

# 应力- 应变过程中海底沉积物微结构 变化对其声速的影响

李赶先<sup>1</sup>, 卢 博<sup>1</sup>, 黄韶健<sup>1</sup>, 刘叔灼<sup>2</sup>

(1. 中国科学院南海海洋研究所边缘海地质和古环境开放实验室, 广东 广州 510301; 2. 华南理工大学 建工系, 广东 广州 510641)

**摘要:** 阐述了对海底沉积物样品在应力- 应变过程中进行同步声学测量的实验工具及方法, 分析了来自南海 45 个站位的海底沉积物样品的实验数据资料, 结果表明, 沉积物颗粒越粗、孔隙越小、无侧限抗压强度越大, 声速越高. 沉积物样品在受力应变过程中, 声速具有明显的随应力而变化的特征. 进一步探讨了不同应变阶段沉积物的声学特征以及应力所导致沉积物微结构变化对其声速的影响过程, 这一研究将在石油地质测井和海底工程基底稳定性评价等方面具有重要应用意义.

**关键词:** 海底沉积物; 应力- 应变; 微结构特征; 声速; 抗压强度

中图分类号: P736. 21

文献标识码: A

文章编号: 0253- 4193(2002)00- 0075- 06

## 1 引言

海底沉积物声速是海底声学、海底工程学以及海洋石油地质和海洋声场研究等领域所需的重要基础参数. 前人为提出准确预估海底声速的方法, 进行了不断的实验研究, 得出了相当有益的结果<sup>[1~ 5]</sup>. 近年来, 越来越多的学者注意到, 除影响海底沉积物声速的重要因子——孔隙度之外, 尚有一些其他因素存在, 诸如沉积物孔隙形状和结构特征、沉积物颗粒接触的力学耦合状态及无侧限抗压强度等<sup>[6~ 7]</sup>. 为进一步研究沉积物微结构特征与其声速变化的关系, 我们进行了应力- 应变过程中海底沉积物同步声学测量试验, 以探讨应力作用下不同应变阶段沉积物内部微结构变化对其声速的影响过程.

## 2 样品采集和实验方法

本文所用的受控应力- 应变过程是在不加围压、不排水状态下无侧限压缩实验, 附加的声

收稿日期: 2000- 09- 28; 修订日期: 2001- 06- 15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49676286); 中国科学院南海海洋研究所边缘海地质和古环境开放实验室资助项目.

作者简介: 李赶先(1963-), 男, 山东省昌邑县人, 工程师, 硕士, 从事海洋沉积声学研究.

学换能器在受压的沉积物两端, 附以声波仪和计算机组成应力- 应变/ 声速测量系统. 计算机用于数据处理和频谱分析.

海底沉积物样品有 22 个采自南海大陆架和 23 个采自南海大陆坡. 沉积物类型包括粉砂质黏土、黏土质粉砂、粉砂质砂和砂质粉砂等类型.

柱状样品自海上取回实验室, 须保持垂直并密封, 以防样品扰动和水分蒸发流失. 样品经切割后, 取其中中心部分做本项实验, 其余部分用作粒度、含水量和湿密度等项参数的分析测量. 样品处理和测量按国家标准《土工实验方法标准 GBJ 138- 88》要求进行. 试样直径为 3. 8 cm, 高度与直径之比为 2. 0~ 2. 5. 每个样品的测量在 10 min 之内完成, 计算出应力- 应变过程中各次数据测量的沉积物声速( 声波仪测量精度小于或等于  $\pm 0. 5\%$  ), 并绘出应力- 应变过程中的声速曲线和应力- 应变曲线, 按国家标准给定的方法计算出试样的无侧限抗压强度.

### 3 数据和结果

表 1 列出了南海海底 3 种典型沉积物的各种物理力学和声学参数平均值, 沉积物类型包括粉砂质黏土、黏土质粉砂和粉砂质砂. 这 3 种沉积物类型是分布在南海海底最广的沉积物, 所测样品数量也基本上能代表各类沉积物的基本情况( 样品数: 粉砂质黏土 15 个、黏土质粉砂 11 个、粉砂质砂 10 个).

