

Study on the Characteristics of Acoustic Emission Signals Transmitted through Waveguide Rod in a Simulation of Deep Well Water

Feng Wang¹, Zhen Lv¹, Bing Liu¹, Chong Chen¹, Xiangbin Kong², Musen Li^{1,3}

¹Shandong Engineering Research Centre for Superhard Materials, Zoucheng

²Zoucheng Seismological Bureau, Zoucheng

³School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan

Email: wzzf_cn@163.com

Received: Jan. 21st, 2013; revised: Feb. 25th, 2013; accepted: Mar. 6th, 2013

Copyright © 2013 Feng Wang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The waveform and spectroscopy characteristics of acoustic emission signals generated by the broken lead tests through the cylindrical rod shape of waveguide in a simulation of deep well water have been studied in this article. The attenuation regulations of the acoustic emission signals in the water-acoustic coupling system have also been discussed. The results show that the maximum amplitude, duration time, ringing count and energy of the acoustic emission signals through the cylindrical rod waveguide in the simulation of deep well water were lower than that of the acoustic emission signals only through the waveguide rod. The former signals show an obvious frequency dispersion phenomenon and its frequency band energy is mainly in the fourth and fifth bands.

Keywords: Acoustic Emission Signal; Simulation of Deep Well Water; Waveguide Rods; Time-Domain Waveform; Frequency-Domain Spectroscopy

在模拟深井水中经波导杆传播的声发射信号特征研究

王 风¹, 吕 震¹, 刘 兵¹, 陈 冲¹, 孔祥斌², 李木森^{1,3}

¹山东省超硬材料工程技术研究中心, 邹城

²邹城市地震局, 邹城

³山东大学材料科学与工程学院, 济南

Email: wzzf_cn@163.com

收稿日期: 2013 年 1 月 21 日; 修回日期: 2013 年 2 月 25 日; 录用日期: 2013 年 3 月 6 日

摘 要: 本文对由断铅产生的声发射信号在模拟深井水中经圆柱形波导杆传播的波形、波谱特征进行了实验研究, 并探究了声发射信号在水-声耦合系统中的衰减规律。结果表明, 在模拟深井水中经波导杆传播的声发射信号比单一波导杆传播声发射信号的最大幅值、持续时间、振铃计数、能量等均相应减小, 而且声发射信号发生明显的频散现象, 其频率段能量主要分布在第四、五波段。

关键词: 声发射信号; 模拟深井水; 波导杆; 时域波形; 频域波谱

1. 引言

地震因其频发性和破坏性, 成为人类面临的严重自然灾害之一。但是, 人类至今尚未完全掌握地震的

孕育和发生规律, 地震预报仍然是国际上未能攻克的重大学难题。因此, 研究新的地震活动信息实时采集方法, 对地震活动信息进行科学表征、计算和分析,

探索地震的孕育和演变规律,为地震的短临预报提供科学依据和定量判据,具有十分重要的现实意义。邹城市地震局 2004 年在岳庄建立了一个地震监测站,该站主要由一口深 800 米水井改造而成,处于峰山断裂带的支一和支二小断层间。自 2004 年以来积累的大量水位监测资料显示,该井所记录到的水位固体潮曲线规律性比较好,对地下应力响应灵敏,且有较好的放大功能。课题组拟以此深井井水作为耦合介质,基于水-声耦合方法和合理的波导杆,通过联接区域地质结构与声发射传感器,采用声发射动态无损检测技术建立新型地震波实时监测、采集和处理系统。在前期实验阶段,实验室在模拟深井水中,通过波导杆进行了声发射信号传播的基本特征实验研究,为水-声耦合检测地震波信号奠定了重要的实验依据。

