

海底天然气渗漏流量声学测量方法及初步实验研究*

龙建军¹, 黄为¹, 邹大鹏¹, 邸鹏飞², 吴金萍¹

1. 广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006; 2. 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301

摘要: 测量每年海底渗漏释放到海洋水体及大气中的具有温室效应的甲烷的量具有重要的科学意义。文章提出了测量前调整气泡状态并用透射声波波形-幅度参数测量渗漏气泡流量的新方法。通过空间频谱分析得出声波测量窗口高度小于气泡流每秒上升的距离时, 文章所设计的声波传感系统可以有效地测量气泡流速。根据求解声波方程的 Born 近似方法得出了气泡直径与测量声波波长的关系, 该关系是确定测量系统结构参数的依据。实验表明, 采用蜂窝芯板为主的结构可把气泡调整为直径小于 3mm 且空间分布均匀的状态, 气泡流速测量精度可达 $\pm 2\%$, 透射声波幅度与截面含气率有近线性关系; 初步验证了气泡流量测量方法的可行性。

关键词: 海底冷泉渗漏; 气泡流量测量; 声波; 流态控制

中图分类号: P733.2; P744.4 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2012)05-0100-06

Method of measuring bubble flow from cool seeps on seafloor using acoustic transmission and preliminary experiments

LONG Jian-jun¹, HUANG Wei¹, ZOU Da-peng¹, DI Peng-fei², WU Jin-ping¹

1. Faculty of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510060, China;

2. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

Abstract: Observations of seabed bubbles of methane, an important greenhouse gas, at a natural marine hydrocarbon seep to evaluate the global methane budget per year is very important. The objective of this paper is to develop a new approach, in which the configuration and distribution of bubbles are adjusted before flow measurement, to measure cold seepage flow on seafloor by the wave form-amplitude parameters of acoustic transmission. After the spectrum analysis we lead to the height of the measurement window through which acoustic wave transmits to the opposite wave transducer is less than the distance which bubbles go up pass per second. And the bubble speed can be effectively measured by using the acoustic sensing system designed under the proposed height of the measurement window in the paper. The relationship between the bubble diameter and the measured acoustic wavelength is obtained under the Born approximation. Diameters of bubbles become smaller than 3 mm after they go through the honeycomb-core board and other structure parts, and the distribution of bubble populations is uniform. Spatial frequency spectrum analysis is applied to establish the relationship between geometry parameters of the piezoelectric transducer and the motion of bubbles, and the measurement accuracy of bubble velocity is expected to $\pm 2\%$. The nearly linear relationship between the amplitude of sound transmission and the gas bubble flow has been established through the experiment. It turns out to be an effective method of measuring the bubble flow.

Key words: hydrocarbon seeps on seafloor; bubble flow measurement; sound wave; flow pattern adjustment

最近的研究估计每年通过海底冷泉渗漏方式释放到海洋水体及大气中的甲烷的数量非常惊人, 且

收稿日期: 2011-09-20; 修订日期: 2011-11-06。卢冰编辑

基金项目: 国家自然科学基金项目(40876018, 50575044, 41176034); 中国科学院三亚深海科学与工程研究所知识创新工程领域前沿项目(SIDSSE-201208)

作者简介: 龙建军(1960—), 男, 博士, 副教授, 近年主要从事海洋声学检测技术研究。E-mail: longjj@gdut.edu.cn

*本文的研究过程得到中国科学院广州地球化学研究所陈多福研究员的帮助, 在此谨表谢意! 感谢广州市番禺奥迪威电子有限公司赠送了研究实验用的压电换能器!

