

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020051001

# 砂质海底沉积物压缩波速与物理参数关系试验研究

王虎, 吴涛, 张仕杰, 孙振银, 周亚迪, 朱涛

天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072

**摘要:** 砂土是主要的海底沉积物类型之一, 明确砂质沉积物声学与物理性质的关系对海底底质和地层探测至关重要。本文利用超声探测仪和自制的试样制备测试装置, 模拟制备不同沉积状态的砂土试样, 同步开展超声测试和物理性质测试, 探讨砂质沉积物声速测试方法及影响因素, 揭示砂质沉积物压缩波速与物理参数的内在联系。试验结果和分析表明: 换能器接触管壁的间接测量方法中, 声波多路径传播可显著影响沉积物声速测量的准确性, 而换能器接触试样的直接测量方法可避免这一影响; 30 kHz 至 100 kHz 的不同频率对压缩波速测量结果没有明显影响。砂质沉积物的压缩波速与密度、孔隙度、含水率有较好的相关性, 相关系数分别为 0.87、0.86、0.84, 并且随密度的增大而增大, 随孔隙度、含水量的增大而减小。砂质沉积物的压缩波速与中值粒径的相关系数小于 0.6, 对物质组成不敏感。另外, 与声速相比, 砂质沉积物的声阻抗与密度、孔隙度、含水量的相关性更高。砂质沉积物压缩波速对饱和度非常敏感, 例如, 饱和度从 0.971 增至 0.994 时, 压缩波速从  $393.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  急剧增大到  $748.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 需特别注意。

**关键词:** 海底沉积物; 压缩波速; 声阻抗; 物理参数

中图分类号:P733 文献标识码:A

## Experimental study on the relation between compressional wave velocity and physical properties of sandy sediments

WANG Hu, WU Tao, ZHANG Shijie, SUN Zhenyin, ZHOU Yadi, ZHU Tao

School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract:** Sand is one of the main type of submarine sediments. Figuring out the relation between acoustic and physical properties of sandy sediments is critical to seafloor and sub-bottom detection. In this paper, by using the ultrasonic detector and the self-developed sample preparation device, sand samples in different physical states are prepared to simulate different natural sedimentary conditions. Acoustic and physical properties are tested simultaneously, so as to reveal the effective measuring methods and its influence factors, and to explore the internal connection between the compressive wave velocity (CWV) and physical parameters of sandy sediments. Results and analysis indicate that the multipath propagation of sound wave can affect the measurement accuracy for the method with ultrasonic transducers touching the side wall of sediment container, while this effect can be avoided by measuring with a direct contact between transducers and sediment. No effects are found with different test frequencies among 30 kHz to 100 kHz. The CWV of sandy sediments, which shows good correlation with density, porosity and water content, with correlation coefficients 0.87, 0.86, and 0.84, respectively, increases with increasing density, while decreases with increasing porosity and water content. While the correlation coefficient between CWV and medium diameter is smaller than 0.6, which shows that the CWV of sandy sediments has no clear link to grading distribution. The correlation of acoustic impedance with bulk density, porosity and water content is bigger than that of CWV with them. In addition, special attention should be paid to the saturation of sediments because the CWV is very sensitive to saturation, for example, the CWV increases dramatically from  $393.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  to  $748.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  as the saturation increases from 0.971 to 0.994.

**Key words:** submarine sediments; compression wave velocity; acoustic impedance; physical parameter

海底沉积物的物理和声学性质是重要的海洋环境基础数据, 对海洋及海底声学探测、海洋工程建

设等至关重要<sup>[1-2]</sup>。自 20 世纪 50 年代起, Hamilton<sup>[3-4]</sup>、Anderson 等<sup>[5]</sup>开始通过现场试验和室内试验研究海

资助项目: 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室开放基金项目“基于声学遥测的近海底质精细化识别研究”(201805); 国家级大学生创新训练计划项目“海底粉土声传播规律试验研究”(201810056104); 国家自然科学基金项目“基于波致动力固结的黄河三角洲铁板砂形成过程研究”(41702307)

作者简介: 王虎(1986—), 男, 讲师, 主要从事海洋工程地质研究, E-mail: hu.wang@tju.edu.cn

收稿日期: 2020-05-10; 改回日期: 2020-08-11。周立君编辑

底沉积物声学性质, 引领众多国内外学者开展海底沉积物声学和物理性质的经验关系与理论模型的研究<sup>[6-13]</sup>。试验研究方面, 原位测试通过将测试装置插入海底, 直接量测海底沉积物声学参数<sup>[14-15]</sup>, 其优点是对沉积物扰动小、能反映海底沉积物真实状态, 但其设备复杂昂贵, 测量过程和结果受复杂海洋环境的影响。取样后测试, 指利用取样器采取海底沉积物样品后, 在船上或实验室开展测试, 该法相对简便易行, 但沉积物的原始应力状态和结构已遭改变, 测得的声速、孔隙度等参数存在一定程度的失真。经验关系和理论模型方面, 取自不同海域的沉积物样品物质组成、沉积环境和沉积历史各异<sup>[12, 16]</sup>, 物理变量多, 因此, 基于取样后测试建立的海底沉积物声速与物理参数的经验关系往往具有较大的离散性。以 Biot-Stoll<sup>[17-19]</sup> 为代表的多孔介质弹性模型从理论上确定了沉积物声速与密度、孔隙度等物理参数及弹性模量、泊松比等力学参数之间的关系, 但其参数多, 参数取值范围大, 难以确定。