2. 实验原理和方法

2.1. 声波在波导杆中的传播

在声发射检测中,对于高温高压、特殊器具、液态物质等,不能直接将传感器耦合到其表面进行检测,采用波导杆辅助检测技术可以完成声发射检测^[1-4]。选用的波导杆长度 L 与直径 d 的比值应大于 10,同时材料均匀且各向同性,并服从虎克定律。在波导杆一端施加的声信号产生的振动位移很小,在纵向振动时,波导杆的端面保持为平面,应力均匀分布在每一个截面上。因此,波导杆可以认为是一个有限长细杆,满足纵波在细杆中的传播方程^[5]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中 u 是声能, t 是传播时间, x 是传播距离, C_0 是常数。

声波在细杆中传播时,声波能量的一部分将通过内摩擦、热传导及散射等物理过程转化为热能。因此,波在传播中其强度和振幅都将逐渐减小。声波沿 x 轴传播一段距离 x 后,平面波的振幅、强度分别按下式衰减^[6]:

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad (2)$$

$$I = I_0 e^{-2\alpha x} \quad (3)$$

式中 A_0 、 I_0 、 α 均为常数。

声波在传播过程中,随着波导杆长度的变化,通

过垂直于波传播方向任意截面 dS 时声波的能量流为^[6]:

$$P = \int_S dp = \int_S I \cdot dS \quad (4)$$

对其取时间的平均值,可以得到声波的平均能量流表示式为:

$$\bar{P} = \int_S \bar{I} \cdot dS \quad (5)$$

对于简谐波而言,

$$I = \frac{1}{2} \rho u \omega^2 A^2 \quad (6)$$

国际单位是 W/m^2 。

在波导杆端面进行断铅实验,产生的平面简谐波以速度 μ 在波导杆中传播,则垂直于传播方向的某一截面的平均能量流为:

$$\bar{P} = \bar{I} S = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 \mu S \quad (7)$$

式中 ω 为声波的角速度。

对于截面半径为 r 的圆柱型波导杆而言,截面积 $S = \pi r^2$,则声波在到达某一截面的振幅为:

$$A = \frac{1}{\omega r} \sqrt{\frac{2\bar{P}}{\rho \mu \pi}} \quad (8)$$

由式(8)可以看出,在平均能量流 $\bar{P}$ 一定的情况下,声波到达某一截面时其振幅与波导杆的半径 r 、声波的角速度 ω 成反比。

2.2. 模拟深井水-声耦合实验

本实验采用直径 0.5 mm 的铅芯,铅芯伸出长度为 2.5 mm,铅芯端与波导杆或模拟深井井壁成 30° 夹角,然后均匀用力压断铅芯。断铅产生的声信号沿着波导杆传递,并被声发射传感器接收、记录。假如每次断铅所产生的声信号能量相同,由式(2)、(3)、(8)可以推出声信号经过波导杆传递到达某一截面时的幅值、波强。波导杆越长,声波被吸收的能量就越大,声波到达某一截面时的幅值、波强就越小。

本实验所用波导杆均为直径 25 mm 的 45#钢,长度分别为 20 cm、40 cm、60 cm、80 cm、100 cm。传感器为北京声华兴业科技有限公司生产的 SR150 M 型压电陶瓷传感器,前置放大器为增益 40 dB,采用

DS2-8A 型全波形声发射检测仪进行声发射信号的记录和分析。

实验分两部分完成：一是单一采用波导杆进行检测，波导杆的一端与声发射传感器耦合，在另一端的端面圆心处进行断铅；二是采用不同长度的圆柱形波导杆，在模拟深井水条件下进行声发射信号检测，模拟试验装置如图 1 所示。

为确定在模拟深井水中、经波导杆传播的断铅声发射信号基本特征，将直接在长度为 20 cm 波导杆一端面圆心的断铅声发射信号特征参数作为对比参照，以此对比分析模拟深井水条件对直接检测的断铅声发射信号的影响^[7]。具体实验如下：

1) 将直径 25 mm、长 20 cm 的波导杆一端与传感器耦合，在其另一端的端面圆心处进行断铅，然后记录声发射信号的波形，并提取相关的波形参数。

2) 在将直径 25 mm、长度分别为 40 cm、60 cm、80 cm、100 cm 的波导杆放进模拟深水井的井筒中，波导杆水面以上部分为 20 cm，波导杆水面以下部分分别为 20 cm、40 cm、60 cm、80 cm，并使传感器保持距断铅产生的声源 100 cm。在模拟水井底部圆周固定一位置进行断铅，然后记录声发射信号的波形，并提取相关的波形参数。

