

# 未胶结砂的声波速度测量

李刚<sup>1</sup>, 乔文孝<sup>1</sup>, 郑金军<sup>2</sup>

(1. 石油大学石油资源科学系, 山东东营 257061; 2. 胜利石油学校)

中图分类号: TB52<sup>\*</sup> 7      文献标识码: A

## The measurement of acoustic velocity of unconsolidated sand

LI Gang<sup>1</sup>, QIAO Wen-xiao<sup>1</sup>, ZHENG Jin-jun<sup>2</sup>

(Department of Petroleum Resource Science, University of Petroleum, Shandong Dongying 257061, China)

### 1 引言

在利用声波进行海底勘探和地面勘探以及桩基评价中, 不可避免的遇到未胶结细砂这种声学介质。因此研究这种介质的声传播特性是很有意义的。本文介绍了用声波透射法测量未胶结细砂的群速度和相速度的方法和测量结果。

### 2 实验装置

在本项研究中, 采用了如图 1 所示的声波脉冲透射法实验测量系统。本系统由美国泛美公司 (Panametrics) 生产的 5058 型超声波分析仪、中心频率为 100kHz 的 V1011 宽频带声波探头, 惠普公司生产的 HP54504A 数字存储示波器和 586 计算机和盛砂容器构成。超声波分析仪工作在对穿 (Through) 模式, 用来发射、接收和放大声波信号, 计

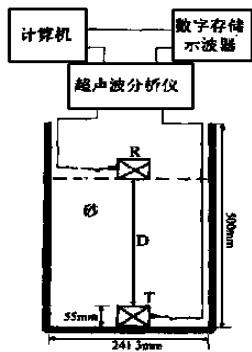
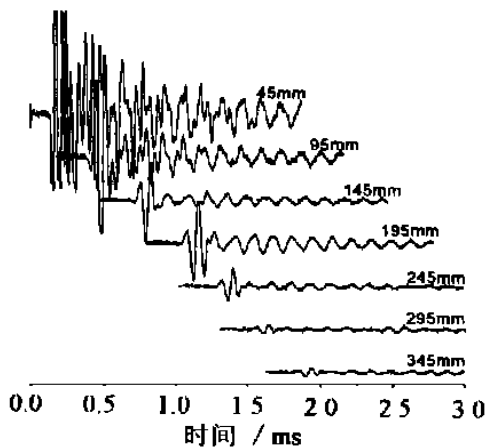
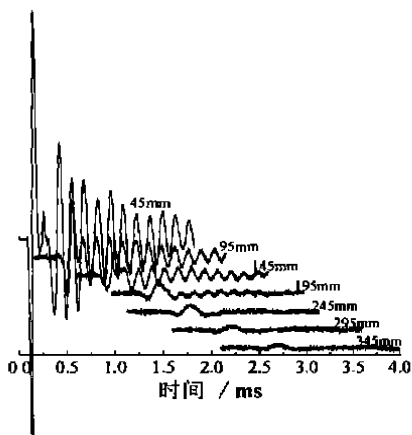


图 1 测量装置示意图

算机和数字存储示波器用来对声波信号进行显示和数据采集。整个测试系统由计算机控制运行。待实验的砂子为纯净的石英砂, 其颗粒线度范围为 2mm-



(a) 潮湿砂



(b) 水饱和砂

收稿日期: 2000-01-21; 修订日期: 2000-05-15  
作者简介: 李刚 (1957-), 男, 工程师, 从事地球物理测井的研究工作。

2 发射和接收探头之间的距离为不同数值时测得的波形

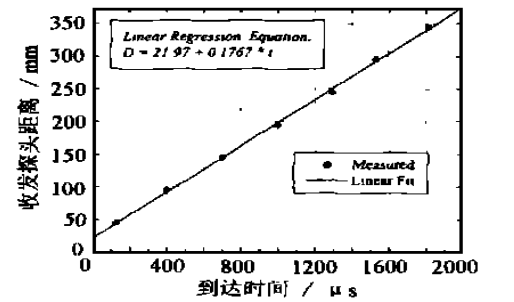
3mm。盛放砂子的容器为带夹层的保温桶,其内径为241.3mm,深度约为500mm。

