

冲击混响法溶洞探测初步试验

赵亚军，阎玉舜，林维正

(同济大学声学研究所，上海 200092)

摘要：提供一种区别于通常地矿应用的测声时差的新的溶洞声学测试方法—冲击混响法。通过有无溶洞两个模型的声学试验，对测量数据进行时域分析和时频分析，得到混响衰减系数和混响持续时间两个参数，结果表明：两个模型的混响衰减系数和混响持续时间都存在明显差异，空心模型的混响衰减系数较实心模型小，而混响持续时间则比实心模型大。因而为方便快捷地判断有无溶洞的冲击混响法提供了试验依据。

关键词：溶洞；声学探测；混响衰减系数；混响持续时间

中图法分类号：TB52+9

文献标识码：A

文章编号：1000-3630(2008)-03-0473-05

Primary test of cavern detection by impact reverberation method

ZHAO Ya-jun, YAN Yu-shun, LIN Wei-zheng

(Acoustics Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A new cavern detection method of measuring impact reverberation which is different from the geological method of measuring interval transit time is provided. Through the experiments of two acoustic models, one is hollow and the other is solid, the measured data are analyzed in time and time-frequency domains. Two parameters are given as reverberation attenuation coefficient and reverberation duration. The results show that, the reverberation attenuation coefficients and reverberation durations of two models are obviously different from each other. The reverberation attenuation coefficient of the hollow model is smaller than that of the solid one, and the reverberation duration of the hollow model is greater than that of the solid one. This provides an experimental basis for the impact reverberation method which can easily and quickly to judge whether a cavern exists.

Key words: cavern; acoustic detection; reverberation attenuation coefficient; reverberation duration

1 引言

探测地下溶洞，对防止煤矿灾难事故（如瓦斯突出、透水事故等）的发生具有重大意义。瓦斯突出即瓦斯从溶洞中喷出；透水事故则是因为打通了未知含水洞体。

关于矿山灾害地质预报工作，国内外对此进行了多年研究并取得一定进展，其中采用声学方法的有：美国利用标准微震技术^[1]、俄罗斯利用声发射法^[2]、国内也有报道采用电阻、应力、声时差等综合地球物探

法。但这些方法都不是直接对溶洞进行探测，而是对灾害前一些异常声学现象的探测。岩溶矿区地质构造预报工作的重点应是对洞穴的超前探测，而声发射属于被动检测，声时差法在复杂的地质情况下也难以适用。

本文不采用以往单纯测量声时差的方式，而是检测其混响特性。

对检测数据进行时域分析和时频分析，得到混响衰减系数及混响持续时间两个参数。将无溶洞地质区域的这两个参数作为基准（无溶洞地质区可由其他方法判定），若同一矿区有限范围内（十几米至几十米）被探测地质区域的这两个参数与基准参数有显著差异，则可初步判断被测区域有可能存在溶洞，这可称为跟踪比对法。由于选择测试条件相近的同一地区进行比对，故此法可消除其他因素的影响。基准参数地

收稿日期：2007-12-19，修回日期：2008-01-28

作者简介：赵亚军(1979-)，男，江苏人，博士研究生，研究方向为超声。
通讯作者：赵亚军，E-mail:yjzhao@mail.tongji.edu.cn

质区域的确定也是可变的,以保证跟踪的可比性。

2 声学探测溶洞模拟试验

振动(声)在地层中传播,其传播特性与地层构造有关。遇有较大溶洞,产生反射甚至多次反射而形成混响。混响的衰减量、衰减时间与混响区域体积及溶洞界面尺寸大小都有关。

为此制作两个混凝土试块模型进行研究。图1(a)为石沙比大、尺寸为 $0.80\text{m}\times 0.80\text{m}\times 0.80\text{m}$ 的实心模型;图1(b)为石沙比大、外尺寸为 $0.80\text{m}\times 0.80\text{m}\times 0.80\text{m}$,空室尺寸为 $0.55\text{m}\times 0.55\text{m}\times 0.55\text{m}$ 的空心模型。