表 1 南海海底沉积物声学和物理力学参数平均值

参 数	中值粒径 $\Phi$	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$d_s$	$\omega(\%)$	$W_l(\%)$	$W_p(\%)$	$I_l$	$I_p$	$n(\%)$	$q_u/kPa$	$C_p/m \cdot s^{-1}$
粉砂质黏土	8. 24	1. 33	2. 59	152. 2	90. 9	48. 6	3. 34	42. 2	79. 9	3. 47	1355
黏土质粉砂	7. 12	1. 43	2. 62	127. 5	61. 1	35. 9	3. 74	25. 3	74. 3	4. 15	1364
粉砂质砂	3. 60	1. 58	2. 66	52. 3	33. 7	21. 5	2. 98	12. 2	58. 4	12. 18	1446

$\rho$  为湿密度,  $d_s$  为颗粒比重,  $\omega$  为含水量,  $W_l$  为液限,  $W_p$  为塑限,  $I_l$  为液性指数,  $I_p$  为塑性指数,  $n$  为孔隙度,  $q_u$  为无侧限抗压强度,  $C_p$  为纵波速.

从表中可以看出一些非常明显的规律性, 自粉砂质黏土到黏土质粉砂, 再到粉砂质砂随着沉积物颗粒中值粒径的逐渐变大( 按国际统一分级标准  $\Phi = -\log_2 d$ ,  $d$  以 mm 为单位, 所以  $\Phi$  值越小, 颗粒越大), 沉积物密度增大, 孔隙减少和变小, 含水量降低, 无侧限抗压强度增高, 声速变大, 这与相关文献中数据分析结果是一致的<sup>[7]</sup>. 由此可见, 除孔隙度外, 尚有其他物理力学因素与海洋沉积物声速存在相关变化, 而这些因素均直接或间接地受沉积物微结构特征的影响.

为了更好地分析和研究沉积物声速随其微结构变化的规律, 我们对各种类型的沉积物样品做了应力- 应变过程中同步声速测量, 结果表明不论哪种海底沉积物, 其声速均存在随应力- 应变过程而变化的规律, 声速值一般在 1 300~ 1 500 m/s 之间, 而声速变化幅度一般在 20 m/s 以上, 显然这不是由仪器测量精度不够所引起. 实验测量的典型结果见图 1, 2, 3, 它们分别为粉砂质黏土、黏土质粉砂和粉砂质砂 3 种类型的沉积物应力- 应变/ 声速测量曲线叠加效果图. 从这些图可以看出 3 种类型的沉积物的应力- 应变/ 声速曲线具有大体一致的变化规律. 在整个应变过程中, 各种沉积物类型均经过了应力和声速自小变大再变小的过程. 大

