

# 海底沉积物声学性质原位测量系统海上试验研究

李艳华<sup>1,2,3</sup>, 郭常升<sup>1,2</sup>, 李会银<sup>4</sup>, 谭宝海<sup>4</sup>

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 4. 中国石油大学 地球资源学院, 山东 东营 257061)

**摘要:** 提出了一种新的海底沉积物声学性质原位测量方法, 介绍了新研制的海底沉积物声学性质原位测量系统。在青岛近海海域对该系统进行了海试, 获得了各个站位的声速数据。将测得的各站位的声速与不同海域的沉积物声速进行对比分析, 并对各个站位的声速与沉积物的平均粒径进行了相关性分析, 发现与以往研究结果一致, 沉积物声速与沉积物类型相关, 不同类型的沉积物的声速有明显差异; 声速与平均粒径相关性较好, 粒径越大, 声速越高。结果表明, 利用海底沉积物声学性质原位测量系统测得的原位声速是正确的, 它能快速准确地得到海底沉积物的声速值。

**关键词:** 海底沉积物; 原位测量; 声速

中图分类号: TB565.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2010)09-0055-05

海底沉积物的声学特性研究随着海洋科学、海洋沉积学、海洋地质学等学科的发展以及海洋工程和海洋开发的需要, 越来越受到广泛的重视<sup>[1]</sup>。海底作为海洋的下界面, 在海洋工程、海洋声场等研究中都需要了解海底沉积物的声学特性。目前获得海底沉积物声学特性的测量方法主要有两种: 原位测量和采样后的实验室测量<sup>[2]</sup>。实验室测量是首先获得沉积物样品, 然后在实验室测量得到沉积物的声学性质。实验室测量仪器设备简单, 操作方便, 但是这种方法改变了沉积物原有的真实环境, 如海底沉积物所处的海水压力以及温度等都发生了变化, 而且取样过程中也会不可避免地对沉积物产生扰动, 测得的海底沉积物声学特性值与真实值有较大的差别。原位测量是将测量设备放在海底, 将声学换能器插入海底沉积物中, 直接测量海底沉积物的声学特性值, 这样得到的数据是真实海底环境的声学特性值, 避免了取样产生的扰动, 具有更高的精度和可靠性。尤其对于易受扰动的沉积物, 如稀软的海底表层沉积物以及含有气体的沉积物等, 原位测量更为重要。但是原位测量设备比较复杂, 技术要求高。

近年来, 国外已经开发出了几种原位测量系统, 比较具有代表性的是美国海军实验室的沉积物声学特性原位测量系统(ISSAMS)<sup>[3]</sup>、夏威夷大学的声学长矛(Acoustic Lance)<sup>[4]</sup>和 Geotek 公司的沉积物声学物理性质测量仪(SAPPA)。目前, 国内对沉积物声学性质的研究主要还是取得沉积物样品后进行实验室

测量, 还没有成熟的海底沉积物声学性质原位测量技术。本文提出了一种新的海底沉积物原位测量技术, 初步制作了海底沉积物声学性质原位测量系统, 利用该系统在青岛近海进行了原位测试得到了沉积物的声速, 并对声速与沉积物平均粒径之间的关系作了分析研究, 获得了初步成果。

## 1 海底沉积物声学性质原位测量原理

本文研究的是海底 30 cm 以内的浅层沉积物, 它具有较高的含水量, 甚至呈流体状。海底浅层沉积物一般比较松软, 可以将声学换能器直接插入沉积物中进行测量, 测量原理如图 1 所示。当声学换能器插入沉积物中后, 发射换能器发射声波信号, 两个接收换能器接收穿过沉积物的声波信号, 由声波到达两个接收换能器的时间差, 可以计算沉积物中的声速。具体的计算公式如下:

$$V_p = \frac{d}{t_2 - t_1}$$

式中,  $V_p$  为声波在沉积物中传播的速度,  $d$  为接收换能器 1 和接收换能器 2 之间的距离,  $t_1$  和  $t_2$  为声波分别到达接收换能器 1 和接收换能器 2 的时间。