试验研究是探究沉积物声速与物理参数之间的内在联系机制的基础, 对于建立有效的经验关系、合理选用计算模型及参数取值至关重要。除原位测试和取样后测量外, 室内模拟试验便于控制试验变量, 可制备不同物理状态的沉积物试样, 模拟并还原沉积物原始沉积状态, 并且便于对试样同时开展物理、力学、声学参数测试。例如, 邹大鹏等<sup>[20]</sup>

和 Sessarego 等<sup>[21]</sup> 分别利用室内模拟试验研究了静水压力和声发射频率对砂质沉积物声速的影响。本文选取有代表性的砂质海底沉积物为研究对象开展室内模拟实验, 利用超声探测仪与自制的试样制备与测试装置, 以粒径级配、密实状态为控制性变量, 制备不同物质组成和不同物理状态的沉积物试样, 开展压缩波速和物理参数测试, 揭示砂质沉积物声学与物理性质之间的变化规律, 为经验关系和理论模型的开发、应用提供参考与支持。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验装置

本文利用自制装置<sup>[22]</sup> 制备饱和砂土试样, 装置主要由可拆卸和组合的制样筒、位于制样筒侧壁的孔隙水压力传感器监测机构、透水及不透水筒盖等组成, 如图 1 所示。装置的质量和直径已知, 通过量测试样高度、称量装置以及试样的总重, 可实时获取试样密度; 利用击实的方法可改变试样密实状态, 进而获取不同密度、含水量和孔隙度的试样; 装置侧壁的孔隙水压力传感器用于监测试样的固结状态; 在制样筒底部安装不透水筒盖, 可实现试样表层单向排水固结并确保试样始终处于饱和状态。采用 RSM-SY6 超声探测仪连接平面夹心换能

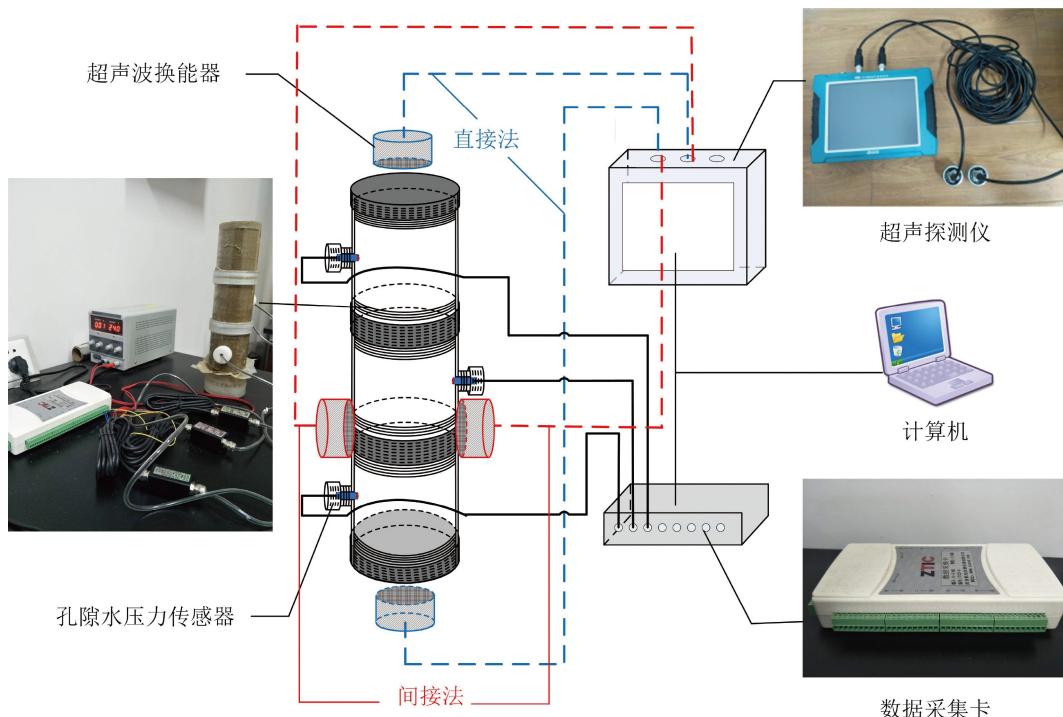


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of test device

器用于波速测量,其工作参数:发射电压500 V;发射波形为正弦波;采样频率100 kHz;采样点数512;声波频率30、40、50、100 kHz。通过调整增益和延时将不规则波形调制到容易辨识。通过分段拆卸装置,选取最稳定的、均匀各向同性的试样段进行测量。

当前的实验室沉积物波速测试主要有两种:直接法和间接法。直接法指超声发射、接收换能器通过黄油耦合剂直接与沉积物试样紧密接触,通过测量超声波通过试样的走时和试样长度,计算得出沉积物声速 $V_1(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ :

$$V_1 = \frac{L}{t-t_0} \quad (1)$$

式中, $L$ 为试样长度(mm); $t$ 为声波传播时间(ms); $t_0$ 为换能器校准时间(ms)。侯正瑜等<sup>[12]</sup>、邹大鹏等<sup>[20]</sup>即采用直接法测量沉积物波速。需要注意的是,此法换能器与试样接触,可能会造成试样变形,进而导致试样的长度、含水量等参数的变化,需要小心操作。间接法,试样位于保持直立的制样筒中,筒中水面始终高于沉积物以确保试样处于饱和状态,超声发射、接收换能器通过医用超声耦合剂对称压紧到试样管侧壁,开展沉积物声速测量。另外,对装有无气水的试样管进行测量获取走时,换算得到沉积物声速 $V_2(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ :

$$V_2 = \frac{D_1}{t-(t_0-D_2/V_w)} \quad (2)$$

式中, $D_1$ 为试样直径, $D_2$ 为试样筒中无气水直径( $D_1=D_2$ )(mm); $t$ 为内置试样时声波传播时间(ms);

