doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2023.03.010

# 海洋沉积物热电声物性探测系统研究

丁忠军1,2,孟德健1,李洪宇1,冯志亮1

(1.山东科技大学,山东 青岛 266590; 2.国家深海基地管理中心,山东 青岛 266237)

摘 要:海洋沉积物取样测量会改变沉积物的温度、压力等参数,取样测量所得到的数据会与 沉积物的真实参数有所差距。针对上述问题本文开展了海洋沉积物热、电、声探测技术研究, 并设计了一款适用于深潜器的海洋沉积物原位热、电、声多参数探针。探针使用时差法测量沉 积物中的声速、声衰减系数,使用温纳法测量沉积物的电导率参数,使用 NTC 热敏电阻作为温 度传感器测量沉积物温度。在探针校准并对沙质沉积物进行测量。实验结果表明:探针测量电 导率标准误差小于 2.8%。温度测量误差小于 0.28 ℃,温度测量时间不小于 120 s,此次获取泥 沙样品的声速为 1 737.5 m/s,声衰减系数 2.5 dB/m。实验结果显示该探针能够准确、快速地测 量海洋沉积物的热、电、声参数。

关键词: 原位测量; 海洋沉积物; 多参数探针; 电导率; 温度; 水声换能器 中图分类号: P738 文献标识码: A 文章编号: 1003-2029 (2023) 03-0079-09

海洋沉积物中蕴含着丰富的矿产资源、油气资 源。海洋沉积物的热力学、声学、电学等性质, 受到沉积物所处环境、组成成分、含水率、孔隙 度、颗粒粒径等参数影响<sup>[1-2]</sup>,因此可以通过测量沉 积物的热力学、声学、电学性质推算海洋热流、 海洋地质,为后续探索海洋资源,开发海洋资源打 下基础。目前测量海底沉积物热、电、声方法大致 可以分为两类:原位测量、取样测量。取样测量在 取样过程中会改变沉积物所处的温度、压力环境<sup>[3]</sup>, 也会受到取样器的容量限制,并不能够很好地反映 出沉积物的真实特征<sup>[4]</sup>,相比取样测量而言原位测 量更能够准确反映沉积物的性质。

沉积物声学测量主要测量沉积物的声速、声衰 减来推演沉积物性质,电学测量主要测量沉积物的 电导率来反演沉积物孔隙度等性质,热力学测量为 探测海洋地热流提供重要数据。国内外科学家已经 开发了一系列海洋沉积物原位测量系统。例如: ROBBGBN 等<sup>™</sup>研发的沉积物声学探针设备,FUS S 等<sup>10</sup>研发的声学长矛系统(Acoustic Lance), 候正 瑜等四的沉积物声学原位测量系统; PENG Z 等<sup>18</sup>设 计了一款基于圆形排列电极的海洋沉积物电阻率测 量系统,徐志豪<sup>19</sup>设计的沉积物温度梯度探针。以 上沉积物声学、电学、热力学系统均取得了不错的 测量效果。随着水下运载技术装备的飞速发展,使 用潜水器进行海洋沉积物的原位测量已经成为国内 外研究热点。使用载人潜水器或水下机器人操作 探针类型传感器能够快速方便的测量沉积物的性 质<sup>[8]</sup>。目前船载测量系统单次测量耗费时间长,绝 大部分船载系统依靠重力贯入沉积物中,因而体积 较大,重量较高。潜水器对于搭载的探测器有较高 的体积重量限制,很难搭载目前已有的系统,并且 目前测量系统中大部分系统不能够同时测量沉积物 的热、电、声性质。

针对目前沉积物探测系统存在的测量参数单

收稿日期: 2022-11-28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0306600, 2021YFC2802100); 山东省重点研发计划资助项目(2020JMRH0101)

