

# 黏土水合物沉积物力学特性及应力应变关系\*

鲁晓兵<sup>1,3</sup>, 张旭辉<sup>1,3</sup>, 石要红<sup>2</sup>, 王淑云<sup>1,3</sup>, 罗大双<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 广州海洋地质调查局, 广州 510075; 3. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

**摘要:** 以中国近海某天然气水合物(水合物)区的海底粉质黏土制备水合物沉积物样品,并在土工三轴仪上进行实验,分析其应力应变曲线和破坏应力特性。结果表明:力学常数如破坏应力(应变为 15% 对应的偏应力)随水合物饱和度的增加而增加,在饱和度约 25% 时破坏应力产生跳跃,即破坏应力随水合物饱和度的变化可分为两部分,饱和度小于 25% 时水合物的存在对沉积物破坏应力影响较小,大于 25% 时影响较大。在水合物饱和度小于 45% 的范围内,水合物沉积物的应力应变曲线可分为弹性段、屈服段和强化段。文中给出了描述其应力应变曲线的分段函数。

**关键词:** 黏土水合物沉积物;应力应变曲线;破坏应力

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2017)10-009-05

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20160474

引用格式: 鲁晓兵, 张旭辉, 石要红, 等. 黏土水合物沉积物力学特性及应力应变关系[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(10): 9-13.

LU Xiao-Bing, ZHANG Xu-Hui, SHI Yao-Hong, et al. Mechanical properties of hydrate-bearing silty-clay and stress-strain relation[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(10): 9-13.

水合物是在高压和低温条件下,主要由甲烷等小分子气体和水形成的结晶化合物<sup>[1]</sup>,呈分散状或结节状等存在于地层中,由于储量巨大而被视为 21 世纪潜在能源<sup>[2-3]</sup>。

水合物沉积物的力学参数是水合物勘探与开发分析的基础数据,目前人们已经开展了很多的工作,大部分是室内三轴实验,且以砂土骨架为主<sup>[4-6]</sup>。而中国近海水合物沉积物主要以黏土骨架为主,开展这方面的研究非常必要。

Winters 等<sup>[6]</sup>利用 Malik2L-38 钻井的水合物沉积物原状样和渥太华砂为骨架的水合物样品进行了三轴压缩实验。获得了水合物沉积物强度与水合物含量、分布等因素的关系。Hyodo 等<sup>[7]</sup>对砂骨架甲烷水合物进行了三轴实验,分析了温度、有效围压和水合物饱和度对强度的影响。Masui 等<sup>[8]</sup>利用日本南海海槽的原状水合物岩芯和室内合成的水合物砂样进行了三轴实验,认为水合物沉积物的抗剪强度随着水合物饱和度的增加而增加。张旭辉<sup>[9-10]</sup>、鲁晓兵等<sup>[11]</sup>分别在水合物沉积物三轴实验装置上,针对甲烷、二氧化碳和四氢呋喃等不同类型的水合物沉积物,主要以砂土为骨架,分析了水合物沉积物的力学参数。

鉴于前人的研究主要针对砂土骨架水合物沉积

物,本文将针对黏土骨架水合物沉积物进行三轴实验研究,获得其力学特性,包括应力-应变关系曲线以及破坏应力等。

## 1 实验布置

实验在自行研制的水合物合成与力学性质测量一体化实验装置上进行。装置技术参数如下:围压 0~14 MPa,压力室温度 -20~20 °C。考虑到黏土中甲烷水合物合成时间长、饱和度及均匀性很难控制,而四氢呋喃水合物与甲烷水合物具有相似的热、力学性质,且容易合成<sup>[12]</sup>。Yun<sup>[13]</sup>等利用含四氢呋喃水合物的黏土进行了初步的实验探讨,表明可以反映天然气水合物的基本特性。故本文的实验均采用四氢呋喃水合物沉积物进行三轴实验。

实验用粉质黏土从中国近海水合物区的海底取回,颗粒比重 2.7,粒径在 0.005~0.05 mm 内的颗粒占 80% 左右。样品尺寸为直径 3.91 cm,高 8.0 cm。颗粒级配曲线如图 1 所示。