$t_0$ 为内置无气水时声波传播时间(ms); $V_w$ 为无气水声速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )。Richardson 和 Briggs<sup>[23]</sup>用该法测量软泥和密实砂的压缩波速,该法的优点是对试样扰动小。本文即分别运用上述两种方法开展砂质沉积物波速测量,探讨其有效性。

## 1.2 试验方案

试验以砂土的粒径级配和密实状态为控制变量制备试样。将取自天津东疆港沙滩的沉积物过筛,分别配制不同级配(不均匀系数 $C_u \geq 5$ 且曲率系数 $C_c=1 \sim 3$ 为级配良好)的细砂(F)、中砂(M)、粗砂(C),如表1所示。本文通过击实控制密实状态,具体做法为:在制样筒中加入无气水;砂雨法加入沉积物,击实25次;将表面抛毛后加入第二层沉积物击实,共进行三层击实;控制每个试样击实功率不同,制备不同密实状态的饱和砂土试样,进而得到不同密度、含水量、孔隙度的试样。击实后,使沉积物始终处于浸没状态,浸水饱和时间不低于13 h<sup>[24-25]</sup>,试样饱和标准为饱和度大于0.95。当监测超孔隙水压力降为0,即试样达到正常固结状态后开展超声测试。直接法,根据实际情况拆卸制样筒,选取均质稳定的试样段,换能器通过黄油与圆柱形沉积物试样两端紧密接触,根据P波初至读取走时,用游标卡尺测得试样长度 $L$ ,依据公式(1)计算求取波速。间接法,将换能器通过医用超声耦合剂对称压紧到制样筒侧壁,分别测试沉积物和无气水的波速,按公式(2)计算波速。直接法和间接法

表1 直接测量法获得的砂质沉积物物理和声学参数值  
Table 1 Physical and acoustic parameters of sandy sediment obtained by direct measurement

试验组别	中值粒径 $d_{50}/\text{mm}$	密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	含水量 $\omega/\%$	孔隙度 $n/\%$	饱和度 $S_r$	压缩波速 $V_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	声阻抗 $Z/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
FGI-1	0.246	2.033	23.005	38.329	0.992	616.9	1254.0
FGC-1	0.246	2.162	16.450	30.724	0.994	747.5	1616.3
FNI-1	0.230	1.930	29.002	44.175	0.982	444.2	857.1
FNC-1	0.230	2.047	22.301	37.547	0.994	506.6	1036.9
MGI-1	0.374	1.997	25.137	40.453	0.992	481.8	962.0
MGC-1	0.374	2.128	17.877	32.639	0.989	598.2	1272.7
MNI-1	0.460	1.943	28.030	43.373	0.981	405.6	788.0
MNC-1	0.460	2.001	24.230	39.898	0.978	426.4	853.3
CGI-1	0.973	2.079	20.366	35.551	0.989	552.8	1149.2
CGC-1	0.973	2.170	16.048	30.227	0.993	748.5	1624.1
CNI-1	0.587	1.918	30.102	44.991	0.986	393.3	754.4
CNC-1	0.587	2.017	22.970	38.797	0.971	438.0	883.6

中的试样, 均采用相同粒径级配的砂土和相同制样方法制备, 认为测试时试样具有相同的初始状态。物理参数按如下方法测定: 比重计法测定土粒比重, 筛分法获取试样粒径级配, 超声测试后用烘干法测含水量, 称量总重和制样筒重得到沉积物质量, 根据制样筒直径和试样长度求取体积, 进而得到试样密度, 计算孔隙度和饱和度<sup>[26]</sup>。

## 2 试验结果

直接法共制备试样 12 组, 试样基本参数如表 1 所示。试样的中值粒径为 0.230~0.973 mm, 分属细砂、中砂、粗砂; 试样密度 1.918~2.170 g·cm<sup>-3</sup>、含水量 16.048%~30.102%、孔隙度 30.227%~44.991%, 饱和度 0.971~0.994, 中值粒径与密度之间无明显规律, 含水量和孔隙度随密度的增大而减小。

不同频率 30、40、50、100 kHz 的沉积物压缩波速测量结果如图 2 所示。可以看出, 30~100 kHz 测试频率对砂质沉积物压缩波速影响不明显, 即没有明显的频散效应。所以, 为方便与前人研究成果进行对比, 本文给出各组试样在 100 kHz 频率下测得的压缩波速(表 1), 并基于其开展后继的分析讨论。

从表 1 中可以看出, 100 kHz 频率下, 测试得到的砂质沉积物压缩波速为 393.3~748.5 m·s<sup>-1</sup>、平均值为 530.0 m·s<sup>-1</sup>, 声阻抗为 754.4~1 624.1 kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、平均值为 1 087.6 kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 压缩波速和声阻抗随密度的增大而增大、随含水量和孔隙度的增大而减

小, 随饱和度的增加而增大。

间接法试样物理参数和测试结果见表 2, 饱和砂质沉积物压缩波速的范围为 1 454.4~1 544.3 m·s<sup>-1</sup>, 平均值为 1 508.4 m·s<sup>-1</sup>, 略高于水的声速, 该方法测得的压缩波速与物理参数之间并无明显相关性。直接法和间接法压缩波速测量结果的差距, 将在后文讨论。