收稿日期: 2010-01-22; 修回日期: 2010-07-04

基金项目: 国家 863 计划项目(2006AA09Z116)

作者简介: 李艳华(1985-), 女, 山东聊城人, 硕士研究生, 研究方向为海洋地质声学, 电话: 15910306217, E-mail: lyhlyh1985@126.com

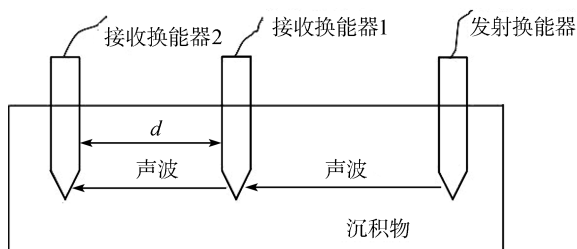


图 1 海底沉积物声学性质测量原理  
Fig. 1 Principle of velocity measurement

## 2 系统构成

海底沉积物声学性质原位测量系统采用有缆方式作业，当声学换能器插入沉积物后，甲板的计算机对测量系统采用指令方式，进行实时操作和监控。测量系统有两部分组成：水上甲板控制部分和海底测量部分，如图 2 所示。水上甲板控制部分以计算机

为中心，对整个测量系统进行控制并进行人机对话，它可以完成对系统进行参数设置、发射接收控制、数据实时显示等功能。电缆传输接口将水上设备对海底测量仪器的控制命令调制后，通过电缆传输给海底测量仪器，并对海底仪器上传数据通过数据处理模块解调后，通过 USB 接口传递给计算机处理、记录。供电模块对整个系统进行供电，使得系统在没有电源供应的情况下也可以持续工作 7~8 h。海底仪器由数据传输接口、声系控制模块、声波波形数据采集模块及声系组成。声系由一个发射换能器和两个接收换能器组成。声系控制模块控制发射探头激发声波的时间及强度，数据采集电路对来自接收探头的声波信号进行放大、滤波并完成模数转换。数据传输接口接收来自水上的控制命令，并将采集电路得到的测量数据调制后上传。

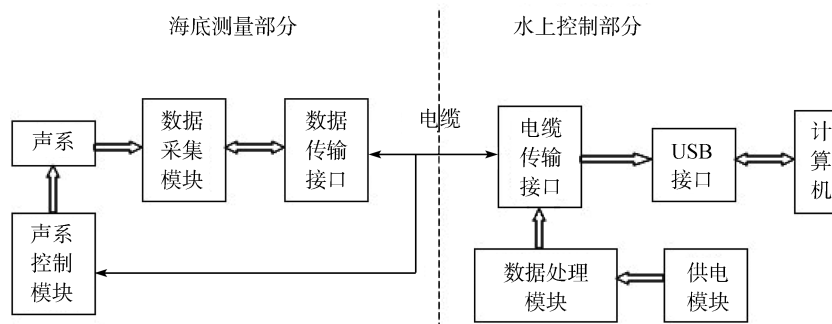


图 2 海底沉积物声学性质原位测量系统结构图  
Fig. 2 Scheme of the system structure

由于海洋环境比较复杂，为了保证系统能在较复杂的海洋环境中正常有效地工作，设计合理的海底测量部分的结构成为技术的关键。我们设计的海底测量部分采用三角形框架，如图 3 所示。在框架的三个角上固定有加重铅球，使得框架在海底保持平衡，而且，在框架下放到海底后，可以无需动力装

置，仅靠自身重力就可以使探头插入海底沉积物中。

## 3 海上试验及数据分析

2009 年 10 月，在青岛近海海域进行了海底沉积物声学性质原位测量系统海上试验，试验选择一艘渔船，实验海区范围为 35°40' ~ 36°10'N, 120°10' ~ 120°35'E。

