

基于同轴差距测量法的南海深水海底沉积物 声衰减特性研究

邹大鹏¹, 卢博², 吴百海¹, 梁润华¹, 陈飞燕¹

(1. 广东工业大学机电学院, 广东 广州 510090; 2. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 南海海洋研究所, 广东 广州 510301)

摘要: 通过分析沉积物声波测量过程能量损失的实质, 阐述平行轴差距衰减测量法和垂直轴差距衰减测量法的研究基础——差动式衰减测量方法原理, 并推导了其衰减系数公式。根据南海沉积物的柱状样品分装的特点, 结合以上两种方法, 提出了同轴差距衰减测量法, 这种方法具有原理上的合理性并且其可操作性强; 运用此方法测量了沉积物在常温和温度控制变化条件下的声波信号, 计算了衰减系数, 研究了温度对沉积物声波传播能量的影响, 得出南海深水海底沉积物具有以下声衰减特性: 沉积物含砂量高, 声衰减系数大; 随着温度的升高, 沉积物的声衰减系数变化具有不均匀性, 整体呈非线性减小趋势。以上研究将为声学遥测和反演海底沉积物的物理力学特性提供数据和方法支持。

关键词: 南海; 沉积物; 温度; 声衰减

中图分类号: P733.23, P736.211

文献标识码: A

文章编号: 1009-5470(2009)03-0035-05

Acoustic attenuation characteristics of deep-water seafloor sediments from the South China Sea based on coaxial differential distance attenuation measurement method

ZOU Da-peng¹, LU Bo², WU Bai-hai¹, LIANG Run-hua¹, CHEN Fei-yan¹

(1. Faculty of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China;

2. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China)

Abstract: The authors analyze the essential energy loss during sediment acoustic measurement process, describe the principle of differential attenuation measurement that is the research base of parallel-axis and vertical-axis differential distance attenuation measurement methods, and deduce its attenuation coefficient formula. According to sectioning characteristics of the cylinder seafloor sediment samples from the South China Sea, a coaxial differential distance attenuation measurement method (CDDAMM) is put forward with combination of the above two methods, which is reasonable in principle and feasible in practice. Using CDDAMM, they measure the sound propagation signals of the sediments in both room and controlled temperatures, calculate the acoustic attenuation coefficient, and study the effect of temperature on sound propagation energy. The sound attenuation characters of deep-water seafloor sediments from the South China Sea are as follows. The sediments have large acoustic attenuation coefficients with high sand contents. As temperature increases, the attenuation coefficients vary nonlinearly and inhomogeneously, with a descending trend on the whole. This research has provided both data and method for acoustic remote measurement and inversion of physical and mechanical properties of seafloor sediments.

Key words: South China Sea; sediment; temperature; acoustic attenuation

海底沉积物是一种由孔隙海水和固相孔隙介质组成的混合物, Stoll^[1]和 Buckingham^[2]都认为它是一种松散骨架状态的沉积物。这种松散骨架的混

合物状态导致了声波传播的复杂性和非线性, 而其传播能量特性直接影响着声波信号的获取、首波起跳点的判读、声波幅度的分析, 从而制约着声时读

收稿日期: 2008-10-29; 修订日期: 2009-01-16。卢冰编辑

基金项目: 中国科学院声场声信息国家重点实验室资助项目(200801), 国家自然科学基金项目(40876018)

作者简介: 邹大鹏(1977-)男, 黑龙江省德都县人, 博士, 主要从事海洋工程、机电液工程的研究。Email: anthonyzou@126.com

取、衰减特性计算和频率分析的精度。Hamilton^[3]、陶春辉^[4]、谷明峰^[5]等开展了原位测量方法研究沉积物声衰减特性，刘强^[6]、吴锦虹^[7]等基于实验室测量方法研究了南海沉积物的声衰减特性。两种方法都采用衰减系数来描述不同沉积物的声波传播能量的损失特性，探寻声衰减与沉积物物理参数关系。