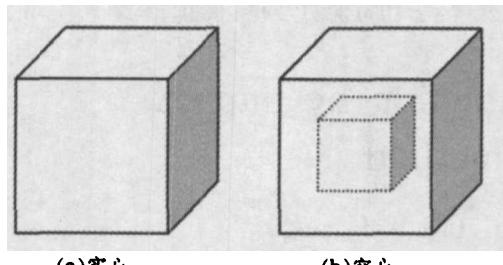


图1 混凝土试块模型
Fig.1 Concrete test model

实验采用单面测试。以混凝土回弹仪作为冲击源,加速度计接收体内的混响讯号,然后通过示波器采集数据,存储到计算机进行处理分析,如图2所示。

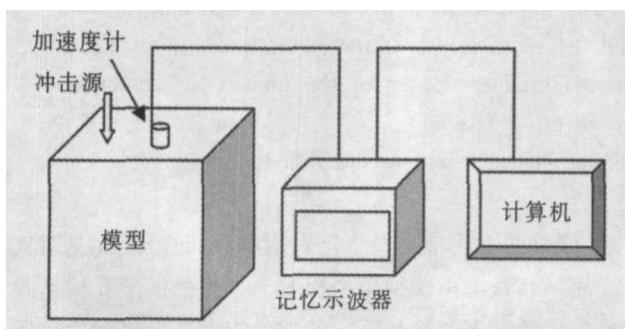


图2 发射-接收示意图
Fig.2 Transmission-reception diagram

实验中示波器采样率为 5MHz ,两个模型采集到的波形如图3所示。

3 数据分析处理

对于同一输入信号,实心与空心两个声学系统由于不同的系统响应,会得到不同的输出信号。这表明通过对输出信号的分析来判别不同声学系统的特性。输出信号 $y(t)$ 可以表示为:

$$y(t) = ae^{-\alpha_1 t} + ce^{-\alpha_2 t} \quad (1)$$

式中: α 为衰减系数。由式(1)可见,衰减系数 α 与声学系统的输出 $y(t)$ 相对应,如果两个系统一致,则实心模型的输出信号 $y_k(t)$ 与空心模型的输出信号 $y_s(t)$ 近似相等,衰减系数 α_k 与 α_s 也无差别。

因此可通过比较衰减系数来分析两个声学系统(空心和实心)的差别,同样也可通过比较衰减时间来分析两个声学系统。本文分别用时域拟合分析和时频分析两种方法对此进行处理。

3.1 时域分析

为了提高拟合精度,先将原始波形取绝对值,然后对其取包络。Trust-Region 算法在解决疑难非线性问题上是一种较为有效的算法^[3]。MATLAB7.0 的 Curve Fitting 工具箱中提供了图形用户界面的曲线拟合工具,可以用 Trust-Region 法对取包络后的图形进行无参数非线性曲线拟合。考虑到实际接收波形中有直达波及多次混响回波,所以采用式(2)分段拟合:

$$y(t) = ae^{-\alpha_1 t} + ce^{-\alpha_2 t} \quad (2)$$

由于直达波衰减比多次回波衰减快很多,所以衰减系数 α_1 与 α_2 中,较大的值主要反映的是直达波的

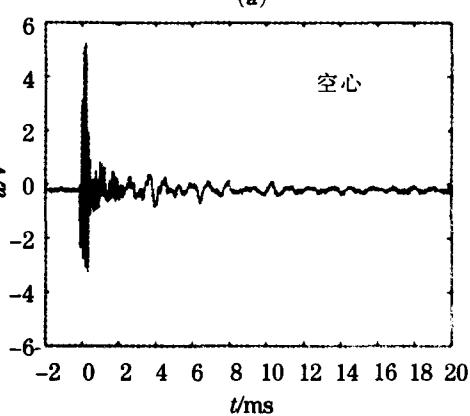
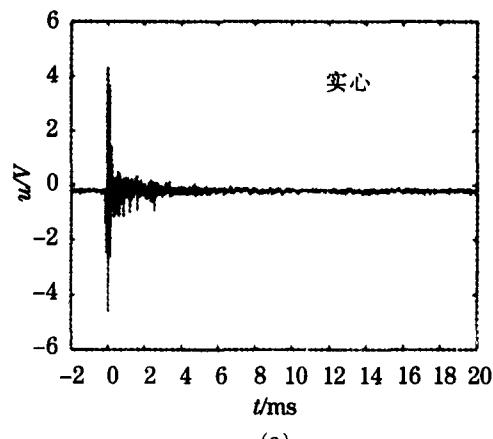


