

# 南海水合物黏土沉积物力学特性试验模拟研究<sup>1)</sup>

石要红<sup>\*†</sup> 张旭辉<sup>\*\*2)</sup> 鲁晓兵<sup>\*\*</sup> 王淑云<sup>\*\*</sup> 王爱兰<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>(中国海洋大学, 青岛 266100)

<sup>†</sup>(广州海洋地质调查局, 广州 510075)

<sup>\*\*</sup>(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要** 利用自行研制的含水合物沉积物合成、分解与力学性质测量一体化试验设备, 以南海水合物区域的海底粉质黏土作为骨架, 制备含水合物沉积物样品, 并对其进行了三轴压缩试验研究, 获得了水合物分解前后的应力应变曲线和抗剪强度特性. 结果表明: 在水合物饱和度 0%~45% 的范围内, 水合物沉积物的应力应变曲线均表现为弹性变形, 存在明显的应变硬化现象; 抗剪强度、内摩擦角和黏聚力随水合物饱和度的增加而增加. 相对而言, 内摩擦角随饱和度增加幅度较小, 其他参数在水合物饱和度超过 25% 时, 呈陡然增高趋势; 水合物分解后导致抗剪强度最大可降低为初始的 1/4, 不同初始饱和度条件下水合物完全分解后沉积物的抗剪强度基本相等, 并大于同等围压条件下初始不含水合物的沉积物抗剪强度.

**关键词** 水合物沉积物, 黏土, 应力应变曲线, 抗剪强度

中图分类号: TU411 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-14-424

## 引言

水合物是指在适当的高压和低温条件下, 由甲烷、丙烷、二氧化碳、硫化氢、四氢呋喃等和水形成的冰状化合物<sup>[1]</sup>. 含水合物沉积物则是指蕴含这种固态水合物的砂、黏土等土质的多相多组分的混合物. 自然界中水合物(甲烷水合物为主)广泛分布在陆地高纬度冻土带、陆坡海底和一些深水湖底, 是一种储量巨大的新型非常规能源<sup>[2-3]</sup>. 实现水合物的高效、安全、经济的开采是各国研究的目标.

含水合物沉积物在水合物分解前后和分解过程中的应力应变、抗剪强度等力学参数是水合物勘探与开发分析的基础数据. 因为原位试验成本高昂, 且现场条件难以控制, 针对含水合物沉积物力学性质的研究目前主要是在室内开展. 室内研究主要以常规土工三轴试验仪为基础平台, 添加合成水合物沉积物样品所需的高压和低温环境模块, 进行水合物沉积物合成及原位力学性质试验研究. 目前, 关于水合物沉积物力学性质研究的试验主要是针对砂土类

骨架<sup>[4-17]</sup>, 这是因为前期研究较多的加拿大马利克地区和美国的阿拉斯加地区的水合物地层主要是砂性土. 而我国南海含水合物的地区主要以粉质黏土沉积物为主, 因此开展这方面的研究非常必要.

Winters 等<sup>[5-6]</sup>对 Malik2L-38 钻井的含水合物土原状样和室内制备渥太华砂土样进行了三轴压缩试验. 结果表明: 与未含水合物的试样相比, 原状和重塑水合物沉积物样品的强度增大, 增大的比例取决于水合物的含量、分布等. Hyodo 等<sup>[7]</sup>利用水合物合成与力学性质测量三轴试验装置, 对含甲烷水合物的砂样进行了室内试验. 结果表明: 温度越低、有效围压越高和甲烷水合物的饱和度越大, 含甲烷水合物砂样的强度越高. Masui 等<sup>[8-9]</sup>在对日本南海海槽地区钻取的原状水合物岩芯样和室内合成含水合物砂样的三轴压缩试验结果表明: 含水合物土的抗剪强度随着水合物孔隙饱和度的增加而增加. Clayton 等<sup>[10]</sup>利用共振柱试验装置, 合成含甲烷水合物砂样并进行共振柱试验. 结果表明: 饱和砂样的体

2014-12-19 收稿, 2015-03-03 录用, 2015-03-10 网络版发表.

1) 国家自然科学基金(51239010, 41376078, 11102209)和中国地质调查局(GZH201100311)资助项目.

2) 张旭辉, 副研究员, 主要研究方向: 天然气水合物开采中的岩土力学问题研究. E-mail: zhangxuhui@imech.ac.cn

**引用格式:** 石要红, 张旭辉, 鲁晓兵, 王淑云, 王爱兰. 南海水合物黏土沉积物力学特性试验模拟研究. 力学学报, 2015, 47(3): 521-528  
Shi Yaohong, Zhang Xuhui, Lu Xiaobing, Wang Shuyun, Wang Ailan. Experimental study on the static mechanical properties of hydrate-bearing silty-clay in the South China Sea. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(3): 521-528

积模量和剪切模量的比值从 15~30, 当水合物充满 20% 骨架孔隙空间时, 其值降低到 2. 当水合物含量为 3%~5% 时, 砂样的阻尼达到峰值.