试样制备完成后开始进行三轴压缩实验。压力室温度保持 2 °C,使水合物在实验过程中不分解,按 0.9 mm/min 的轴向变形速度进行排水加载直至破坏。实验共进行 6 组,每组 3 个样品,分析水合物饱和度对力

\* 基金项目:中国地质调查局项目(GZH2011003);国家自然科学基金项目(11072245, 41376078)资助

Supported by Geological Survey of China (GZH2011003); National Natural Science Foundation of China (11072245, 41376078)

收稿日期:2017-05-10;修订日期:2017-07-12

作者简介:鲁晓兵(1968-),男,研究员。E-mail: xblu@imech.ac.cn

学特性的影响。根据南海水合物沉积物的饱和度,实验控制水合物饱和度为 15%、25%、和 45%。实验装置介绍和实验步骤等可参考文献[14]。

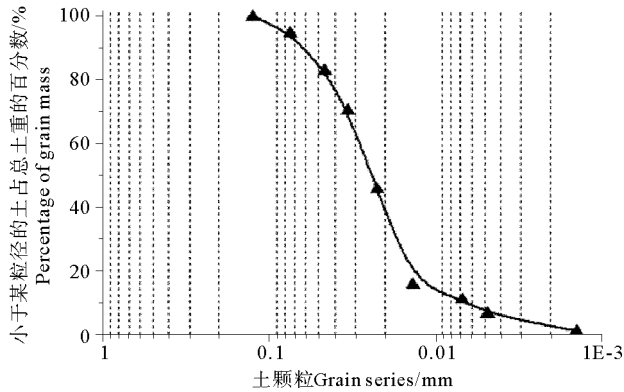


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain distribution curve

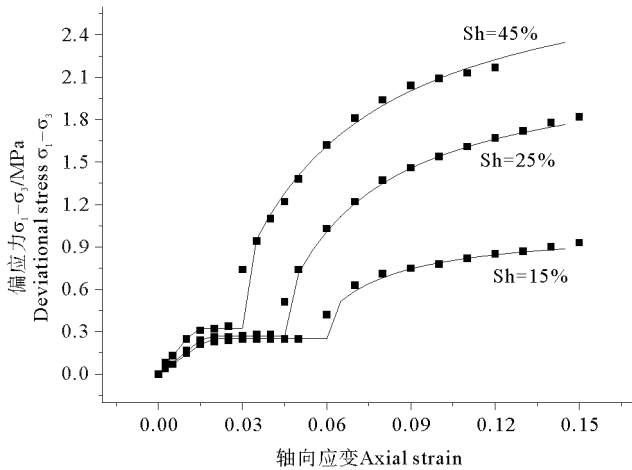


图 2 围压 2.5 MPa 时的应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve at confined pressure 2.5 MPa

## 2 实验结果分析

每组实验围压为 2.5、5 和 8 MPa。由于实验中没有软化及峰值,故在轴向应变为 15%时停止实验,并以此时的应力为破坏应力。

应力应变曲线有如下特征(见图 2,3): (1) 具有三个明显的阶段:弹性段、塑性段、强化段。在小的应力范围内近似为弹性阶段;之后在应变小于 6% 内有一个屈服平台,即应力不变,应变增加;接着发生应力随应变快速上升的强化段,但是曲线应力没有峰值。这三段分界点的应变随水合物饱和度和围压而变化。(2) 破坏应力随着饱和度和围压的增加而增加,在饱和度约 25% 时破坏应力产生跳跃,即破坏应力随水合物饱和度的变化可分为两部分,饱和度小于 25% 时沉积物破坏应力对水合物饱和度近似呈线性快速增长;大于

25% 时则近似呈二次曲线形式增长。应力应变有三个阶段的原因是:在加载初期,由于应变小,样品只发生弹性变形;随着应变增加,样品进入塑性屈服阶段。随着塑性应变增加,沉积物颗粒将发生重新排列和压密,孔隙体积缩小,而原水量不变,因而水合物饱和度变大,颗粒接触越紧密,这时对外载的支撑作用越来越显著,故发生强化。破坏应力发生跳跃的原因也是当水合物饱和度达到一定值时,水合物自身已经形成连续骨架而对外载起支撑作用,加上原土骨架的支撑,样品整体的抵抗外力的作用发生突增。