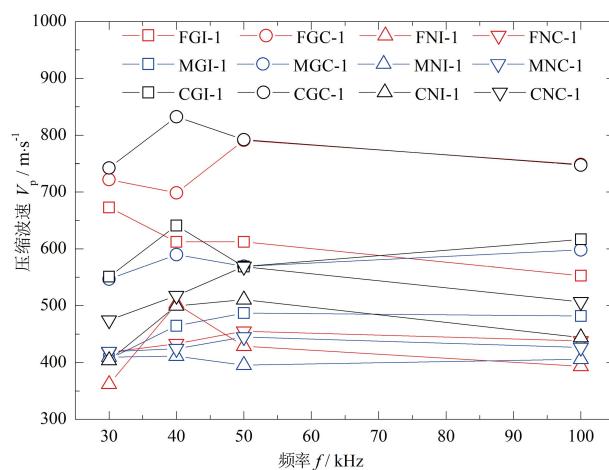


图 2 不同测试频率下的砂质沉积物压缩波速  
F-细砂, M-中砂, C-粗砂; G-级配良好, N-级配不良;  
C-击实, I-无击实; 1-直接法, 2-间接法。

Fig.2 Compression wave velocity of sandy sediments at different test frequencies

F-fine sand, M-medium sand, C-coarse sand; G-good gradation, N-poor gradation; C-compaction, I-no compaction; 1-direct method, 2-indirect method.

表 2 间接测量法获得的砂质沉积物物理和声学参数值  
Table 2 Physical and acoustic parameters of sandy sediment obtained by indirect measurement

试验组别	中值粒径 $d_{50}$ /mm	密度 $\rho$ /g·cm <sup>-3</sup>	含水量 $\omega$ /%	孔隙度 $n$ /%	饱和度 $S_r$	压缩波速 $V_p$ /m·s <sup>-1</sup>	声阻抗 $Z$ /kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>
FGI-2	0.222	1.959	32.102	44.666	1.000	1488.5	2915.9
FGC-2	0.222	2.076	25.028	38.055	1.000	1531.0	3177.8
FNI-2	0.211	1.937	31.967	45.237	1.000	1511.2	2926.9
FNC-2	0.211	2.011	26.774	40.797	1.000	1521.1	3059.6
MGI-2	0.381	1.965	27.976	42.720	1.000	1454.4	2857.3
MGC-2	0.381	2.066	24.966	38.307	1.000	1469.8	3036.8
MNI-2	0.450	1.861	35.116	48.604	0.995	1514.1	2817.9
MNC-2	0.450	1.997	31.081	43.155	1.000	1544.3	3083.9
CGI-2	0.905	2.092	20.857	35.418	1.000	1488.0	3112.7
CGC-2	0.905	2.131	21.288	34.455	1.000	1510.6	3218.5
CNI-2	0.685	1.936	29.572	44.259	0.998	1525.1	2952.1
CNC-2	0.685	1.973	26.861	41.956	0.996	1542.0	3043.1

### 3 讨论

#### 3.1 砂质沉积物声速测量方法及有效性

直接法测量海底沉积物声速较为普遍<sup>[11-12]</sup>, 测量时, 需要将制样筒横置、将平面夹心换能器通过黄油贴紧试样中心, 测得的压缩波速小于  $800 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 而制样筒为有机玻璃制作, 压缩波速为  $2260 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 测量结果是真实值, 未受到声波可能沿筒壁传播的影响。但是, 直接法测量砂质沉积物声速时, 制样筒两端敞开, 易造成试样扰动、孔隙水流失, 可能造成砂质沉积物饱和度降低、试样长度测量困难等问题, 这都将影响声速测量结果, 应特别小心操作。

间接法测量对试样无扰动、试样更接近完全饱和, 但换能器穿透管壁测试沉积物声速, 结果可能受到超声波多路径传播的影响, 即超声波可能穿透筒壁和沉积物以最短路径透射传播, 或沿着声速较大的筒壁绕射传播, 测试结果为沿任一路径传播的最短走时。为此, 本文设计空筒、干砂、水、饱和砂等四种工况下的间接法超声测试(见图3和表3), 四种工况下超声波传播路径见图4。结果显示, 四种工况下的声波走时非常接近, 工况1、2、4条件下, 超声波穿过空筒的波形图(图3a)、试样筒加干砂波形图(图3b)、试样筒加饱和砂波形图(图3d)的初至时间均相同且与声波沿外径为  $80 \text{ mm}$ 、压缩波速  $2730 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[26]</sup> 的制样筒半圆周传播的理论走时  $46 \mu\text{s}$  接近。三种工况下根据实际走时结合间接法计算公式(2), 计算出压缩波速为  $1472 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 这与空气波速  $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、干砂波速  $250 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  相差较大, 由此确定这三种工况下初至时间为超声波沿筒壁半圆周传播走时。图3a约在  $220 \mu\text{s}$  波形发生变化, 与超声波穿透空气传播的理论走时  $235.3 \mu\text{s}$  接近; 由于超声波穿透管壁和干砂时发生弯曲透射, 图3b与图3a相比, 约在  $300 \mu\text{s}$  处波形发生变化, 与超声波穿透管壁和干砂的理论走时  $323.8 \mu\text{s}$  接近; 图3d初始波形与图3a、3b相似, 均为超声波沿筒壁半圆

周绕射传播产生, 认为试样未达到完全饱和, 无法判断准确的初至时间。工况3条件下测得超声波穿透制样筒和水的波形图(图3c), 与图3a、3b、3d相比, 前端增加一小段波形, 说明超声波穿透管壁和水的径向传播速度大于沿试样筒半圆周的传播速度, 读取的初至时间为超声波穿透筒壁和水的真实走时。在这一小段波形后仍出现与图3a、3b、3d相似的波形, 即超声波沿筒壁半圆周绕射传播的波形。以上分析均证实了超声波多路径传播的存在, 并沿走时最快的路径优先到达。若试样本身压缩波速低于临界值( $1500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 测得的压缩波速则会被高估; 若高于临界值, 则没有影响, 间接法也可用。对于非完全饱和沉积物, 压缩波速一般低于临界值, 特别需要注意多路径效应, 建议使用直接法, 本文即属于这种情况。而 Richardson 等<sup>[23]</sup> 测量压缩波速时未考虑饱和度的问题, 测试结果存在高估沉积物实际声速的可能性。