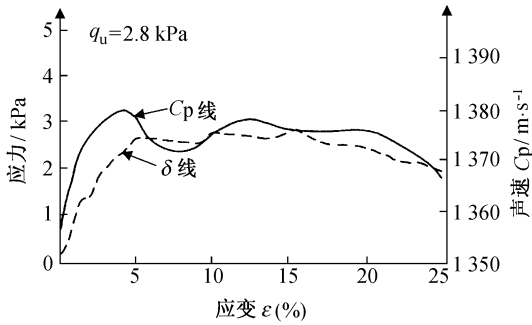


图1 粉砂质黏土样品应力-应变/声速测量曲线

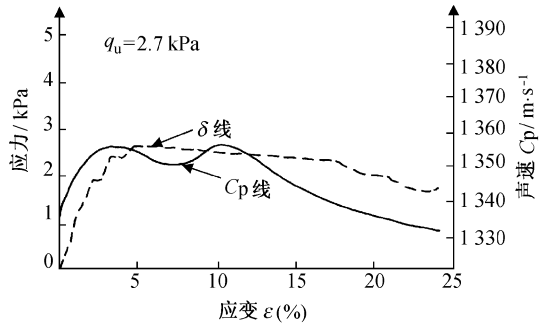


图2 黏土质粉砂样品应力-应变/声速测量曲线

约在应变的3%以内声速随应力的加大而迅速升高,在应变的3%~10%之间,各种类型沉积物的应力和声速均发生不同程度的波动。应力具有较明显的变大后趋向变小的过程,而声速则呈现出上升到高位后波动下降再转为上升,表现出比较复杂的变化情况。在应变的10%~20%之间,3种类型沉积物的声速均随应变加大和应力减小而不断降低,这是沉积物受到应力作用产生破碎后的情况。这种基本一致的规律性变化反应出应力-应变过程中沉积物微结构的变化与声速的变化是密切相关的。

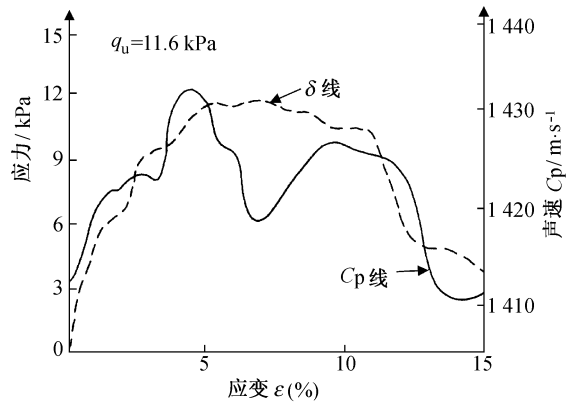


图3 粉砂质砂样品应力-应变/声速测量曲线

## 4 沉积物微结构变化对其声速的影响分析

### 4.1 应力是影响沉积物声速的重要因子

由于自然状态的海底沉积物并不是Wyllie模型所假设的沉积物固体颗粒间非接触和胶结的悬浮于流体介质中,而是颗粒间存在着不同的堆垒方式和力学耦合状态<sup>[7]</sup>。对于相同孔隙度的沉积物,由于它们的颗粒形状和颗粒堆垒方式的不同,各种原生和次生结构面如微层理、微裂隙和孔隙长轴统计优势取向的不同,会造成声速很不相同。近年来,随着显微技术在研究沉积物物理性质方面的逐渐展开和深入应用,使认识沉积物微结构特征成为可能。Toksoz引用孔隙形状谱的概念,朱正亚引入孔隙结构因子 $K$ ,而梁元博等则用沉积物抗压强度 $q_u$ 代表沉积物微观孔隙结构、颗粒堆垒方式和力学耦合状态等对声速影响的综合因子。这些研究说明沉积物微结构特征是影响声速的重要因素,如果颗粒间存在胶结,则微结构特征对声速的影响更加显著<sup>[8]</sup>。本文的实验研究表明在应力作用下,在不同应变阶段,同一沉积物内部微结构状态不同,会导致其声速的相应变化。

为了探讨海底沉积物应力与声速的相关性,我们对部分实验样品应力与声速的相应变化作了相关回归分析,分析表明,海底沉积物声速与应力是相关变化的。就上述3种典型沉积物

样品而言, 相关回归分析结果如下:

对粉砂质黏土, 应力与声速相关系数较低, 未形成回归方程,

对黏土质粉砂,  $C_p = 1\,528.67 + 1.048\,6\delta$  ( $R = 0.800\,5$   $F = 39.251\,6$ ),

对粉砂质砂,  $C_p = 1\,409.38 + 1.626\,5\delta$  ( $R = 0.708\,0$   $F = 17.085\,4$ ),

式中,  $C_p$  为纵波声速;  $\delta$  为应力;  $R$  为相关系数;  $F$  为标准离差。

从这3种典型沉积物样品的应力-声速回归分析可以看出, 对于声速平均值最低的粉砂质黏土, 应力与声速相关性较低, 而得不出相关回归方程。对于声速相对较高的粉砂质砂和黏土质粉砂样品, 应力与声速之间呈显著相关, 并且未加应力之前的初始声速越高, 应力与声速的相关性越好。这说明声速越高, 表示沉积物颗粒之间接触越紧密, 颗粒接触角度好, 以至颗粒接触面较大, 应力加大, 尤其易对颗粒更加紧密的接触产生影响, 致使应力与声速相关度高。

