

## 海底松散沉积物声学性质原位测量实验研究

谷明峰<sup>1,2</sup>, 郭常升<sup>1</sup>, 李会银<sup>3</sup>

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

> 摘要:分析研究了国内外海底松散泥沙的声速和声衰减系数测量的研究现状,并据此研制了海底表层沉积 物声速声衰减系数原位测量系统。利用原位测量系统分别在实验室和海滩对不同粒度的沉积物进行了测量 分析,得到了不同粒度沉积物的声速和声衰减系数。数据分析表明,沉积物的声速和声衰减系数与沉积物 的粒径有密切的关系,粒径越粗,声速越高,声衰减系数越大。通过沉积物声学性质研究,可以开发海底 浅层沉积物声学性质原位测量技术,提高相关海洋调查的速度和效率。

关键词: 沉积物声速; 声衰减; 原位测量 中图分类号: P714.8 文献标识码: A

海底是整个海洋环境的一个重要组成部分,海 底表层沉积物的声学性质对于海洋环境声场研究具 有重要的利用价值。对海洋水声场影响的一个重要 因素是海底表层沉积物的声学参数,海底表层沉积 物由松散的泥沙组成,它的主要声学参数就是声速 和声衰减系数,因此,研究海底表层松散沉积物的 声速和声衰减系数特性是海洋环境探测与海洋声场 等研究不可或缺的内容。

海底底质对海洋水声场影响起决定作用的是 海底表层沉积物, 这部分沉积物的厚度大约在二、 三十厘米, 是一些没有胶结的泥沙, 作者研究的内 容就是这部分沉积物的声速和声衰减系数的测量方 法及其特性。传统的海底沉积物测量调查技术多数 是针对海底工程与资源勘查而研究开发的,这些调 查手段主要是海底地质取样、声波浅剖测量及多波 束测量,利用这些技术无法获得海底表层沉积物的 声学参数,针对海底表层沉积物的声学参数测量问 题,国外在20世纪90年代中期研制开发出了海底 底质声学性质原位测量系统,这种系统就是把仪器 下放到海底,探针插入沉积物中直接测量声速、声 衰减系数等参数,具有代表性的主要是美国海军研 制的沉积物声学现场测量系统(ISSAMS)<sup>[1,2]</sup>以及 英国研制的海底沉积物声学物理性质测量仪 (SAPPA),在中国还一直没有这样的测量技术。作 者研究的目的就是通过实验与实际测量分析,探索

一种新的海底表层沉积物声学参数原位测量方法, 这种方法比国外的观测方法更简单,测量速度更快, 为今后开发海底底质原位测量技术奠定基础。

## 1 海底底质声学参数测量原理

文章编号: 1000-3096(2008)05-0001-05

由于作者所研究的测量目标是海底 20 cm 以内 的表层沉积物, 传统的声学探测技术不能准确测量 这部分沉积物的声速和声衰减系数, 国外使用的方 法是把多个声波探头按一定的排列方式插入到沉积 物中进行测量。作者采用的也是探头插入海底直接 测量的方法, 但声波探头的排列方式不同。本仪器 使用 3 个声波探头: 1 个作为发射源, 另外 2 个作 为接收探头, 3 个探头在一条直线上, 测量原理如 图 1 所示。



图1 沉积物声速和声衰减系数测量原理



测量时,将发射换能器和接收换能器插入表层

收稿日期: 2007-12-24; 修回日期: 2008-02-25

基金项目: 国家 863 计划项目(2006AA09Z116)

作者简介: 谷明峰(1983-), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 研究方向为 海洋地质声学, E-mail: gufeng1024@163.com, 电话: 0532-82898541