综上, 实验室测量砂质沉积物声速方法中, 直接法较为准确, 操作过程应注意尽量减小对试样的扰动, 间接法中存在超声波多路径传播效应, 会高估不完全饱和砂的波速。由于试验过程中, 很难确保砂质沉积物完全饱和, 下文基于直接法测量结果

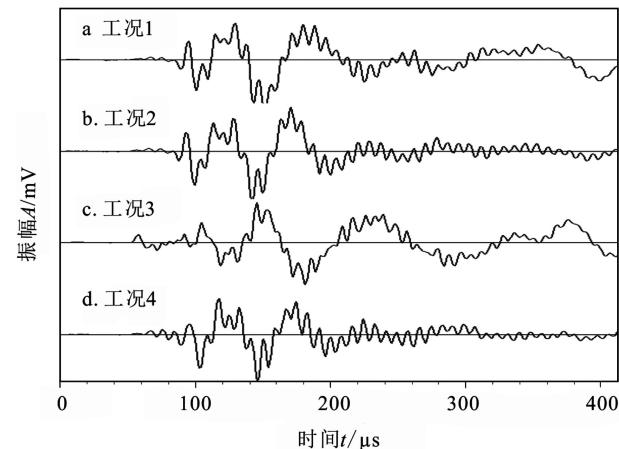


图3 不同工况下的间接法超声测试波形图

Fig.3 Waveforms of indirect ultrasonic testing under different working conditions

表3 不同工况下的间接法超声测试走时

Table 3 Travel time of indirect ultrasonic test under different working conditions

工况	类型	试样筒直径 $D/\text{mm}$	理论径向声速 $V_d/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	理论环向声速 $V_c/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	理论径向声时 $T_d/\mu\text{s}$	理论环向声时 $T_c/\mu\text{s}$	实际声时 $T/\mu\text{s}$
1	空试样筒	80	340	2730	235.3	46.0	54
2	试样筒+干砂	80	247 <sup>[27]</sup>	2730	323.8	46.0	54
3	试样筒+水	80	1500	2730	53.3	46.0	53
4	试样筒+饱和砂	80	1592 <sup>[27]</sup>	2730	50.3	46.0	54

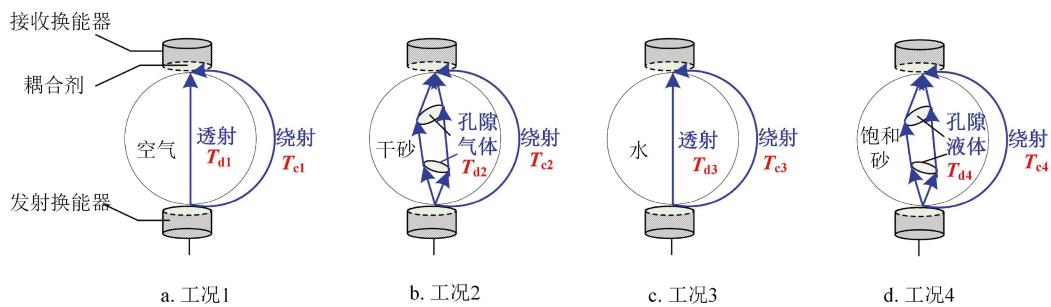


图 4 不同工况下的间接法超声测试传播路径及走时

Fig.4 Propagation path and travel time of indirect ultrasonic testing under different working conditions

展开讨论。

### 3.2 砂质沉积物声速影响因素分析

沉积物声速  $V_p$ 、声阻抗  $Z$ (声速与密度的乘积)是重要的海底地声参数,与沉积物的物理性质有密切的联系。表 4 给出了基于本文直接法试验结果得到的砂质沉积物声速声阻抗与物理参数的回归公式。砂质沉积物的压缩波速与密度、孔隙度、含水量相关性较大,相关系数分别达到了 0.87、0.86、0.84,与中值粒径的相关系数为 0.44,表明砂质沉积物的物质组成与声速没有明显的规律。砂质沉积物的声阻抗与密度、孔隙度、含水量的相关系数分别达到了 0.91、0.90、0.88,比声速相关性更高,这和侯正瑜<sup>[28]</sup>的研究结果一致。声阻抗是密度与声速的乘积,而密度与孔隙度、含水量有很高相关性,因而声阻抗与物理参数的相关性更高。

如图 5 所示,砂质沉积物压缩波速随密度的增大而增大,与 Hamilton<sup>[29]</sup>的研究一致。密度是指沉积物在天然状态下单位体积内的质量,可以综合反映沉积物的组成和结构特征<sup>[30]</sup>,与孔隙比、含水率

表 4 砂质沉积物声学与物理参数的经验公式  
Table 4 Empirical formula of acoustic and physical parameters of sandy sediment