本文通过分析沉积物声传播能量传递过程的实质，阐述以上两种方法的研究基础——差动式衰减测量方法原理，并推导了其衰减系数公式；根据南海沉积物的柱状样品分装的特点在方法上提出了同轴差距衰减测量法(coaxial differential distance attenuation measurement method, CDDAMM)，这种基于实验室测量法的方法与前述实验室衰减测量法相比具有原理上的合理性，与原位测量法相比可操作性强；基于此方法测量了温度控制变化下的沉积物声波信号，计算了衰减系数，研究沉积物物理参数外的温度因素对沉积物声波传播能量的影响。

1 同轴差距衰减测量法

1.1 差动式测量方法原理

海底沉积物声波测量实质为能量在换能器发射端、海底沉积物和换能器接收端之间的传递过程。因此，测量过程总能量损失(TL)共包括 5 个部分：发射端的传输能量损失(TL_e)、发射端与沉积物耦合传输能量损失(TL_{ec})、沉积物传输能量损失(TL_{sa})、沉积物与接收端耦合传输能量损失(TL_{rc})和接收端传输能量损失(TL_r)。其表达式如下

$$TL = TL_e + TL_{ec} + TL_{sa} + TL_{rc} + TL_r \quad (1)$$

其中，沉积物传输能量损失(TL_{sa})直接体现沉积物的衰减特性，而其他 4 部分能量损失在声衰减测量中都属于干扰量。为了消除掉其他 4 部分能量损失的影响，获得沉积物的衰减特性，通常测量两段质相同、长度差为标准尺寸的沉积物，然后对获得的两段传输能量损失求差，从而得到标准距离状态下的沉积物衰减特性。其前提假设为两次测量中换能器的状态相同，且与沉积物的耦合状态相同。通过求差，消除换能器的影响，只保留沉积物自身衰减特性。这里定义这种方法为差动式衰减测量法，表达式如下

$$TL_{sa}(r_1, r_2) = TL(r_1) - TL(r_2) = TL_{sa}(r_1) - TL_{sa}(r_2) \quad (2)$$

式中，TL_{sa}(r₁, r₂)表示长度为 r₁、r₂ 两段沉积物传输能量损失差；TL(r₁)，TL(r₂)表示两段沉积物各自的发射换能器与接收换能器之间的总

能量传输损失；TL_{sa}(r₁)，TL_{sa}(r₂)表示两段沉积物各自的传输能量损失。

差动式衰减测量法是当前海底沉积物衰减测量普遍采用的方法，如原位测量方法^[3-5]和实验室测量方法^[6,7]等都是基于差动式测量的原理，其中原位测量法由于接收换能器轴线互相平行，称为平行轴差距衰减测量法，刘强等的实验室测量方法的两个接收换能器轴线相互垂直，称为垂直轴差距衰减测量法。

根据传播损失定义式^[8]，可得

$$TL_{sa}(r_1, r_2) = 10 \lg(I_{r_2}/I_{r_1}) \quad (3)$$

式中，I_{r₁}、I_{r₂}分别表示 r₁、r₂ 两段沉积物测得的声强度。

引入衰减系数 α，式(2)可表示为

$$TL_{sa}(r_1, r_2) = \alpha(r_1 - r_2) \quad (4)$$

由式(3)、(4)可得衰减系数 α 的表达式如下

$$\alpha = 10 \lg(I_{r_2}/I_{r_1})/(r_1 - r_2) \quad (5)$$

衰减系数与距离无关，是沉积物自身的本质属性，是表示沉积物能量损失特性的重要参数。

1.2 同轴差距衰减测量方法结构原理

根据衰减测量的南海海底沉积物样品主要为柱状采集方式，运回实验室，采用直径 75mm 的 PVC 管进行分装的特点，结合平行轴差距衰减测量法和垂直轴差距衰减测量法，我们提出一种适合于分装沉积物样品衰减测量方法——同轴差距衰减测量法，这种方法保证接收换能器的轴线一致，同时结构简单，便于操作。其结构原理见图 1，方法如下：换能器的发射端和接收端同轴测量沉积物样品 s1 的声波信号后，截断沉积物样品为 s2，保持换能器的发射端和接收端同轴测量 s2，两次测量的结果按照式(2)进行计算，得到 s3 段沉积物的能量损失。