作者简介:丁忠军(1974—),男,博士,教授,主要研究方向为深海装备运维技术和深海调查监测技术。

E-mail: dzj@ndsc.org.cn

一, 仪器体积较大的问题本文研制一款小型海底沉 积物热、电、声多参数探测探针。通过设计小型聚 偏氟乙烯(Polyvinylidene Fluoride, PVDF)压电薄 膜水声接收换能器,优化探针结构等方式减小探针 贯入沉积物时造成的扰动,也便于潜水器进行快速 操作。小型探针可以搭载在潜水器上,通过潜水器 机械臂将探针贯入沉积物中,实现同步测量沉积 物热力学、电学、声学参数。

# 1 探针结构

#### 1.1 探针整体结构

探针总体由三部分组成:电子舱、探针主杆、 水声发射换能器。

沉积物探测系统如图 1 所示,电子舱整体为钛 合金制作,电子舱内安装信号采集电路,数据处理 电路,供电电源等电子设备,通过工形固定板固定 在电子舱内部。发射换能器谐振频率为 8 kHz,位 于探针主杆与电子舱交界处右侧,从侧方向接入电 子舱内与正弦波激励电路相连。



#### 图1 探测系统示意图

电子舱下部为探针主探杆。主探杆由上到下分 别安装了两只聚偏氟乙烯水声接收换能器,4只环 形铜电极。C1、C2、C3、C4为4只环形铜电极直 径为 16 mm,厚度为 1 mm,相互之间间隔 20 mm。 四组环电极之间使用特制的连接件连接,方便后续 扩充环电极数量,提高沉积物电导率测量深度。探 测探针的主要结构均为金属结构,金属的导电能力 要远远大于沉积物导电能力,因此有必要对环形铜 电极与金属探杆之间进行绝缘处理。为了减小金属 探杆带来的影响设计中采用如下方案:①在铜电极 与连接件之间增加橡胶垫;②在测量铜环附近外表 面上覆盖一层聚氨酯材料;③在探杆内部整体使用 环氧树脂进行固封。

主杆内部在垂直方向上等距布置有若干 NTC (Negative Temperature Coefficient) 热敏电阻,为了 提高温度测量速度,在温度传感器安装时应该尽量 使 NTC 热敏电阻传感器尽量靠近探杆内壁。为减 小探针贯入沉积物过程中对沉积物造成扰动,探针 主探杆直径设置为 16 mm,经计算在外径 16 mm, 内径 11 mm 为情况下承受最大压强为 68.5 MPa,满 足绝大部分使用要求。探针底部为锥形不锈钢件, 采用圆锥形结构可以一定程度上减小探针插入沉积 物时受到的阻力。

#### 1.2 水声接收换能器设计

现有测量系统大部分采用的水听器产品挂载在 沉积物测量系统的探杆上,从而导致挂载水听器部 分的探杆会有较高的突出部分,既增大了沉积物的 贯入阻力、同时连接部分难以保证不受损坏。针对 以上问题使用 PVDF 薄膜制作一款直径仅为 20 mm 的换能器,以减少探针贯入阻力。接收换能器示意 图如图 2 所示。



图 2 PVDF 水声换能器示意

压电材料使用 PVDF 薄膜, PVDF 薄膜的压电 常数 g<sub>31</sub> 为 216×10<sup>-3</sup> Vm/N, 传统压电陶瓷压电材料 的压电常数 g<sub>31</sub> 为 11×10<sup>-3</sup> Vm/N。PVDF 压电薄膜的 压电电压常数较之压电陶瓷要高出 20 倍以上, 其 有频响宽, 声阻抗低等特性, 除此之外 PVDF 压电 薄膜还具有易弯曲, 易做成管状等优点, 适合制作 水声换能器<sup>100</sup>。根据所设计换能器参数裁剪出一块 适合大小的长方形 PVDF 压电薄膜, 在 PVDF 薄膜 两侧覆盖导电银胶。高温会使 PVDF 薄膜失去压电 特性, 所以不能采用焊接的方式将导线与压电材料 相连接, 在本设计中采用铆接的方式将 PVDF 压电 材料与导线相连接, PVDF 薄膜形状如图 3 所示。



