隙等缺陷^[6]。在这样的探测尺度的前提下，以往的探测仪器只能采用人工锤击的办法，这种激振方法在坚硬的岩石中有可能激发出2 kHz的声波信号，但在煤、泥岩这样的软岩中激发的声波信号一般不超过500 Hz，且每次激发其信号的一致性很差，无法满足分辨率的要求。因此，研制一种宽频带、大功率、短余振声波震源对工程岩体探测具有十分重要的意义。

因用压电陶瓷材料制作的声波换能器的发射频率与功率是矛盾的，即若要求发射功率大，势必体积大，进而导致发射器的共振频率降低，余振加大。若要求提高频率，减小余振，则其功率又必然受到限制，所以单从频率上讲可以满足测试需求，但其发射功率低，在大跨度声波探测中因发射功率低、穿透距离短而不能使用^[7]。

超磁致伸缩材料也称稀土超磁致伸缩材料，是继稀土永磁材料、稀土高温超导材料之后，出现的一种新的高技术功能材料，是一种新型的高机电转换效率、大应变的磁致伸缩材料。磁致伸缩大小以其相对伸缩值 $\lambda = \Delta L / L$ 表征， λ 称为磁致伸缩系数。饱和时的磁致伸缩系数，称为饱和磁致伸缩系数，记为 λ_s 。传统的磁致伸缩材料，其 λ_s 值为(0.1~1.0)×10⁻⁴，而超磁致伸缩材料的 λ_s 值为(1.0~2.5)×10⁻³，此外，超磁致伸缩材料的磁(电)致伸缩值、机电耦合因子和能量密度等参数均远大于传统的磁(电)致伸缩材料^[8]，超磁致伸缩材料的上述特性是研制宽频带、大功率、短余振声波震源的基础。

基于此，本文采用超磁致伸缩材料制作的声波发射器作为震源，研制声波探测仪器，较好地解决了声波探测距离与分辨率的矛盾。通过大跨度混凝土结构件和顶煤厚度的探测实例，其分辨率能够达到要求，实际应用效果较好。

1 超磁致伸缩声波震源

1.1 震源的结构与特点

超磁致伸缩材料(Giant Magnetostriuctive Materials, 简称GMM)^[8]具有耐热和显著的磁致特性。GMM、压电陶瓷(PZP)和纯镍(Ni)3种材料特性的对比见表1。

表 1 GMM、PZP 和 Ni 性能比较^[8]

Table 1 Comparison of the performances of GMM, PZP and Ni^[8]

材料名称	最大应变	能量密度/(J·m ⁻³)	速度/(m·s ⁻¹)
Ni	3.4×10 ⁻⁵	130	4 770
PZP	2.6×10 ⁻⁴	2×10 ³	2 790~3 490
GMM	>10 ⁻³	2×10 ⁴	649

由表1和文献[9-11]可知GMM具有下列优点：

- ① 磁致伸缩效应的最大应变是纯镍的30倍，压电陶瓷的4倍；
- ② 能量密度比PZP至少大10倍，比Ni至少大150倍；
- ③ 材料的能量转换效率为46%~59%，而压电陶瓷为23%~51%；
- ④ 耐热居里温度在300℃以上，远比常规的压电陶瓷要高，而且高温下能保持稳定的物理特性；
- ⑤ 工作频带宽度在低频几百赫兹到超高频。