国内的张旭辉 [11-13]、魏厚振 [14]、宋永臣 [15]、程远方等 [16] 分别在各自改造研制的水合物沉积物合成与力学特性测量装置基础上, 针对甲烷、二氧化碳和四氢呋喃等不同水合物类型, 主要以砂土为骨架, 试验分析了含水合物土的力学参数, 基本结果是土骨架孔隙中充满水合物和水时, 含水合物土的应力应变多表现出前期弹性变形-后期脆性破坏的特征. 弹性常数和强度随着水合物饱和度和围压的增加而增加.

鉴于前人的研究主要集中在水合物砂土沉积物, 本文将针对南海含水合物黏土沉积物进行三轴试验模拟研究, 分析其水合物分解前后的宏微观力学特性, 以获得较高有效围压条件下水合物勘探与开采评价相关的基础力学参数, 包括水合物分解前后的沉积物的应力-应变关系曲线以及弹性模量、黏聚力和摩擦角等, 为我国南海水合物相关工程实践提供依据, 也为含相变土工材料力学性能的理论认识进行拓展.

### 1 试验装置与试验过程

试验在如图 1 所示的水合物合成与力学性质测量一体化试验装置上进行. 试验装置的技术参数如下: 油压系统可以提供 0~14 MPa 之间的围压, 低温控制系统可以提供 -20°C~20°C 之间的温度, 试验中采用控制应变速度的 (0.9 mm/min) 的方法.

考虑到黏土中甲烷水合物合成时间周期长、水合物饱和度及其分布均匀性很难控制, 而四氢呋喃



(b) 含水合物土合成与力学性质一体化装置实物图

(b) Photo of the system

图 1 含水合物土合成与力学性质一体化装置

Fig.1 Integrated syntheses system for hydrate formation and triaxial test

水合物与甲烷水合物具有相似的热、力学性质, 与水混合形成溶液后可直接与黏土充分混合并施加低温条件 (1 个大气压, 温度低于 4.4°C 即可形成水合物) 制备含水合物黏土试样 [18-20]. Yun 等 [17] 利用含四氢呋喃水合物的黏土进行了初步的试验探讨, 表明可以反映天然气水合物的基本特性. 因此, 本文的试验均采用四氢呋喃水合物黏土沉积物样品进行三轴试验研究.

试验用的粉质黏土从南海水合物取样地区的海底取回, 颗粒比重为 2.7, 粒径在 0.005~0.05 mm 区间内的颗粒占 80% 左右. 颗粒级配曲线如图 2 所示.

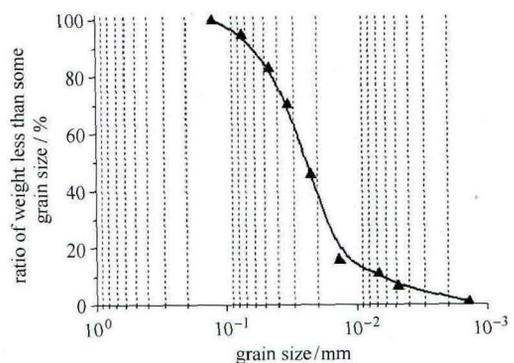
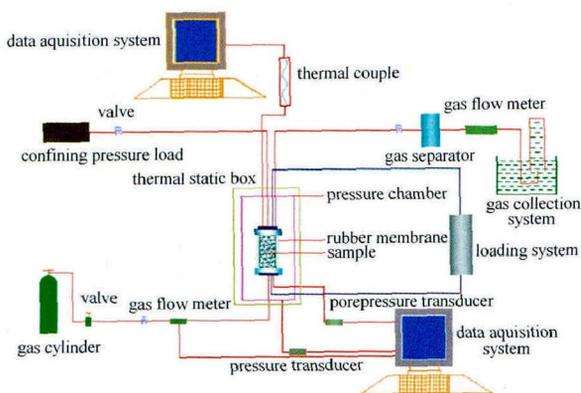


图 2 颗粒级配曲线

Fig.2 Grain distribution curve

室内制备样品的步骤如下: (1) 根据南海北部陆坡神狐区域取样岩心的干密度 ( $\rho_d = 1.3 \text{ g/cm}^3$ ), 通过试验得到制备该干密度样品的最优含水率 (30%); (2) 配制不同体积分数四氢呋喃的溶液, 将此溶液按照



