

模拟近海混浊水声吸收的实验测量方法

文洪涛, 杨燕明

(国家海洋局第三海洋研究所, 福建厦门 361005)

摘要: 混浊海水的声吸收研究对改善在近海环境下工作的声纳性能具有重要意义。基于混响法建立了一套测量近海混浊水声吸收的实验测量系统。理论分析表明, 实验测量系统满足混响法测声吸收的实验要求。采用厦门海滩泥沙与海水混合配制模拟近海混浊水, 测量了模拟近海混浊水在 50~100kHz 的声吸收, 实验测量结果符合近海混浊水的声吸收规律, 与理论估算值相比具有较好的一致性。实验测量结果为近海混浊水声吸收理论估算模型的应用提供了依据。

关键词: 混响法; 近海混浊水; 声吸收

中图分类号: TB556, P733.21+6

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-01-0062-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.01.011

An experimental method of sound absorption of simulated coastal turbid water

WEN Hong-tao, YANG Yan-ming

(Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, Fujian, China)

Abstract: The study of sound absorption of turbid seawater has great significance for improving the performance of sonar working in coastal environment. Based on reverberation method, an experimental system for sound absorption of coastal turbid water has been designed. Theoretical analysis shows that the experimental system meet the requirements of sound absorption measurement using reverberation method. Xiamen beach sediment and seawater are mixed to simulate the coastal turbid water, and the sound absorption of the simulated coastal turbid water has been measured in the frequency range of 50-100 kHz. Experimental results accord with the sound absorption law of coastal turbid water, and have better consistency with the prediction results. Experimental results are the basis for the application of sound absorption prediction model of coastal turbid water.

Key words: reverberation method; coastal turbid water; sound absorption

1 引言

中国海岸线漫长, 陆架海域辽阔, 众多大江大河携带大量泥沙等悬浮颗粒物注入中国近海, 加上潮汐、风及海流等的作用, 近海海水混浊。海水中的悬浮颗粒物会导致声衰减增大, 声纳探测距离降低, 严重影响了在近海混浊海水环境下工作的声纳性能。

混浊水的声吸收研究开始得较早, 但多偏重于理论分析, 研究的声波频率多在几兆赫兹到几百兆赫兹范围内, 远高于一般声纳工作频段, 其研究对象也多为浓混浊水, 高于近海混浊水的悬浮物浓度。针对近海混浊水在声纳工作频段下的声吸收实验

测量研究则极少。Urlick^[1]从理论分析和实验验证两方面开展了高岭土和泥沙混浊水的声吸收研究, 其声吸收理论模型可用于对近海混浊水的声吸收估算, 但其实验测量频段在兆赫兹以上。Richards 等^[2,3]理论上给出了近海混浊水的声吸收估算模型, 考虑了悬浮颗粒物不同形状对声吸收的影响; 实验方面通过采用不同的粒度分析技术, 测量了玻璃珠混浊水、高岭土混浊水以及碳酸钙粒子混浊水等的高频声吸收, 做了大量实验测量工作。刘永伟等^[4-6]实验测量了细泥混浊水的声吸收, 基本揭示了混浊水的声吸收规律, 分析了近海混浊水的声吸收, 但实验频段相对较低, 混浊水测量结果缺少与理论估算值的比较。迟凤阳^[7]在改进刘永伟实验测量装置的基础上, 测量了混浊水的声吸收, 研究了温度变化对混浊水声吸收的影响, 总结了混浊水声吸收随频率、浓度、温度等的变化规律。

前人的实验测量对象多为纯水与悬浮颗粒物混合配置的混浊水, 不能完全模拟近海混浊水。本

收稿日期: 2010-01-06; 修回日期: 2010-04-15

基金项目: 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目(海三科 2010018, 海三科 2008018)

作者简介: 文洪涛(1983-), 男, 湖南衡东人, 研究方向为海洋声学。

通讯作者: 杨燕明, E-mail: ymyang126@126.com

文采用厦门的海滩泥沙混浊海水来充分模拟近海混浊水。根据混响法设计了一套实验测量装置, 测量了悬浮物浓度为 $0.2\sim 2\text{kg/m}^3$ 的模拟近海混浊水在 $50\sim 100\text{kHz}$ 的声吸收。将实验测量结果与理论估算结果进行比较, 为理论估算模型的应用提供依据。