物理力学参数	经验公式	$R^2$
密度 $\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$V_p = 3729.2\rho^2 - 13933\rho + 13415$	0.87
	$Z = 8975.6\rho^2 - 33447\rho + 31922$	0.91
孔隙度 $n / \%$	$V_p = 1.1174n^2 - 106.37n + 2934.1$	0.86
	$Z = 2.6851n^2 - 257.23n + 6926.9$	0.90
含水量 $\omega / \%$	$V_p = 1.6054\omega^2 - 96.921\omega + 1876.5$	0.84
	$Z = 3.8943\omega^2 - 236.37\omega + 4382.9$	0.88
中值粒径 $d_{50}/\text{mm}$	$V_p = 1479.3d_{50}^2 - 1652.2d_{50} + 894.35$	0.44
	$Z = 3453.1d_{50}^2 - 3821.8d_{50} + 1921.6$	0.42

密切相关,沉积物密度越大,颗粒结构越紧密,声波穿透固体颗粒传播,走时越短,声速越大。由图 6 可知,砂质沉积物压缩波速随孔隙度的增大而减小,这一趋势与前人<sup>[5, 8, 29]</sup>研究结果一致。孔隙度越

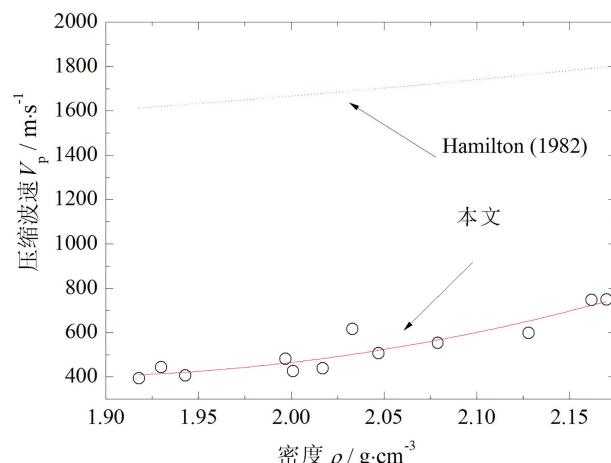


图 5 密度对砂质沉积物压缩波速的影响

Fig.5 The effect of density on the compression wave velocity of sandy sediments

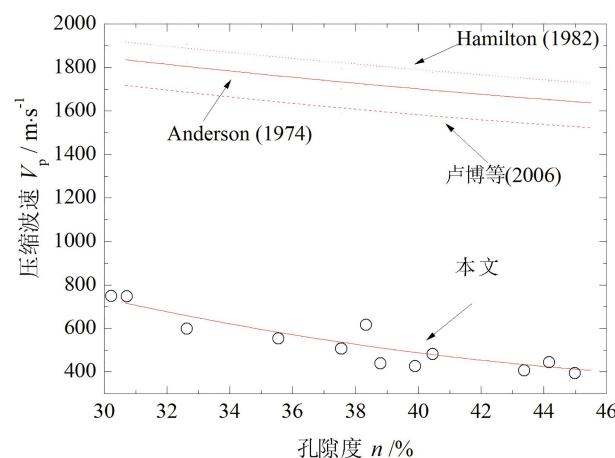


图 6 孔隙度对砂质沉积物压缩波速的影响

Fig.6 The effect of porosity on the compression wave velocity of sandy sediments

小,沉积物越密实,颗粒之间有效接触越多,压缩波速越大。由图7可知,压缩波速随含水量的增大而降低,与卢博等<sup>[8]</sup>一致。当沉积物含水率增大,被水填充的孔隙就会增多,孔隙度相应增大,导致压缩波速减小。

此外,由图5、6、7可以看出,本文砂质沉积物压缩波速比其他学者研究结果偏低,一方面是因为其他学者研究对象多为某某海域的混合沉积物,成分更加复杂且沉积物内部胶结作用等的影响使沉积物声速增大。另一个主要原因是饱和度,饱和度对沉积物声速影响较大,尤其是当它从0.99增大到1时<sup>[27,31-32]</sup>。图8展示了砂质沉积物饱和度与声速的关系,当砂质沉积物饱和度从0.971增至0.994时,压缩波速从438 m/s增大到748 m/s,这个趋势与Kumar和Madhusudhan<sup>[27]</sup>所揭示的趋势一致。由于

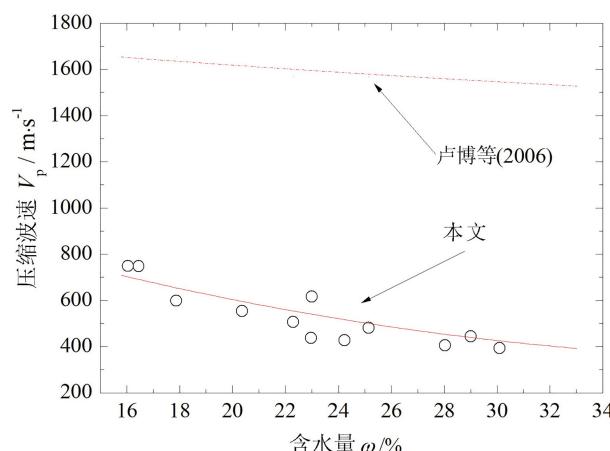


图7 含水量对砂质沉积物压缩波速的影响  
Fig.7 The effect of water content on compressional wave velocity of sandy sediments

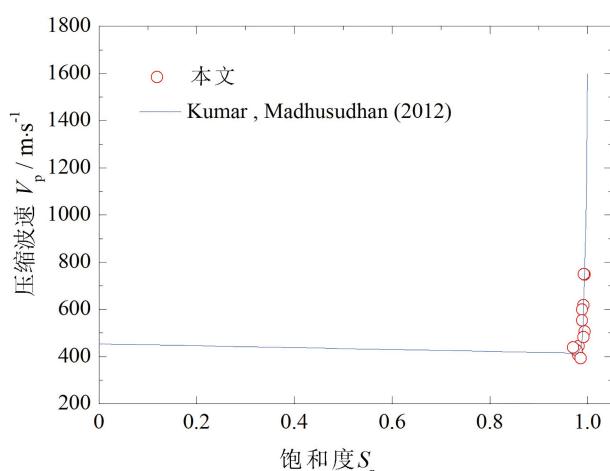


图8 压缩波速与饱和度的关系  
Fig.8 Relationship between compression wave speed and saturation