因此，超磁致伸缩材料适合制作频率低于10 kHz的大功率声波震源，而且抗压强度和承载能力大，适合煤矿井下环境使用。

超磁致伸缩声波震源主要由防爆防水外壳、手把、超磁棒材、动力驱动线圈、振动输出探头、调整压块、防爆接线盒等组成。其机械结构如图1所示。

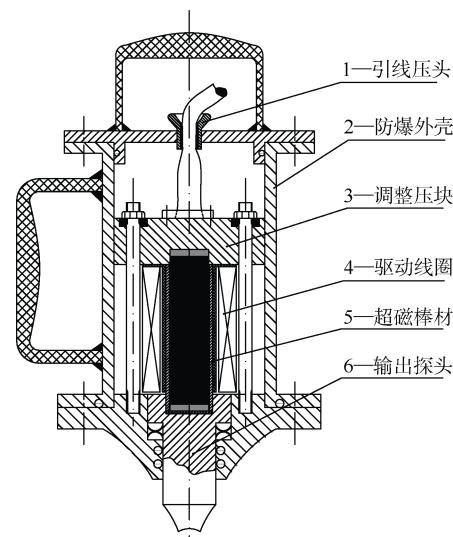


图 1 超磁致伸缩声波换能器结构

Fig.1 Structure diagram of giant magnetic acoustic wave transducer

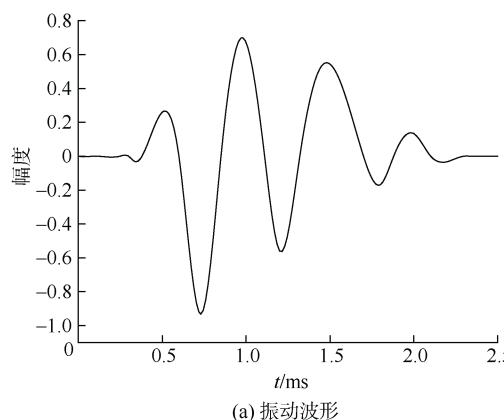
调整压块与超磁棒材之间的薄层耦合材料, 通过调整螺栓的预紧力来增减调整压块的作用力及贴合程度, 达到超磁棒材处于最佳工作特性和稳定状态。输出探头设计成锥形, 其材料是一种特殊金属, 具有聚集辐射的特性, 而且能够达到和介质的充分耦合。

驱动线圈是发射器的动力来源, 工作时向其施加 100~800 V 的脉冲电压, 超磁棒材在交变磁场作用下产生机械伸缩动作, 以声波的形式辐射能量。

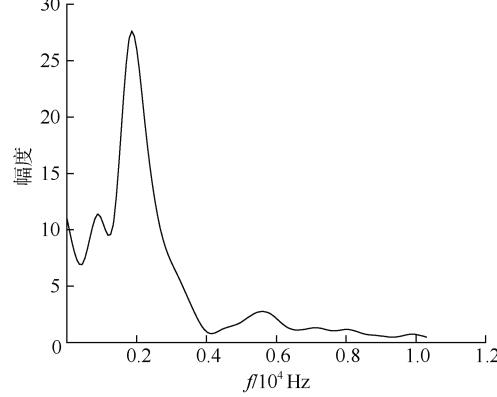
超磁致伸缩声波震源显著特点是适合在特定高频率范围内产生高强度超声, 穿透距离大; 因其共振频率偏低, 所以与共振频率高的同类材料制作的震源相比检测精度略显偏低^[8-9], 但仍然比电火花震源或者击打震源有明显优势。