(a) 含水合物土合成与力学性质一体化装置示意图

(a) Sketch of the system

最优含水率计算得到的液体量, 其中, 四氢呋喃试剂的量由四氢呋喃水合物饱和度的设计值确定 (在四氢呋喃水合物中, 四氢呋喃的质量分数为 19%), 进而确定溶液中水和四氢呋喃的质量或体积比例 (表 1)。然后与黏土沉积物混合 (混合过程中, 用塑料袋封闭以避免四氢呋喃的挥发), 制备直径  $\times$  高度为  $3.91\text{ cm} \times 8\text{ cm}$  的样品。为保证土样的均匀性, 分 4 层击实, 每层  $2\text{ cm}$ , 在层与层之间用细铁丝刮毛来衔接; (3) 将制备好的样品置于三轴的压力室内, 加围压, 控温系统制冷至  $2^\circ\text{C}$ , 2~3 天后合成完毕。

试样制备完成后开始进行三轴压缩试验。试验时首先调整围压至指定值, 然后按  $0.9\text{ mm/min}$  的轴向变形速度进行排水加载直至破坏。试验过程中记录应力、轴向应变和体变等数据。进行水合物分解后的试验时, 先在室温条件下 ( $20^\circ\text{C}$  左右) 放置 1 天, 使得水合物完全分解后再重复上述过程。

为考察不同水合物含量时的沉积物力学特性, 试验采用 6 组, 每组 4 个样品, 其中 3 个样品是用于水合物分解前的力学试验, 1 个样品用于水合物分解后的力学试验。根据南海水合物沉积物的饱和度, 试验控制的水合物饱和度分别为 0%, 5%, 15%, 25%, 35% 和 45%, 具体实验参数见表 1, 其中,  $S_h$ ,  $G_d$ ,  $\rho_d$ ,  $\phi$ ,  $w$  和  $m_h$  分别表示四氢呋喃水合物饱和度、土比重、干密度、孔隙度、含水量和四氢呋喃水合物质量。

表 1 实验参数表  
Table 1 Test parameters

$S_h/\%$	$G_d$	$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\phi$	$w/\text{mL}$	$m_h/\text{g}$
0	2.7	1.3	0.52	37.5	0
5	2.7	1.3	0.52	35.0	2.4
15	2.7	1.3	0.52	30.0	7.3
25	2.7	1.3	0.52	25.0	12.1
35	2.7	1.3	0.52	20.0	16.9
45	2.7	1.3	0.52	15.0	21.8

## 2 试验结果与讨论

每组试验的围压分别为  $2.5\text{ MPa}$ ,  $5\text{ MPa}$  和  $8\text{ MPa}$ , 这是考虑到现场相关工程中有效围压一般小于这个值。水合物分解后的应力应变曲线只取  $2.5\text{ MPa}$  围压下的数据用于对比, 其他围压下的结果基本类似。在试验中样品温度保持为  $2^\circ\text{C}$ , 使水合物在剪切过程中稳定存在而不分解。图 3~图 8 为试验获得的 6 组应力应变曲线。按照土力学的常规,

对于没有峰值的应力应变岩土材料, 取应变为 15% 时对应的偏差应力即最大主应力和最小主应力之差  $\sigma_1 - \sigma_3$  作为抗剪强度。

总体来看, 应力应变曲线主要具有如下特征 (图 3~图 8): (1) 随着水合物饱和度的增加, 水合物黏土沉积物的强度增加; 水合物分解后, 沉积物的强度降低, 降低程度随着合成的水合物饱和度的增加而增大。试验中强度最大降低为初始的 1/4 左右。水合物形成时, 与黏土颗粒发生胶结, 同时随着水合物饱和度的增加, 孔隙中水合物对沉积物结构的支撑作用越来越强。一旦水合物发生分解, 胶结和支撑作用均会消失, 使其强度降低。(2) 应力应变曲线呈现弹塑性变形及明显的应变强化特性。首先在小的应力范围内近似为弹性阶段; 然后在应变 6% 内有一个平台期, 即应力不变, 应变增加阶段; 接着发生应力快速上升及应变强化, 但是曲线应力没有峰值。这与水合物砂土沉积物的应力应变曲线有显著的区别。水合物砂土沉积物的应力应变曲线没有强化阶段, 水合物饱和度高时, 曲线有峰值。造成水合物黏土沉积物应变强化的原因是: 在初期加载时, 沉积物压密,

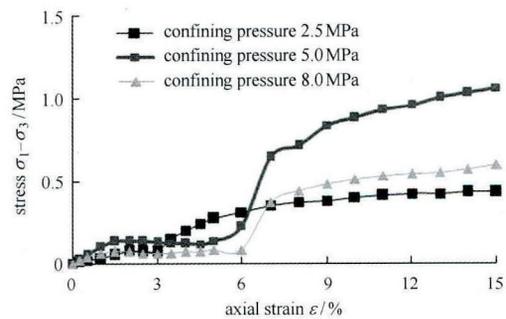


图 3 初始不含水合物沉积物的应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of samples initially without hydrate