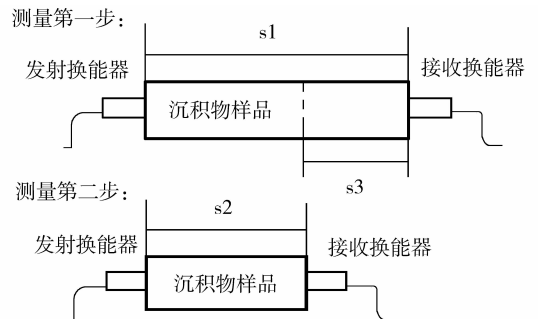


图 1 同轴差距衰减测量法结构原理图
Fig. 1 Schematic diagram of CDDAMM

对于简谐波，声波传播声强与声压有如下关系^[9]

$$I = p_m^2 / (2p_0 c_0) \quad (6)$$

式中, p_m 为简谐波的最大声压幅值, 与距离有关; ρ_0 、 c_0 为沉积物的密度和声速。

将式(6)代入式(5)可得

$$\alpha = 20 \lg (A_{r_2} / A_{r_1}) / (r_1 - r_2) \quad (7)$$

式中, A_{r_1} 、 A_{r_2} 分别为 r_1 、 r_2 段接收声波信号的声压最大幅值。

式(7)为衰减系数的计算公式, 根据能量衰减可知衰减系数 α 总为正值。

2 海底沉积物声衰减测量装置与过程

海底沉积物的声学测量装置结构图如图 2, 运用同轴差距衰减测量法测量沉积物声衰减特性, 通过控制温度可以模拟实际环境中南海广阔海域的沉积物处于的不同温度状态。

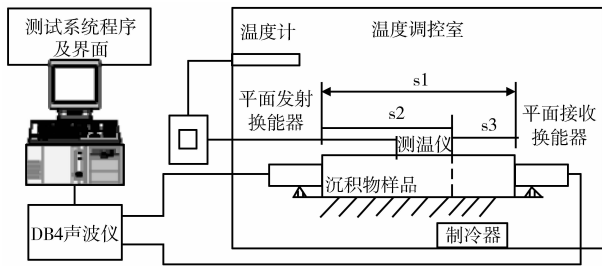


图 2 温度控制声衰减测量装置结构示意图

Fig. 2 Structural sketch of temperature-controlled sound attenuation measurement

制冷装置采用冰柜, 调节至所需的恒定温度, 控制降温速度; 通过温度计测量温度调控室温度, 保证降温过程平缓; 通过测温仪测量沉积物样品温度, 判断温度稳定在测定温度下, 测温仪分辨率为 1°C ; 运用 DB4 声波音测量沉积物并记录温度稳定时的声波图, 测量实际主频为 37.1kHz 。

3 南海深水海底沉积物声衰减测量结果

3.1 常温状态下的声衰减系数

沉积物样品采自南海深水海域, 封装后返回陆地实验室进行分装测量, 测得典型样品常温状态下声衰减系数及物理参数见表 1。

与其他两个样品相比, NHS0805 的 B 段中含有砾且含量为 2.47% , 颗粒大, 衰减亦大。以上数据表明, 南海深海海底沉积物含砂量大, 衰减系数大, 与谷明峰^[5]的研究结论一致。陶春辉^[4]开展沉积物原位测量, 采用 35.4kHz 的测量频率, 得到声衰减数据为: 砂含量为 80% 的样品声衰减系数为 $33.5\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$, 砂含量为 75% 的样品声衰减