1.2 震源的时频特性

为了了解超磁致伸缩声波震源的时频特性^[12],



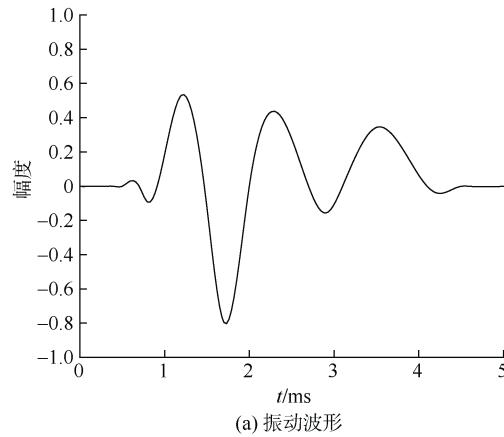
(a) 振动波形



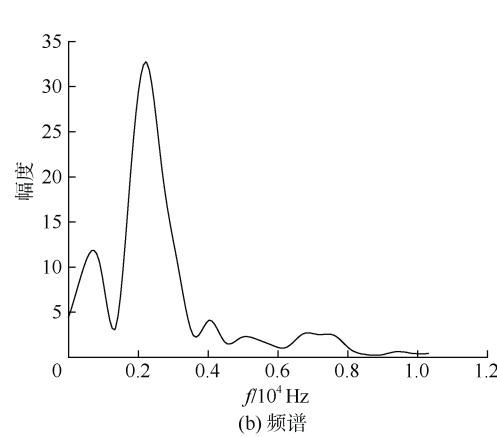
(b) 频谱

图 2 试验 1 声波振动波形及其频谱

Fig.2 Acoustic vibration waveform and frequency spectrum of test 1



(a) 振动波形



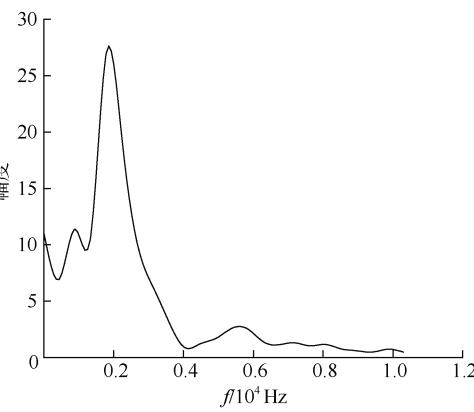
(b) 频谱

图 3 试验 2 声波振动波形及其频谱

Fig.3 Acoustic vibration waveform and frequency spectrum of test 2

理论研究表明, 识别 4~7 m 煤层厚度反射波所需要的子波主频为 1 000~700 Hz^[14], 可见大功率超磁致伸缩声波震源的时频特性适合于煤层厚度探测。

在现场做了 2 个试验, 试验 1 是震源与接收换能器相隔 15 cm, 穿透空气介质; 试验 2 是穿透煤块, 煤块长度 0.66 m, 发射和接收换能器端面涂黄油耦合。图 2 为试验 1 声波振动波形及其频谱, 图 3 为试验 2 声波振动波形及其频谱; 试验采集到的振动波形图, 纵坐标均做了归一化处理。由图 2 和图 3 的振动波形和频谱可以看出, 该震源具有以下特性: ① 余振短 2 个试验的声波振动波形相似, 振动 3.5 个周期即衰减到零, 而压电陶瓷震源余振一般不少于 10 个周期^[15]; ② 频率高 穿透空气介质, 能量在 1 800 Hz 取得极大值; 穿透煤体介质, 能量在 2 200 Hz 取得极大值。2 个试验的频谱特性表明, 震源的激发频率与激发介质的振动速度相关, 煤的声波速度(实测为 2 200 m/s)远大于空气的声波速度, 在煤体表面(黄油耦合)激发的声波振动频率明显大于自由激发的声波振动频率。



(b) 频谱

2 声波穿透的模型试验

近年来建筑行业出现了大量的超高超大混凝土

建筑物，对其主体结构质量检测和评估而言，采用无损伤探测技术是发展的必然趋势。本次采用的大功率、长透距声波探测仪器，由硬件、数据采集和数据处理三部分组成。

硬件部分包括主机、声波发射器、声波接收器和供电系统；数据采集部分包括参数设置模块、数据采集控制模块等；数据处理部分包括数据曲线显示模块、数学处理模块。

声波发射器(防爆型)由大功率超磁致伸缩材料制作，主频 5~8 kHz；声波接收机(防爆型)采用 d_{33} 压电晶体陶瓷制作^[15-16]，其阻抗特性显著降低，机电耦合系数高，满足高灵敏度、宽频带的要求，同时也满足大动态范围、短余振的要求。

探测仪器主机采用奔腾处理器，彩色操作显示界面，发射电压 500 V，瞬时发射功率 10 kW，发射频率 2~80 kHz，频带宽度 8 Hz~200 kHz。

图 4 为超磁致伸缩声波检测仪测试原理，图 5 为混凝土结构体实物照片。选择了一个废弃水泥厂建筑结构作为研究对象，横梁尺寸有 6.12、8.26、10.08、12.68 m 等，本次对这几种尺寸的横梁都进行了探测，从实测信号可知：横梁尺寸越大，穿透信号越弱。