2 实验方法与原理

室内测量声吸收的方法较多, 如脉冲法、共振法和混响法。因本文的研究频段在几十千赫兹到几百千赫兹的高频, 所以采用混响法。混响法的原理基于塞宾公式^[8], 由塞宾的建筑声学混响时间公式推广而来, 根据待测液体同标准液体的混响时间差来计算待测液体的逾量吸收。在扩散声场中, 将边界和传播介质的吸收使声压级降低 60dB 的时间定义为混响时间 T , 并表示为:

$$T = \frac{55.2V}{c(A + 8\alpha V)} \quad (1)$$

式中: A 为容器界面的总吸收, $A = S\bar{\alpha}$, S 是容器的表面积(m^2), 而 $\bar{\alpha}$ 是一个无量纲的平均塞宾吸声量; $8\alpha V$ 是液体介质的吸收, α 为液体介质的吸收系数(Np/m); V 为待测液体体积(m^3)。显然, A 和 V 是与实验容器有关的量, 那么根据混响时间 T 的不同, 就可得到吸收系数 α 的差别。本文实验标准液体为清洁海水(用 $0.45\mu\text{m}$ 滤膜滤除悬浮物后的海水), 待测液体为海滩泥沙与清洁海水混合配制的混浊水, 如果 T_s 和 T_w 分别为泥沙混浊海水和清洁海水的混响时间, 那么泥沙混浊海水的逾量声吸收 $\Delta\alpha$ 可表示为:

$$\Delta\alpha = (10\log e^2) \frac{55.2}{8c} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_w} \right) \quad (2)$$

式(2)推导的前提条件为声速 c 、容器界面总吸收 A 和混浊水体积 V 均为常量。已知 A 和 V 是与实验容器有关的量, 在实验过程中保持不变, 满足式(2)的前提条件; 又因为本实验混浊海水浓度较低, 均在 2.0kg/m^3 以下, 引起的声速变化可以忽略, 所以声速 c 也满足式(2)的前提条件。

3 实验测量系统及分析

3.1 实验测量系统介绍

实验测量系统及其连接如图 1 和图 2 所示。图中盛装混浊水的容器为聚乙烯袋, 壁厚仅 0.035mm , 因其非常薄, 袋壁与混浊水之间只有非常小的声阻抗失配, 袋壁内耗也极小。聚乙烯袋通过胶带绑定

在泡沫圆环上, 泡沫圆环放置在不锈钢支架上, 通过不锈钢支架支撑起整个实验系统。选择泡沫圆环作为不锈钢支架和聚乙烯袋之间的连接体, 原因有三: 一是能在聚乙烯袋和不锈钢支架间起到很好的隔振作用, 减少系统自身的能量损耗; 二是便于聚乙烯袋的绑定; 三是泡沫材料便于加工。

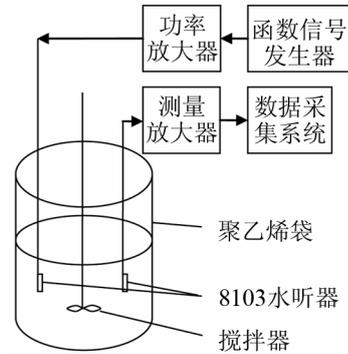


图 1 实验系统连接框图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus.



图 2 实验聚乙烯袋及其支撑系统

Fig.2 Photograph of the experimental polythene bag.

3.2 实验测量系统分析

采用混响法测量声吸收, 实验测量系统需满足两个条件。其一是实验测量时混响容器内要求形成扩散声场, 那么测量系统的 Schroeder 截止频率需低于实验测量频率。其二是混响容器所含待测液体的水体吸收大于容器的边界吸收。

3.2.1 实验测量系统的截止频率分析

实验测量系统的 Schroeder 截止频率的计算式可表示为^[2]:

$$f_{Sch} = \left(\frac{c^3}{4\ln 10} \right)^{1/2} \left(\frac{T}{V} \right)^{1/2} \quad (3)$$

式中: c 为待测液体声速, V 为待测液体体积, T 为混响时间。根据实验测量数据可知, 该系统截止频率在 $50\sim 60\text{kHz}$, 位于本文实验频段的下限, 因而满足混响容器内形成扩散声场的条件。