甲烷是强烈的温室气体,其温室效应是相同质量 CO_2 的 20 倍以上,如此巨大数量的甲烷将是全球气候变化的一个重要的影响因子^[1-2]。人类有必要对海底冷泉进行观测,确定其释放的甲烷量。

国外已经采用了多种技术方法测量海底冷泉渗漏中的气相数量。Cable 等^[3]在墨西哥湾西北近岸水域浅水区用带有进气与排气阀门的塑料气袋测量气体量; Roberts 等^[4]对墨西哥湾北部陆坡的冷泉渗漏系统采用容积法测量天然气渗漏量; Washburn 等^[5]采用浮式收集器测量从海底上升到海面的天然气气泡量; Greinert 等^[6]用单束超声波的回波强度检测气泡流量; Leifer 等^[7]研制由汇集气泡帐篷与涡轮流量计组成的装置测量气泡流量; Nikolovska 等^[8]用水听器记录气体流经收集器上方喷嘴的声音信号,并用声信号的特征估计气体流量; Roberts 等^[9]根据甲烷强烈吸收短波红外线的特性,用遥测红外成像光谱数据评估海面的甲烷数量。Deimling 和 Schneider 等^[10-11]采用一个特殊结构的多波束水声扫描声纳观测渗漏区域天然气的三维动态分布。

而我国目前主要是采用地球物理等方法探测海底发育的冷泉渗漏活动,并采用水样和海底沉积物分析其甲烷等烃类气体的异常等^[12-13]。最近,李灿苹等^[14]对含天然气气泡的海水水体声速开展了计算分析研究。

实际气泡直径变化范围大,声波的前向散射或逆向散射会导致声波传播参数涨落较大,影响测量准确性。为此作者提出了测量海底冷泉渗漏甲烷渗漏流量的新方法,该方法在测量前用流体装置首先把海底自然渗漏出来的气泡流调整为利于测量的状态,然后利用透射声波的声特性参数变化量反演气泡流的密度和流速,并在实验室开展了初步的模拟实验研究。

1 测量原理

气泡流量声波测量装置结构原理见图 1。测量过程是先用收集器汇集气泡,汇集后的气泡在矩形横截面的测量管上升。在测量管的一个侧面分别安装一个超声波发射头和一个声波分路器,与此相对的侧面分别安装两个接收换能器,每个接收换能器正对声波分路器的一个端面,根据透射声波与气泡流体的互相作用关系,渗漏气泡的瞬时体积流量 $Q(i)$ 为:

$$Q(i) = k_1 \cdot S \cdot v(i) \cdot R_b(i) \quad (1)$$

式中, i 为采样序号; k_1 为比例系数; S 为测量管通流横截面积,其单位为 m^2 ; $v(i)$ 为两个换能器间气泡流上升速度均值,其单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $R_b(i)$ 为截面含气率(即测量管单位高度的气泡流气泡密度); $Q(i)$ 的单位为 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

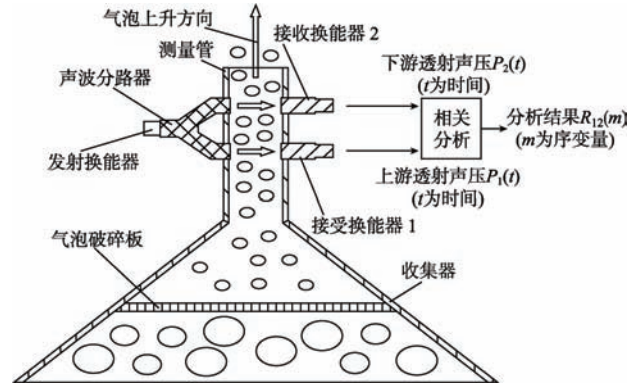


图 1 气泡流量测量装置结构原理

Fig. 1 Schematic diagram of the bubble flow measuring device

2 气泡流动状态调整和声波换能器几何参数

2.1 气泡流中的透射声波传播的近似方法与气泡流调整依据

声波在气泡-海水介质中传播由非线性非齐次波动方程描述。利用声波参数反演介质属性,需求解该波动方程。而对该方程求精确解非常棘手,常通过线性化和迭代方法来求近似解。求解这类声波方程的 Born 近似方法的有效条件^[15]为:

$$r \cdot n_\delta < \lambda / 4 \quad (2)$$

式中, r 是气泡半径, λ 是声波在水中波长, n_δ 是折射系数相对于背景介质的变化量,下标 δ 表示取折射系数变化量。

在气泡-海水两相流中, n_δ 近似等于 3.4。如果在测量前,把海底自然渗漏出来的气泡调整为较均匀状态,使气泡流状态满足公式(2),因此可以用求解声波方程的 Born 近似方法建立透射声波传播模型,通过实验获得模型参数,建立透射声波参数与气泡状态参数的关系。