Marine Sciences/Vol.32,No.5/2008



积物中,声波由声源发出,经过沉积物到达两个接收换能器,仪器记录接收信号的时差和能量,由下 式可以获得沉积物的纵波速度:

$$V_{\rm p} = \frac{d}{t} \tag{1}$$

式中, $V_p$ 表示纵波声速(m/s); d表示两个接收 换能器之间的距离(m); t表示声信号到达两个接收 换能器的时差(s)。

由下式可以获得沉积物的声衰减系数[3]:

$$\alpha = 10 \frac{\log(e_1 / e_2)}{d} \tag{2}$$

式中, *α* 表示声衰减系数(dB/m); *e*<sub>1</sub>, *e*<sub>2</sub> 分别表示 两个接收换能器接收到的信号能量。

## 2 室内测量实验

为了检验测量系统的工作性能,首先在室内进行了测量实验。试验时,将泥砂加到水箱中,其上加海水模拟海底沉积物,先将仪器放入水中进行校

正,精确测量两水听器之间的距离。然后,把仪器 放置在模拟海底沉积物上进行测量,测量分析模拟 沉积物的声速和声衰减系数。本试验所用的声源主 频为 30 kHz,频带宽度为 10~50 kHz。

#### 2.1 测量装置水中校正

由式(1),(2)可以看出,两个水听器之间的 距离 *d* 是声速和声衰减系数计算的重要参数,需要 精确测量。由于两个水听器本身具有一定的体积, 用直接测量的方法只能得到不精确的值,误差较大。 为此,作者采用间接测量的方法,即在水中对装置 进行距离校正。

校正时,把装置放入水中进行测量,水中接收 到的声信号如图 2a 所示。对两个水听器接收到的有 效信号进行相关分析,计算出两道信号的时差*t*。 为了降低测量的偶然误差,重复测量 10 次,对计算 出的 10 次时差进行平均,得到平均时差为 65 µs。

根据声信号常温常压下在水中的传播速度 V<sub>w</sub>, 由 *d=V<sub>s</sub>t* 可以计算两个接收换能器之间的精确距离, 多次测量得到的平均值为 9.75 cm。



国2 关孤记录时放形



a. 原位测量装置水中校正得到的信号;b. 室内沉积物测量记录的一组波形;c. 海滩细砂区记录的一组波形

a. received waveform for calibration in the water; b. received waveform in the laboratory measurement; c. received waveform measured in sea beach

#### 2.2 沉积物测量分析

取海滩泥沙(中值粒径 0.3 mm)加到水池中, 其上加海水模拟海底沉积物。对测量装置进行校正 后,对模拟沉积物的声速和声衰减系数进行了测量。 作者共进行了 5 次测量,其中的一组记录波形如图 2b 所示,测量分析得到的结果见表 1,5 次测量的 平均纵波声速为 1 688.4 m/s,平均声衰减系数为 115.2 dB/m。在模拟沉积物的制取过程中,破坏了 泥沙原有的压实结构,并有可能混入气泡。另外, 由于室内测量的水池较小,测量对模拟泥沙沉积物 的扰动影响在很长的时间内难以恢复,实验室中测 量的模拟沉积物的声衰减系数较大与这有关。

## 3 海滩原位测量实验

海底底质沉积物可以看作是由砂泥固体颗粒 和海水流体组成的固液两相多孔介质,声波在其中 的传播不仅受固体颗粒相互作用的控制,其中所含 流体也会对声的传播产生重要影响,在很大程度上 决定了声速和声衰减系数的大小。砂质沉积物中国 近海各个海域的底质中分布广泛<sup>[4,5]</sup>,研究声波在泥 砂中传播的声学特性将对中国海域的海底底质调查 等研究具有指导意义。



表1 室内模拟泥沙沉积物测量的声速和声衰减系数

Tab.1	Measured speed and attenuation of sediments at the
	laboratory

labora	atory	
测点号	声速	声衰减系数
	(m/s)	(dB/m)
L-1	1 681.0	128.6
L-2	1 688.3	94.4
L-3	1 703.1	134.2
L-4	1 673.8	115.2
L-5	1 695.7	103.8
平均值	1 688.4	115.2