### 3 实验结果及分析

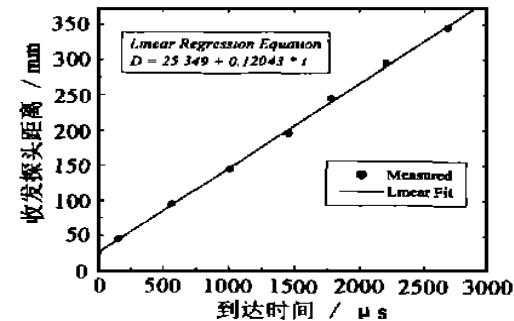
在实验中,使收发探头之间的距离的变化范围为45mm-345mm,每隔50mm进行一次测量,得到一道波形。图2(a)和图2(b)分别表示了发射和接收探头之间的距离为不同数值时在潮湿砂和在水饱和砂中测量得到的时域波形。由图2可见,在本实验所取的探头间距范围内,可以观测到信噪比良好的声波信号,但声波信号的衰减是非常大的。相比较而言,水饱和砂中声波的衰减比潮湿砂中声波的衰减大得多。可以观测到的另外一个现象是透射脉冲波的主频随着探头间距的增加而大幅度减小,这说明高频声波的声衰减比低频声波的大。

#### (1) 群速度

对应于每一个收发探头间距 $D$ 的波形,容易测得首波的到达时间 $t$ ,制作 $D \sim t$ 关系曲线并作线性回归,则回归直线的斜率就是纵波的传播速度。图3(a)和图3(b)分别表示了潮湿砂和水饱和砂的 $D \sim t$ 关系曲线及回归结果。图中纵轴为收发探头距离 $D$ ,

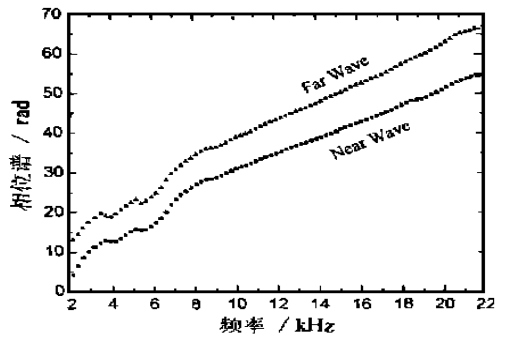


(a) 潮湿砂

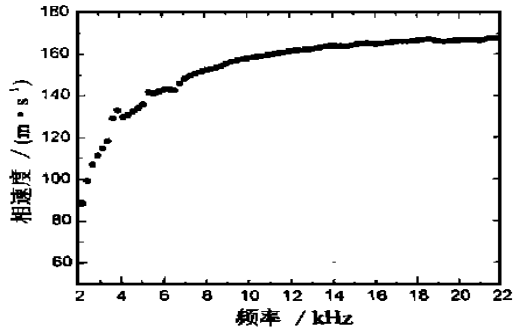


(b) 水饱和砂

图3 声波传播速度测量结果



(a) 相位谱



(b) 相速度

图4 探头间距分别为145mm和245mm时潮湿砂中测得的相位谱和相速度

横轴表示不同的收发探头距离时首波的到达时间 $t$ ,回归直线的斜率值为声波传播群速度。

对于潮湿砂, $D \sim t$ 关系的回归直线方程为:

$$D(\text{mm}) = 21.97 + 0.1767 \times t(\mu\text{s})$$

该方程的回归系数为0.9995,由此得潮湿砂的声速为176.7m/s。

对于水饱和砂, $D \sim t$ 关系的回归直线方程为

$$D(\text{mm}) = 25.349 + 0.12043 \times t(\mu\text{s})$$

该方程的回归系数为0.9993,由此得水饱和砂的声速为120.4m/s。

#### (2) 相速度

由图2所示的波形数据,可以计算声波在未胶结砂中传播时的相速度。我们知道,时域信号傅立叶的相位谱是被限制在主值之内的,因而是失真的、不能用以计算相速度的。但是相位展开法可以解决这一困难<sup>[1]</sup>。我们取如图2(a)所示的、收发探头间距分别为145mm(近波)和245mm(远波)的两道波形,计算所得这两道波形的相位谱如图4(a)所示,由此相位谱计算出的相速度与频率之间的关系曲线如图4(b)所示。由图4(b)可见,潮湿砂中声波的相速度是随频率的增加而增加的。(下转第165页)