穿透混凝土试验方案：发射器先放在混凝土梁体右端，接收器放在混凝土左端，发射超声信号，接收器显示第 1 道波形；然后，发射器和接收器同向平移 5 cm，再发射超声信号，接收器显示第 2 道波形。如此循环往复，对穿 12 次，形成 12 道波形；发射器和接收器对调，再用同样的方法对穿 12 次，再形成 12 道波形，总计形成 24 道波形。

以穿透 12.68 m 混凝土结构体的声波图像为例(图 6)，声波穿透混凝土后到达接收器，通过示波器显示出比较清晰有规律的波形，可以辨识出 P 波和 S 波，而且信号波形质量可靠。通过测定的 P 波波速和 S 波波速，可估算出混凝土抗压强度($R_b = 0.344v^{3.146}$)^[17]、

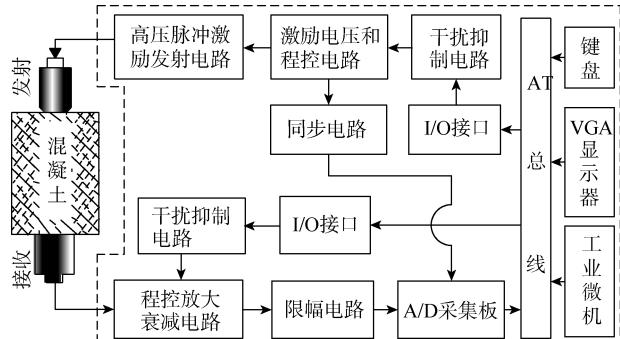


图 4 超磁致伸缩声波检测仪测试原理

Fig.4 Test schematic of giant magnetostrictive acoustic wave detector



图 5 混凝土结构体实物照片

Fig.5 The photo of concrete structure

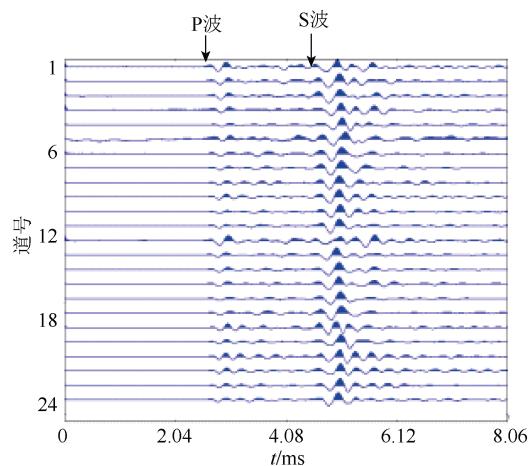


图 6 现场测试声波波形

Fig.6 Acoustic wave diagram of field test

计算弹性模量和泊松比 2 个力学参数，对结构体质量能够作出科学的评价。

本次试验结果反映出超磁致伸缩声波，明显具有功率大、穿透力强、频率高的特点。

3 顶煤厚度探测实例

3.1 方法原理

目前，煤矿井下顶煤厚度探测一般采用钻探法(直接法)，费时费力，周期长，工作量大。工作面顶煤厚度探测能够为提高放顶煤回收率和控制放煤质量提供依据，目的是尽量放出全部煤炭又不放出过多矸石，提高经济效益；回采巷道顶煤厚度探测为选择合适的巷道支护方式提供科学依据，便于顶板安全管理。

近年来煤矿开采智能化蓬勃发展，智能化采掘工作面对顶煤探测提出了更高的要求：要跟随采煤机实时、动态、精细探测放顶煤厚度，为指导采煤机正确割煤的透明化地质信息提供技术支撑^[18]。综放开采顶煤厚度快速、准确探测一直是急需解决的问题。