3.2.2 实验测量系统的水体吸收和边界吸收分析

实验测量系统的水体吸收主要为海水的声吸收和悬浮颗粒物引起的黏滞吸收^[9]。边界吸收主要是边界的切向摩擦、器壁的内耗和向周围的辐射^[10]。混响容器的器壁极薄，壁厚仅为 0.035mm，与实验声波半波长相差在 2 个数量级以上，因此器壁内耗极小，可以忽略不计。

海水的声吸收采用 Francois 和 Garrison 的海水声吸收公式^[11,12]进行计算，该式将海水的声吸收表示为频率、压力、温度、盐度和 pH 值的函数，并表示为：

$$\alpha_w = 10^{-3} \left(\frac{A_1 f_1 P_1 f^2}{f_1^2 + f^2} + \frac{A_2 f_2 P_2 f^2}{f_2^2 + f^2} + A_3 P_3 f^2 \right) \quad (4)$$

其中 A_i 是温度和盐度的因子， P_i 是压力因子， f_i 是弛豫频率，下标 1、2、3 分别表示硼酸吸收、硫酸镁吸收和纯水吸收。

计算悬浮物黏滞吸收比较公认的公式是 Urick 公式^[1]，Richards 将其发展，应用到近海混浊水的黏滞吸收计算中，并表示为^[13]：

$$\alpha_v = (10 \log e^2) \frac{\varepsilon k (\sigma - 1)^2}{2} \frac{\zeta}{\zeta^2 + (\sigma + \tau)^2} \quad (5)$$

式中： α_v 为黏滞吸收系数(dB/m)； $\varepsilon = M / \rho_s$ 为悬浮粒子体积浓度，其中 M 为悬浮粒子质量体积浓度(kg/m³)； $k = \omega / c$ 是入射压缩波波数，而 c 是压缩波速度(m/s)； σ 是悬浮粒子固体密度 ρ_s 与液体密度 ρ_0 之比； $\tau = 1/2 + 9(\delta_v/a)/4$ ， $\zeta = 9(\delta_v/a)(1 + \delta_v/a)/4$ ，其中 a 为粒子平均半径(m)； $\delta_v = \sqrt{2\nu/\omega}$ 是粒子外围黏滞切变波表层深度(m)， ω 是角频率， ν 是液体的运动黏滞性，且 $\nu = \eta / \rho_0$ ， η 为海水分子黏滞系数。

考虑到实际混浊海水中悬浮物并不是单一粒径，而是存在一个粒径分布，并且黏滞吸收受粒径分布及其变化影响，从而式(5)表示为^[9]：

$$\alpha_v = (10 \log e^2) \int_{a_0}^{a_1} \frac{\varepsilon k (\sigma - 1)^2}{2} \times \frac{\frac{9}{4} \left(\frac{\delta_v}{a} \right) \left(1 + \frac{\delta_v}{a} \right)}{\left(\frac{9}{4} \left(\frac{\delta_v}{a} \right) \left(1 + \frac{\delta_v}{a} \right) \right)^2 + \left(\sigma + \left(\frac{1}{2} + \frac{9}{4} \left(\frac{\delta_v}{a} \right) \right) \right)^2} \times f(a) da \quad (6)$$

式中原有的参数 τ 和 ζ 用与粒径参数 a 有关的表达式代替， $f(a)$ 为悬浮物体积分数关于粒子半径的分布函数， a_1 为粒径分布上限， a_0 为粒径分布下限。由于式(6)积分难以求得解析解，实际数据处理过程中粒径 a 与分布函数 $f(a)$ 均表示成离散矩阵，然后采用累加求和的数值求解方法求解，两者可采用激光粒度仪测量并进行粒径分级后得到。

实验测量系统的混响容器近似为圆柱体，由文献[10]可知，在扩散声场条件下，Mulders 给出了圆柱体边界切向摩擦的计算公式：

$$\alpha_s = \frac{2}{3c} \sqrt{\frac{\omega \eta}{2\rho}} \left(\frac{2}{R} + \frac{1}{H} \right) \quad (7)$$