海底底质在自然状态下都是饱和状态的,为了 与真实的海底底质原位测量一致,用来进行测量的 泥沙都是被海水覆盖,饱和状态下的海滩泥沙沉积 物。作者在海滩选取了海滩细砂区、岸边砂波区和 岸边粗砂区 3 个区域进行测量,同一个区域各测点 之间泥沙的平均粒径基本相同,不同测区之间的泥 沙平均粒径有所变化。3 个测区利用原位测量装置 进行实际观测(海滩细砂区测量记录的一组波形见 图 2c),并取样在实验室内测量沉积物的粒径。对 得到的声学数据进行处理,计算出各测点海滩泥沙 的声速和声衰减系数。

#### 3.1 不同测区的泥沙声速

在每个测区选取 10 个站位进行测量,各站点测 量得到的声速见表 2。为了准确反映不同测量区域 整体的声学特征,对每个测区的 10 个测点的测量值 求平均,进行分析。海滩细砂区的平均值为 1 684 m/s, 砂波区为 1 674.5 m/s,粗砂区为 1 732 m/s。

在声学测量的同时,对3个测区的泥沙进行取 样,在实验室内进行粒度分析。分析结果显示:岸 边砂波区的平均粒径为0.19 mm,海滩细砂区为 0.21 mm,岸边粗砂区平均粒径最大,为0.72 mm。 将声速值结合粒径数据分析可以看出,3 个测区的 平均声速值变化与粒径的大小存在一定的关系。整 体上来看,粒径越粗,声速值越高。

#### 表 2 3 个测区各测点的声速

Tab.2 Sediment speeds of the 3 measure areas

海滩细砂区		岸边砂波区		岸边粗砂区	
测点号	声速 (m/s)	测点号	声速(m/s)	测点号	声速 (m/s)
A-1	1 688.3	B-1	1 673.8	C-1	1 748.9
A-2	1 695.7	B-2	1 681.0	C-2	1 725.7
A-3	1 681.0	B-3	1 666.7	C-3	1 710.6
A-4	1 695.6	B-4	1 673.8	C-4	1 703.1
A-5	1 673.8	B-5	1 681.0	C-5	1 725.7
A-6	1666.7	B-6	1 673.8	C-6	1 725.7
A-7	1 681.0	B-7	1 673.8	C-7	1 725.7
A-8	1 673.8	B-8	1 666.7	C-8	1 748.9
A-9	1 688.3	B-9	1 673.8	C-9	1 756.8
A-10	1 695.7	B-10	1 681.0	C-10	1 748.9
平均值	1 684.0	平均值	1 674.5	平均值	1 732.0
标准差	10.4	标准差	5.3	标准差	18.0

### 3.2 不同测区的泥砂声衰减系数

由表 3 可以看出,海滩泥沙上覆海水深度较浅, 沉积物受海水的压实作用较小,同时受海浪冲刷的 影响,泥沙较为松散,对声信号的衰减作用非常强 烈,声衰减系数较大。3 个测区的声衰减系数最大的为 海岸粗砂区,平均为 96.7 dB/m,标准差为 36.8 dB/m(粗 砂区由入海水流冲刷影响,压实性较差,引起声衰 减系数的标准偏差较大);其次为细砂区,平均声衰 减系数为73.7 dB/m,标准偏差6.8 dB/m;砂波区声 衰减系数最低,仅为61.6 dB/m,标准偏差5 dB/m。 结合粒径数据分析可以看出,沉积物的粒径越粗, 其声衰减系数越大,对声信号的衰减作用越强烈。