### 3.1 试验海区概况

青岛近海海域沉积物受气候、季节，尤其水动力(波浪、恒流、潮汐等)的影响较大，沉积物来源比较复杂，从而导致沉积物类型较多，沉积较复杂。青岛近海沉积物的总体分布是，沿海岸颗粒较粗，类型为砂、粉砂质砂，向深处颗粒逐渐变细，较深处的沉积物主要为粉砂、黏土，局部为粉砂质黏土、黏土质粉砂。研究区位于青岛胶州湾和附近滨岸区以及南

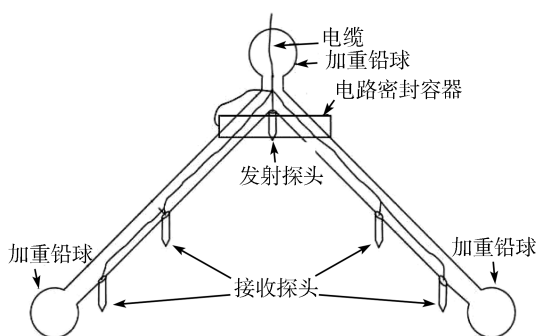


图 3 海底部分仪器构造  
Fig. 3 Structure of the underwater part

部浅海沉积区。胶州湾和附近滨岸区属于现代沉积区。滨岸区为高能海岸, 沉积物类型为砂、粉砂质砂, 颗粒较粗。胶州湾则属于潮汐作用为主的低能海岸, 沉积物类型较多, 表层沉积物主要是黏土质粉砂和粉砂质黏土, 局部还有砾石、砂砾-砾砂、粗砂、砂、细砂、黏土粉砂质砂、粉砂黏土质砂、砂黏土质粉砂等<sup>[5]</sup>。南部浅海沉积区分为两个沉积区, 一个为 20 m 水深以内以及大公岛附近的海域, 沉积物类型以砂-粉砂-黏土为主; 另一个为灵山岛东北部水深大于 20 m 的海域, 为陆架沉积区, 沉积物类型以砂-粉砂-黏土以及黏土质粉砂、粉砂质黏土为主, 分选较差<sup>[6]</sup>。

为了准确测得研究区海底沉积物的声学特性值, 我们首先在海水中对测量系统进行了校正, 精确测量了水听器之间的距离, 然后选取了比较有代表性的 9 个站位进行了海底沉积物声速原位测试, 每个站位测量多次, 取其平均值作为该站位的声速值, 外业采集了海底沉积物样品, 在室内按常规方法测试了样品的平均粒径。

### 3.2 原位测量系统海水中校正

由声速计算公式可知, 两个接收换能器之间的距离是计算声速的重要参数, 它的测量准确度直接影响声速的计算精度。但是, 接收换能器是有一定体积的, 直接测量的方法不能准确测出声波在两个换能器之间的传播距离。为此, 只能采用间接的方法进行测量, 即在海水中进行测量系统校正。

校正时, 首先将原位测量系统放入海水中进行测量, 海水中接收到的声信号如图 4, 根据两道声波

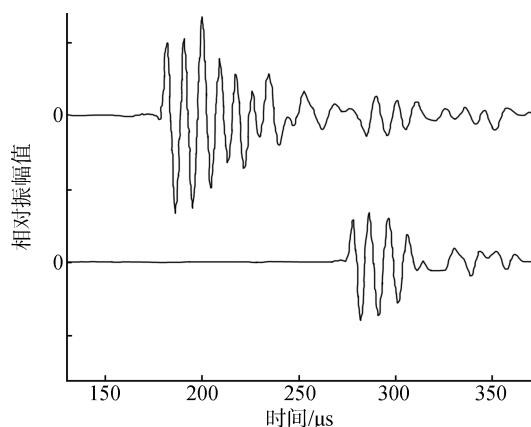


图 4 原位测量系统海水校正得到的信号

Fig. 4 Received waveform for calibration in the sea water

的到时, 可以计算出声波到达两个接收换能器的时间差。为了提高测量精度, 重复测量 6 次, 计算平均值, 得到的时间差为  $95.6 \mu\text{s}$ 。利用 CTD 测得海水的声速为  $1516 \text{ m/s}$ , 由  $d=vt$ , 可以计算出两个接收换能器之间的距离为  $14.493 \text{ cm}$ 。