#### 4.2 应力作用下沉积物微结构变化对其声速的影响分析

由于海水的体积模量远大于沉积物颗粒, 沉积物声波速度强烈取决于声线上孔隙水的多少, 即取决于声线上孔隙比的大小, 但沉积物颗粒间接触方式直接决定着声传播路径上孔隙比的大小。显然声线上颗粒接触越紧密, 声速越快。对理论和实验分析均指出, 颗粒间内磨擦角的大小直接决定着颗粒间紧密与否。设  $S$  为沉积物抗剪强度,  $\bar{C}$  为颗粒间的胶结作用和吸引作用,  $\delta$  为破裂面上的法向有效应力,  $\varphi$  为颗粒间有效内磨擦角, 从表示海底沉积物抗剪强度的摩尔-库伦关系式:

$$S = \bar{C} + \delta \tan \varphi.$$

可以看出, 对一定沉积物而言, 所受应力越大, 其颗粒间结构调整会使颗粒发生位置旋转, 使内磨擦角变大, 颗粒间接触面变大, 颗粒紧密, 孔隙减少和变小, 相应声线上孔隙比减小, 声速增大。由此可见, 沉积物所受的应力通过改变颗粒间的内磨擦角而直接影响声速的变化。

我们对实验样品进行了加载应力前后的2000倍电子显微镜观察扫描(图4, 5), 发现在相同倍数电子显微镜观察下, 同一样品的内部颗粒结构在应力加载前后发生了显著变化。应力加载后, 在应变的3%以内, 颗粒紧密, 孔隙减少和变小, 小颗粒充填进大颗粒孔隙之中, 颗粒间接触关系由点边式转变为边面式。在应变的3%~10%之间, 沉积物内部局部压缩以及局部裂隙混杂造成声速波动复杂, 而应力经过最大值和应变约大于10%以后, 声速随沉积物破裂, 应力下降而减小。

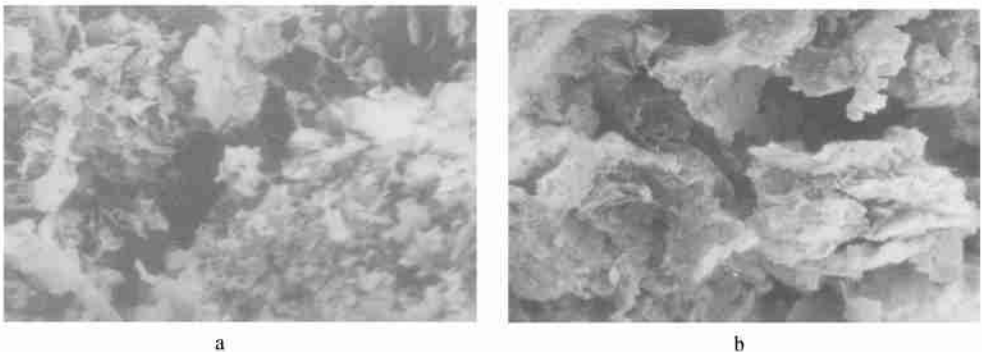


图4 加载前海底沉积物微结构电子显微照片( $\times 2\,000$ )

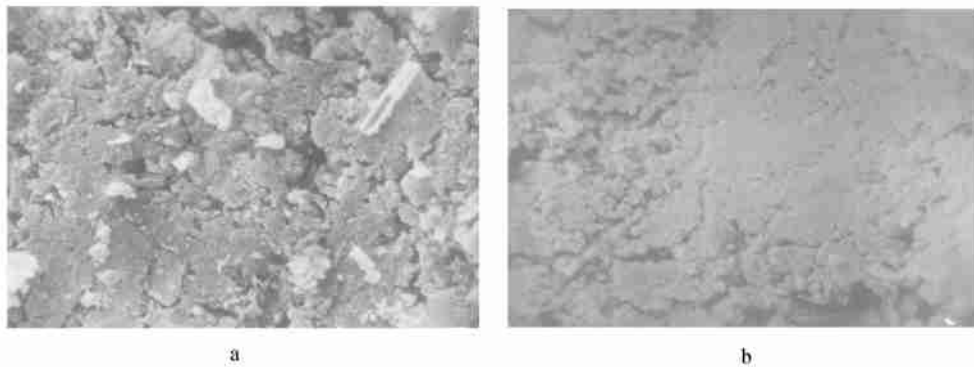


图5 加载后海底沉积物微结构电子显微照片( $\times 2000$ )