比较室内测量的数据可以看出,海滩细砂区和 砂波区的声衰减系数值较室内测量的值要小的多,



这是由于在制取室内模拟沉积物的过程中,破坏了 泥沙原有的沉积结构,并且有一定的气泡混入,大 大增加了声信号的衰减。

## 4 海滩松散泥沙声学特性分析

## 4.1 纵波声速特性

Hamilton<sup>[6]</sup>对海底沉积物的声学特性与其它物 理参数之间的关系做了大量研究,提出沉积物的声 速与孔隙度、密度以及粒度呈线性相关,声速随孔 隙度的增大而降低,随粒径的变大、密度的升高而 升高。他还将室内测量以及原位测量的声速和其它 参数数据进行回归分析,得到了声速与其它物理参 数的经验公式。通过海滩不同区域的泥沙测量,作 者研究了声速与粒径的关系,发现沉积物的粒径越 粗,声信号在其中传播的速度越快,砂波区粒度为 0.19 mm,声速为1674.5 m/s,而在岸边粗砂区, 粒度变为0.72 mm时,平均声速增加到1732 m/s。 在本次海滩原位测量中,沉积物声速并不是随粒径 的增大而线性升高,表面上看不符合 Hamilton 提出 的两者之间的线性关系,但是经过深入分析,可以 发现造成这一差异的原因,Hamilton 的研究中是在 其它参数不变的情况下,沉积物声速随粒度线性升 高。而在本次测量中,粒度和孔隙度同时发生了变 化,粒度增大了孔隙度也增大了,这种情况使声速 没有随粒度增大而线性升高。

#### 表 3 3 个测区各测点的声衰减系数

Tab.3Sediment attenuations of the 3 measured areas

海滩细砂区		岸边砂波区		岸边粗砂区	
测点号	声衰减系数(dB/m)	测点号	声衰减系数(dB/m)	测点号	声衰减系数(dB/m)
A-1	62.2	B-1	60.6	C-1	118.6
A-2	81.6	В-2	64.5	C-2	83.6
A-3	69.4	B-3	53.3	C-3	63.8
A-4	73.8	B-4	65.8	C-4	58.1
A-5	71.6	B-5	64.2	C-5	88.5
A-6	74.9	B-6	56.3	C-6	58.8
A-7	80.3	B-7	67.5	C-7	67.4
A-8	64.7	B-8	55.0	C-8	155.9
A-9	81.9	B-9	65.3	C-9	133.5
A-10	76.4	B-10	63.3	C-10	138.4
平均值	73.7	平均值	61.6	平均值	96.7
标准差	6.8	标准差	5.0	标准差	36.8

Biot<sup>[7,8]</sup>建立了声波在两相介质中传播的理论 模型,针对海底沉积物,Stoll对其进行了修改<sup>[9,10]</sup>, 并利用该模型预测存在"快波"和"慢波"两种纵波, 这种预测已经在实验中被证实存在<sup>[11,12]</sup>。作者认为, 声波在饱和两相孔隙流体介质中主要通过两种途径 传播:(1)在矿物骨架中传播,即通过相互连接的 颗粒进行传播;(2)在颗粒之间的孔隙流体中传播。 而声速在矿物骨架中的传播速度要远大于在孔隙流 体中的传播速度,这种速度差异使通过两种途径传 播的波存在一定的时差,从而形成了"快波"和"慢 波"。

由以上分析可以看出,声速在饱和的海滩泥沙 中传播主要是受沉积物孔隙所含流体和沉积物颗粒 大小这两个因素控制,密度、孔隙度等其它物理参数的变化最终还是要通过孔隙流体的变化对声速变 化起作用。当沉积物密度较大、孔隙度较低时,含 水量较低、孔隙流体含量较少,这时声波主要靠矿 物骨架传播,所以声速较大;当沉积物颗粒较大时, 有利于声波通过矿物颗粒形成的骨架进行传播,从 而声速较大,本文在海滩泥沙不同粒径区域的实验 证实了沉积物粒径大小对声速具有重要影响。

## 4.2 声衰减系数特性

通常,人们所指的声衰减是声波在沉积物中传播所造成的能量损失的总合。在两相孔隙流体介质中,引起衰减的内部机制主要有3个:(1)在声场作用下,沉积物孔隙流体与矿物颗粒相对运动引起



的能量耗散;(2)颗粒之间相互摩擦引起的能量损失;(3)沉积物颗粒对声波的发散作用。此外,海 滩泥沙沉积物本身所含的气泡、贝壳等物质所引起 的沉积物的非均质性在声信号传播时也会引起能量 的异常损失。