3) 用 Matlab 软件对采集的声发射信号进行小波分析，并作出时域波形和频域波谱图，进行波形特征的纵向和横向比较。

3. 实验结果与分析

3.1. 声发射信号的波形特征

由表 1 断铅实验采集的波形数据(多次实验重复性较好)可知，与直接经单一波导杆传播的断铅声发射信号相比，模拟深井水中经波导杆传播的断铅声发射信号波形的最大幅值、持续时间、振铃计数、能量等

均相应减小。而随波导杆入水深度的增加，波形数据只呈现略微增加的趋势，这是由于波导杆与水之间的接触面积增大的缘故。由图 2(a)、图 3(a)可以看出，两种对比的实验波形相近，说明在水 - 声耦合系统中能够有效接收到经模拟深井水传播的声发射信号。

模拟深井水中经波导杆传播的断铅声发射信号与单一波导杆传播的断铅声发射信号，其波形都表现为典型的突发型信号。前者波形较后者波形在时间轴上衰减较快，这是由于经单一波导杆传播的波形有纵波和横波，纵波在前横波在后，横波和纵波之间有一个到时差(图 2 有标注)，声信号较为完整。而模拟深井水中经波导杆传播的断铅信号只有纵波，故表现为时间轴上幅值低、衰减快。

3.2. 声发射信号的频谱特征

由图 2(b)、图 3(b)可以看出，模拟深井水中经波导杆传播的断铅声发射信号发生了明显频散现象。而经单一波导杆传播的断铅信号则不明显。这与模拟深水井环境较为复杂有关，因断铅信号在水和井壁、水

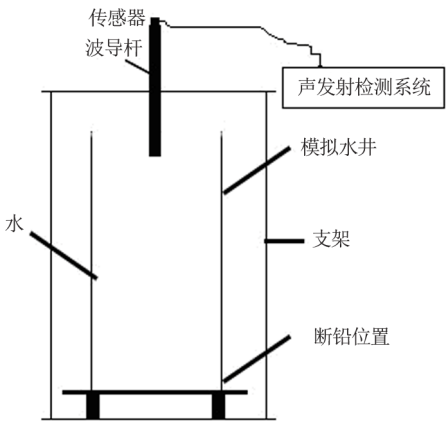


Figure 1. Experimental apparatus of acoustic emission signals transmitted through waveguide rod in a simulation of deep well water
图 1. 模拟深井水中经波导杆传播声发射信号的实验装置示意图

Table 1. Characteristic parameters of acoustic emission signals transmitted through waveguide rod in a simulation of deep well water
表 1. 模拟深井水中经波导杆传播的声发射信号特征参数

波导杆长度/(cm)	幅度(mV)	持续时间(uS)	上升时间(uS)	振铃计数	上升计数	能量(mV·mS)
20(波导杆端面圆心断铅)	9550.79	35367.67	285.33	771	35	24635.08
40	462.34	4084.67	29.00	78	3	276.31
60	535.89	6395.33	490.33	203	35	509.09
80	533.45	7588.00	409.33	174	14	524.13
100	545.65	10978.00	411.33	609	32	875.91