#### 图 3 PVDF 薄膜示意图及剖面图

与压电陶瓷不同, PVDF 压电材料为柔性材料, 自身刚度不够,需要与背衬相结合提高整体刚度与 耐静水压能力。接收换能器的背衬使用亚克力材 料,亚克力材料声阻抗与水比较接近,可以有效地 减小声反射。水声换能器内部使用环氧树脂将带螺 纹的连接件与其他部件灌封为一体。

### 1.3 系统硬件组成

沉积物探针的硬件设计如图 4 所示, 声学探测 包括一组发射换能器, 两组接收换能器, 在测量过 程中探针主杆全部贯入沉积物中, 主控芯片控制正 弦波发射电路发射若干周期的正弦波信号, 经过放 大之后接入发射换能器。发射换能器发射固定数量 的声波, 采集电路并行采集 2 路水声换能器的信号 输出。其中 7 个周期的正弦波信号由 DAC902 芯片 产生, 经过功率放大电路放大之后接入发射换能 器。使用 AD7606 模数转换芯片同步采集两组水声 接收换能器的接收信号, 模数转换芯片通过并行的 方式向主控芯片发送转换之后的数据。



图 4 探测系统硬件组成

C1、C2、C3、C4 为四组环形铜电极,其中C1 或C4 端接入100 mA 交变电流源,另一端接地。在 探测探针贯入沉积物的过程中不断测量C2、C3 端 口的电压实现沉积物电阻率的剖面测量。多只NTC 热敏电阻组成温度梯度测量系统,温度数据采集电 路实时采集探入过程中沉积物的温度。

为了减小探测器的能量消耗,增加探针在海底 的探测时间,主控芯片及热、电、声探测模块大部 分时间处于待机状态。到达工作地点之后通过姿态 传感器判断仪器姿态从而唤醒探测装置。

# 2 沉积物多参数原位探测原理

#### 2.1 电阻率测量原理

目前温纳法测电阻率电极排列方式有两种:直 线排列、环形排列。因直线型排列方法拓展性强,加工方便的原因,本测量系统中使用直线排列。4 组环电极中C1或C4端为交变电流输入端,另一端 为接地端,通过测量环电极C2、C3之间的电压差 值就可以得到沉积物电导率<sup>[11]</sup>,换算公式如下。

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} \times \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)\right]}$$
(1)

式中,  $\rho$  为测量的沉积物电阻率(单位:  $\Omega$ ·m);  $\Delta V$  为环电极 C2、C3 之间的电势差; I 为环电极的 输入电流值;  $r_1 - r_4$  为电极之间的距离。温纳法将 电极等距排列, 那么以 $\rho$ 可以表示如下。

$$\rho = \frac{2\pi a \Delta V}{I} \tag{2}$$

式中, a 为环电极间隔。

#### 2.2 声学测量原理

如图 5 所示沉积物声学测量由发射换能器 A 发 射声波信号,在接收换能器 B、C 端接收声学信号。



#### 图 5 沉积物声学测量示意图

本文设计的探针中发射换能器与接收换能器之间呈 三角形状。由于加工工艺等原因,发射换能器与接 收换能器之间的距离难以精确测量,所以采用对比 法来测量沉积物中的声速。

水声信号在水中与沉积物中的传播距离是一致的,根据公式 *S* = *V*·*T*,沉积物中的声速测量公式如式(3)所示。

$$V_1 = \frac{V_2 \cdot T_2}{T_1} \tag{3}$$

式中, *V*<sub>1</sub>为沉积物中的声速; *T*<sub>1</sub>为声波在沉积 物中传播的时间; *V*<sub>2</sub>为在海水中的声速; *T*<sub>1</sub>为声波 在海水中传播的时间; *S*为接收换能器之间的距离。 由于所布置的接收换能器距离较近,间隔较小,在 测量中多次重复测量取平均值。沉积物的声衰减测 量公式如下<sup>112</sup>。

$$\alpha(f) = 20 \frac{\lg\left(\frac{A(f)_{snear}}{A(f)_{sfar}}\right) - \lg\left(\frac{A(f)_{unear}}{A(f)_{ufar}}\right)}{S}$$
(4)