### 3.3 海底沉积物物理参数和声速分析

国内学者主要是通过沉积物取样进行室内测量得到声速值。唐永禄<sup>[7]</sup>分析了南海 3 个海区的沉积物物理性质和声速范围, 沉积物类型从黏土质粉砂到砂, 声速范围为  $1492 \sim 1633 \text{ m/s}$ 。卢博等<sup>[8,9]</sup>在中国东南近海以及海南岛东南外海等海域进行取样, 测得了海底沉积物的声速。他指出台湾东南台东外海的砂质沉积物声速为  $1610 \text{ m/s}$  以上, 泥质沉积物声速为  $1500 \sim 1650 \text{ m/s}$ ; 南海北部沉积物取样以粗颗粒为主, 声速范围为  $1420 \sim 1880 \text{ m/s}$ ; 东海海底沉积物取样以细砂为主, 声速范围为  $1396 \sim 1760 \text{ m/s}$ ; 海南岛东南外海分为高声速区和低声速区, 低声速区主要是黏土质粉砂或粉砂质黏土, 声速范围为  $1514 \sim 1523 \text{ m/s}$ , 高声速区主要是细砂以及粗砂-砾-珊瑚碎屑, 声速范围是  $1586 \sim 1673 \text{ m/s}$ 。原位测试方面, 只有陶春辉等<sup>[10,11]</sup>利用声学长矛获得了杭州湾的原位声速值。可见, 不同海域、不同类型的海底沉积物声速的变化范围较大, 但是, 整体上来看, 沉积物声速与沉积物类型密切相关, 沉积物颗粒越粗, 声速越大。

表 1 为我们测得的 9 个站位的海底沉积物的声速和平均粒径的测试分析结果。试样均为浅层沉积物原状样, 其中 1 站位位于胶州湾内部, 为砂质粉砂沉积物; 2~3 站位分别位于团岛附近浅海区和海水浴场, 为砂质沉积物, 代表了近岸较粗颗粒的沉积物; 4~6 站位位于离海岸较远的海域, 颗粒较细, 代表了含有黏土较多的松软沉积物; 7~9 站位为黏土质粉砂, 或含砂的黏土质粉砂, 代表了细颗粒的粉砂质沉积物。

从表 1 的分析结果可见, 沉积物声速与沉积物类型密切相关, 不同类型的海底沉积物的声速有较大差异, 声速一般随着沉积物颗粒变粗而增大。较粗的砂沉积物的声速最大, 为  $1675.4 \text{ m/s}$ ; 细颗粒的黏土质粉砂沉积物的声速在  $1550 \text{ m/s}$  左右; 较松软的粉砂质黏土沉积物的声速都在  $1550 \text{ m/s}$  以下。与其他海域的沉积物声速相比, 我们测得的沉积物的声速是合理的。

表 1 各站位海底浅层沉积物测试结果  
Tab. 1 Measurements of marine sediments

站号	水深(m)	沉积物分类	平均粒径(μm)	波速(m/s)
1	15	砂质粉砂	37.2 (4.75 )	1 606.5
2	8	砂	101.2 (3.30 )	1 675.4
3	25	粉砂质砂	85.7 (3.54 )	1 638.0
4	23.6	粉砂质黏土	23.8 (5.39 )	1 505
5	25.5	粉砂质黏土	15.3 (6.03 )	1 511.5
6	25.6	粉砂质黏土	19.9 (5.65 )	1 504.1
7	34.5	黏土质粉砂	39.6 (4.66 )	1 561.6
8	30.4	砂-粉砂-黏土	72.4 (3.79 )	1 555.3
9	13.5	黏土质粉砂	35.4 (4.82 )	1 547.8