大多数情况下顶板煤层和岩层属于松散破碎、裂

隙发育的岩石, 而且一般要求的探测厚度 5~10 m。所以需要大功率、宽频带震源才能甄别到来自煤岩交界面的偏弱反射波。具备了可分析的反射波以后, 因实测信号是波形复杂的混合信息综合表现, 也不能直接判断出反射波。在声波探测中反射波到达接收器时, 接收信号有所突变。若采取有效的信号处理方法, 提取信号突变点时域特征, 然后识别煤岩交界面的反射波初至时刻, 就可计算声波行走时间。所以利用检测突变点的方法使得对顶煤厚度的声波探测成为可行方法。

根据以前学者的研究, 可以采用极小偏移距法进行顶煤厚度探测^[19], 因其偏移距仅仅几十厘米, 与几米、十几米的煤厚相比, 其带来的误差可以忽略不计, 现场测试是符合实际应用的。

煤矿井下对综放工作面和回采巷道顶煤厚度探测, 实际测试中要考虑探测设备布置空间条件、井下机电设备限制条件和煤层倾斜方向等影响因素, 通常偏移距取值 20~30 cm, 因这个值远远小于要探测的顶煤厚度, 由三角函数关系可知接近于垂直反射法, 即自激自收法^[20]。设 h 为煤厚, x 为偏移距, 则反射波时距方程为:

$$t = \frac{\sqrt{4h^2 + x^2}}{v} \quad (1)$$

式中: t 为入射波(反射波)波程时, s; h 为煤层的厚度, m; x 为偏移距, m; v 为煤层中声波速度, m/s。因 $x \ll h$, 故有:

$$h = \frac{vt}{2} \quad (2)$$

时间 t 值通过对测试信号采用小波分析后确定。波速 v 值如果掌握不准对顶煤厚度探测精度影响会较大, 需要在现场对声速进行多点标定。合理的方式是根据煤矿井下煤层变化情况, 一般以一个区段的范围(煤矿计算工作面采出率的单元)临时确定实际声速。

设煤层厚度为 h , 煤层密度和波速分别为 ρ_1 、 v_1 ; 顶板岩层的密度和波速分别为 ρ_2 、 v_2 。根据弹性波理论, 煤岩交界面垂直入射的反射系数 R 由下式计算^[21]:

$$R = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \quad (3)$$

式中: $\rho_1 v_1$ 为煤层的波阻抗, 煤层密度一般在 1.6 g/cm³ 以下, 波速为 1 800~2 200 m/s; $\rho_2 v_2$ 为顶板岩石的波阻抗, 伪顶或直接顶岩石的密度 2.2 g/cm³ 以上, 波速 3 000~4 000 m/s。

由此可见: 煤岩交界面是一个良好的反射界面,

反射法探测顶煤厚度是具备理论基础的。

3.2 实测结果与讨论

短时傅里叶变换不能区分许多瞬间变化的信号, 也就是只能在一个分辨率上进行; 小波分析在时域和频域都可以表征局部信号, 即突变点, 可以提取出信号的特征, 即能从信号中提取有效信息, 优于短时傅里叶变换的^[22]。这是目前大家采用小波多分辨率分析的原因。

试验地点选择一个典型的综采放顶煤工作面的回采巷道和工作面运输道上方, 实测信号与小波分解如图 7 所示。 $s(t)$ 为信号的实际接收波形, 反映了原始波形特征。经过试验分析比较兼顾频带划分、时域紧支撑和算法效率等, 采用 db4 小波基对信号进行四层分解。四层分解与原始信号关系如下:

$$s(t) = a_4(t) + d_4(t) + d_3(t) + d_2(t) + d_1(t) \quad (4)$$

式中: $s(t)$ 为信号的实际接收波形; 用小波变换提取信号有效特征, 需要圈定每一层对应的频率范围, $a_4(t)$ 为第四层分解的低频分量, 它表征出信号低频特征; $d_4(t)$ 、 $d_3(t)$ 、 $d_2(t)$ 、 $d_1(t)$ 分别为第四层到第一层分解的高频分量特征, 分别表示第四层到第一层的高频信息细节。