图3 波形图
Fig.3 Waveform

传播,较小的值主要反映的是混响回波的衰减。

将实心模型波形图(图3(a))局部放大,得到图4。对其取绝对值,再取二次包络,二次包络后按照式(2)做e指数拟合,其拟合后波形如图5所示。拟合后得到拟合系数分别为: $a=1.303, \alpha_1=5871, c=0.2411, \alpha_2=173$ 。

将空心模型波形图(图3(b))局部放大,得到图6。对图6中二次包络后的波形按照式(2)做e指

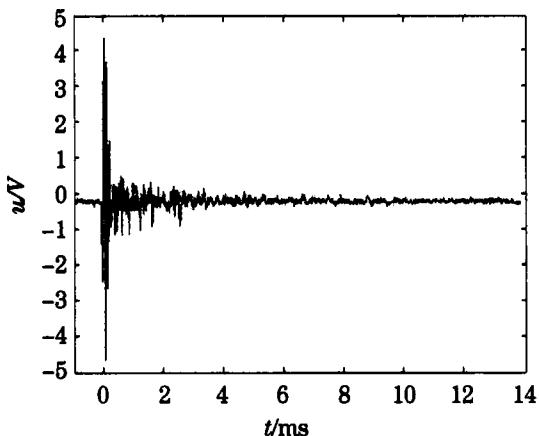


图4 实心模型波形放大图

Fig.4 Enlarged drawing of solid model waveform

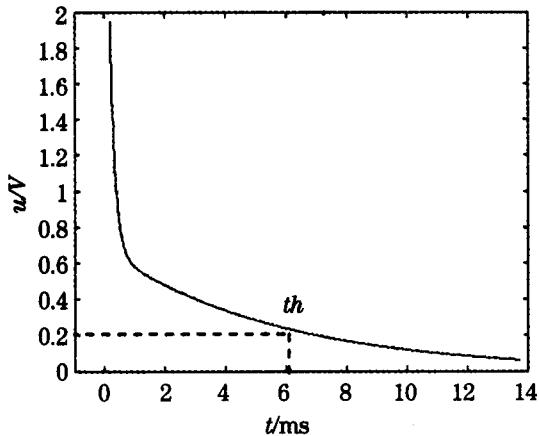


图5 实心模型波形拟合图

Fig.5 Fitting curve of solid model waveform

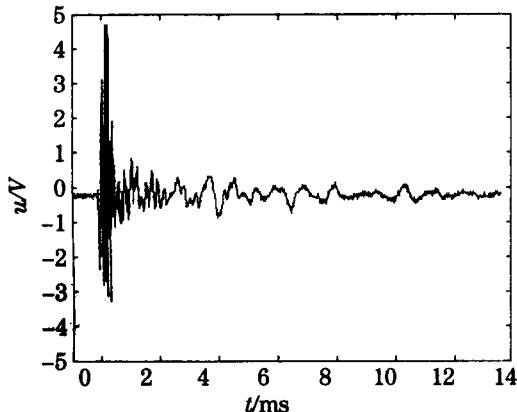


图6 空心模型波形放大图

Fig.6 Enlarged drawing of hollow model waveform

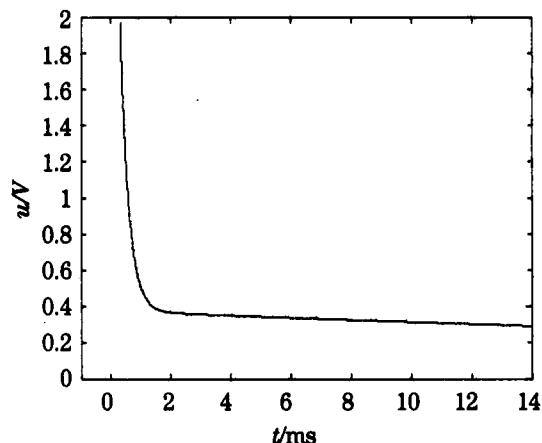


图7 空心模型波形拟合图

Fig.7 Fitting curve of hollow model waveform

数拟合,其拟合的波形如图7所示。拟合后得到拟合系数分别为: $a=1.245, \alpha_1=3606, c=0.0969, \alpha_2=18$ 。

本实验将信号衰减到直达波信号最大幅值的1/10所用的时间定义为混响持续时间。对于实心模型而言,混响持续时间 t_h 约为6ms(见图5)。同样的方法,可以从图7得到空心模型的混响持续时间约为50ms,因空心模型的混响持续时间比较长,故在图7中未直接显示。