散曲线及兰姆波各模式的衰减。数值计算中所用的材料参数如下:

表 1 数值计算中所用的材料参数

材料	纵波波速 (m/s)	横波波速 (m/s)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
铝	6350	3050	2700
环氧树脂	2923	1423	1580

### 2.1 粘弹体厚度不同时铝-环氧树脂-铝中兰姆波的频散曲线

图 2 为用厚度不同的环氧树脂粘结的双层铝板中兰姆波的频散曲线。中间环氧树脂层中体纵波的衰减为:  $\alpha = 0.0256N_p/Wl$ , 体横波的衰减为:  $\alpha = 0.0049N_p/Wl^{3/4}$ 。图 2(a)、2(b)、2(c) 中铝-环氧树脂-铝三层板用毫米单位表示的厚度分别为: 1.4-0.2-1.4、1.49-0.02-1.49、1.499-0.002-1.499。板系的总厚度均为 3mm。

随着中间环氧树脂层厚度的降低, 反映在频散曲线上最主要的变化就是各个模式在相同频厚积下的相速度都提高了。相对于低阶模式, 高阶模式的变化更大一些。各个模式的截止频率随着环氧树脂层厚度的降低都增大了。

### 2.2 粘弹体厚度不同时铝-环氧树脂-铝中兰姆波各模式的衰减

下面我们将对两种模式  $a_1$ 、 $s_1$  的衰减进行讨论。之所以选择这两种模式, 是因为它们在实验和应用中比较容易激发和检测到。图 3、图 4 分别为环氧树脂层厚度不同时板中两种模式的衰减随频率变化的情况。图 3 中环氧树脂体纵波与体横波的衰减与图 2 中相同; 图 4 中环氧树脂体纵波的衰减增加到:  $\alpha = 0.0512N_p/Wl$ 。体横波的衰减增加到:  $\alpha = 0.$

49Np/Wl。三层板的厚度分别为 1.4-0.2-1.4、1.49-0.02-1.49、1.499-0.002-1.499。

从图 3、图 4 中可以发现各个模式的衰减与频率之间的关系及其变化规律。大体上说衰减随粘结层层厚的降低都有减小的趋势。在图 3(a)、图 3(b)、图 3(c) 中, 由于环氧树脂的粘性较小, 这种趋势并不明显。在图 4(a)、图 4(b)、图 4(c) 中, 由于环氧树脂的粘性较大, 可以很清楚地看出这种趋势。其中可发现图 4(c) 的衰减与图 4(a)、图 4(b) 的衰减有很大的不同, 更趋近于环氧树脂层粘性较小时的情况, 这可能与粘结层厚过小有关系。从中也可看出, 板系中各模式衰减的变化情况不仅与粘结层的衰减有关, 与粘结层的厚度也密切相关, 这与实际情况是相符的。

## 3 结 论

在对弹性波传递矩阵算法无需做任何改动的情况下, 通过引入复数波数, 则得到的特征方程为复数, 且依赖于频率的板波波数的实部及虚部, 而虚部描述了波的衰减, 从而将弹性波的传递矩阵算法应用到粘性联结的层状固体媒质中。本文仅给出初步的数值计算结果, 进一步的研究将另文发表。

参考文献:

- [1] L. E. Malvern. Introduction to the mechanics of a continuous medium[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1969.
- [2] Michael J. S. Lowe, Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered media[J], IEEE Trans: UFFC, 1995, 42(4): 525-542.
- [3] Che-Wan Chan, Peter Cawley. The existence of low lamb modes in highly attenuative media[J], Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1996, 15: 193-200.

(上接第 162 页)

## 4 结 论

通过实验测量了未胶结砂中声波传播的群速度和相速度, 对于潮湿砂, 声波的群速度数值为 176.7 m/s; 对于水饱和砂, 声波的群速度数值为 120.4

m/s, 潮湿砂中声波的相速度随频率的增加而增加。本文结果对于海底勘探和桩基评价有参考价值。

参考文献:

- [1] 乔文孝, 阎树汶. 用相位展开法提取相速度[J]. 声学学报, 1995, 20(2): 135-137.