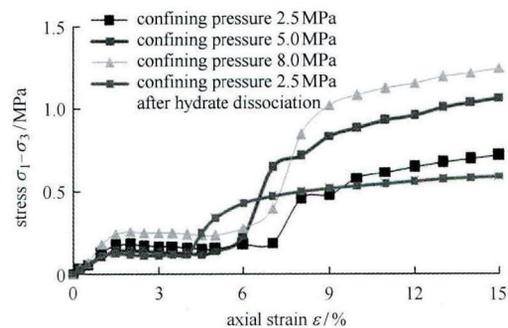


图 4 水合物饱和度 5% 的应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of samples with hydrate saturation 5%

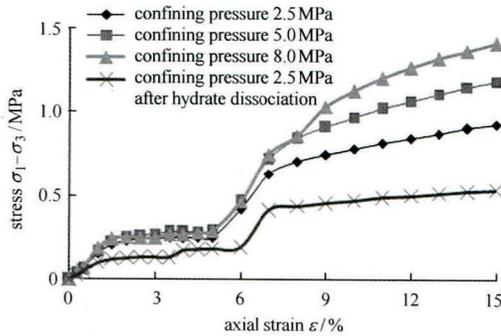


图 5 水合物饱和度 15% 的应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of samples with hydrate saturation 15%

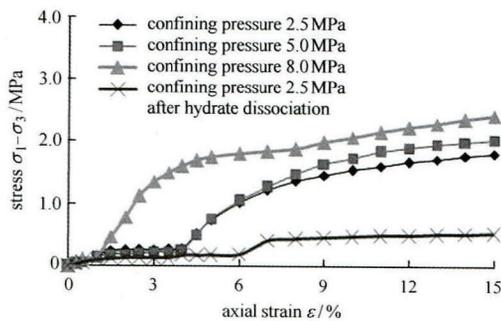


图 6 水合物饱和度 25% 的应力应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of samples with hydrate saturation 25%

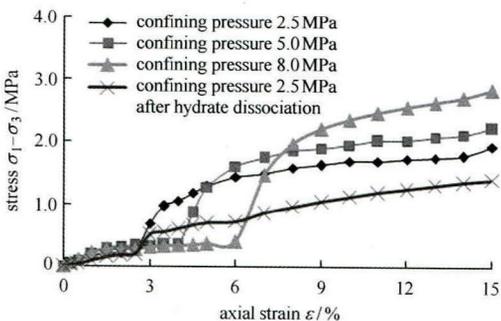


图 7 水合物饱和度 35% 的应力应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curve of samples with hydrate saturation 35%

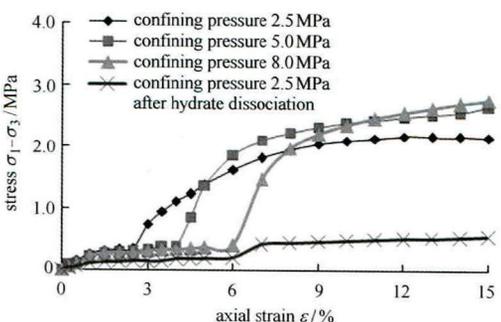


图 8 水合物饱和度 45% 的应力应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curve of samples with hydrate saturation 45%

在恒定孔隙流体压力下渗流固结, 这时应力和应变均较小, 孔隙压缩也小; 然后在平台期, 随着土体应变继续增大, 孔隙越来越小, 水合物在孔隙中的填充程度越来越大, 其支撑作用随着越来越强. 当水合物的填充程度超过一定值时, 其支撑效应变得显著, 发生应变强化. 注意到, 初始不含水合物的沉积物应力应变曲线和水合物分解后的并不相同, 这说明水合物在沉积物中的形成和分解扰动了沉积物原始结构.

弹性模量是一般作为材料刚度的量度. 这里采用强化阶段的割线模量来讨论, 因为起始模量较小且难以分辨. 总体上看, 不同饱和度和围压下的割线模量差异不大, 尤其是相同饱和度情况下. 可能在这种水合物合成方式下, 即使较小饱和度条件下, 水合物颗粒间及水合物与土颗粒之间容易发生胶结进而对刚度起主导作用, 故而饱和度和围压的影响可以忽略, 这与前人的结果相同<sup>[17]</sup>. 水合物分解以后沉积物弹性模量略有降低 (图 9). 初始不含水合物的沉积物的强度较大, 可能的原因是轴向加载前围压引起样品压缩固结, 增大了实际的模量.