2.2 气泡流动状态的调整实验

海底自然冒出的气泡直径范围约为 0.01mm 至 80mm^[16],空间分布不均匀,在这样的状态下透射声波幅度将产生起伏^[17],影响测量准确性。因此需要预先调整气泡流动状态,使大气泡破碎为较小直

径的气泡,使气泡在水中的分布趋于均匀,得到声阻抗分布较均匀的气泡-海水两相流。

为了用透射声波有效地获得气泡流动参数需要确定声波频率。在一定的气泡直径下根据式(2)可以确定声波波长的下限,也即确定了声波频率的上限。还需要有其他条件来确定声波频率的下限。用压电换能器产生声波时,波束展角大小与声波频率有关,其基本规律是声波频率大波束展角小。在图1所示的测量结构中,如果声波波束宽度与测量管横截面宽度相同,声波波束就可以完全覆盖测量管横截面,透射声波的波速变化与波幅衰减等可以较好地反映气泡流的特性。因此声波波束宽度等于测量管横截面宽度是确定声波频率下限的条件。可见声波频率的确定与气泡直径和测量管结构参数有关,其中气泡直径是需要先确定的参数。

采用特殊的蜂窝芯板(图2)可以调整气-海水两相流的流动状态,把大气泡破碎为较小直径的气泡。蜂窝芯板有两个参数:边长 a 和高度 H 。边长 a 是影响破碎气泡效果的主要参数。由于气体具有可压缩性并且气泡容易变形,在边长 $a=0.8\text{mm}$ 时,直径大于 5mm 的气泡通过蜂窝芯板后,破碎为直径不大于 5mm 的气泡。

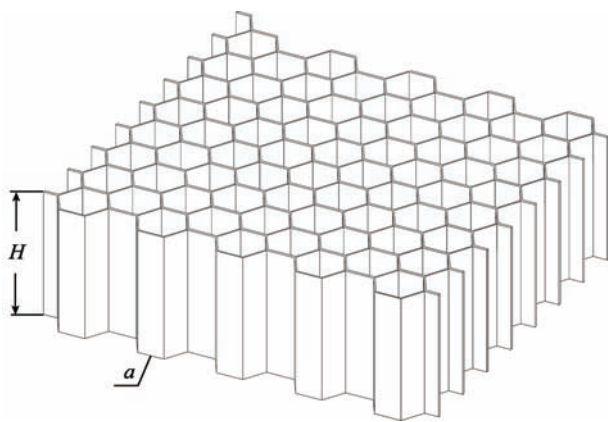


图2 蜂窝芯板三维示意图

Fig. 2 Three-dimensional diagram of honeycomb core board

通过实验,发现在蜂窝芯板上覆盖多孔弹性织物,可获得更小直径的气泡。实验观测到气泡张力大于弹性织物的张力时,气泡通过弹性织物的孔;在气泡张力小于纤维张力时,纤维收缩把气泡分割。

因此,当气泡通过弹性织物达到一定的体积时,气泡张力下降,纤维就可以分割气泡。气泡通过多孔弹性织物后,原来直径接近 5mm 的气泡破碎为直径小于 3mm 的气泡。

小气泡进入蜂窝芯板的通道后将被互相分隔,

避免其再聚集,使其在水中分布均匀。这时,蜂窝芯板格子的作用类似在风洞试验装置中导流格栅的作用。实验结果表明,此方法可以达到气泡流动状态调整的目的。

2.3 声波换能器几何参数与气泡运动参数关系分析

测量渗漏气泡的瞬时体积流量 $Q(i)$ [方程(1)]需要知道气泡流速和截面含气率。用透射声波测量这两个参数,首先需要确定测量装置中的压电换能器的布放及其几何参数,特别是压电换能器沿测量管轴向尺寸 L 。在声波的发射与接收都采用扁平矩形、厚度振动的压电换能器,且两个换能器面对面布放在矩形截面测量管的两侧时,它们对应的敏感区完全覆盖测量管横截面(图3)。对于图3的换能器布放情况,可以建立接收换能器输出信号的频谱^[18]为:

$$S_o(f) = k_2 \cdot W(p_z) \cdot |A(p_z)|^2 \quad (3)$$

式中 f 为声波的时间域频率, p_z 为气泡流动变化的空间域频率。 k_2 为换能器电路的放大倍数, $W(p_z)$ 为气泡流动变化的空间频谱, $A(p_z)$ 为换能器敏感区测量窗口函数的傅里叶变换。

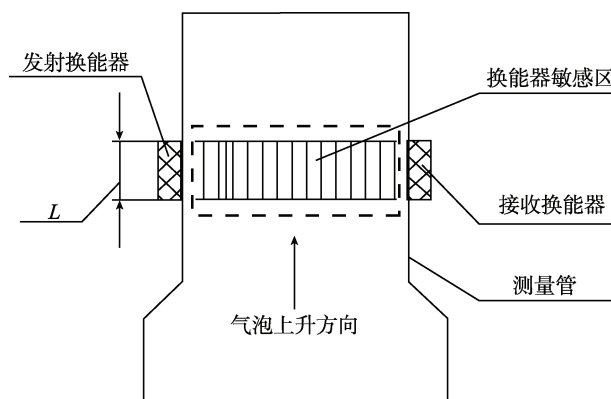


图3 换能器敏感区示意图

Fig. 3 Sensing area of piezoelectric transducer

假定气泡流动变化对声波的调制作用及干扰噪声的频域形式均为有一定带宽且等强度的信号,由式(3)可以得到空间频率 p_z 与时间频率 f 关系为:

$$p_z = f / v \quad (4)$$

在测量前对气泡流动状态加以调整,使气泡转化为利于测量的状态,其目的是使气泡流动变化对声波的作用成为有一定带宽且等强度的频域信号,以满足测量数据处理方法的要求。

当海底冷泉渗漏的气泡以速度 v 相对于高度为 L (换能器沿测量管的轴向尺寸)的直线“窗口”运动时,换能器测量到的气泡上升运动随机信号的带宽将是:

$$f_{\max} = v / L \quad (5)$$

在敏感区窗口尺寸 L 小于气泡每秒的上升距离时, 带宽 $f_{\max} > 1$ 。其物理意义是把流过敏感区窗口的气泡看作为一帧一帧的运动图像, $f_{\max} > 1$ 时透射声波获得的气泡图像信息可以依次连接起来完整地反映气泡的流动信息。分析结果表明当压电换能器沿测量管轴向尺寸 L 小于气泡每秒的上升距离时, 上述声波传感系统可以有效地测量气泡流速。

3 声波信号的形式和声波测量气泡参数

3.1 声波波形对测量透射声波幅度和气泡流速的影响分析

在气泡流量测量中, 所需的声波参数主要为幅度、上下游传感器首波走时及气泡通过两个接收换能器之间的距离所需时间, 而且要求测量装置可自动完成测量过程。声波波形可采用脉冲波或连续波, 采用哪种声波信号更利于实现测量装置的功能, 通过以下分析可以确定。

图 4 和图 5 是实验获得的透射声波波形。图 4 是发射波为脉冲时透射声波的波形。图 5 是发射波为多个周期正弦波时透射声波的波形。图 4 的声波幅度与首波传播时间难以自动判读。图 5 的声波幅度可以对达到稳定值后的正弦波数据通过自相关分析