将两个拟合后的参数及波形进行对比(见图8),可见空心模型混响衰减系数($\alpha_2=18$)比实心模型的混响衰减系数($\alpha_2=173$)小得多。实心模型的混响持续时间(5ms)明显低于空心模型的混响持续时间(50ms)。

3.2 时频分析

接收到的波形分为直达波和混响的回波,其到达时间和频率都存在着差别,故可用时频分析法对采集到的数据进行分析,找出其差别之处。

时频分析采用短时傅立叶变换^[4],为保证时间上的分辨率及频率的精度,将窗口值设为0.8ms。将每个窗口内的频率取平均值 f ,表达式如式(3)所示:

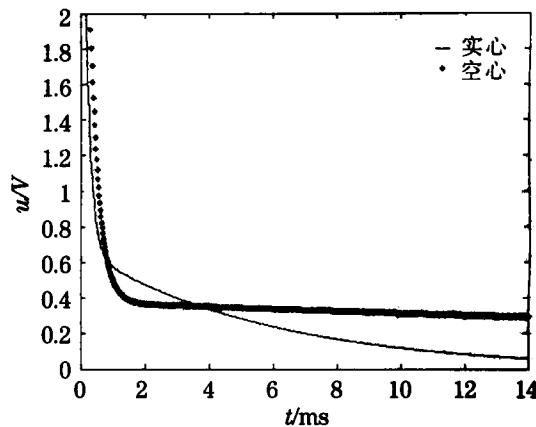


图8 拟合对比图

Fig.8 Fitting drawing of waveform of two models

$$f = \frac{\sum_{i=1}^n f_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (3)$$

这样可得到每个窗口内的平均频率 f , 依次移动窗口, 进行重复计算可得到信号的时频曲线。根据上述方法可得到实心和空心模型的时频曲线。实心模型的原始波形和时频图如图 9 所示。

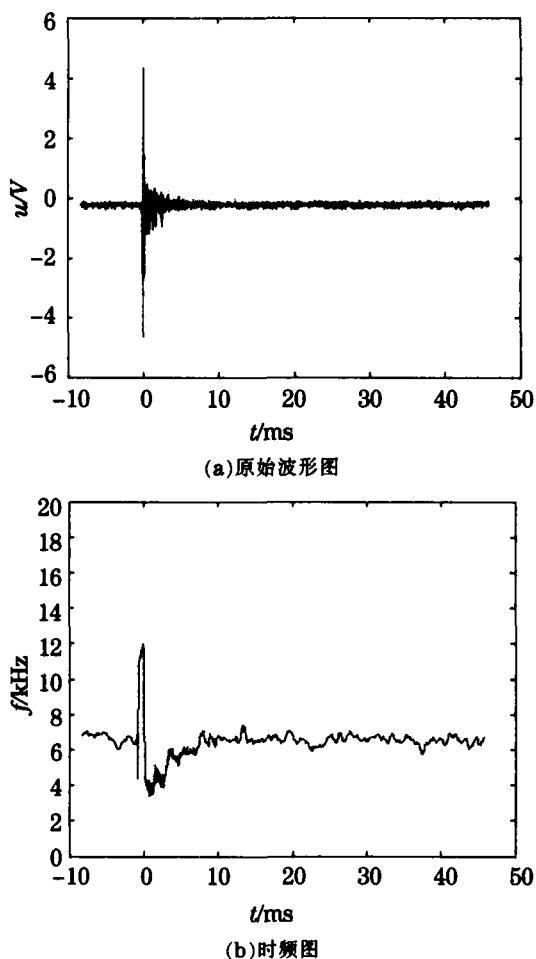


图 9 实心模型原始波形图和时频图
Fig.9 Original waveform and time-frequency waveform of solid model

图 9(b)是对图 9(a)作时频分析后得到的时频图。从图 9(b)可见, 信号首先是直达的频率约为 12kHz 的高频信号, 在约 0.2ms 时高频信号变为频率为 4kHz~6kHz 的低频信号, 这个低频信号即是混响信号(中心频率约 $6.0\text{kHz}\pm0.5\text{kHz}$)。约在 6ms 时该混响信号逐渐衰减消失。混响信号的持续时间约为 6ms 左右, 与前面的拟合所得的混响持续时间基本一致。