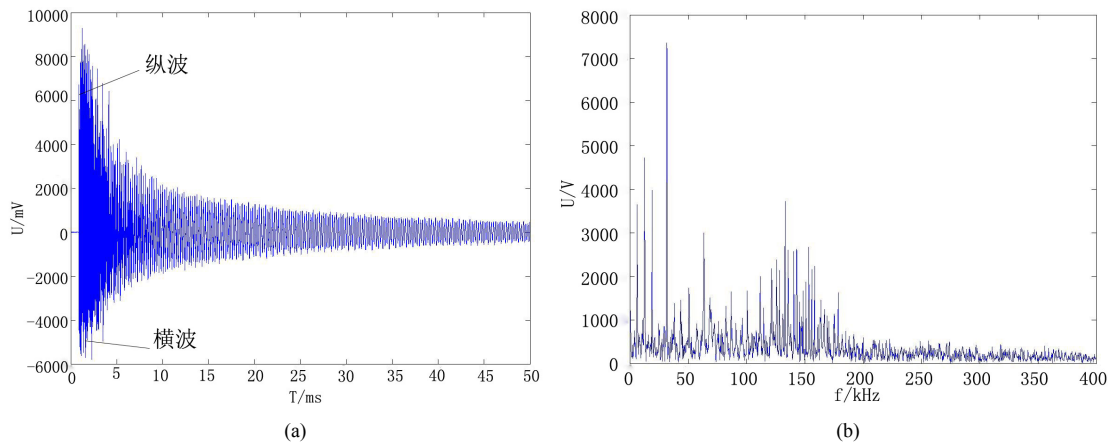


Figure 2. Time-domain waveform (a) and frequency-domain spectroscopy (b) of break lead on center of section when the length of the waveguide rod is 20 cm

图 2. 20 cm 波导杆端面圆心断铅的时域波形(a)和频域波谱(b)

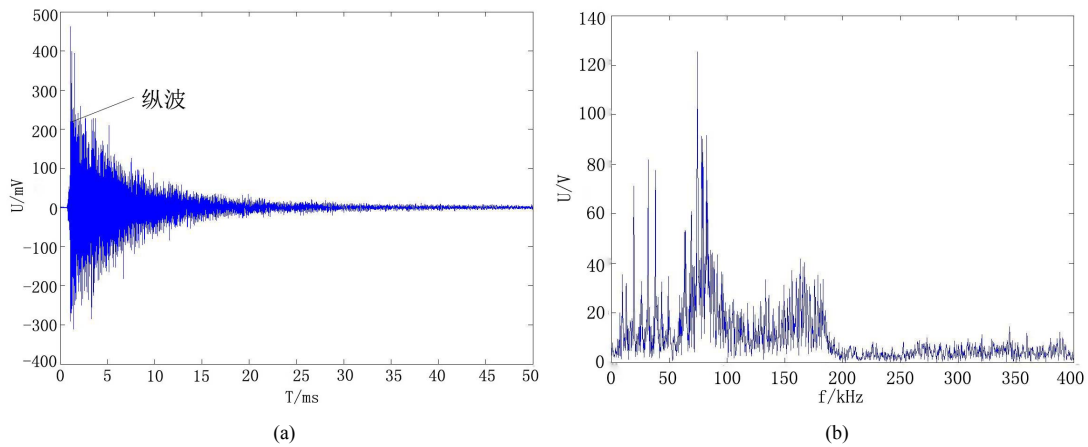


Figure 3. Time-domain waveform (a) and frequency-domain spectroscopy (b) of break lead on circumference of bottom when the length of the waveguide rod is 40 cm in a simulation of deep well water

图 3. 模拟深井水中经 40 cm 波导杆传播井底断铅的时域波形(a)和频域波谱(b)