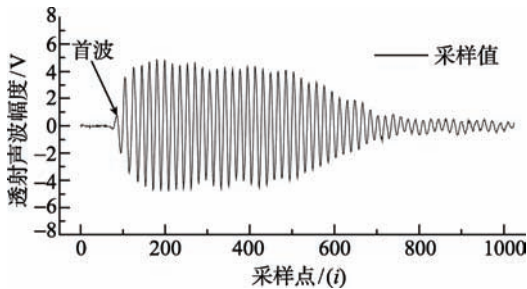


图 4 发射脉冲波时穿透声波的波形

Fig. 4 Transmission waveform using pulse wave source

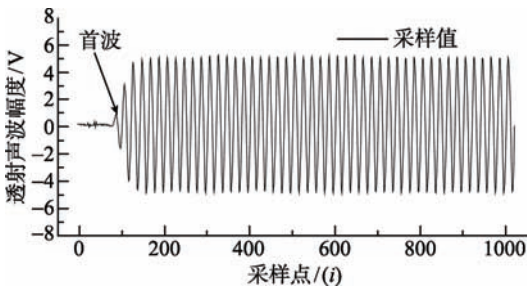


图 5 发射多个连续正弦波时透射声波的波形

Fig. 5 Transmission waveform using continuous sine wave source

3.2 气泡流速测量

图 1 中两个接收换能器检测的信号是同源的, 上游透射声压 $P_1(t)$ 与下游透射声压 $P_2(t)$ 是相关的。可得上下游传感器获得的透射声波声压幅度信号的互相关函数^[20]为:

$$R_{12}(m) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{N-m-1} x_1(i+m)x_2(i) & m \geq 0 \\ R_{12}(-m) & m < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 $x_1(i), x_2(i), i=1, 2, \dots, N$ 分别为图 1 中上下游传感器获得的透射声波声压幅度 $P_1(t)$ 和 $P_2(t)$ 的采样数据; m 为互相关函数的序变量。

气泡通过两个接收换能器间的距离所需时间^[19]为:

$$\tau_0 = m_0 \Delta t \quad (7)$$

式中 m_0 为 $R_{12}(m)$ 的最大值对应的横坐标, Δt 为采样时间间隔。

根据式(6)和(7), 在两个接收换能器的距离为 d_0 时, 气泡流速(单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)均值为:

$$v = d_0 / \tau_0 \quad (8)$$

目前, 实验结果得到相关法测量气泡流速精度可以达到 $\pm 2\%$ 左右, 与文献[18]的结果一致。

3.3 截面含气率测量

截面含气率是换能器对应的单位高度敏感区内的气泡密度。截面含气率与透射声波参数有密切关系, 其中透射声压是主要因素, 因此可以建立截面含气率(单位为 $\text{L} \cdot \text{m}^{-2}$)与透射声波幅度的简化模型为:

$$R_b k_3 f(P_t) \quad (9)$$

式中 k_3 是一个比例系数, 需要通过实验确定。 $f(P_t)$ 是透射声压幅度 P_t 的函数, P_t 是上游透射声压 $P_1(t)$ 或下游透射声压 $P_2(t)$ 中的较大者。

在声波信号采用连续正弦波时, 见图 5。透射声波达到稳定值后, 利用自相关原理^[19-20]截面含气率为:

$$R_b = k_3 \cdot \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x^2(i)} \quad (10)$$

式中 $x(i), i=1, 2, \dots, N$ 为透射声波声压幅度采样数据。

4 实验研究

4.1 实验装置简介

图 6 实验装置主要由水池、气源、气压调节表、气体流量控制器、管道、出气管、气泡破碎装置、发射换能器与电路、接收换能器与电路、信号放大采集与数据处理系统等组成。气体采用压缩空气、出气管用于模拟气泡的形成。

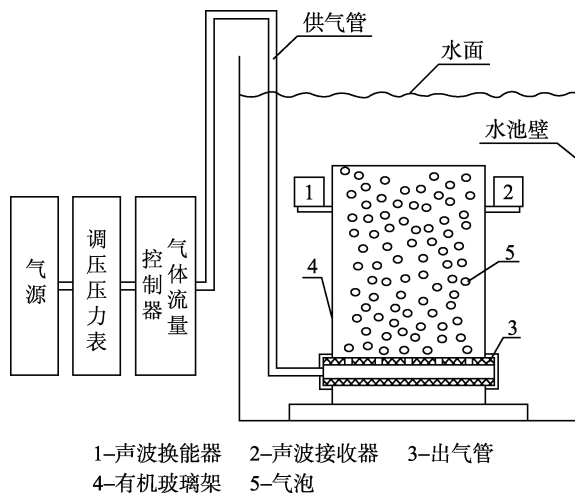


图6 实验装置原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of experimental set-up

