

温度对海底沉积物声学特性影响实验研究*

洪刚¹, 吴百海¹, 邹大鹏^{1,2}

1. 广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510090;

2. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301

摘要:温度的变化是影响海底沉积物声学特性非常重要的因素之一。文章采用同轴差距衰减测量法, 在不同温度下对海底沉积物声学特性进行测量, 实验得出南海海底沉积物随着温度的升高具有以下声学特性: 1) 沉积物声速变化比较缓慢, 上下波动点较明显, 但总体趋势接近线性下降; 2) 衰减幅值随着温度升高一直下降, 偶尔有些波动的异常点, 声衰减幅值呈现线性下降的趋势; 3) 声衰减系数变化呈现抛物线趋势, 具有强非线性。对于此类沉积物声速特殊情况, 还有待从理论和实验方面更深入地研究解释其成因。

关键词: 海底沉积物; 声速; 声衰减; 温度

中图分类号: P733.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2011)06-0070-04

Experimental study on acoustic characteristics of seafloor sediment on effects of temperature

HONG Gang¹, WU Bai-hai¹, ZOU Da-peng^{1,2}

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: Temperature changes which affects the acoustic characteristics of marine sediment is a very important factor. The coaxial differential distance attenuation measurement method is applied on measuring the seafloor sediment acoustic characteristics at different temperatures in this article. As the temperature increasing, some conclusions of acoustic characteristics of marine sediment could be draw: 1) sediment sound velocity changes slowly with obvious fluctuation, but the overall trend of decline is nearly in linear; 2) decay amplitude has been falling in a linear amplitude attenuation downward trend with some volatility outliers; 3) attenuation coefficient shows parabolic-like trend, with strong nonlinearity. As a special type, the speed of sound decreasing with increasing temperature requires further theoretical and experimental study to explain the causes.

Key words: seafloor sediment; acoustic velocity; acoustic attenuation; temperature

海底沉积物声学特性研究是当今海洋研究的重要课题之一。它随着海洋科学、海洋沉积学、海洋地质学等学科的发展, 受到越来越广泛的关注。准确测量海底沉积物的声速、声衰减等声学特性, 对声学探测海底沉积物底质类型、土工性质等具有重要的研究价值。目前, 对海底表层沉积物声学测量

的方法主要有 2 种, 海底沉积物声学原位测量法^[1]和样品采样后的实验室声学测量法^[2-5]。由于样品储存温度、压力等条件的变化, 实验室测量法存在由测量环境状态改变所引起的误差, 但这种方法操作方便, 可以重复测量, 技术和费用相对低, 因此作为一种常规的方法被广泛采用。

收稿日期: 2010-05-05; 修订日期: 2010-09-26。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项目(SKLOA201003); 国家海洋局海底科学重点实验室开放研究课题基金(KLSG0906); 国家自然科学基金项目(40876018)

作者简介: 洪刚(1985—), 男, 四川省内江市人, 硕士研究生。主要从事海底沉积物声学特性研究。

通信作者: 邹大鹏。E-mail: anthonyzou@126.com

* 感谢在本文研究过程中给予了宝贵的建议和指导的中国科学院南海海洋研究所卢博研究员。

影响海底沉积物声学特性的外部环境参数主要有温度、压力和盐度等，这些外部条件影响着海底沉积物内在特性的变化。从温度因素考虑，吴锦虹等^[4]基于实验室测量方法研究了南海沉积物的声衰减与温度的关系；邹大鹏等^[5]利用同轴差距衰减测量法进一步研究了海底沉积物声衰减特性。本文通过实验模拟海底沉积物在不同温度下的状态，研究温度对沉积物声速和声衰减系数的影响规律。

1 温度控制下沉积物声学特性测量实验

1.1 实验原理和测量方法

根据声衰减理论和南海海底沉积物样品柱状采集方式，本实验采用同轴差距衰减测量法对海底沉积物的声学特性进行测量。这种方法实现了发射和接收换能器的轴线在同一条直线上，在原理上保证了声波传播过程中的同轴性和同指向性^[5]。其结构原理如图 1。

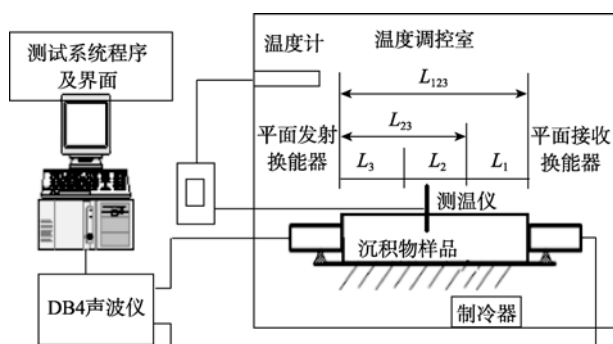


图 1 温度控制声衰减测量装置结构示意图

Fig. 1 Structural sketch of sound attenuation measurement with temperature controlled