本文测试的试样未达到完全饱和,所以其声速未达到1600 m·s⁻¹。可见,沉积物的饱和度是声速测试中必须要考虑的因素。

天然海底沉积物并非都是完全饱和的,这在Mory<sup>[33]</sup>和朱祖扬<sup>[34]</sup>的研究中已得到证实,贾永刚等<sup>[35]</sup>和徐东升等<sup>[36]</sup>的黄河三角洲现场测试结果也显示海床并非完全饱和,测试得出饱和度分别为0.86~1、0.89~0.98。对于饱和土的界定,工程中认为饱和度超过0.8即为饱和土,而《土工试验方法标准》中饱和判定标准为饱和度大于0.95<sup>[24]</sup>,本文试样饱和度均大于0.95,因而认定为饱和砂土。具体来看,本文直接法试样饱和度为0.971~0.994,间接法中有些试样饱和度为1,有些小于1。**表2**中,计算饱和度略微超过1,则取为1,计算值未超过1,则取为真值。由于饱和度是由试样密度、含水量、土粒比重3个实测指标计算而来,即便试样的真实饱和度为1,计算出的饱和度仍可能略微超过1或略小于1,所以,实测饱和度接近1,在一定区间范围内的样品(如《土工试验方法标准》饱和判定标准为饱和度大于0.95)可认为是饱和试样。完全饱和样品很难制备,Emerson等<sup>[31]</sup>和黄博等<sup>[37]</sup>研究均表明即使按照严格饱和步骤制备,也很难使试样达到完全饱和。已有海底沉积物声学测试中鲜有提及饱和度,一般默认试样为完全饱和。本文的测试结果及分析表明,饱和度对海底沉积物压缩波速的测试结果有显著影响,需要引起足够的重视。

#### 4 结论

本文采用超声探测仪和自制的试样制备与测试装置,以粒径级配和密实状态为主控因素,制备不同物理状态的砂质沉积物试样,同步开展压缩波速和物理参数测试,探讨砂质海底沉积物声速测量方法及声速与物理参数之间的关系,得出以下结论:

(1)直接法由换能器直接接触试样,测量结果准确,但测试过程中应尽量避免对试样的扰动。间接法可提高试样饱和度,但非完全饱和砂,需要特别注意超声波的多路径传播可能造成测量结果偏大。

(2)砂质沉积物的压缩波速与密度、孔隙度、含水量的相关性较好,相关系数分别达到了0.87、0.86、0.84,与中值粒径相关系数小于0.6,相关性较差。与声速相比,声阻抗与密度、孔隙度、含水量相关性更高。

(3)砂质沉积物压缩波速随密度的增大而增大,随孔隙度、含水率增大而减小。砂质沉积物声

速受饱和度影响显著, 砂质沉积物饱和度从 0.971 增至 0.994 时压缩波速从  $393.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  快速增大到  $748.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 砂质沉积物声速测试时需特别注意饱和度的影响。