系数为 $24.0\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 。运用同轴差距衰减测量法在实验室环境下测得的衰减系数与原位测量数据接近但偏低, 相比差异在于陶春辉测量的沉积物砂含量高。

表 1 样品声衰减系数及物理参数

Tab. 1 Acoustic attenuation coefficients and physical parameters of samples

样品段	NHS0802 的 B 段	NHS0805 的 B 段	NHS0805 的 E 段
衰减系数/ $(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$	12.77	18.59	8.93
长度/m	0.30	0.295	0.33
孔隙度/%	53.69	56.89	68.26
含水量/%	44.13	49.02	75.95
湿密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.80	1.77	1.62
砾含量/%	0	2.466	0
砂含量/%	42.69	43.42	6.69
粉砂含量/%	40.84	35.94	66.70
粘土含量/%	16.48	18.17	26.61
类型	粉砂质砂	粉砂质砂	粘土质粉砂

3.2 温度变化下的声衰减特性

对 NHS0802 沉积物样品 CDE 段、DE 段、E 段三段分别进行温度控制状态下的测量, 运用式(7)计算得到 C、D 两段的衰减系数, 其随温度变化趋势及各测量段样品的最大声波幅值随温度变化如图 3。C、D、E 段物理参数见表 2。

表 2 样品 NHS0802 物理参数

Tab. 2 Physical parameters of Sample NHS0802

样品段	C 段	D 段	E 段
长度/m	0.325	0.280	0.266
孔隙度/%	53.12	52.54	49.69
含水量/%	43.26	40.00	36.71
湿密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.80	1.88	1.89
砾含量/%	0	0	3.68
砂含量/%	49.61	51.20	62.77
粉砂含量/%	35.21	15.71	22.99
粘土含量/%	15.18	33.09	10.57
类型	粉砂质砂	粉砂质砂	细砂

图 3a 和图 3c 表明沉积物样品的衰减系数呈现波动变化, 处于一种非线性的趋势, C 段样品的衰减系数变化范围 $4.8\text{—}23.0\text{dB}$, D 段样品的衰减系数范围为 $16.6\text{—}31.8\text{dB}$ 。

图 3b 和图 3d 表明温度对沉积物传播声波的能量影响非常显著, 温度升高, 测量系统传播损失增大。当温度由 3°C 增加到 21°C 过程中, 沉积物声波信号幅值下降, CDE、DE、E 三段样品的幅值下降幅度分别为 43% 、 59% 、 61% ; 声波信号幅值下降过程中, 个别温度处幅值出现较大起伏, 呈现非线性变化。