式中 c 是声速， ω 是角频率， ρ 是待测液体密度， η 为待测液体黏滞系数。 R 和 H 分别是圆柱的半径和液体高度。

因混响容器器壁极薄，考虑系统的辐射损失时，混响系统近似为水—气界面。若 θ_i 为入射角， θ_t 为透射角， z_1 和 z_2 分别为海水和空气的声特性阻抗。由文献[14]可知，斜入射情况下的声能透射系数可表示为：

$$t_w = \frac{4z_1 z_2 \cos \theta_i / \cos \theta_t}{(z_2 \cos \theta_i / \cos \theta_t + z_1)^2} \quad (8)$$

显然， $0 < \cos \theta_i / \cos \theta_t \leq 1$ ，通过分析可知，当 $\cos \theta_i / \cos \theta_t = 1$ ，即声波垂直入射到水—气界面时，声能透射系数 t_w 达到最大。实验测量时海水温度为 20℃，盐度为 30ppt，那么根据式(8)求得本实验的最大声能透射系数为 0.0011，最大的声能辐射损失仅为千分之一左右，可以忽略不计。

根据上述分析，混响容器水体吸收与界面吸收之比主要考虑海水声吸收、悬浮物的黏滞吸收和边界的切向摩擦吸收。利用式(4)、式(6)与式(7)可得到实验频段内混响容器水体吸收与界面吸收之比，如图 3 所示。计算时，悬浮物浓度取本次实验的最小值 0.2kg/m³。从图中可以看出，实验测量频段内，水体吸收是界面吸收的 7 倍以上，完全满足实验测量要求。

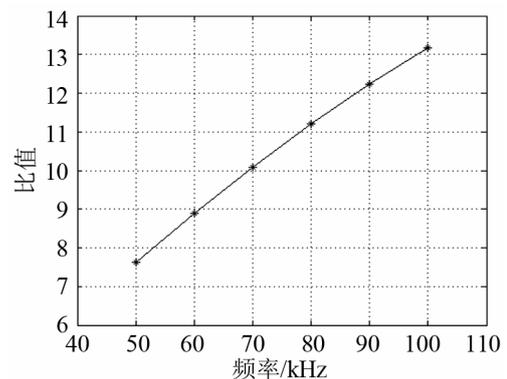


图 3 实验测量系统水体吸收与界面吸收的比值
Fig.3 Ratio of body absorption to interface absorption in experimental system

4 实验测量数据的处理方法

根据式(2)可知，得到混响时间就可求得近海混

浊水的逾量吸收。混响时间为声能衰减 60dB 的时间, 即-60/衰减曲线斜率。根据信噪比的不同, 数据处理中衰减曲线斜率按照衰减下降 20 或 30dB 选取, 并保证选取点上限与衰减前的平均功率谱相差 5dB, 选取点下限与本底噪声的平均功率谱相差至少 15dB^[4]。本文采用 Matlab 语言编程对采集数据进行处理。先对采集数据做功率谱估计, 然后从中提取实验频率点的功率谱值, 得到功率谱随时间的衰减曲线, 最后根据衰减曲线斜率计算混响时间。图 4 为实验得到的一个 100kHz 的声能衰减曲线切片。图中曲线 1 为原始的声能随时间的衰变曲线, 绘图时经过向右和向上平移; 曲线 2 为原始数据平滑滤波后得到。P1 为初始平均电平值衰减 5dB 得到; P2 为初始平均电平值衰减 35dB 得到。在确定 P1 和 P2 的同时, 能确定两者在原始数据中对应的指针, 从而确定原始数据点。然后根据最小二乘法对两点间的原始数据进行线性拟合, 就得到衰减曲线斜率, 从而推算出混响时间。图 4 对应的衰减曲线线性拟合过程如图 5 所示。