4.2 实验研究结果

实验在室温为 28℃ 的室内水池进行, 气源为压缩空气, 气体压力为 0.4MPa。在直径气泡小于等于 3mm 时, 根据式(2), 计算出室温下水中声波波长为 $\geq 20.4\text{mm}$, 其对应频率为 73.5kHz。选择频率为 65kHz 的换能器, 产生频率为 65kHz 的正弦声波, 采样频率为 10MHz。气体流量控制器为 D08-8B/ZM 流量积算仪, 其气体流量范围为 0—200 SCCM (standard-state, cubic centimeter per minute; 标准工况, 单位是毫升每分钟)。测量管横截面积 100cm^2 。

根据气体流量计范围, 分为 10 档流量开展实验, 每档进行 10 次实验后取均值, 采集的数据处理后的结果见表 1。实验数据与回归曲线见图 7。

表 1 气体流量与透射声波幅度

Tab. 1 Gas flow and transmission wave amplitude

气体流量/SCCM	截面含气率/(SCCM·cm ²)	幅度/V
0	0.0	1.033203
20	0.2	0.983398
40	0.4	0.969727
60	0.6	0.942461
80	0.8	0.941973
100	1.0	0.940293
120	1.2	0.911367
140	1.4	0.905391
160	1.6	0.920020
180	1.8	0.887363
200	2.0	0.839238

可见, 透射声波幅度随着截面含气率增大而按一定规律逐渐减小。采用线性模型对表 1 数据拟合, 可以得到透射声波幅度与截面含气率关系式为:

$$A = -0.0007q + 1.0071 \quad (11)$$

式中 A 为透射声波幅度 (V), q 为截面含气率 (SCCM·cm²)。

根据式(10)计算的透射声波幅度的方差为 0.0171V, 而且经检验其线性关系显著。

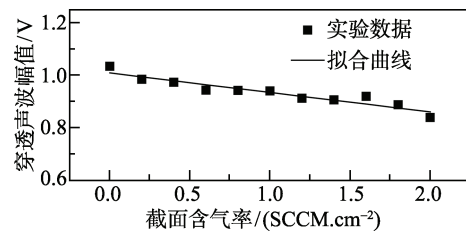


图7 实验测量的透射声波幅度-截面含气率曲线

Fig. 7 Measured wave amplitude-void fraction experiment curve

5 结语

本文讨论了用透射声波参数, 特别是声波信号幅度和相位, 反演海底冷泉渗漏甲烷渗漏流量的方法。根据声波传播理论和求解声波方程的 Born 近似方法得出了气泡直径与声波波长的关系, 是确定气泡状态调整结构参数的依据。根据频谱变换原理建立了测量装置压电换能器几何参数与气泡流动参数的联系, 是确定换能器几何布局的原则。分析了声波信号形式对气泡流量参数自动测量的影响, 为选择测量声波的波形提供了参考。运用互相关原理建立了气泡上升速度和气泡平均密度测量与声波幅度和相位的关系式, 是反演气泡流量的基本计算方法。这些结果构成了海底冷泉渗漏流量声波测量基础。

通过初步实验, 表明合理地采用蜂窝芯板为主的结构可以实现气泡直径和状态预调整, 并且气泡流动传感装置获得了透射声波幅度与截面含气率间的近线性关系。因此, 在测量前把气泡状态调整为较好的状态再测量气泡流量的方法是可行的, 为海底冷泉渗漏流量原位测量提供了一种新的方法。

海底冷泉渗漏气泡参数对声波的声学物理特性的影响机理和破碎气泡的流体力学机理是下一步需要研究的工作。

参考文献

[1] CHEN DUOFU, SU ZHEN, CATHLES L M. Types of gas hydrates in marine environments and their thermodynamic

-characteristics [J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2006, 17 (4): 723–737.

