

海底沉积物声特性与海水深度变化 关系的研究*

王琪^{1†} 刘雁春¹ 吴英姿² 张林² 李海森²

(1 海军大连舰艇学院海测工程系 大连 116018)

(2 哈尔滨工程大学水声技术国家重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要 海底沉积物声特性的实验室测量结果,相对原位直接测量,将由于测量环境的改变而发生变化。其中海水深度(压强)的改变是影响海底沉积物声传播速度、声传播衰减系数的因素之一。文章以现有海底沉积物纵波传播速度理论为依据,分析了海水深度(压强)影响海底沉积物声传播速度、声传播衰减系数的原因;设计了海底沉积物声特性实验室仿真测量系统,并根据实验数据获得海水深度(压强)影响海底沉积物声传播速度、声传播衰减系数的变化规律。

关键词 海底沉积物,声学特性,水深影响

Relation between the acoustic characters of sea bottom sediment and the seawater depth

WANG Qi¹ LIU Yan-Chun¹ WU Ying-Zi² ZHANG Lin² LI Hai-Sen²

(1 Dalian Navy Academy, Dep. of Hydrography, Dalian 116018)

(2 Harbin Engineering University, National Key Lab of Acoustic Technology, Harbin 150001)

Abstract When the measuring environment change from in situ to the laboratory, the acoustic characters of the sea bottom sediment will vary. Among those factors of the environment, the sea water depth is one of the most important items which have influence on the sound wave's propagating velocity and attenuation coefficient. In this article, the reasons for such influences are discussed. A method of measuring the acoustic characters of sea bottom sediment in laboratory and yet simulating the sea environment is designed and the variations of sound propagating velocity and attenuation coefficient with the sea water depth (pressure) are experimentally studied.

Key words Sea bottom sediment, Acoustic characters, Influence of sea water depth

2007-06-12 收稿; 2007-10-17 定稿

* 国防预研基金, 哈尔滨国防科技水声重点实验室基金项目 (51445080204JB1601)

作者简介: 王琪(1962—), 男, 辽宁人, 硕士生导师, 从事海洋测深及海洋声学的教学和研究工作。

刘雁春(1962—), 男, 山西大同市人, 教授, 博士, 博导。

吴英姿(1965—), 博士, 教授。张林(1963—), 教授。李海森(1963—), 教授, 博士, 博导。

† 通信联系人 E-mail: wang_qi@sina.com

1 引言

准确测量海底沉积物的声学特性(声速、传播衰减)是建立海洋地声学模型的基础。作为了解海底浅层沉积物物理性质与声学参量之间关系的一项基础研究,对水声学、海洋沉积学、海洋工程学等民用学科具有重要意义;同时对于掌握海底物理环境在军事上也具有重要应用价值。目前在我国,测量海底沉积物的声学特性是一项重要内容。当前,海底沉积物声学特性的直接测量方法有两种,一种是海底沉积物声学特性的原位(in situ)测量,另一种方法为采样后的实验室测量^[1-2]。限于技术的原因,我国常采用后一种方法。即利用重力式采样器,将海底沉积物以柱状样的形式采集到测量船上,并在测船实验室内利用声波参数仪测量海底沉积物的声速与传播衰减系数。但当海底沉积物以柱状样的形式采集到测量船上并在测船实验室内进行声特性参数的测量时,海底沉积物声特性参数测量的环境相对于原位测量发生了变化,如海底沉积物所处的海水水深(压力)以及温度都发生了变化。这些变化将直接影响到海底沉积物声特性参数的测量结果。本文重点研究海底沉积物声特性与海水深度(压力)之间的变化关系。

2 海底沉积物声速与海水深度(海水压力)之间的关系

根据 Biot 模型^[3-5],可将海底沉积物当作一个充满流体的多孔介质,由沉积物固体颗粒与海水双相介质组成,可视为矿物颗粒处于一种框架之中,框架的孔隙间充满了海水。沉积物中的声波传播(特别是压缩波分量的传递)在很大程度上是由双相介质的可

压缩性及平均密度来决定的。据此可得描述海底沉积物纵波传播速度 V_p 的 Wood 方程^[3]:

$$\begin{aligned}\rho &= n\rho_w + (1-n)\rho_s \\ \beta &= n\beta_w + (1-n)\beta_s \\ V_p &= \{[n\rho_w + (1-n)\rho_s] \\ &\quad \times [n\beta_w + (1-n)\beta_s]\}^{-1/2}\end{aligned}$$