和波导杆界面会形成多次反射或折射, 改变了波的频率。而断铅信号的波速依赖于波的频率, 从而导致信号的幅频和功率谱展宽, 在幅频谱图上则表现出波的频散。

3.3. 声发射信号的频率段能量分布

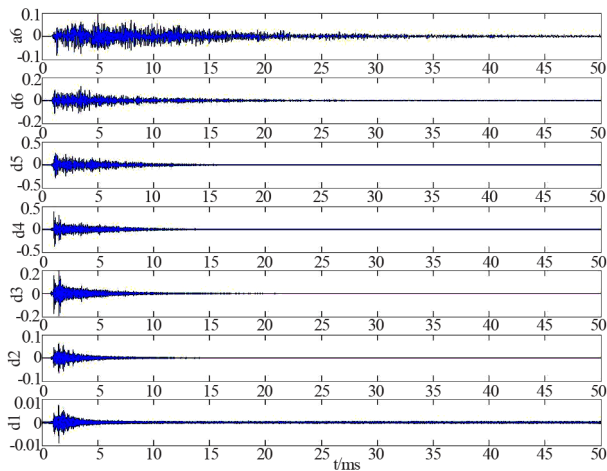
由图 2、图 3 可以看出, 声发射信号频率在 50~200 kHz 范围内的幅值较高, 但不能分清某个频率下信号的幅值情况。应用 Matlab 软件的小波分析程序, 采用小波函数 db5 对断铅声发射信号进行 6 级小波分解, 可以看到声发射信号在某个时间段、频率段上幅值变化情况。在各分解尺度中, 每个尺度的信号都表示一定频率范围内的信号。其中, a6 为信号的第 6 层低频近似部分, 反映了声发射信号的变化趋势; 而 d1~d6

层为细节部分, 反映了信号高频成分的组成和变化规律^[8]。图 4 为 20 cm 波导杆端面圆心断铅产生的声发射信号在各尺度下分解的重构波形信号及其所对应的频谱、频段能量。图 5 为在模拟深井水中经波导杆传播声发射信号经分解后的各频带所占能量比例。

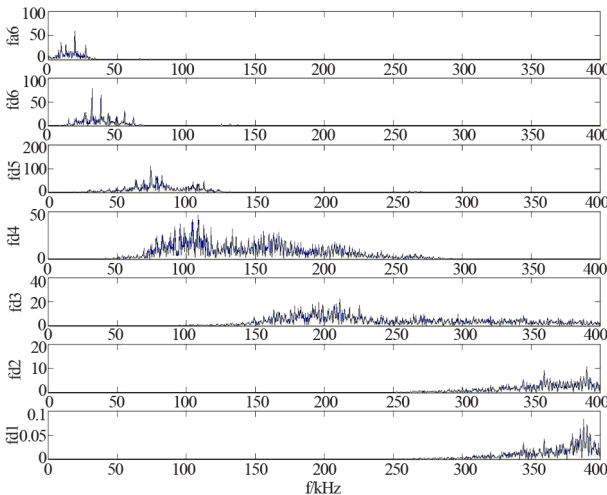
在图 5 中, 1~7 分别代表分解信号 a6 和 d1~d6。可以看出, 不同尺度下分解信号所占的能量不同。单一波导杆端面圆心断铅产生的声发射信号的频率段能量主要集中在第四波段; 而模拟深井水经波导杆传播的声发射信号频率段能量主要集中在第四、五波段。

4. 结论

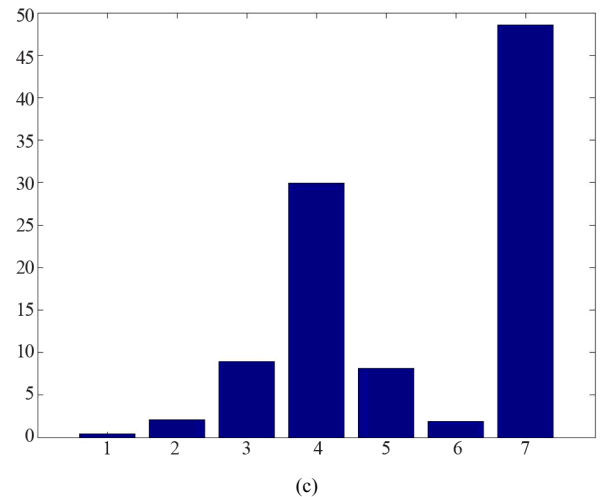
1) 在模拟井水中经波导杆传播声发射信号比单一波导杆传播声发射信号的最大幅值、持续时间、振



(a)