1.2 实验装置

实验用湘潭天鸿电子研究所研制的 DB4 型多功能声波仪测量沉积物并记录声波图，配备一对平面换能器(中心频率为 37.1kHz)。用冰柜进行温度调控，调节至所需温度，模拟实际海底沉积物在不同温度下的状态。通过冰柜内和沉积物样品内的两个测温仪(精度为 1℃)来监控温度。

1.3 实验样品

本实验沉积物样品采自南海海域，密封于直径为 75mm 的 PVC 管中，两端用橡胶盖密封。带回陆地实验室分装后声学测量，声学测量后测量样品常温下的物理参数见表 1。

1.4 实验步骤

1)以凡士林为耦合剂，将换能器水平同轴均匀地耦合在沉积物样品两端表面，用支架支撑整个样

表 1 样品物理参数

Tab. 1 Physical parameters of samples

样品段	长度/m	孔隙度/%	含水量/%	湿密度/(g·cm ⁻³)	类型
L_1	0.325	53.12	43.26	1.80	粉砂质砂
L_2	0.280	52.54	40.00	1.88	粉砂质砂
L_3	0.266	49.69	36.71	1.89	细砂

品，用垫圈固定换能器，把测温仪插入 PVC 管的小孔，并密封。把沉积物放入温度调控室降至 2℃；

2)稳定后控制温升，对沉积物全段 L_{123} 进行测量，观察温度的变化，每变化 1℃ 的过程都进行多次测量，记录测量声波信号；

3)当温度接近室温，2h 之内保持温度不变时，停止测量；

4)将沉积物样品分割成 L_1 和 L_{23} ，操作过程中确保接收换能器固定不动，对 L_{23} 按 1)—3)步骤进行测量；

5)将沉积物样品分割成 L_2 和 L_3 ，操作过程中确保接收换能器固定不动，对 L_3 按 1)—3)步骤进行测量；

6)分别从 L_1 、 L_2 和 L_3 中取出部分样品，进行样品物理性质分析。

2 海底沉积物声速与温度关系

沉积物样品长度分别为 $L_{123}=871\text{mm}$ ， $L_{23}=546\text{mm}$ ， $L_3=266\text{mm}$ 。

样品 L_{123} 、 L_{23} 、 L_3 声速-温度拟合方程分别为：

$$c_{p123} = -3.4271t + 1782.1; R^2 = 0.9478 \quad (1)$$

$$c_{p23} = -2.9301t + 1877.0; R^2 = 0.9679 \quad (2)$$

$$c_{p3} = -0.9594t + 1749.1; R^2 = 0.6583 \quad (3)$$

式中， c_p 为声速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)； t 为温度(℃)； R^2 为复测相关系数。

样品 L_{123} 、 L_{23} 和 L_3 的测量声速及拟合曲线如图 2 所示。

沉积物测量样品的声速范围为 $1711\text{—}1870\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；在南海海域海底表层沉积物的声速范围 $1336\text{—}1885\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间^[6]。从图 2 可知，随着温度的连续升高，沉积物样品声速呈现一种缓慢下降的趋势。

吴锦虹等^[4]实验表明，沉积物由于成分不同、分层不同等，导致其在温度变化下内部结构也发生变化，沉积物声速缓慢波动，出现有的样品声速随温度上升，有的样品随温度下降的现象。本次实验测得声速随温度升高而下降，少数点出现波动情况，表现出变化有大有小的趋势。在 $3\text{—}22^\circ\text{C}$ 之间，样品 L_{123} 的声速变化量为 $52\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，样品 L_{23} 的声速变化量为 $61\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，样品 L_3 的声速变化量为 $22\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

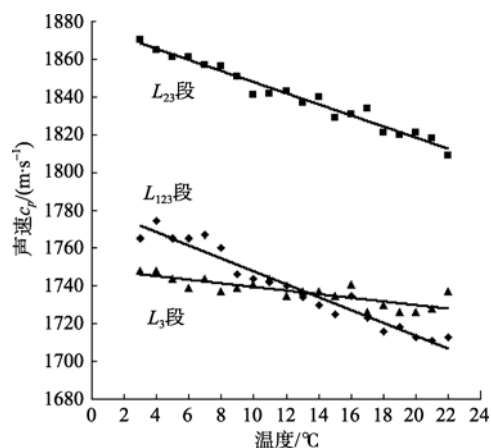


图2 沉积物声速-温度图

Fig. 2 Diagram of sound velocity-temperature

3 海底沉积物声衰减与温度关系

3.1 声波传播幅值衰减与温度关系

声衰减是声波在沉积物传播过程中能量的损失, 可以用衰减量来表示。衰减量的变化可以从幅值中体现出来。

样品 L_{123} 、 L_{23} 、 L_3 声幅-温度拟合方程分别为:

$$A_{123} = -0.0175t + 0.5004; \quad R^2 = 0.8922 \quad (4)$$

$$A_{23} = -0.0076t + 0.2510; \quad R^2 = 0.9832 \quad (5)$$

$$A_3 = -0.0384t + 1.1750; \quad R^2 = 0.9836 \quad (6)$$

式中, A 为归一化幅值; t 为温度(°C)。

测得海底沉积物声衰减幅值数据, 绘制出幅值-温度图及拟合曲线, 如图3所示。

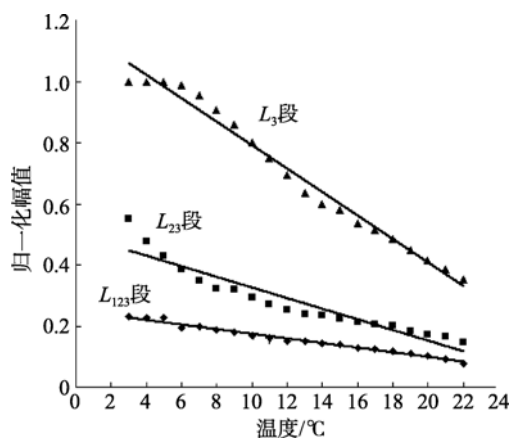


图3 沉积物幅值-温度图

Fig. 3 Diagram of amplitude-temperature

由图3可知:

(1)随着温度升高, 衰减幅值呈现一种趋于线性下降的状态;

(2)在3—22之间, 各段沉积物样品的衰减幅值不同, L_{123} 、 L_{23} 、 L_3 3段样品的幅值下降比

别为66.2%、73.1%、64.7%。

3.2 声衰减系数与温度关系

不同沉积物具有不同的声衰减特性, 沉积物的声衰减特性通常用声衰减系数 α 表示。通常用声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的关系。公式如下^[7]:

$$\alpha = 20 \lg(A_2 / A_1) / (r_1 - r_2) \quad (7)$$

式中, A_1 、 A_2 分别为固定距离 r_1 、 r_2 (单位: m) 上测得的声波信号声压最大变化幅值 (单位: μPa)。

利用式(7)计算出声衰减系数如表2所示。绘制出声衰减系数-温度图, 如图4所示。

表2 连续温度变化下的声衰减系数

Tab. 2 Attenuation coefficient during continuous temperature changing

温度	声衰减系数		温度	声衰减系数		温度	声衰减系数	
/	L_1	L_2	/	L_1	L_2	/	L_1	L_2
3	22.99	18.51	10	14.90	31.29	17	13.30	28.14
4	19.88	23.07	11	14.04	31.50	18	14.76	27.10
5	17.10	26.31	12	13.95	31.46	19	13.54	27.62
6	18.20	29.17	13	12.67	30.20	20	13.89	26.88
7	14.82	31.23	14	12.99	28.92	21	15.29	26.41
8	14.57	31.83	15	12.73	29.52	22	16.88	26.91
9	15.55	30.63	16	13.16	28.84			

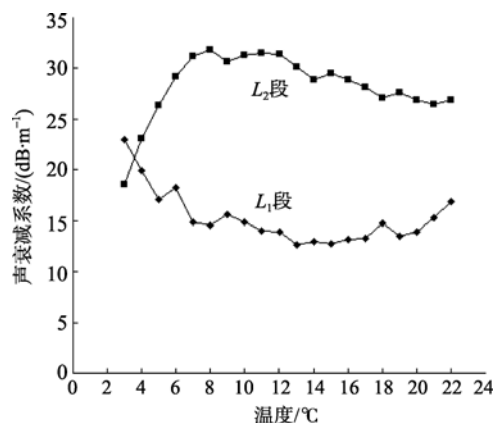


图4 沉积物声衰减系数-温度图

Fig. 4 Diagram of sound attenuation coefficient-temperature

由图4可知, 沉积物在测量频率37.1kHz下进行测量, 得出以下结论:

1)在3—22之间, L_1 声衰减系数范围12.67—22.99 $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$, 平均值15.26 $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 。其整体趋势呈抛物线形状, 即声衰减系数随着温度升高先减小后增大, 具有强非线性; L_2 声衰减系数范围为18.51—31.83 $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$, 平均值28.28 $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 。8—22随着温度升高, 沉积物声衰减系数减小。