- [2] JUDD A G, HOVLAND M, DIMITROV L I, et al. The geological methane budget at continental margins and its influence on climate change [J]. *Geofluids*, 2002, 2 (2): 109–126.
- [3] CABLE J E, BURNETT W C, CHANTON J P, et al. Field Evaluation of Seepage Meters in the Coastal Marine Environment [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, 45 (3): 367–375.
- [4] ROBERTS H. H. Fluid and gas expulsion on the northern Gulf of Mexico continental slope: Mud-prone to mineral-prone responses[M]// PAULL C K, DILLON W P. *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution and Detection*. New York: American Geophysical Union, 2001: 145–161.
- [5] WASHBURN L, JOHNSON C, GOTSCHALK C C, et al. A Gas-Capture Buoy for Measuring Bubbling Gas Flux in Oceans and Lakes [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, 18 (8): 1411–1420.
- [6] GREINERT J, NÜTZEL B. Hydroacoustic experiments to establish a method for the determination of bubble fluxes at cold seeps [J]. *Geo-Marine Letters*, 2004, 24 (2): 75–85.
- [7] LEIFER I, BOLES J. Measurement of marine hydrocarbon seep flow through fractured rock and unconsolidated sediment [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22 (4): 551–568.
- [8] NIKOLOVSKA A, WALDMANN C. Passive acoustic quantification of underwater gas seepage [C]//*Proceedings of OCEANS 2006*, Boston, MA, 2006. New York: IEEE, Dec. 2007: 1–6.
- [9] ROBERTS D A, BRADLEY E S, CHEUNG R, et al. Mapping methane emissions from a marine geological seep source using imaging spectrometry [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114 (3): 592–606.
- [10] DEIMLING J S, GREINERT J, CHAPMAN N R, et al. Acoustic imaging of natural gas seepage in the North Sea: Sensing bubbles controlled by variable currents [J]. *Limnology and Oceanography-Methods*, 2010, 8: 155–171.
- [11] SCHNEIDER VON, DEIMLING J. *GasQuant — a hydroacoustic gas bubble monitoring system* [R]. Victoria, Canada: University of Victoria, 2007: 1–15.
- [12] 陈忠, 颜文, 陈木宏, 等. 南海北部大陆坡冷泉碳酸盐结核的发现: 天然气水合物新证据 [J]. *热带海洋学报*, 2006, 25 (1): 83–83.
- [13] 徐华宁, 杨胜雄, 郑晓东, 等. 南中国海神狐海域天然气水合物地震识别及分布特征 [J]. *地球物理学报*, 2010, 53 (7): 1691–1698.
- [14] 李灿苹, 刘学伟, 杨丽, 等. 气泡半径和含量对含气泡海水声速度的影响 [J]. *现代地质*, 2010, 24 (3): 528–533.
- [15] KAK A C. *Principles of Computerized Tomographic Imaging* [M]. New York: IEEE Press, 1999: 212–216.
- [16] LEIFER I, DE LEEUW G, KUNZ G, COHEN L H. Calibrating optical bubble size by the displaced-mass method [J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, 58 (23-24): 5211–5216.
- [17] 钱祖文, 吴端. 气泡幕回声信号的起伏相关 [J]. *声学学报*, 1998, 23 (6): 505–508.
- [18] 徐苓安. *相关流量测量技术* [M]. 天津: 天津大学出版社, 1988: 141–163.
- [19] LONG JIANJUN, WU BAIHAI. Positioning Mobile Vehicle by Using Super-Short Baseline with AM Ultrasonic Beacon: ICMTMA 2009: *Proceedings of International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, April 11–15, 2009 [C]. New Jersey: IEEE Computer Society, 2009, 3: 536–540.
- [20] ORFANIDIS S J. *Optimum Signal Processing. An Introduction* [M]. 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1996: 150–153.