由图 7 分析可知, 能量强和频率高的直达波信号首先出现, 而来自煤岩交界面的反射波应叠加在直达波后续出现的能量较强的低频波上。反射信号 $s(t)$ 能量较小, 所以仅根据 $s(t)$ 无法分辨出反射波的接收时刻。 $a_4(t)$ 是低通滤波器输出的波形, 但只是一个关于实测信号 $s(t)$ 的轮廓。由图 7 可以看出, 首先出现的高频信号直达纵波和横波的能量主要集中在 3.0 ms 以内范围。在 4.5 ms 以后 d_4 分量能大致显示一个反射波包络, 但是由于并不十分明显, 所以无法使用。在 5~6 ms 范围 d_3 分量出现了一个明显的小波震动, 这说明反射波的信号在这时体现出来。由上述分析可知, 反射波振动频率主要分布在 d_3 频段内, 能量集中。在 d_3 分量, 顶板煤岩交界面反射波最为明显, 此时可以进行分辨。 d_2 、 d_1 分量表示本次分解的最高频分量, 而往往噪声的频率非常高, 所以可以认为 d_2 、 d_1 分量以高频噪声为主, 无法看出有用信息, 但是由于信号刚刚接收到时存在一些突变, 所以可以通过 d_2 、 d_1 分量看出信号刚接收到的时刻。

综上所述, 根据对小波 d_1 — d_4 分量的综合分析可知, 顶板煤岩交界面的反射波首次到达时间为 5.7 ms。测试前标定的煤层速度为 2 200 m/s, 利用式(2)计算出顶煤探测厚度为 6.27 m。经高位瓦斯巷开槽验证, 测点处煤层真实厚度 6.33 m, 探测结果

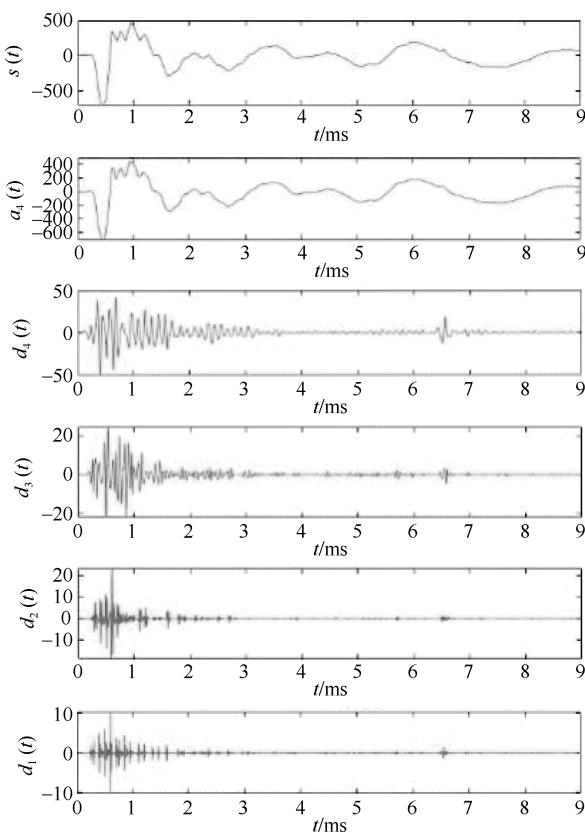


图 7 实测顶煤厚度探测信号及小波分解

Fig.7 Decomposition diagram of the detection signal of the top coal thickness and wavelet