式中 ρ 和 β 为沉积物对海水与固体颗粒的密度和体积压缩系数所做的体积平均(下标 w 和 s 分别表示海水和固体颗粒), n 为沉积物的孔隙率。将上式略做变化可推导出^[6]:

$$V_p = V_0 \left\{ \left[n + (1-n) \frac{\rho_s}{\rho_0} \right] \cdot \left[n + (1-n) \frac{\beta_s}{\beta_0} \right] \right\}^{-1/2}$$

式中: $V_0 = (\rho_0\beta_0)^{-1/2}$ 为海水声速。

根据沉积物声速的表达式可以分析得出结论:海底沉积物声速与海底沉积物上覆海水的声速有关。由于海底沉积物固体颗粒的密度与体压缩系数随海水水深(压强)的相对变化率 $-\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}$ 、 $-\frac{\Delta\beta_s}{\beta_s}$ 小于海水的密度与体压缩系数的相对变化率 $-\frac{\Delta\rho_w}{\rho_w}$ 、 $-\frac{\Delta\beta_w}{\beta_w}$ 。即有关系式 $\left[\frac{\partial\rho_s(h)}{\partial h_w} / \frac{\partial\rho_w(h)}{\partial h_w} \right] < 1$; $\left[\frac{\partial\beta_s(h)}{\partial h_w} / \frac{\partial\beta_w(h)}{\partial h_w} \right] < 1$, 故海底沉积物声速受海水水深(压强)的影响也必然小于海水水深(压强)对海水声速的影响。

由《海道测量规范》^[7], 海水声速 V_0 可用经验公式计算:

$$V_0 = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + (1.34 - 0.010T)(S - 35) + 0.016Z$$

式中, V_0 的单位为 (m/s), T 为摄氏温度 ($^{\circ}\text{C}$), S 为盐度 ($\%$), Z 为海水深度 (m)。当水深为 1000m (10Mpa) 时, 对海水声速的影响约为 16m/s; 而对海底沉积物声速的影响必然小于 16m/s, 小于海底沉积物声速的 1%,

即在水深小于 1000m(10MPa) 时可以忽略海水水深对海底沉积物声速的影响。上述结论通过实验数据及后面的图 3 可以得到验证。

我国学者曾在空气介质环境中对海底沉积物柱状样在应力—应变过程中的海底沉积物柱状样声速进行了详细的研究^[8,9], 但其声速变化的机理不同于本研究。

3 海底沉积物声传播衰减与海水深度(海水压力)之间的关系

声波在海底沉积物中传播时, 主要由于介质的粘滞摩擦、热传导和分子吸收而产生声传播衰减。声传播衰减系数可表达为:

$$\alpha = \alpha_{\eta} + \alpha_x + \alpha_m$$

分别代表粘滞摩擦衰减系数、热传导衰减系数和分子吸收系数。三者的表达式分别为^[10]:

$$\alpha_{\eta} = 8.68 \frac{8\pi^2 \eta f^2}{3\rho V_P^3}$$

$$\alpha_x = 8.68 \frac{2\pi^2 \gamma}{3\rho V_P^3 C_v} \cdot \frac{\gamma-1}{\gamma} f^2$$

$$\alpha_m = 8.68 \frac{2\pi^2 (k_e - k_i) \tau_p f^2}{\rho V_P^3}$$

从上式中可以得出结论: 声传播衰减系数的各项都与 ρV_P^3 成反比关系。这意味着当沉积物所处海水水深(压强)增大时, 随着海底沉积物的密度和声传播速度的增大, 海底沉积物声传播衰减系数将会减小。

由声波传播衰减系数计算的定义, 海底沉积物声传播衰减系数可由下式^[11,12] 计算:

$$\alpha = \frac{20}{x} \lg \left[\frac{p_0}{p(x)} \right] \text{dB/m}$$

式中 p_0 为当 $x=0$ 时的平面波起始声压值, $p(x)$ 是当传播距离为 x 时的声压值。 x 为平面波的纵波传播方向, 在本实验中为沿收发

换能器方向。

设声特性参数测量仪具有相同的辐射声功率, 则可认为其起始声压值 p_0 相等。测量海底沉积物在不同海水深度(海水压力)下的声压值 $p(x)$, 则可以导出海底沉积物声传播衰减系数变化率与不同海水深度(不同海水压力)之间的变化关系式。

$$\begin{aligned} \Delta \alpha &= \alpha_2 - \alpha_1 \\ &= \frac{20}{x} \lg \left[\frac{p_0}{p_2(x)} \right] - \frac{20}{x} \lg \left[\frac{p_0}{p_1(x)} \right] \\ &= \frac{20}{x} \lg \left[\frac{p_1(x)}{p_2(x)} \right] \text{dB/m} \end{aligned}$$