#### 4 海底沉积物物理参数对声速的影响

海底沉积物物理参数对声速影响的研究,国内外很多学者在理论模型和相关性经验方程方面都进行过研究。在海底沉积物的理论模型方面,最具代表性的是 Biot 模型<sup>[12,13]</sup>,将海底沉积物看作是一个充满流体的多孔介质。此模型可以得到一组描述声波在多孔介质中的传播方程,但是方程引入的参量很多,有些不容易测定,实用价值不大。经验方程方面研究的较多,但是适用范围有一定的局部性。Hamilton<sup>[14]</sup>将海底沉积物分为大陆阶地、深海丘陵和深海平原 3 个类型,每个类型都给出了沉积物声速与孔隙度、密度、平均粒径、黏土含量等某些物理参数的回归方程。Anderson<sup>[15]</sup>则是将海底沉积物按深度分为 4 类,每一类给出了声速与包括孔隙度、孔隙比、平均粒径等物理参数的回归方程。国内周志愚<sup>[16]</sup>、唐永禄<sup>[1]</sup>分别总结了南海海底沉积物声学物理参数的回归方程,他们都在方程中含有海水声速项,并认为孔隙度与海底沉积物声速的相关性最好。卢博等<sup>[8,17]</sup>在中国东南沿海海域对海底沉积物做了统计分析,得出了声速与孔隙度、含水量、塑限、液限等的统计相关公式。罗忠辉、卢博<sup>[18]</sup>又提出利用多参数方程来预报声速,它是利用主元分析技术,在众多影响声速的物理参数中,从理论上选出相互独立、对声速影响显著的物理参数来建立声速相关方程。但是,不同研究海区的沉积物类型和沉积物结构特性不同,而各个经验公式都是根据各自的研究区内的海底沉积物的声学物理数据来得到的,有一定的适用范围和条件。

本文根据海底沉积物声学性质原位测试系统得

到的原位声速与相应的沉积物的平均粒径等数据,研究了青岛近海海域原位声速与沉积物平均粒径的相关性。平均粒径是沉积物的一个重要参数,它是在样品中长期保持不变的参数。图 5 是原位测量得到的声速与沉积物平均粒径的统计相关图,计算得到声速与沉积物平均粒径的相关系数为 0.867 0,相关性较好。声速随着沉积物平均粒径的增大而增大,这与以往的研究结果<sup>[13,14]</sup>是一致的。这是因为海底沉积物的声传播(压缩波)在很大程度上是由沉积物的弹性性质<sup>[7]</sup>决定的。海底沉积物是由固体矿物颗粒经长时间沉积堆积形成孔隙骨架,在骨架间的空隙中充满流体的双相介质。海底沉积物的固体骨架与流体弹性性质差别很大。沉积物的固体骨架具有较高的体积模量和剪切强度,声速较高;而流体体积模量较低,剪切模量为 0 或很小,声速较低。声波在海底沉积物中传播时,会通过声速较高的固体颗粒,也会通过声速较低的液体海水,因此,两者的相对含量会对声速产生很大的影响。海底沉积物的平均粒