误差仅为 0.9%。因煤矿井下对顶煤厚度探测精度要求不是十分高，超磁致伸缩声波换能器震源探测精度能够满足煤矿井下应用的需求，并高于井下钻探靠返渣肉眼判断精度。

井下探测点顶煤结构如图 8 所示，由此可知顶煤由暗淡煤、半暗煤、半亮煤和暗淡煤组成。而且煤层直接顶为粉砂岩，不存在伪顶或煤岩互层直接顶，有利于形成反射波。

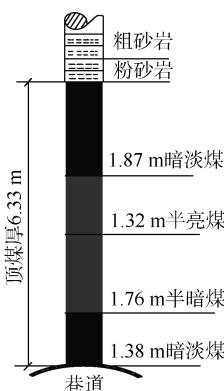


图 8 顶煤小柱状图

Fig.8 Small column diagram of the top coal

总之，将超磁致伸缩声波探测系统在顶煤厚度探测中，通过高能量大功率激发可以获得煤岩交界

面反射波信号；借助于小波多分辨率分析信号处理能够加强煤岩交界面弱反射波的分辨能力，可以大幅度提高分析精度；是提高顶煤厚度探测分析精度的有效手段。

4 结论

a. 超磁致伸缩声波震源具有发射功率大、频带宽、短余振、一致性好等优点，可有效解决了传统声波检测只能适用于小尺度结构体的问题，是大跨度(几米到几十米)结构体高分辨率探测中较为理想的震源。

b. 该技术可以有效探测煤矿井下采场顶煤厚度，借助小波多分辨分析增强分辨率，提高了采场顶煤厚度探测的精度及其可靠性，从而为顶煤厚度精确探测提供了一条有效的非接触式探测方法。通过技术改进，该方法可推广应用于跟随采煤机实时、动态探测放顶煤厚度，为解决采场顶煤厚度探测这一难题提供了新的方法。

请听作者语音介绍创新技术成果

等信息，欢迎与作者进行交流



OSID 码

参考文献(References)

- [1] 李平, 杜军. 浅底层剖面探测综述[J]. 海洋通报, 2011, 30(3): 344–350.
LI Ping, DU Jun. Review on the probing of sub-bottom profile[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(3): 344–350.
- [2] 朱国维, 王怀秀, 刘盛东. 声波探测综放面顶煤厚度的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 1997, 25(12): 17–20.
ZHU Guowei, WANG Huaixiu, LIU Shengdong. Experimental study on acoustic detection of top-coal thickness in fully-mechanized top-coal caving face[J]. Coal Science and Technology, 1997, 25(12): 17–20.
- [3] 施龙青, 徐东晶, 邱梅, 等. 采场底板破坏深度计算公式的改进[J]. 煤炭学报, 2013, 38(增刊 2): 299–303.
SHI Longqing, XU Dongjing, QIU Mei, et al. Improved on the formula about the depth of damaged floor in working area[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(Sup.2): 299–303.
- [4] 许延春, 谢小峰, 董检平, 等. 在相似模拟试验中利用超声波检测技术探测底板破坏深度[J]. 煤矿开采, 2016, 21(1): 7–11.
XU Yanchun, XIE Xiaofeng, DONG Jianping, et al. Ultrasonic testing of floor breakage depth on similar simulation[J]. Coal Mining Technology, 2016, 21(1): 7–11.
- [5] 程学丰, 刘盛东, 刘登宪. 煤层采后围岩破坏规律的声波 CT 探测[J]. 煤炭学报, 2001, 26(2): 153–155.
CHENG Xuefeng, LIU Shengdong, LIU Dengxian. Sound-wave CT detection for failure patterns of surrounding rock after mining[J]. Journal of China Coal Society, 2001,