式中 $p_1(x)$ 、 $p_2(x)$ 为两种不同海水深度(压强)的声压测量值。从上式可以获得海底沉积物声传播衰减系数变化率与不同海水深度(不同海水压力)之间的变化规律。通过对实验数据的计算和分析研究可以发现: 海底沉积物声传播衰减系数随着不同海水深度(海水压力)的变化而有明显的改变。

4 实验结果及讨论

基于对海底沉积物声特性与海水水深间关系的上述分析研究, 设计了海底沉积物声特性实验室仿真测量系统。系统原理如图 1 所示。

实验室仿真测量系统设计耐压 10MPa, 可模拟 1000m 水深。容器中加注盐度 S 为 35.1、温度为 21.5℃ 的海水。通过手动加压泵模拟不同水深, 由压力表和温度计监测测量环境参数变化。沉积物柱状样断面涂抹黄油使其与耐压防水换能器辐射面相耦合, 通过耐压防水金属软管连接到压力容器外部测量仪器。声参数测量仪采用武汉岩海公司 RS-ST01C 非金属声波检测仪^[13]。根据实验数据, 在 1000m 水深范围内, 改变海水压强, 模拟改变水深, 发现沉积物声速维持不变, 但个

别声速数据有跳点现象,与检测仪工作稳定状态有关。声压幅值分辨率为 $8\text{bit} \pm 1/2\text{LSB}$,故声压幅值在不同压力水深为离散值,在计算沉积