式中,  $\alpha(f)$ 为特定频率下的声衰减;  $A(f)_{snear}$ ,  $A(f)_{snear}$ ,  $A(f)_{snear}$ ,  $f(f)_{snear}$ ,  $A(f)_{snear}$ ,  $A(f)_$ 

#### 2.3 热力学测量原理

热力学测量采用 NTC 热敏电阻测量, NTC 热 敏电阻是一款负温度系数的热敏电阻, 它的阻值与 温度的对应关系是非线性的, 阻值与温度的关系符 合如式(5)所示<sup>[13]</sup>。

$$T_1 = 1 / \left( \frac{\ln\left(\frac{R_t}{R}\right)}{B} + \frac{1}{T_2} \right)$$
(5)

式中,  $R_i$ 为环境温度为  $T_1$ 时热敏电阻的阻值; R为环境温度为  $T_2$ 时热敏电阻的阻值; B为热敏电 阻的材料常数。本文使用的热敏电阻在  $T_2$ 为 25  $^{\circ}$ 时的阻值为 10 k $\Omega$ 。

# 3 系统测试与结果分析

#### 3.1 电导率测量及数据分析

海洋沉积物中含有物质种类与物质含量的不同 会影响沉积物的电导率。在实验室中称取 74.56 g KCI,配置成 1.000 mol/L 的溶液(密度 1.0449 g/cm<sup>3</sup>), 再稀释至 0.100 mol/L。在 25 ℃环境下验证电导率 测量的误差。在环型铜电极 C1 或 C4 端接入由 IT6700H 可编程电源产生的 100 mA 交变电流,另 一端接地。使用安捷伦 DSO-X 型示波器测量C2、 C3 口电压值。数据经计算之后如表 1 所示。

表1 电导率测量表

序号	理论值/(S•m <sup>-1</sup> )	测量值/(S•m <sup>-1</sup> )	误差/%
1	0.012 88	0.013 24	2.82
2	0.012 88	0.013 02	1.08
3	0.012 88	0.012 55	-2.50
4	0.012 88	0.013 18	2.32
5	0.012 88	0.012 94	1.50

电导率测量校准中电导率的最大误差百分比为 2.82%,误差期望值为1.044%。探针总体测量误差 大于1%,在探针主探杆贯入沉积物过程中,沙质沉积 物会与探杆表面的聚氨酯绝缘层摩擦,部分绝缘层 脱落,因此环电极附近金属探杆与沉积物直接接 触。金属电导率远远大于沉积物电导率,导致测量沉 积物电导率与实际值相比偏高。WHEATCROFT R A<sup>[14]</sup> 指出海水与底部沉积物电阻率有着极大的不同,两 者大约是 2.5 倍的关系,因此可以根据电阻率变化 判断探针大体位置。



图 6 声学测量实验图

### 3.2 沉积物声学测量及数据分析

声学测量实验图如图 6 所示,在发射换能器两

端施加8kHz的电压信号,电压信号的峰值为15V,每次发射7个周期的正弦波,使用接收换能器接收 声波信号。实验中使用DPA-2698型功率放大器驱 动信号驱动发射换能器,使用示波器直接观察接收换能器接收信号。激励信号、接收信号幅值如图 7 和图 8 所示。



图 8 沉积物中接收换能器接收信号

从图 7 和图 8 中可以看出随着传播距离的增加,声音信号在水中有一定程度的衰减,声音信号在 沉积物中衰减程度要比在水中信号衰减程度要高,可以根据声音信号的衰减程度计算声衰减系数。在 计算过程中分别寻找换能器接收信号的峰值:水听 器在海水中接收到的近距离处振幅为 0.039 V,远 距离处振幅为 0.017 V,在沉积物中的分别为 0.026 V、 0.011 V, 经计算声衰减系数为 2.5 dB/m。