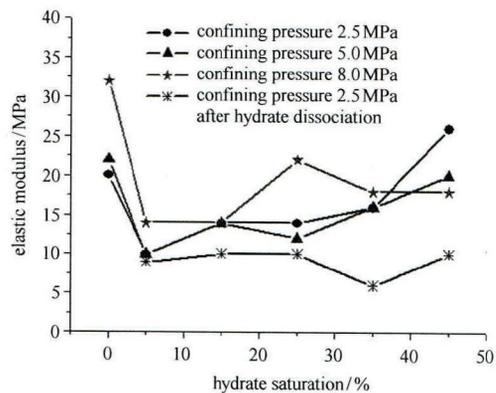


图 9 含水合物沉积物弹性模量随饱和度和围压的变化

Fig. 9 Relations between the elastic modulus of HBS and hydrate saturation and confining pressure

剪切强度随围压的增加和水合物饱和度的增加而增加 (图 10). 不含水合物的沉积物在 3 种给定的围压下, 破坏强度分别为 0.15 MPa, 0.215 MPa 和 0.3 MPa. 以围压 8.0 MPa 条件下的结果为例说明其随水合物饱和度变化特点, 水合物饱和度从 5% 增加到 15% 时, 剪切强度从 0.31 MPa 增加到 0.71 MPa, 水合物饱和度到 25% 时, 剪切强度跳跃到 1.21 MPa, 之后水合物饱和度从 35% 增大到 45% 时, 剪切强度从 1.41 MPa 缓慢增加到 1.49 MPa. 可以看到, 在水合

物饱和度为 25% 时，破坏强度发生的显著的跳跃，陡然增加为水合物饱和度 5% 时的 4 倍以上。这与应变强化的位置是对应的，也说明饱和度 25% 是这类黏土中的一个临界点，这大大低于水合物砂土的临界点 45%<sup>[21]</sup>。究其原因，可能是黏土的孔隙和颗粒粒径均较砂土的小，因此只需要较小的孔隙填充度就可以引起明显的胶结和支撑作用。

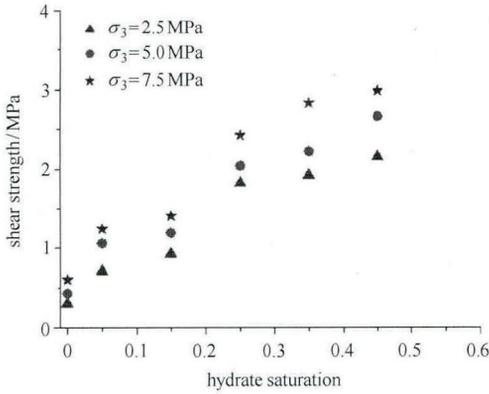


图 10 含水合物沉积物的剪切强度随水合物饱和度和围压的变化  
Fig. 10 Relations between the shear strength of HBS and hydrate saturation and confined pressure

表 2 给出了水合物分解前后黏土的剪切强度。在围压为 2.5 MPa 时，水合物分解后的剪切强度，当初始水合物饱和度 5% 时为 0.30 MPa，相当于初始的 4/5，水合物饱和度 15% 时，分解后剪切强度降为 0.27 MPa，即为初始值的 3/5，水合物饱和度 25% 时，分解后剪切强度降为 0.27 MPa，约为初始值的 1/4，水合物饱和度 35% 时，分解后剪切强度降为 0.7 MPa，即为初始值的 7/10，水合物饱和度 45% 时，分解后

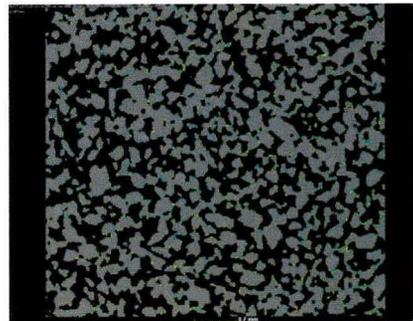
表 2 水合物分解前后强度对比

Table 2 Comparison of shear strength before and after

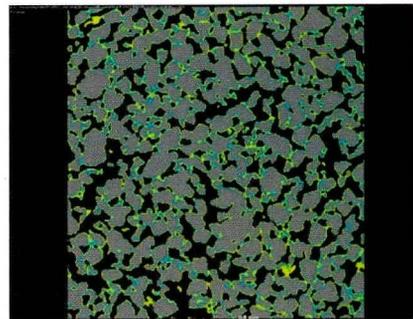
GH dissociation		
$S_h$	$\sigma_3/\text{MPa}$	$\sigma_1 - \sigma_3/\text{MPa}$
0%	2.5	0.15
5%	2.5	0.36
	After 2.5	0.30
15%	2.5	0.48
	After 2.5	0.27
25%	2.5	0.91
	After 2.5	0.27
35%	2.5	0.96
	After 2.5	0.70
45%	2.5	1.08
	After 2.5	0.27