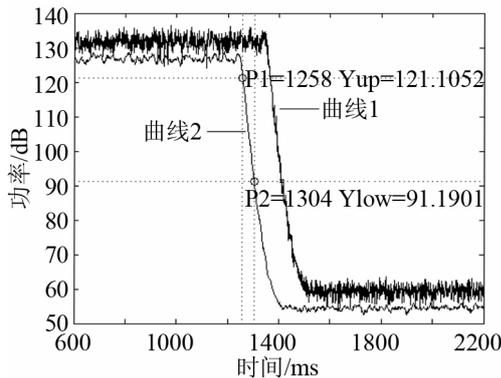


图 4 声能衰减曲线切片图

Fig.4 The figure of acoustic attenuation curve

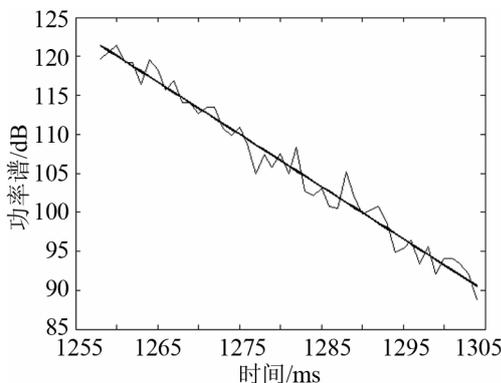


图 5 衰减曲线的线性拟合

Fig.5 The linear fitting of attenuation curve

5 实验测量过程及结果

实验前袋中混浊水须预先进行真空除气处理,

然后在 20℃ 的恒温环境下静置 6h 以上, 以调节水温到实验所需温度。温度由大功率空调控制, 直至实验结束。袋中混浊水体积为 25L。测量时, 水听器没入水中的深度始终保持不变。实验过程中为防止悬浮物沉淀而导致声吸收偏小, 每隔 40s 左右开启搅拌器(JJ-2 增力电动型)对混浊水搅拌一次, 搅拌器在搅拌完后要立即移离水面。

5.1 实验测量过程

测量时, 函数信号发生器(Agilent 33120A)产生噪声信号, 经功率放大器(HFVA-42)驱动 B&K8103 水听器, 在混浊海水中形成扩散声场。为了保证声场的稳定, 实验中该过程持续约 4s。然后切断噪声信号源, 让扩散声场中的声能自由衰减。另一个 B&K8103 水听器则记录声场中声压的变化过程, 并将信号经测量放大器(B&K NEXUS 2692A0S4)适调后送入数据采集系统(National Instruments-6122 高频水声信号采集卡)进行数据存储。重复上述测量步骤至少 20 次, 以便进行数据求平均。最后导出数据, 用 Matlab 进行处理分析, 得到不同频率及不同浓度混浊水的混响时间。将混响时间代入式 (2), 即可求得混浊海水的逾量吸收。

5.2 实验测量结果

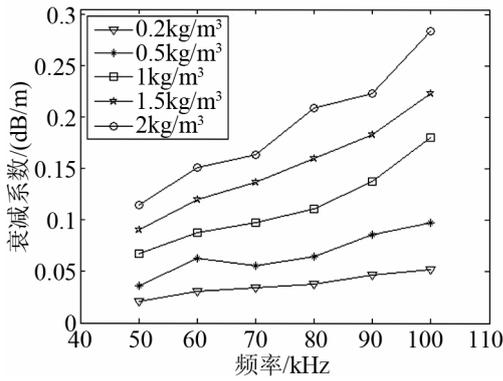
本文测量了浓度为 0.2~2.0kg/m³ 的海滩泥沙混浊海水在 50~100kHz 的声吸收。其测量结果如图 6、7 所示。其中图 6 为不同浓度的海滩泥沙混浊海水的声吸收实验测量值, 图 7 为悬浮物黏滞吸收的实验测量值与式(6)计算得到的理论估算值的比较。从图中可以看出:

(1) 实验测量值符合近海混浊水的声吸收规律。随着测量频率的升高, 声吸收增大; 在稀混浊水情况下, 随着混浊海水浓度的增大, 声吸收的实验测量值近似线性增大, 这与 Urick^[1]的实验测量结果是一致的。

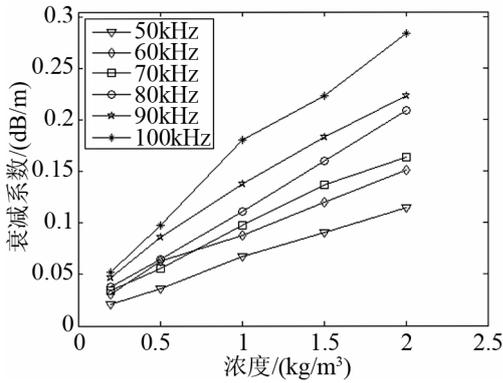
(2) 在一定的误差范围内实验测量值与理论估算值是符合的, 只有 100kHz 处部分测量值离散性较大, 最大偏差约为 50%。