2)在8—19之间, 随着温度升高, 两段声衰减系数呈下降趋势, 与CARBÓ等^[8]研究结果一致。

4 讨论与总结

目前海底沉积物声学物理性质的获得主要是通过实验室测量法,此方法具有操作方便,技术和费用低等优点得到了人们的普遍认可。运用同轴差距衰减测量法,控制温度变化,对海底沉积物进行声速和声衰减测量,研究沉积物声学特性与温度之间的关系,得出南海沉积物声学特性存在如下特点。

1)随着温度的升高,沉积物声速变化比较缓慢,上下波动点较明显,但总体趋势接近线性下降;

2)随着温度的升高,衰减幅值随着温度升高一直下降,偶尔有些波动的异常点,声衰减幅值呈现线性下降的趋势;

3)随着温度的升高,声衰减系数变化呈现抛物状趋势,具有强非线性。

海底沉积物通常被当成一种松散未固结状态的两相混合物^[9-10],具有黏弹塑性,随着温度的升高,沉积物中内部分子热运动增强,导致声传播能量发射散射和损耗,声衰减幅值在波动中近似线性下降;由于沉积物内部成分不同,其孔隙度、颗粒度、含水量、分层等情况也会不同,造成了沉积物在不同温度状态下,声衰减系数的变化曲线不规则,表现出强非线性。这与文献[4]、[5]所研究的南海海底沉积物的声衰减性质相同,本文对文献[5]的数据进行了校正。

但在声速温度影响性方面,南海海底沉积物除了

存在声速随着温度升高而升高的类型外^[11],还存在一类随着温度升高而波动中下降的类型,这种类型的声速变化特点与在其他海域的研究^[8,12]是不同的。

从海底沉积物的声波传播机理上分析,温度对海底沉积物的声速影响机制等效为对海底沉积物的等效弹性模量和等效密度的综合影响结果,TCFCMCM 模型等效解^[11]和 Biot^[13]效模型都能很好地解释沉积物声速随着温度升高而缓慢增加的现象,但却无法解释沉积物声速波动中下降的原因。因此,温度变化下,造成了沉积物声速下降的可能影响机制如下:

1)在实验室测量条件下,海底沉积物实际上可能是一种气、液、固三相混合物,具有多孔隙介质的耦合性,即沉积物中存在气-固耦合、气-液耦合、液-固耦合 3 种耦合特征。采样分装测量等过程引入的气体存在于沉积物中,可能会引起沉积物某些物理参数的变化,在温度升高时使声速产生波动下降情况。

2)实际状态下,孔隙结构具有不均匀性,以及海水具有黏性和惯性,液-固耦合作用明显,而且孔隙海水里悬浮、耦合或者溶解着盐、矿物质等元素,在流动过程中与不均匀的孔隙介质骨架相互作用使沉积物内部成分发生局部不均匀变化,改变了沉积物内部微观结构,可能会使沉积物声速波动下降。

对于南海存在沉积物样品声速随温度升高而下降的现象,还有待从理论和实验方面更深入地研究。

参考文献

- [1] 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.
- [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] 邹大鹏, 吴百海, 卢博, 等. 海底沉积物声速实验室测量结果校正研究[J]. 热带海洋学报, 2008, 27(1): 27-31.
- [4] 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.
- [5] 邹大鹏, 卢博, 吴百海, 等. 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[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(3): 35-39.
- [6] 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.
- [7] 吴锦虹, 吴百海, 刘强, 等. 基于声波探测海底浅层沉积物特性的方法研究[J]. 海洋工程, 2008, 26(1): 114-119.
- [8] CARBÓ R, MOLERO A C. The effect of temperature on sound wave absorption in a sediment layer [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 108(4): 1545-1547.
- [9] STOLL R D, BRYAN G M. Wave attenuation in saturated sediments[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1970, 47(5B): 1440-1447.
- [10] BUKINGHAM M J. Theory of acoustic attenuation, dispersion, and pulse propagation in unconsolidated granular materials including marine sediments[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 102(5): 2579-2596.
- [11] 邹大鹏, 吴百海, 卢博, 等. 温度对水饱和孔隙介质压缩波速度的影响[J]. 声学技术, 2008, 27(4): 492-496.
- [12] RAJAN S D, FRISK G V. Seasonal variations of the sediment compressional wave-speed profile in the Gulf of Mexico[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1990, 91(1): 127-135.
- [13] BIOT M A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media[J]. The Journal of Applied Physics, 1962, 33(4): 1482-1498.