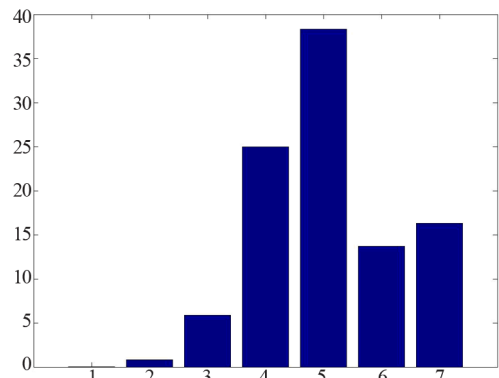
(b)



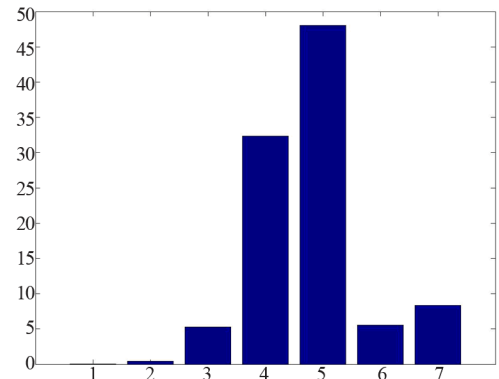
(c)

Figure 4. Reconstructed waveform (a), spectroscopy (b) and frequency band energy (c) of wavelet decomposition signal of break lead on center of section when the length of the waveguide rod is 20 cm

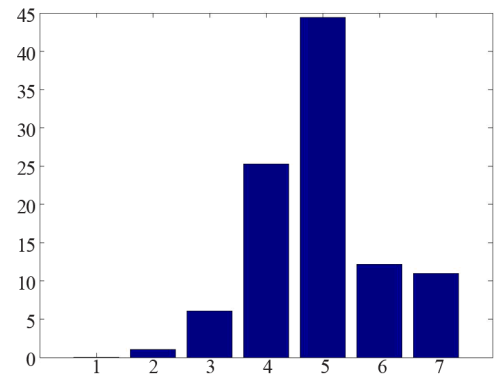
图 4. 20 cm 波导杆端面圆心断铅声发射信号经小波分解后各尺度的重构波形(a)、频谱(b)、频段能量(c)



(a)



(b)



(c)

Figure 5. Frequency band energy of wavelet decomposition signal in each scale of acoustic emission signals transmitted through different waveguide rod in a simulation of deep well water: (a) 40 cm; (b) 60 cm; (c) 80 cm

图 5. 模拟深井水中不同长度波导杆传播声发射信号经小波分解后各尺度的频段能量: (a) 40 cm; (b) 60 cm; (c) 80 cm

铃计数、能量等均相应减少。在模拟深井水中，随波导杆入水深度的增加，波形数据呈现略微增加的趋势，这是波导杆与水之间接触面积增大的缘故。

2) 在模拟深井水中经波导杆传播声发射信号发生明显的频散现象，这是由于信号在水和井壁、水和波导杆界面会形成多次反射或折射所致。

3) 在模拟深井水中经波导杆传播声发射信号频率段能量主要集中在第四、五波段;而单一波导杆圆心断铅产生的声发射信号频率段能量主要集中在第四波段。

参考文献 (References)

- [1] 蒋仕良. 波导杆对声发射信号的影响[J]. 无损检测, 2006, 28(1): 51-52.
- [2] 袁振明. 声发射技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [3] 李善春, 戴光等. 波导杆中声发射信号传播特性实验[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(5): 65-68.
- [4] M. Fantozzi, E. Fontana. Acoustic emission technique the optimum solution for leakage detection and location on water pipelines. 15th World Conference on Nondestructive Testing, Rome, 15-21 October 2000.
- [5] J. L. 罗斯, 著, 何存富, 吴斌, 王秀彦, 译. 固体中的超声波[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [6] 张海澜. 理论声学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [7] 李伟, 郭福平. 波导杆中声发射源传播特性实验研究[J]. 化工机械, 2007, 34(4): 179-183.
- [8] 张平, 施克仁, 耿荣生等. 小波变换在声发射检测中的应用[J]. 无损检测, 2002, 24(10): 436-439, 442.