剪切强度降为 0.27 MPa，相当于初始值的 1/4，这些结果与 Winters 等<sup>[5-6]</sup>的现场钻取水合物沉积物样品的三轴压缩试验结果趋势一致。可以看到，除了水合物饱和度 35% 的数据异常外，其他情况下，水合物分解后的剪切强度基本相等，但是大于初始不含水合物的沉积物的值。这说明一方面水合物饱和度大小对于分解后的剪切强度影响不大，另一方面水合物在沉积物中形成与分解对结构物原有的结构产生了较大影响。

从图 11 给出的 X-CT 微观图像可以看出，水合物饱和度低时，及在孔隙中填充程度小情况下，水合物主要零散的附着于砂土颗粒的表面，没有对骨架起支撑作用(图 11(a))，胶结作用很有限。这时，剪切导致颗粒间旋转、滑移和重排列。随着水合物饱和度的增加，水合物更加均匀的胶结在砂颗粒的表面并逐渐大面积地相互连接，在颗粒间的支撑和胶结作用显著增强(图 11(b))。这时剪切将主要由水合物本身及颗粒间的胶结面承担。这也即体现了水合物的微观赋存形式(由孔隙填充型向胶结型转变)对宏观的含水合物沉积物抗剪强度的影响<sup>[21]</sup>。



(a) 水合物饱和度为 5%  
(a) Hydrate 5%



(b) 水合物饱和度为 35%  
(b) Hydrate 35%

图 11 孔隙中水合物微观分布 CT 图片

Fig. 11 CT photo of micro-distribution of hydrate in pores

摩尔库伦强度准则以法向有效应力  $\sigma'$ 、黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  来描述 (见式 (1)). 根据图 3 ~ 图 8 的应力应变数据, 可以整理出摩尔库伦强度参数: 内摩擦角和黏聚力

$$\tau = \sigma' \tan \varphi + c \quad (1)$$

图 12 给出了整理的水合物黏土沉积物内摩擦角和黏聚力随水合物饱和度的变化曲线. 可以看到, 黏聚力随着水合物饱和度的增加而增加. 不含水合物的黏土沉积物的黏聚力和内摩擦角分别为 0.09 MPa 和 1.8°, 水合物饱和度 5% 时的黏聚力和内摩擦角分别为 0.26 MPa 和 2.9°, 水合物饱和度 15% 时的黏聚力和内摩擦角分别为 0.35 MPa 和 2.9°, 水合物饱和度 25% 时的黏聚力和内摩擦角分别为 0.78 MPa 和 2.9°, 水合物饱和度 35% 时的黏聚力和内摩擦角分别为 0.82 MPa 和 3.2°, 水合物饱和度 45% 时的黏聚力和内摩擦角分别为 0.97 MPa 和 3.4°. 可以看到, 只要有水合物形成, 即使饱和度只有 5%, 其黏聚力也

增大为初始不含水合物时的 3 倍. 在水合物饱和度超过 25% 时, 黏聚力值又陡然增加为初始不含水合物时的 8 倍以上. 初始不含水合物时的内摩擦角为 1.8°, 含水合物沉积物的内摩擦角仅为 3° 左右, 随着水合物饱和度的变化不大. 一般来说, 黏土颗粒细小, 比表面积大, 较软, 故颗粒间的接触和吸附能力较砂颗粒强, 而颗粒间的表面摩擦、嵌入和联锁产生的咬合力小, 也即黏聚力显著而内摩擦角小. 水合物在孔隙中形成后, 对沉积物的胶结作用更强化了黏聚力的效应. 因此水合物的形成对内摩擦角的影响很有限.

### 3 结 论

利用自行研制的含水合物土合成与力学性质测量一体化试验设备, 制备南海水合物赋存区域的海底粉质黏土水合物, 进行了三轴压缩试验研究, 并针对水合物微观赋存状态开展了微观 CT 扫描试验研究. 重点分析了不同水合物饱和度 (0%, 5%, 15%, 25%, 35%, 45%) 条件下的水合物黏土沉积物的应力应变特性和强度特性. 得到如下主要结论:

(1) 在与现场沉积物的干密度相同条件下 ( $1.3 \text{ g/cm}^3$ ), 水合物黏土沉积物的应力应变曲线表现弹塑性破坏形式, 且有明显的应变强化特性, 这与水合物砂土沉积物有显著的区别.