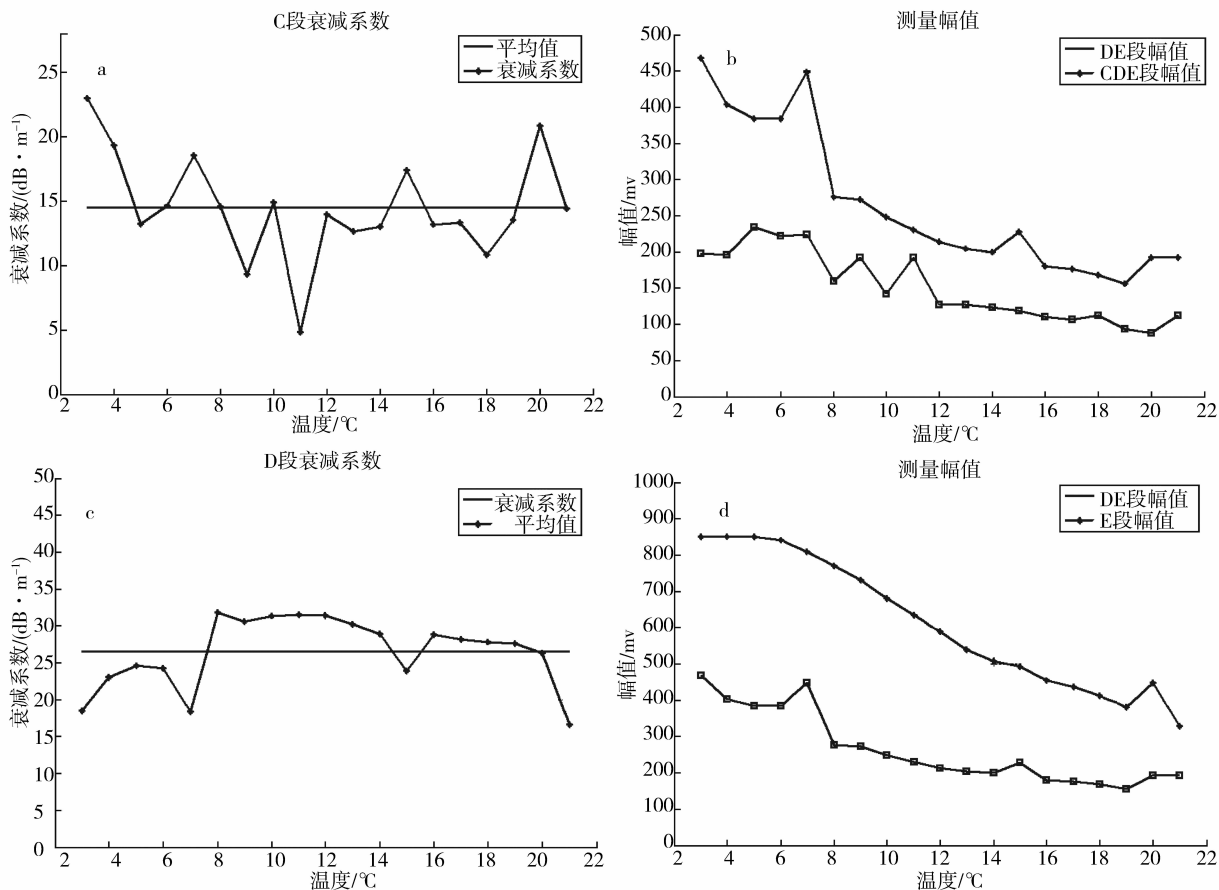


图 3 温度控制变化下沉积物 NHS0802 的声波幅值和衰减系数曲线

Fig. 3 Sketch of sound wave amplitudes and attenuation coefficients of Sample NHS0802 with varied temperature

结合图 3a 和图 3b, 对于均匀变化区域, 可以看出 C 段沉积物的衰减系数的变化趋势, 3、4、8、10、12、13、14、16、17、19°C 时, 衰减系数由快速减小到缓慢减小, 整体上呈现减小趋势; 结合图 3c 和图 3d, 观察 D 段, 8、9、10、11、12、13、14、16、17、18、19°C 时, 衰减系数变化平稳, 呈现减小趋势。Carbó^[10] 实验测量了细砂沉积物, 当温度升高时, 声衰减系数减小, 南海沉积物的声衰减特性与其结论相符合。

4 讨论与结论

南海海域具有形态各异的海底沉积物^[11], 深水沉积物受到陆地污染作用影响较小, 因此其声衰减特性具有一定的代表性。

对于海底沉积物, 本质上是一种松散骨架状态的两相混合物, 具有粘弹塑性属性, 当温度升高时, 沉积物中的孔隙海水和固相孔隙介质的分子热运动增强, 尤其是孔隙海水的粘性减弱, 布朗运动增加显著, 与固相孔隙介质相互之间的无规则的碰撞性增强, 导致声波传播能量发生散射和消耗, 同