6 结语

本文根据混响法建立了一套测量近海混浊水声吸收的实验测量系统。通过理论分析表明, 该实验测量系统满足混响法测声吸收的实验要求。利用厦门海滩泥沙与海水混合配制混浊海水, 以充分模拟近海混浊水。测量了模拟近海混浊水在 50~100kHz 的声吸收, 给出了实验测量数据的处理方

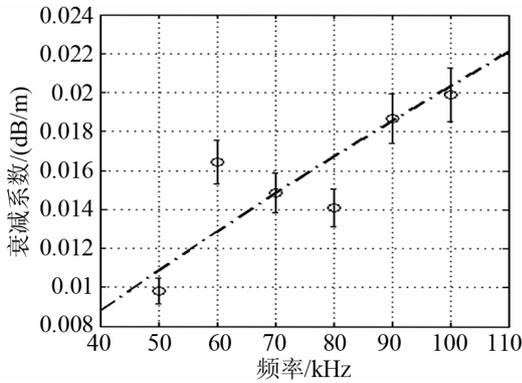


(a)

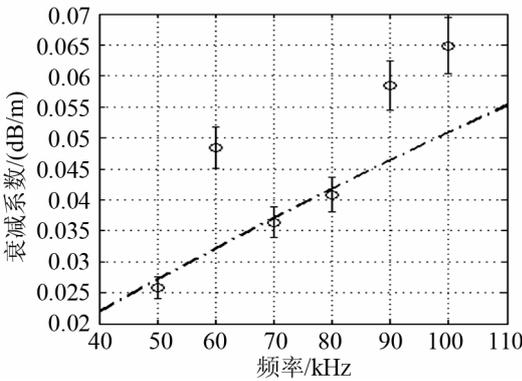


(b)

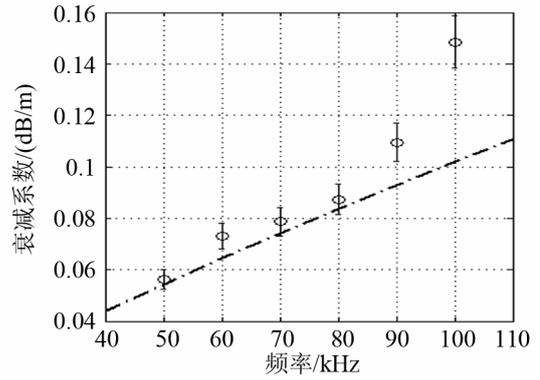
图 6 不同浓度混浊海水的声吸收系数
Fig.6 Sound absorption coefficients for various concentrations of turbid seawater



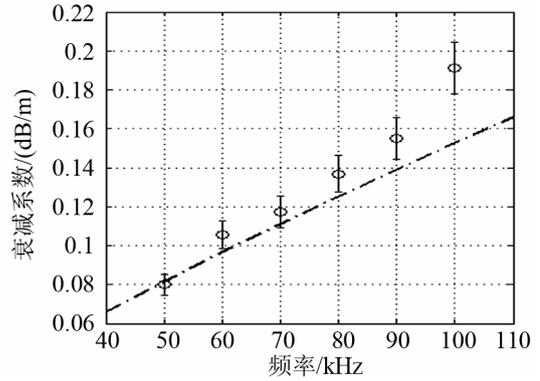
(a) 0.2kg/m³



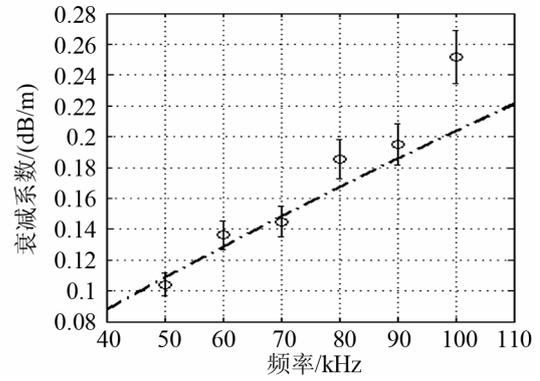
(b) 0.5kg/m³



(c) 1kg/m³



(d) 1.5kg/m³



(e) 2kg/m³

图 7 混浊海水中悬浮物黏滞吸收的实验测量值与理论估算值的比较
Fig.7 Comparison between measured and predicted viscous absorption coefficients of turbid seawater