如图 9 中 A 所示在计算沉积物中声速时,由于 水声换能器 A 在第一个峰值附近存在一个不合理突 变点。所以在计算时采用水声换能器第二个峰值计 算声速。接收换能器 B 在水中、沉积物中接收信号 如图 10 所示。

由图 10 可知,相同频率的声音信号在沙质沉



图 9 接收声波信号局部曲线

积物中的传播速度要大于在水中传播速度。已知在 25℃附近声音信号在海水中传播速度为1500 m/s, 换能器 B 接收到水声信号时间分别为1.263×10<sup>-3</sup> s, 1.462×10<sup>-3</sup> s。将数据代入式(3)可得声音信号在沙 质样品中传播速度为1737.5 m/s。

# 3.3 温度测量及数据分析

在测量过程中温度传感器一端与10k的电阻串 联,另一端接地,在电阻的另一端接入恒流源。通 过测量温度传感器两端电压,间接测量环境温度。 温度校准由恒温水槽来测量,在 50 ℃恒温水 中测量温度传感器输出。对温度传感器进行 13 次 重复测量取每次测量的平均值结果如图 11 所示。 经计算产生的温度最大差值约为-0.28 ℃。测量海 水中声速时必须要考虑温度对声速的影响,其中水 中声速与温度的关系式如下。

C = 1 557 - 0.024 5(74 - t)<sup>2</sup>
式中, C 为声速; t 为测量时温度。
根 据 式(6)可知, 在 50 ℃时水中声速为



图 10 换能器 B 接收信号局部曲线



1 542.878 m/s。探针在 50 ℃时产生的误差最大为 -0.28 ℃,此时对声速测量造成的误差约为 -0.322 m/s, 该误差小于由测量仪器产生的误差,故可以忽略。

将热敏电阻由室温下迅速插入温度相对恒定的 水中,测量传感器由室温下达到设定温度 95%所需 要的时间,作为传感器响应快慢的指标。由于海洋 底部会产生巨大的海水压力,需要对传感器进行耐 压保护处理,因此封装后的温度传感器响应时间会 延长。因此需要确定封装之后的传感器到达稳定时 所需要的时间。

选取同一批次的温度传感器,一只进行封装处 理,另一只不进行处理,将两只传感器同时放入水 中记录到达稳定时所需要的时间。测量结果如图 12 所示,在传感器未进行封装之前达到设定温度的响 应时间为 36.5 s。在进行耐压封装之后响应时间为 95.7 s。在实验中并没有考虑探针贯入沉积物过程 中,由于探针与沉积物摩擦所带来的温度上升以及 耗散所需要的时间。因此考虑到传感器响应时间, 探针在实际应用中最少要在沉积物中稳定 120 s。



# 4 结 论

本文通过对海洋沉积物探测技术研究,设计了 一款小型沉积物热、电、声探测探针,本文主要研

究结论如下:①文中所设计的 PVDF 压电薄膜换能器具有较好的转换能力,能够完成沉积物声学测量任务;②在文中所设计装置不仅能够通过 Wenner法测量沉积物电学性质,而且通过设计特殊连接件为后续增加测量电极提供接口;③经过测试 NTC

热敏电阻测量电路具有较好的稳定性和较高的灵敏度,热力学测量所需要的时间为 120 s。目前所设计的探针声学测量参数单一,电学测量中绝缘措施较差的问题,在后续的时间中将会对此继续进行改进。