## 5 小结

从本文理论分析可以清楚看出,海底沉积物微结构特征是影响其声速的重要因素,通过各种典型的海底沉积物样品的应力-应变/声速同步测量实验,证明沉积物所受应力通过改变颗粒接触关系和力学耦合状态而影响其声速。同一海底沉积物因处在不同的应力状态和应变阶段而具有不同的声速,这一研究具有重要理论和实践意义。事实上,包括海底在内的地壳表层,无处不有地应力,个别地区地应力强烈积聚可以形成地层倾斜、褶皱甚至断裂,相应于地应力作用下沉积物微结构的变化,其声速也发生变化。特别当海底沉积物作为工程载体的基底,如石油平台和管道铺设等,其所受的应力作用就更加强烈,相应发生微结构和声速变化。在此情况下,声速作为海底工程设计所依据的重要参数在考虑时就应更加慎重。由此可见,在今后的研究中有必要采集更多的样品,进行更深入研究,以便发展一套用声学方法遥测海底工程基底应力-应变状态阶段的有效方法,为海底工程建设和稳定性评价服务。

### 参考文献:

- [1] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid[J]. J Acoust Soc Am, 1956, (28): 179-191.
- [2] WYLLIE M R J, et al. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media[J]. Geophysics, 1956, 21(1-4): 41-70.
- [3] ZHOU Zhi-yu, MENG He-sheng. Acoustic estimations of porosity and thickness for thin soft surface layer of sea floor[J]. Marine Geology, 1988, (7): 211-219.
- [4] ANDERSON R S. Statistical correlation of physical properties and sound velocity in sediments[A]. Hampton L, ed. Physics of Sound in Marine Sediments[M]. New York: Plenum Press, 1974. 481-518.
- [5] HAMILTON E L, BUCHMAN R T. Sound velocity and related properties of marine sediments[J]. J Acoust Soc Am, 1982, (72): 1 891-1 904.
- [6] LIANG Yuan-bo, LU Bo. On the effect of physico-geotechnical characteristics upon sound velocities of sea floor sediments [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1984, 9(3): 313-320.
- [7] 梁元博, 卢博. 海底沉积物力学性质影响声速的物理机制[J]. 海洋学报, 1985, 7(1): 111-117.
- [8] 卢博, 李赶先, 黄韶健. 南海海底钙质土声学物理性质及其工程地质意义[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(6): 518-522.

## The influence of microstructure changing of seafloor sediments on its sound velocity in the stress– strain course

LI Gan-xian<sup>1</sup>, LU Bo<sup>1</sup>, HUANG Sha-jian<sup>1</sup>, LIU Shu-zhuo<sup>2</sup>

(1. *Open Laboratory of Marginal Sea Geology and Paleoenvironment, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China*; 2. *Department of Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China*)

**Abstract** Test tools and method of synchronizing acoustic measure at the stress – strain course for sea floor sediments are expatiated on, and the test data of 45 sediment samples which sampled from sea floor in South China Sea are analysed. The result shows that the more sediment grain course, the more porosity small, and the bigger unconfined compression strength, the more sound velocity high. In the stress– strain course, the sediment sound velocity has obvious variance as the stress changes. Acoustic characteristics of sediments in strain phases and the course of influence of sediment microstructure variance on its sound velocity are discussed. This study will have important significance for surveying well of petroleum geology and evaluating base stabilization of sea floor engineering.

**Key words:** sea floor sediments; stress– strain; microstructure feature; sound velocity; compression strength