法。实验测量结果符合近海混浊水的声吸收规律，在一定的误差范围内实验测量值与理论估算值符合得较好。实验测量结果表明，该实验研究方法及测量系统在测量混浊水声吸收方面具有较好的稳定性和可靠性，可用于近海混浊水声吸收的实验测量研究。实验测量结果也为本文式(4)和式(6)所表示的混浊海水声吸收理论估算模型应用于近海混浊水声吸收的估算提供了依据。

参 考 文 献

[1] Urick R J. The absorption of sound in suspensions of irregular

- particles[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*(0001-4966), 1948, **20**(3): 283-289.
- [2] Brown N R, Leighton T G, Richards S D, et al. Measurement of viscous sound absorption at 50-150kHz in a model turbid environment[J]. *J. Acoust. Soc. Am.* (0001-4966), 1998, **104**(4): 2114-2120.
- [3] Richards S D, Leighton T G, Brown N R. Sound absorption by suspensions of nonspherical particles: Measurements compared with predictions using various particle sizing techniques[J]. *J. Acoust. Soc. Am.* (0001-4966), 2003, **114**(3): 1841-1850.
- [4] 刘永伟. 混浊水声吸收系数的测量研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007, 34-35.
LIU Yongwei. The research on measuring the coefficient of sound absorption in turbid water[D]. Harbin: Harbin Engineering University press, 2007, 34-35.
- [5] 刘永伟, 常哲, 杨大恒, 等. 混浊水声吸收系数的试验测量研究[C]. 2006 年全国声学学术会议论文集, 厦门, 2006. 131-132.
LIU Yongwei, CHANG Zhe, YANG Daheng et al. Experimental investigation on measuring the coefficient of sound absorption in turbid water[C]. 2006 National Acoustics Conference Proceeding, Xiamen, 2006. 131-132.
- [6] LIU Yongwei, LI Qi. Research on the coefficient of sound absorption in turbid water[J]. *J. Marine. Sci. Appl*, 2008, **7**(2): 135-138.
- [7] 迟凤阳. 混浊水介质声吸收实验测量研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2009, 32-51.
CHI Fengyang. Experimental research on sound absorption measuring in turbid water medium[D]. Harbin: Harbin Engineering University press, 2009. 32-51.
- [8] Kinsler L E, Frey A R, Coppens A B, et al. *Fundamentals of Acoustics*[M]. New York: Wiley, 3rd ed., 1982. 313-319.
- [9] 文洪涛, 杨燕明, 刘贞文, 等. 近海混浊水的附加声衰减研究[J]. *声学学报*, 2010, **35**(1): 45-52.
WEN Hongtao, YANG Yanming, LIU Zhen, et al. Additional acoustic attenuation of coastal turbid water[J]. *ACTA Acoustic*, 2010, **35**(1): 45-52.
- [10] 钱祖文. 圆柱空间的边界摩擦耗散[J]. *声学学报*, 1965, **2**(2): 75-79.
QIAN Zuwen. On the frictional dissipation due to the boundary of a cylindrical vessel[J]. *ACTA Acoustic*, 1965, **2**(2): 75-79.
- [11] Francois R E, Garrison G R. Sound absorption based on ocean measurements. Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1982, **72**(3): 896-907.
- [12] Francois R E, Garrison G R. Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption[J]. *J. Acoust. Soc. Am.* (0001-4966), 1982, **72**(6): 1879-1890.
- [13] Richards S D. The effect of temperature, pressure and salinity on sound attenuation in turbid seawater[J]. *J. Acoust. Soc. Am.* (0001-4966), 1998, **103**(1): 205-211.
- [14] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. *声学基础*[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001. 205-214.
DU Gonghuan, ZHU Zhemin, GONG Xiufen. *Fundamentals of Acoustics*[M]. Nan Jing: Nanjing University press, 2001. 205-214.