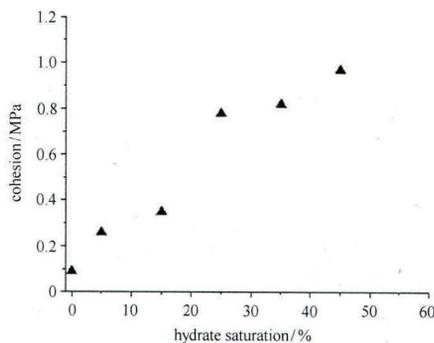
(2) 随着水合物饱和度的增加, 水合物沉积物的剪切强度和摩尔库伦强度参数增大; 且当水合物饱和度超过 25% 时, 其剪切强度和黏聚力有显著的跳跃, 黏聚力值增加为初始不含水合物沉积物的 8 倍以上, 而内摩擦角变化不大.

(3) 水合物分解后, 剪切强度最大可降低到初始的 1/4. 水合物分解后的剪切强度与水合物饱和度相关性很小且大于初始不含水合物的沉积物的剪切强度. 在本文试验中水合物分解后的剪切强度为 0.27 MPa 左右.

本文的研究结果对于我国南海海域水合物沉积物的力学特征具有一定的代表性, 可以作为相关地区水合物研究及工程应用的参考.

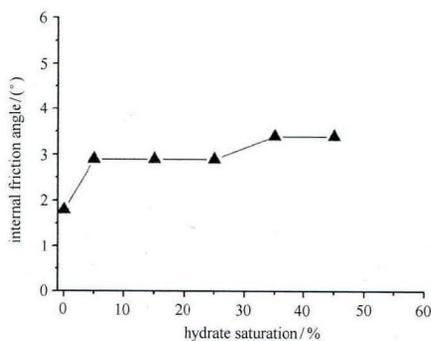
### 参 考 文 献

- 1 Koh CA. Towards a fundamental understanding of natural gas hydrates. *Chemical Society Reviews*, 2002, 31: 157
- 2 Kvenvolden KA, Lorensen TD. The global occurrence of natural gas hydrate. *Geophysical Monograph*, 2001, 124: 3-18
- 3 张洪涛, 张海启, 祝有海. 中国天然气水合物调查研究现状及其进展. *中国地质*, 2007, 34(6): 953-961 (Zhang Hongtao, Zhang



(a) 黏聚力随饱和度变化曲线

(a) Cohesion



(b) 内摩擦角随饱和度变化曲线

(b) International friction angle

图 12 含水合物土的黏聚力和内摩擦角随水合物饱和度的变化  
Fig. 12 Development of the cohesion and international friction angle with hydrate saturation