#### 参考文献:

- JANSEN D, HEESEMANN B, PFENDER M, et al. In situ measurement of electrical resistivity of marine sediments, results from Cascadia Basin off Vancouver Island[J]. Marine Geology, 2005, 216(1/2): 17–26.
- [2] 李琦,刘颉,常哲,等.海底沉积环境对海底表层沉积物声学参数测量影响研究[J].海洋技术学报,2020,39(4):41-46.
- WANG J, LI G, LIU B, et al. Experimental study of the ballast in situ sediment acoustic measurement system in South China Sea[J].
   Marine Georesources and Geotechnology, 2018, 36(5): 515–521.
- [4] 郭常升,窦玉坛,谷明峰.海底底质声学性质原位测量技术研究[J].海洋科学,2007,31(8):6-10.
- [5] ROBB G B N, BEST A I, DIX J K, et al. Measurement of the in situ compressional wave properties of marine sediments[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2007, 32(2): 484–496.
- [6] FUSS, WILKENSRH, FRAZERLN. Acoustic lance: New in situ seafloor velocity proflies[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1996, 99(1): 234-243.
- [7] 侯正瑜,郭常升,王景强.海底沉积物声学原位测量系统[C]//2014年中国声学学会全国声学学术会议.江苏南京:声学技术,2014: 390-393.
- [8] PENG Z, WANG J C, DONG R, et al. Design of a marine sediments resistivity measurement system based on a circular permutation electrode[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(9): 995–1016.
- [9] 徐志豪. 深海沉积物温度梯度探针设计与研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2013.
- [10] 张玲丽. PVDF 水听器的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2015.
- [11] WON I. The geometrical factor of a marine resistivity probe with four ring electrodes[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1987, 12(1): 301–303.
- [12] 陶春辉, 王东, 金翔龙. 海底沉积物声学特性和原位测试技术[M]. 北京: 海洋出版社. 2006.
- [13] 陈浩桉, 邹大鹏, 肖体兵, 等. 海底原位观测系统温度测量单元的设计[J]. 机床与液压, 2021, 49 (8): 96-100.
- [14] WHEATCROFT R A. In situ measurements of near-surface porosity in shallow-water marine sands[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(3): 561–570.

### Study on Thermoelectric Acoustic Property Detection System of Marine Sediments

DING Zhongjun<sup>1,2</sup>, MENG Dejian<sup>1</sup>, LI Hongyu<sup>1</sup>, FENG Zhiliang<sup>1</sup>

School of Oceanology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
 National Deep Sea Center, Qingdao 266237, China)

Abstract: Marine sediment sampling and measurement will change the temperature, pressure and other parameters of the sediment, and the data obtained by sampling and measurement will be different from the real parameters of the sediment. Marine sediment sampling and measurement will change the temperature, pressure and other parameters of the sediment, and the data obtained by sampling and measurement will be different from the real parameters of the sediment. In view of the above problems, this paper carried out research on the thermal, electrical and acoustic detection technology of marine sediments, and designed an in-situ thermal, electrical and acoustic multi-parameter probe of marine sediments suitable for deep-sea submersible. The probe used the time difference method to measure the sound velocity and sound attenuation coefficient in the sediment, the Wenner method to measure the conductivity parameters of the sediment, and the NTC thermistor as a temperature sensor to measure the temperature of the sediment. Sandy sediments were measured after probe calibration. The experimental results show that the acoustic velocity of the sediment samples is 1 588.1 m/s and the acoustic attenuation coefficient is 2.5 dB/m. The standard error of the probe is less than 2.8%. The temperature measurement error is less than 0.28 °C, and the temperature measurement time is not less than 120 seconds. The experimental results show that the probe can accurately and quickly measure the thermal, electrical and acoustic parameters of marine sediments. In view of the above problems, this paper carried out research on the thermal, electrical and acoustic detection technology of marine sediments, and designed an in-situ thermal, electrical and acoustic multi-parameter probe of marine sediments suitable for deep-sea submersible. The probe used the time difference method to measure the sound velocity and sound attenuation coefficient in the sediment, the Wenner method to measure the conductivity parameters of the sediment, and the NTC thermistor as a temperature sensor to measure the temperature of the sediment. Sandy sediments were measured after probe calibration. The experimental results show that the acoustic velocity of the sediment samples is 1 737.5 m/s and the acoustic attenuation coefficient is 2.5 dB/m. The standard error of the probe is less than 2.8%. The temperature measurement error is less than 0.28 °C, and the temperature measurement time is not less than 120 s. The experimental results show that the probe can accurately and quickly measure the thermal, electrical and acoustic parameters of marine sediments.

Key words: in-situ measurement; marine sediments; multi parameter probe; conductivity; temperature; underwater acoustic transducer