作者在粒径较细的砂波区测得的平均声衰减 系数为 61.6 dB/m, 粒径稍大的海滩细砂区的平均声 衰减系数稍微有所升高, 在粒径最大的岸边粗砂区, 声衰减系数增大到 96.7 dB/m。本实验结果表明, 泥沙颗粒粒径的大小对声信号的衰减有重要的影 响, 粒径越粗, 声衰减系数越大。

## 5 结论

通过分析研究,主要得到以下几点结论:(1)作 者提出的一点发射两点接收的海底松散沉积物声学 性质原位测量方法,经过室内试验和海滩测量分析 证明是可行的,可以据此开发海底浅层沉积物声学 性质原位测量技术,提高相关海洋调查的速度和效 率;(2)室内的模拟实验和海滩实测分析证明,海 底松散沉积物对于高频声波(10kHz以上)具有很 强的衰减作用,平均粒径越大,衰减越强。因此在 进行海底沉积物原位测量时,测量系统的发射接收 距离不能太大,一般不能超过1m;(3)通过分析 饱和两相孔隙流体介质的声学性质,认为声波在两 相介质中传播的声速主要与孔隙流体和沉积物颗粒 粒径有关,孔隙流体含量小、沉积物粒径大,声速 较大; 声波在两相介质中衰减的内部机制主要有 3 个: 沉积物颗粒间的摩擦、孔隙流体与矿物颗粒间 的相对运动以及沉积物颗粒对声的发散作用。

#### 参考文献:

- Griffin S R, Grosz F B, Richardson M D. ISSAMS: A remote in situ sediment acoustic measurement system [J]. Sea Technology, 1996, 37(4): 19-22.
- [2] 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.

- [3] GB 12763 5-91,海洋调查规范海洋声、光要素调查[S].
- [4] 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,2005,24(2):
  28-33.
- [5] 卢博,李赶先,黄韶健,等.中国黄海、东海和南海北部海 底浅层沉积物声学物理性质之比较[J],海洋技术,2004, 23(1):66-70.
- [6] Hamilton E L, Bachman R T. Sound velocity and related properties of marine sediments [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1982, 72(6):1 891-1 904.
- Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. low frequency range [J].
   Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28:168-178.
- [8] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. higher frequency range [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28:179-191.
- [9] Stoll R D, Bryan G M. Wave attenuation in saturated sediments [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1970, 47:1 440-1 447.
- [10] Stoll R D. Acoustic waves in ocean sediments [J]. Geophysics, 1977, 42:715-725.
- Plona T J. Observation of a second bulk compressional wave in a porous medium at ultrasonic frequencies [J].
   Applied Physics Letters, 1980, 36 (4): 259-261.
- [12] Chotiros N P, Mautner A M, Lovik A. Acoustic penetration of a silty sand sediment in the 1-10-kHz band[J].
  IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1997, 22(4):604-615.

(下转第16页)

(上接第5页)

# Experimental research of in situ acoustic properties measurement of seafloor unconsolidated sediment

# GU Ming-feng<sup>1,2</sup>, GUO Chang-sheng<sup>1</sup>, LI Hui-yin<sup>3</sup>

(1.Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Georesources College, China Petroleum University, Dongying 257061, China)

Received: Dec., 14, 2007 Key words: sediment compressional velocity; acoustic attenuation; in situ measurement

**Abstract:** In this paper, we analyse the measurement method of compressional wave velocity and acoustic attenuation in unconsolidated seafloor sediment, and develope an in situ measurement system based on this analysis. Experiments in laboratory and sea beach are conducted separately. In this experiment, compressional wave velocity and attenuation coefficient are measured using this system. By analyzing the acoustic data acquired, we get conclusions that the grain sizes affect obviously the compressional velocity and attenuation coefficient, the increase of grain size will cause a high speed and a strong attenuation. The research in this paper can be used to develop the technology of in-situ measurement of seabottom sediment acoustic properties, which may develop the efficiency of the seabottom investigation greatly.

(本文编辑:刘珊珊)

海洋科学/2008 年/第 32 卷/第 5 期

16