## 参考文献 (References)

- [1] Kim G Y, Richardson M D, Bibee D L, et al. Sediment types determination using acoustic techniques in the Northeastern Gulf of Mexico [J]. *Geosciences Journal*, 2004, 8(1): 95-103.
- [2] 金翔龙. 海洋地球物理研究与海底探测声学技术的发展[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(4): 1243-1249. [JIN Xianglong. The development of research in marine geophysics and acoustic technology for submarine exploration [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(4): 1243-1249.]
- [3] Hamilton E L. Low sound velocities in high-porosity sediments [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, 28(1): 16.
- [4] Hamilton E L. Sound velocity and related properties of marine sediments [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1982, 72(6): 1891.
- [5] Anderson R S. Statistical correlation of physical properties and sound velocity in sediments [M]//Hampton L. Physics of Sound in Marine Sediments. Boston, MA: Springer, 1974: 481-518.
- [6] Richardson M D, Muzy E, Troiano L. Shear wave velocity in surficial marine sediments: A comparison of *in situ* and laboratory measurements [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1988, 83(1): S78.
- [7] Bae S H, Kim D C, Lee G S, et al. Physical and acoustic properties of inner shelf sediments in the South Sea, Korea [J]. *Quaternary International*, 2014, 344: 125-142.
- [8] Endler M, Endler R, Bobertz B, et al. Linkage between acoustic parameters and seabed sediment properties in the south-western Baltic Sea [J]. *Geo-Marine Letters*, 2015, 35(2): 145-160.
- [9] Kim S R, Lee G S, Kim D C, et al. Physical properties and geoacoustic provinces of surficial sediments in the southwestern part of the Ulleung Basin in the East Sea [J]. *Quaternary International*, 2017, 459: 35-44.
- [10] Hou Z Y, Wang J Q, Chen Z, et al. Sound velocity predictive model based on physical properties [J]. *Earth and Space Science*, 2019, 6(8): 1561-1568.
- [11] Lu B, Li G X, Huang S J, et al. Physical properties of sediments on the northern continental shelf of the South China Sea [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2006, 24(1): 47-60.
- [12] Hou Z Y, Guo C S, Wang J Q, et al. Seafloor sediment study from south China sea: Acoustic & physical property relationship [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(9): 11570-11585.
- [13] Liu B H, Han T C, Kan G M, et al. Correlations between the *in situ* acoustic properties and geotechnical parameters of sediments in the Yellow Sea, China [J]. *Journal of Asian earth Sciences*, 2013, 77: 83-90.
- [14] 邹大鹏, 阙光明, 龙建军. 海底浅表层沉积物原位声学测量方法探讨 [J]. *海洋学报*, 2014, 36(11): 111-119. [ZOU Dapeng, KAN Guangming, LONG Jianjun. Methods of *in-situ* acoustic measurement of seafloor surface sediment [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(11): 111-119.]
- [15] 阙光明, 邹大鹏, 孙蕾, 等. 浅海沉积声学原位探测系统研制及深海功能拓展 [J]. *海洋测绘*, 2014, 34(5): 79-82. [KAN Guangming, ZOU Dapeng, SUN Lei, et al. Development of sediment acoustic *in situ* measurement system for shallow water and its functioned expansional for deep sea [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2014, 34(5): 79-82.]
- [16] 段晓勇, 印萍, 刘金庆, 等. 中国东部近海现代沉积环境 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(2): 17-23. [DUAN Xiaoyong, YIN Ping, LIU Jingqing, et al. Modern sedimentation environments in the coastal zone of East China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(2): 17-23.]
- [17] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, 28(2): 168.
- [18] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, 28(2): 179.
- [19] Stoll R D. Marine sediment acoustics [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1985, 77(5): 1789-1799.
- [20] Zou D P, Kan G M, Long J J, et al. Influence of hydrostatic pressure on the sound speed of surficial seafloor sediments [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2018, 37(3): 277-281.
- [21] Sessarego J P, Ivakin A N, Ferrand D. Frequency dependence of phase speed, group speed, and attenuation in water-saturated sand: Laboratory experiments [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2009, 33(4): 359-366.
- [22] 天津大学. 一种海底沉积物超声测量装置及其超声测量方法: 中国, 201811088311.2[P]. 2019-01-18. [Tianjin University. Seafloor sediment ultrasonic-measurement device and ultrasonic measurement method thereof: CN, 201811088311.2[P]. 2019-01-18.]
- [23] Richardson M D, Briggs K B. In situ and laboratory geoacoustic measurements in soft mud and hard-packed sand sediments: Implications for high-frequency acoustic propagation and scattering [J]. *Geo-Marine Letters*, 1996, 16(3): 196-203.
- [24] 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部. GB 50123-1999 土工试验方法标准[2007版][S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. [State Bureau of Quality and Technical Supervision, Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50123-1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.]
- [25] 朱俊高, 李翔, 徐佳成, 等. 粗粒土浸水饱和时间试验研究 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2016, 35(1): 85-89, 183. [ZHU Jungao, LI Xiang, XU Jiacheng, et al. Experimental study of saturation time of coarse-grained soil [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Sciences*, 2016, 35(1): 85-89, 183.]
- [26] 冯若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999. [FENG Ruo. Ultrasonics Handbook[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1999.]
- [27] Kumar J, Madhusudhan B N. Dynamic properties of sand from dry to fully saturated states [J]. *Géotechnique*, 2012, 62(1): 45-54.

- [28] Hou Z Y, Chen Z, Wang J Q, et al. Acoustic impedance properties of seafloor sediments off the coast of Southeastern Hainan, South China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 154: 1-7.
- [29] Hamilton E L. Sound velocity as a function of depth in marine sediments [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1985, 78(4): 1348.
- [30] 侯正瑜. 南海南部海底沉积物声学性质及物理参数相关关系研究 [D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2016. [HOU Zhengyu. The correlation of seafloor sediment acoustic properties and physical parameters in the southern south China sea[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2016.]
- [31] Emerson M, Foray P. Laboratory P-wave measurements in dry and saturated sand [J]. *Acta Geotechnica*, 2006, 1(3): 167-177.
- [32] Tsukamoto Y, Ishihara K, Nakazawa H, et al. Resistance of partly saturated sand to liquefaction with reference to longitudinal and shear wave velocities [J]. *Soils and Foundations*, 2002, 42(6): 93-104.
- [33] Mory M, Michallet H, Bonjean D, et al. A field study of momentary liquefaction caused by waves around a coastal structure [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2007, 133(1): 28-38.
- [34] 朱祖扬, 王东, 周建平, 等. 基于非饱和Biot-Stoll模型的海底沉积物介质声频散特性研究 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55(1): 180-188. [ZHU Zuyang, WANG Dong, ZHOU Jianping, et al. Acoustic wave dispersion and attenuation in marine sediment based on partially gas-saturated Biot-Stoll model [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(1): 180-188.]
- [35] 贾永刚, 董好刚, 单红仙, 等. 黄河三角洲粉质土硬壳层特征及成因研究 [J]. *岩土力学*, 2007, 28(10): 2029-2035. [JIA Yonggang, DONG Haogang, SHAN Hongxian, et al. Study of characters and formation mechanism of hard crust on tidal flat of Yellow River estuary [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(10): 2029-2035.]
- [36] 徐东升, 汪稔, 孟庆山, 等. 黄河三角洲粉土原位力学性能试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(2): 409-416. [XU Dongsheng, WANG Ren, MENG Qingshan, et al. Experimental research on in-situ mechanical properties of silt in Yellow River delta [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2): 409-416.]
- [37] 黄博, 汪清静, 凌道盛, 等. 饱和砂土三轴试验中反压设置与抗剪强度的研究 [J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(7): 1313-1319. [HUANG Bo, WANG Qingjing, LING Daosheng, et al. Effects of back pressure on shear strength of saturated sand in triaxial tests [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(7): 1313-1319.]