物声衰减变化规律时予以平滑。声衰减系数变化率与海水压力的关系见图2,海底沉积物声速与海水压力的关系见图3。

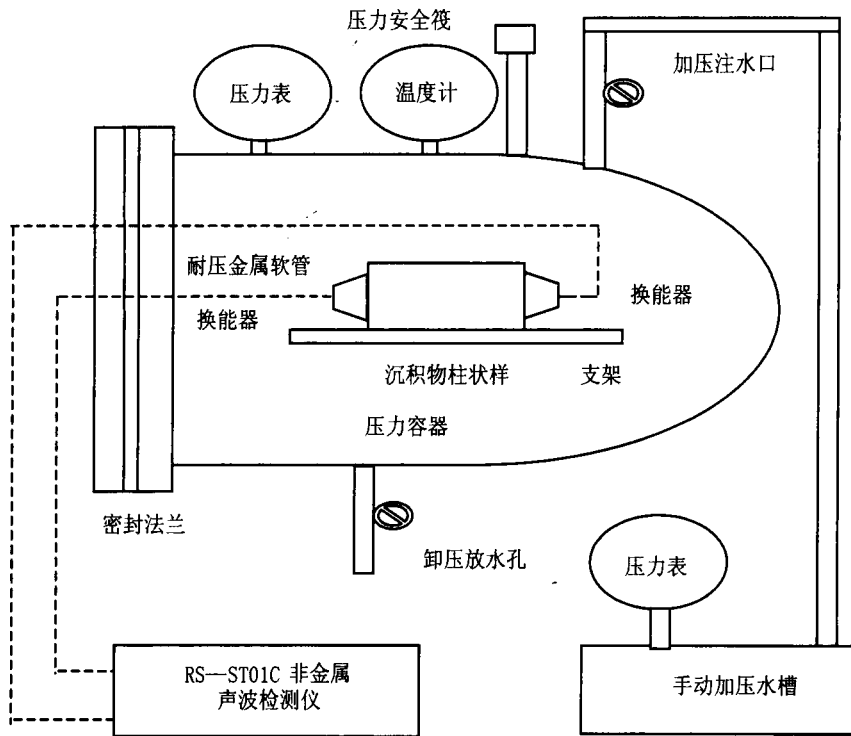


图1 海底沉积物声特性实验室仿真测量系统

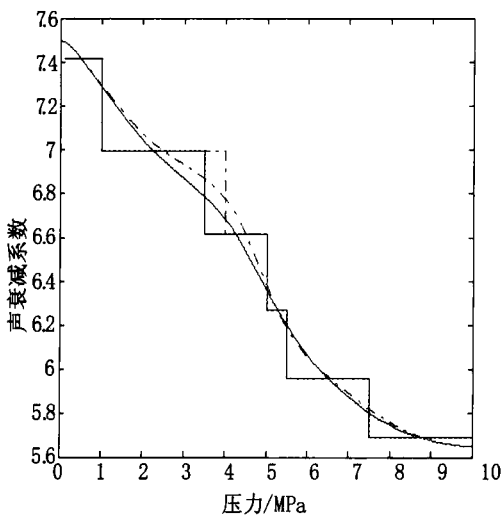


图2 海底沉积物声衰减系数变化率与海水压强的关系

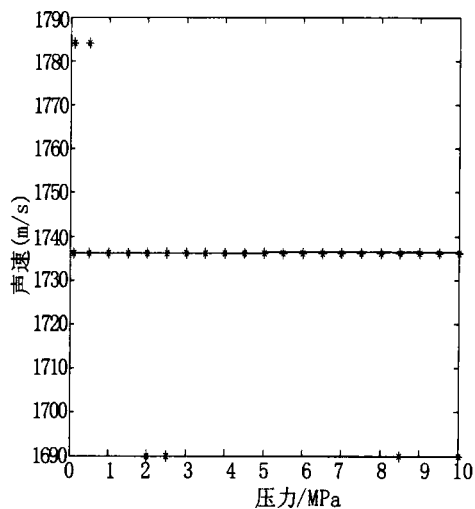


图3 海底沉积物声速与海水压强的关系

5 结论

从对实验数据的计算及图2可以观测

到海底沉积物声衰减系数变化率与海水压强之间具有较大的相关性。当海水深度(压力)增大时,海底沉积物声衰减系数变化率

将明显减小。这意味着采用在测量船实验室上直接测量海底沉积物声衰减系数的方法时,当压强变为 1 个大气压时,必然造成海底沉积物声衰减系数测量的误差,也意味着采用在测量船实验室上直接测量海底沉积物声衰减系数的方法时必须对海底沉积物声衰减系数测量值进行海水深度(压力)的校准。从图 3 可以观测到海底沉积物声传播速度与海水压力之间的相关性在 1000m 水深范围内基本上没有变化,这意味着采用在测量船实验室上直接测量海底沉积物声速的方法时,无须对海底沉积物声速测量值进行海水深度(压强)的校准。

参 考 文 献

- [1] 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. 中国科学(B辑). 1994,24(5):556—560.
- [2] 周建平,吕文正,陶春辉. 海底柱状样沉积物超声测量,东海海洋,2003,21(4):26—33.
- [3] 唐永禄. 海底沉积物孔隙度与声速的关系,海洋学报, 1998,20(6):39—43.
- [4] Hamilton E L. Prediction of In Situ Acoustic and Elastic Properties of Marine Sediments. Journal of Geographical Sciences, 1971, 36:66—284.
- [5] Ogushwitz P R. Applicability of Biot Theory, Journal of Acoustic Sciences, 1985, 77:29—440.
- [6] 赵红丽,唐应吾. 影响松散高孔隙率沉积物中声速的一些因素,青岛大学学报,2003,26(1):37—39.
- [7] 中华人民共和国国家标准. 海道测量规范, GB12327-90, 91—93.
- [8] 李赶先,卢博,黄韶健,等. 应力—应变过程中海底沉积物微结构变化对其声速的影响,海洋学报. 2002,24(3): 75—80.
- [9] 梁元博,卢博. 海底沉积物力学性质影响声速的物理机制,海洋学报. 1985,7(1):111—117.
- [10] 何祚镛,赵玉芳. 编声学理论基础,北京:国防工业出版社, 1981.
- [11] 刘伯胜,雷家煜. 水声学原理,哈尔滨:尔滨工程大学, 2002 68—78.
- [12] Urick R J. Principles of Underwater Sound. 3d Edition, 1983.
- [13] RS-ST01C 非金属声波检测仪用户手册 武汉岩海公司 2002. 5.