时固相介质颗粒之间润滑性增强。正如 Carbó^[10] 所指出, 颗粒状沉积物的损失机理是多方面的。考虑换能器自身热特性以及耦合面的热特性影响因素, 导致了接收到的沉积物样品声波信号幅值降低, 且变化呈现非线性。此外, 在漫长的沉积过程中, 具有分层特征和存在着贝壳、砾石等较大颗粒, 这些层间状态以及大颗粒固相成为温度变化过程中不均匀性源, 使得幅值整体减小趋势下出现了波动变化。如 NHS0802-E 段沉积物含有颗粒较大的砾石成份。第三, 这种幅值波动性还可能与换能器和沉积物接触处的耦合状态有关, 因为沉积物的粘弹塑性属性, 沉积物在温度变化过程中会出现微流动, 影响耦合状态, 产生不均匀性, 这种不均匀性在接触式测量中无法消除, 从而造成声衰减系数的不均匀性。

由于声衰减系数的计算涉及到两段沉积物样品的测量, 累积的沉积物的温度变化特性的非线性因素更为复杂, 使得声衰减系数的温度变化特性曲线波动程度越大, 呈现出非线性。

基于同轴差距衰减测量法研究沉积物声衰减特性, 可以初步得到南海深水沉积物具有以下特性:

沉积物含砂量高，声衰减系数大。

沉积物的声衰减系数变化具有不均匀性，整体呈非线性减小趋势。

温度升高过程中，衰减系数整体上减小，表明沉积物自身声传播损失减少。但各段样品的声传播信号幅值下降，声传播损失增大，表明除沉积物自身声传播损失外，其他4部分总能量损失之和在增大。由此可以得出差动式测量方法具有原理上的正确性，通过求差消除测量仪器及其与沉积物耦合状态对沉积物声学测量的影响，从而得到沉积物自身的声传播损失。

同轴差距衰减测量法在原理上保证了实验室测量过程中声波传播能量接收的同轴性和同指向性，为柱状沉积物样品的衰减测量提供了一种较为实用、新颖的方法。而海底沉积物的声衰减特性深入研究，将为声学遥测和反演海底沉积物的物理力学特性提供数据支持和方法。

参考文献：

- [1] STOLL R D, BRYAN G M. Wave attenuation in saturated sediments [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1970, 47(5): 1440—1447.
- [2] BUCKINGHAM M J. Theory of acoustic attenuation, dispersion, and pulse propagation in unconsolidated granular materials including marine sediments [J]. *The Journal of*

the Acoustical Society of America, 1997, 102(5): 2579—2596

- [3] HAMILTON E L, BUCKER H P, KEIR D L, et al. Velocities of Compressional and Shear Waves in Marine Sediments Determined In Situ from a Research Submersible[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(20): 4039—4049
- [4] 陶春辉, BAFFI S, WILKENS R H, 等. Biot 反演在夏威夷钙质沉积物原位测量声速和衰减中的应用[J]. *海洋学报*, 2005, 27(3): 80—84.
- [5] 谷明峰, 郭常升, 李会银. 海底松散沉积物声学性质原位测量实验研究. *海洋科学*. 2008, 32(5): 1—5, 16.
- [6] 刘强, 卢博, 黄韶健等. 海底沉积物颗粒因素在不同频率下对声衰减的影响. *热带海洋学报*, 2007, 26(4): 27—31.
- [7] 吴锦虹, 邹大鹏, 吴百海, 等. 海底沉积物样品声衰减与温度关系的实验研究[J]. *声学技术*, 2008, 27(5): 481—486.
- [8] 刘伯胜, 雷家煜. *水声学原理*. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1993.
- [9] 许肖梅. *声学基础*. 科学出版社, 2003.
- [10] CARBÓ R, MOLERO A C, MOLERO. The effect of temperature on sound wave absorption in a sediment layer[J]. *The Journal of the Acoustic Society*, 2000, 108(4): 1545—1547.
- [11] LU BO, LI GANGXIAN, HUGNG SHAOJIAN, et al. Physical properties of sediments on the Northern Continental Shelf of the South China Sea. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2006, 24: 47—60.