- 26(2): 153–155.
- [6] 简文彬, 简洪钰. 声波探测技术判别某水电站坝址区岩体缺陷[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(6): 1053–1056.
JIAN Wenbin, JIAN Hongyu. Exploration of rock mass disfigurement for a hydropower station dam site by acoustic wave test[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(6): 1053–1056.
- [7] 于师建. 复杂结构声波电磁波层析成像方法和应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
YU Shijian. Method and application of acoustic and electromagnetic wave tomography for complex structures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [8] 肖柏勋, 刘明贵, 肖文治. 一种新型的工程岩体探测震源: 超磁致伸缩声波发射器[J]. 地学前缘, 1996, 3(1/2): 198–202.
XIAO Baixun, LIU Minggui, XIAO Wenzhi. Ultra-magnetostriuctive sonic generator: A new vibration source for detecting rock mass quality[J]. Earth Science Frontiers, 1996, 3(1/2): 198–202.
- [9] 程久龙, 于师建, 宋扬, 等. 煤层底板破坏深度的声波CT探测试验研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(6): 576–580.
CHENG Jiulong, YU Shijian, SONG Yang, et al. Detection of the failure depth of coal seam floor by acoustic wave computer tomography[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6): 576–580.
- [10] 曾庚鑫. 超磁致伸缩功率超声换能器理论分析与实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
ZENG Gengxin. Theoretical analysis and experimental study of the giant magnetostriective power ultrasonic transducer[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [11] 陈旭玲, 朱如鹏, 陈阳. 多场耦合下超磁致伸缩材料特性与应用综述[J]. 机械传动, 2016, 40(10): 181–184.
CHEN Xuling, ZHU Rupeng, CHEN Yang. Review of performance and application of giant magnetostrictive materials under the multi-field coupling[J]. Mechanical Transmission, 2016, 40(10): 181–184.
- [12] 房善想, 曾露平, 初永臣. 稀土超磁致伸缩超声换能器的研制与试验[J]. 电加工与模具, 2019(6): 61–65.
FANG Shanxiang, ZENG Luping, CHU Yongchen. The development and experiment of rare-earth giant magnetostrictive ultrasonic transducer[J]. Electric Machining and Mould, 2019(6): 61–65.
- [13] 张明明, 梁利喜, 蒋少龙. 不同孔隙结构碳酸盐岩对声波时频特性的影响[J]. 断块油气田, 2016, 23(6): 825–828.
ZHANG Mingming, LIANG Lixi, JIANG Shaolong. Influence of different pore structures of carbonate rock on time and frequency characteristics of acoustic wave spread[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(6): 825–828.
- [14] 赵协广. 煤厚探测数值模拟与信号小波分析研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2004.
ZHAO Xieguang. Simulation of thickness of top coal detection and signal wavelet analyzing research[D]. Qingdao : Shandong University of Science and Technology, 2004.
- [15] 程院莲, 鲍鸿, 李军, 等. 压电陶瓷应用研究进展[J]. 中国测试技术, 2005, 31(2): 12–14.
CHENG Yuanlian, BAO Hong, LI Jun, et al. Research progress in applications of piezoelectric ceramic[J]. China Measurement Technology, 2005, 31(2): 12–14.
- [16] 王天资, 周志勇, 李伟, 等. 高温压电振动传感器及陶瓷材料研究应用进展[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(6): 1–4.
WANG Tianzi, ZHOU Zhiyong, LI Wei, et al. Progress in research and application of high temperature piezoelectric vibration sensors and piezo ceramic materials[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(6): 1–4.
- [17] 吴丰收, 卢松. 声波CT在箱梁底板质量评价应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(增刊1): 314–318.
WU Fengshou, LU Song. Application of sound wave ct technique in evaluating the quality of box girder floor[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(Sup.1): 314–318.
- [18] 程建远, 覃思, 陆斌, 等. 煤矿井下随采地震探测技术发展综述[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 1–9.
CHENG Jianyuan, QIN Si, LU Bin, et al. The development of seismic-while-mining detection technology in underground coal mines[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3): 1–9.
- [19] 于师建, 刘家琦. 煤岩界面弱反射波小波多分辨分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3224–3228.
YU Shijian, LIU Jiaqi. Wavelet multi-resolution analysis of weak reflected wave from the interfaces of coal seam and strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3224–3228.
- [20] 于师建, 王宗胜, 刘延欣. 小波多尺度分析在煤厚探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(5): 70–72.
YU Shijian, WANG Zongsheng, LIU Yanxin. Application of wavelet multiresolution analysis to detecting thickness of coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(5): 70–72.
- [21] 黄忠来, 张建中. 利用探地雷达频谱反演层状介质几何与电性参数[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1381–1391.
HUANG Zhonglai, ZHANG Jianzhong. An inversion method for geometric and electric parameters of layered media using spectrum of GPR signal[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1381–1391.
- [22] 张迅, 赵宇, 阮灵辉, 等. 基于小波变换分析箱梁振动噪声的时频特性[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(1): 109–117.
ZHANG Xun, ZHAO Yu, RUAN Linghui, et al. Time-frequency characteristics of box-girder vibration and noise based on wavelet transform[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(1): 109–117.