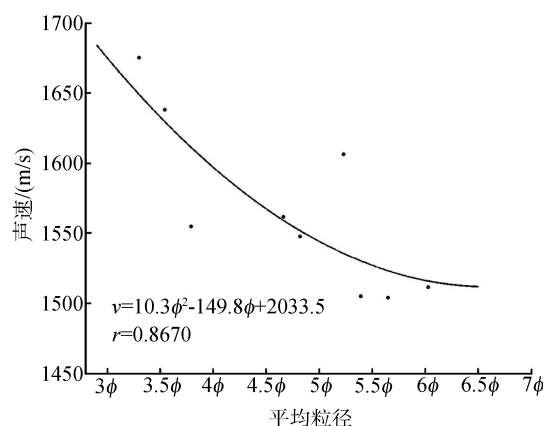


图 5 海底沉积物平均粒径与声速的统计相关图  
Fig. 5 Mean grain size versus acoustic velocity

径对其流体的相对含量,即孔隙度,有很大的影响,整体趋势是颗粒越粗,固体颗粒含量越高,相应的孔隙度越小,声速也就越高。

## 5 结论

本文提出了一种新的海底沉积物声速原位测量方法,自行研制了海底沉积物声学性质原位测量系统,在青岛近海进行了海上试验。海试过程中,系统工作性能稳定,利用该系统获得了海底沉积物的原位声速。测试得到的海底沉积物声速范围为 1 505~1 675.4 m/s,沉积物类型较多,包括黏土质粉砂、砂、砂质粉砂、粉砂质黏土、粉砂质砂和砂-粉砂-黏土等。较粗的砂质沉积物的声速最大,为 1 675.4 m/s;细颗粒的黏土质粉砂沉积物的声速在 1 550 m/s 左右;较松软的粉砂质黏土沉积物的声速都在 1 550 m/s 以下。同时,沉积物的声速与平均粒径相关数为 0.867 0,相关性较好,声速与平均粒径成正相关,粒径越大,声速越高。这些结论与以往的研究结果是一致的,证明利用海底沉积物声学性质原位测量系统测得的声速是正确的,它能快速准确地得到海底沉积物的声速值。但是,必须认识到,我们的试验海区只是在近海海域,测试站点也较少,对于系统在较深海域的工作情况,还需要进一步的研究和改进。

### 参考文献:

- [1] 唐永禄. 海底沉积物孔隙度与声速的关系[J]. 海洋学报, 1998, 20(6): 39-43.
- [2] 周建平, 吕文正, 陶春辉. 海底柱状沉积物超声测量[J]. 东海海洋, 2003, 21(4): 26-33.
- [3] Barbagelata A, Richardon M D, Miaschi B, *et al.* ISSAMS: An in situ sediment acoustic measurement system[A]. Hovem, J M, Richardson, M Q. Shear Waves in Marine Sediments[C]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991. 305-312.
- [4] Buckingham M J, Richardson M D. On tone-burst measurements of sound speed and attenuation in sandy marine sediments[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2002, 27(3): 429-453.
- [5] 李善为. 从海湾沉积物特征看胶州湾的形成演变[J]. 海洋学报, 1983, 5(3): 328-339.
- [6] 肖菲, 尹延鸿. 青岛海岸带及邻近海域地形和沉积物类型研究[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(10): 1-4.
- [7] 唐永禄. 南海三海区海底沉积物物理性质及声学特性[J]. 海洋技术, 1991, 10(1): 81-91.
- [8] 卢博, 李赶先, 孙东怀, 等. 中国东南近海海底沉积物声学物理性质及其相关关系[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(2): 12-17.
- [9] 卢博, 李赶先, 刘强, 等. 海南岛东南外海底沉积物特征及其声学物理性质研究[J]. 海洋学报, 2007, 29(4): 34-42.
- [10] 陶春辉, 金肖兵, 金翔龙, 等. 多频海底声学原位测试系统研制和试用[J]. 海洋学报, 2006, 28(02): 46-50.
- [11] 陶春辉. 海底沉积物声学原位测试和特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [12] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in fluid saturated-porous solid, I. low frequency range[J]. *J Acoust Soc Am*, 1956, 28: 168-178.
- [13] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in fluid saturated-porous solid, II. High frequency range[J]. *J Acoust Soc Am*, 1956, 28: 179-191.
- [14] Hamilton E L, Bachman R T. Sound velocity and related properties of marine sediments[J]. *J Acoust Soc Am*, 1982, 72: 1891-1904.
- [15] Anderson R S. Statistical correlation of physical properties and sound velocity in sediments[A]. Hampton L. Physical of Sound in Marine Sediment [C]. New York: Plenum Press, 1974. 481-518.
- [16] 周志愚. 南海、黄海海底声速垂直分布的测量结果[J]. 海洋学报, 1983, 5(5): 543-552.
- [17] 卢博, 梁元博. 中国东南沿海海洋沉积物物理参数与声速的统计相关[J]. 中国科学(B), 1994, 24(5): 556-560.
- [18] 罗忠辉, 卢博. 基于主元素分析技术的海底沉积物声速预报方程[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(3): 29-34.

(下转第 63 页)