- Haiqi, Zhu Youhai. Gas hydrate investigation and research in China: Present status and progress. *Geology in China*, 2007, 34(6): 953-961 (in Chinese))
- 4 王淑云, 鲁晓兵. 水合物沉积物力学性质的研究现状. *力学进展*, 2009, 39(2): 176-188 (Wang Shuyun, Lu Xiaobing. Advances of research on mechanical properties of gas hydrate deposits. *Advances in Mechanics*, 2009, 39(2): 176-188 (in Chinese))
  - 5 Winters WJ, Pecher IA, Waite WF, et al. Physical properties and rock physics models of sediment containing natural and laboratory-formed methane gas hydrate. *American Mineralogist*, 2004, 89: 1221-1227
  - 6 Winters WJ, Waite WF, Mason DH, et al. Methane gas hydrate effect on sediment acoustic and strength properties. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 56: 127-135
  - 7 Hyodo M, Nakata Y, Yoshimoto N, et al. Shear behaviour of methane hydrate-bearing sand. In: Proceedings of 17th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2007, Lisbon, Portugal, 1326-1333
  - 8 Masui A, Haneda H, Ogata Y, et al. Mechanical properties of sandy sediment containing marine gas hydrates in deep sea offshore Japan. In: Proceedings of 17th International Offshore and Polar Engineering Conference, Ocean Mining Symposium, 2007, Lisbon, Portugal, 53-56
  - 9 Miyazaki K, Masui A, Sakamoto Y, et al. Triaxial compressive properties of artificial methane-hydrate-bearing-sediment. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116, B06102
  - 10 Clayton CRI, Priest JA, Best AI. The effects of disseminated methane hydrate on the dynamic stiffness and damping of a sand. *Geotechnique*, 2005, 55(6): 423-434
  - 11 Zhang XH, Lu XB, Zhang LM, et al. Experimental study on mechanical properties of methane-hydrate-bearing sediments. *Acta Mechanica Sinica*, 2012, 28(5): 1356-1366
  - 12 张旭辉, 王淑云, 李清平等. 天然气水合物沉积物力学性质的试验研究. *岩土力学*, 2010, 31(10): 3069-3074 (Zhang Xuhui, Wang Shuyun, Li Qingping, et al. Experimental study of mechanical properties of gas hydrate deposits. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(10): 3069-3074 (in Chinese))
  - 13 Lu XB, Wang L, Wang SY, et al. Study on the Mechanical Properties of the tetrahydrofuran hydrate deposit. In: Proceedings of 18th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vancouver, Canada, 2008, 57-60
  - 14 魏厚振, 颜荣涛, 陈盼等. 不同水合物含量含二氧化碳水合物砂三轴试验研究. *岩土力学*, 2011, 32(Supp.2): 198-203 (Wei Houzhen, Yan Rongtao, Chen Pan, et al. Deformation and failure behavior of carbon dioxide hydrate-bearing sands with different hydrate contents under triaxial shear tests. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(Supp.2): 198-203 (in Chinese))
  - 15 李洋辉, 宋永臣, 刘卫国. 天然气水合物三轴压缩试验研究进展. *天然气勘探与开发*, 2010, 33(2): 51-55 (Li Yanghui, Song Yongchen, Liu Weiguo. Triaxial compression test of natural gas hydrate. *Natural Gas Exploration & Development*, 2010, 33(2): 51-55 (in Chinese))
  - 16 李令东, 程远方, 孙晓杰等. 水合物沉积物试验岩样制备及力学性质研究. *中国石油大学(自然科学版)*, 2012, 36(4): 97-101 (Li Lingdong, Cheng Yuanfang, Sun Xiaojie, et al. Experimental sample preparation and mechanical properties study of hydrate bearing sediments. *Journal of China University of Petroleum*, 2012, 36(4): 97-101 (in Chinese))
  - 17 Yun TS, Santamarina JC, Ruppel C. Mechanical properties of sand, silt and clay containing tetrahydrofuran hydrate. *Journal of Geophysical Research*, 112, B04106
  - 18 Waite WF, Santamarina JC, Cortes DD, et al. Physical properties of hydrate-bearing sediments. *Reviews of Geophysics*, RG4003/2009, 47: 1-38
  - 19 吴青柏, 蒲毅彬, 蒋观利, 等. 冻结粗砂土中甲烷水合物形成 CT 试验研究. *天然气地球科学*, 2006, 17(2): 239-248 (Wu Qingbai, Pu Yibin, Jiang Guanli, et al. Experimental research of formation process of methane hydrate in freezing coarse grain size sand by computerized tomography. *Natural Gas GeoScience*, 2006, 17(2): 239-248 (in Chinese))
  - 20 Nagashima K, Orihashi S, Yamamoto Y, et al. Encapsulation of saline solution by tetrahydrofuran clathrate hydrates and inclusion migration by recrystallization. *Journal of Physical Chemistry B*, 2005, 109: 10147-10153
  - 21 Lu XB, Zhang XH, Wang SY. Advances in study of mechanical properties of gas hydrate bearing sediments. *The Open Ocean Engineering Journal*, 2013, 6: 26-40

(责任编辑: 冯夏庭)

(责任编辑: 刘希国)

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE STATIC MECHANICAL PROPERTIES OF HYDRATE-BEARING SILTY-CLAY IN THE SOUTH CHINA SEA<sup>1)</sup>

Shi Yaohong<sup>\*,†</sup> Zhang Xuhui<sup>\*\*,2)</sup> Lu Xiaobing<sup>\*\*</sup> Wang Shuyun<sup>\*\*</sup> Wang Ailan<sup>\*\*</sup>

*\*(Ocean University of China, Qingdao 266100, China)*

*†(Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China)*

*\*\* (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)*

**Abstract** By using an integrated experimental apparatus for syntheses of hydrate-bearing sediment (HBS) and tri-axial mechanical tests, a series of static tests were conducted on the silty-clay containing tetra-hydro-furan (THF) hydrate. The samples were prepared with the silty-clay obtained from the South China Sea where gas hydrate has been found. The stress-strain curves before and after hydrate dissociation and the strength parameters were obtained. It is shown that the hydrate-bearing silty-clay behaves as elastic-plastic failure and obvious strain hardening. The failure stress (the stress difference of the maximum and minimum stresses), internal friction angle and cohesion increase with the rise of hydrate saturation. The internal friction angle increases a little bit with the rise of hydrate saturation, while the other parameters increase rapidly once the hydrate saturation is over 25%, which is agreed well with the change of hydrate occurrence form in the pore of HBS. The dissociation of hydrate can cause the sediment's strength decrease to be 1/4 of the initial value. The strengths of the sediments after hydrate dissociation at different initial hydrate saturations are almost the same and larger than that of the sediment initially without hydrate.

**Key words** silty-clay, stress-strain curve, shear strength, THF hydrate

Received 19 December 2014, accepted 3 March 2015, available online 10 March 2015.

1) The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51239010, 41376078, 11102209) and China Geology Survey (GZH201100311).

2) Zhang Xuhui, associate professor, research interests: soil mechanics in gas hydrate exploration and exploitation. E-mail: zhangxuhui@imech.ac.cn