空心模型的原始波形和时频图如图 10 所示。

图 10(b)是对图 10(a)作时频分析后得到的时频图。从图 10(b)可见, 信号首先也是一段高频信

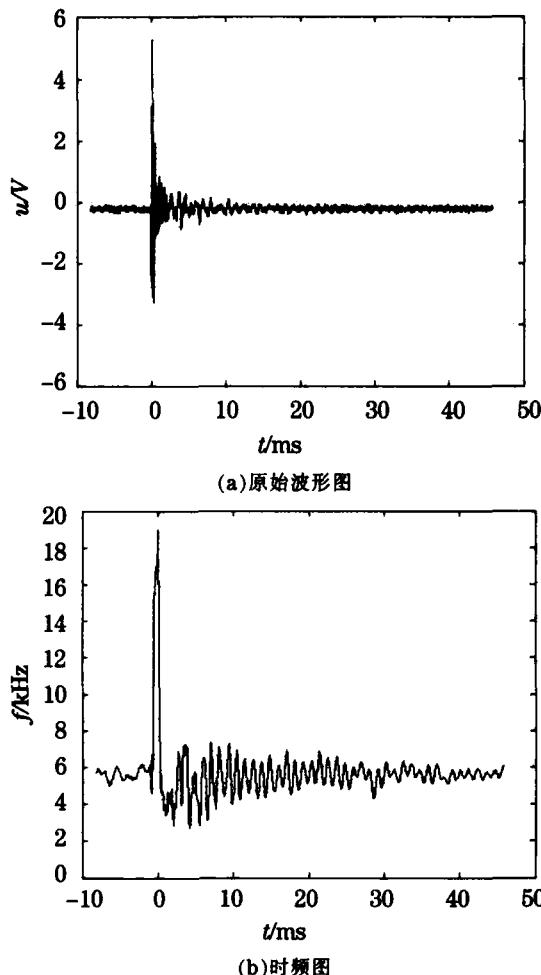


图 10 空心模型原始波形图和时频图
Fig.10 Original waveform and time-frequency waveform of hollow model

号, 频率约为 19kHz, 该信号是直达波。在约 0.5ms 时高频信号变为频率为 3kHz~7kHz 的低频信号, 这个低频信号是混响信号(中心频率约 $6.0\text{kHz}\pm1.5\text{kHz}$, 变化幅度增大)。约在 40ms 时该混响信号逐渐衰减消失。混响信号的持续时间约为 40ms 左右, 与前面的拟合所得的混响持续时间基本一致。

对比实心模型和空心模型的时频图可以发现, 实心模型的混响持续时间明显低于空心模型的混响持续时间, 且频率波动也没有空心模型的大。

4 结论与前景

通过时域上的拟合分析与时频分析两种方法, 可以发现实心、空心模型的混响衰减系数与混响持续时间两个参数都存在明显差异。混响衰减系数空心模型小于实心模型, 而混响持续时间则空心模型大于实心模型。

本试验主要是方法模拟研究, 将无溶洞时的上

述两个混响特性作为基准,通过跟踪对比,以判别是否有溶洞或裂隙带等不连续界面的存在。

本文受上海市科协发展基金资助。

致谢:感谢钱梦麟教授对本文提出的宝贵建议。

参 考 文 献

- [1] 魏栓保. 国内外煤与瓦斯突出预测的新方法[J]. 矿业安全与环保, 2000, 27(5): 17-19.
FAN Suanbao. New methods for coal and gas outburst prediction at home and abroad[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2000, 27(5): 17-19.
- [2] 魏风清, 张建国. 俄罗斯地震声学预测方法的研究现状及发展前景[J]. 煤矿安全, 1999(11): 43-46.
WEI Fengqing, ZHANG Jianguo. Research and development prospect of earthquake acoustic prediction method in Russia[J]. Safety in Coal Mines, 1999(11): 43-46.
- [3] 朱喜林, 武星星, 李晓梅. 基于改进型模糊聚类的模糊系统建模方法[J]. 控制与决策, 2007, 22(1): 73-77.
ZHU Xiling, WU Xingxing, LI Xiaomei. Modeling method of fuzzy inference system based on improved fuzzy clustering arithmetic[J]. Control and Decision, 2007, 22(1): 73-77.
- [4] 皇甫堪. 现代数字信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 319-338.
HUANGPU Kan. Modern digital signal processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003: 319-338.