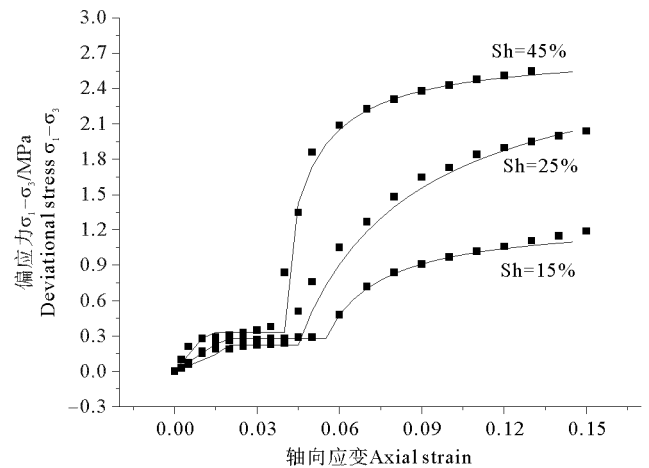


图 3 围压 5 MPa 时的应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve with confined pressure 5 MPa

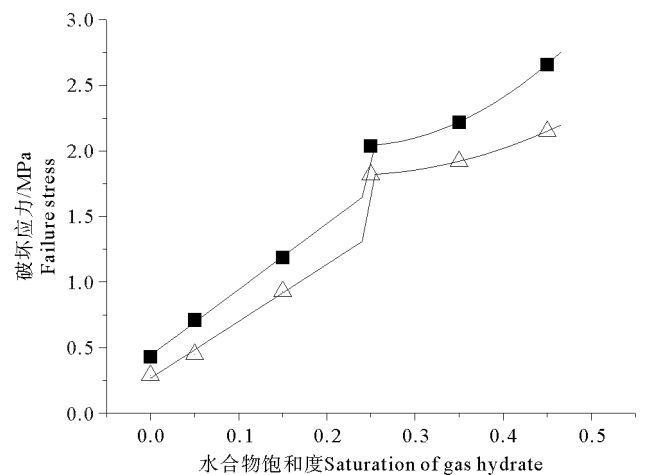


图 4 破坏应力随水合物饱和度的变化

Fig. 4 Failure stress versus hydrate saturation

## 3 应力应变关系和破坏应力

为了应用方便又能较好反映应力应变曲线的特点,本节采用分段式全应力应变模型来描述上述实验得到的应力应变曲线。

模型分为三段: 第一段为弹性段, 设弹性极限应变为  $\epsilon_e$ , 则当应变  $\epsilon \leq \epsilon_e$  时,  $\sigma = E_e \epsilon$ 。

第二段为屈服段: 设  $\epsilon_s$  为强化段起始点应变, 则当  $\epsilon_e \leq \epsilon \leq \epsilon_s$  时,  $\sigma = \sigma_f$ ,  $\sigma_f$  为屈服应力。

第三段为强化段:  $\epsilon \geq \epsilon_s$  时, 参考 Duncan-Zhang 模型, 这里取应力应变关系的形式为:  $\sigma =$

$$\frac{\epsilon - \epsilon_s}{a + b(\epsilon - \epsilon_s)} \sigma_s$$

根据图 2 和图 3 中的实验数据, 可以得到两种围压和三种水合物饱和度下的偏应力  $\sigma_d$  和轴向应变  $\epsilon_d$  的关系表示如表 1。用得到的关系式计算并绘出图线, 可以看到与实验值吻合较好。

表 1 不同围压和水合物饱和度下的应力应变关系  
Table 1 Stress-strain relation with confined pressure and hydrate saturation

围压/MPa Confining pressure	水合物饱和度/% Gas hydrate saturation	第一段 The first stage	第二段 The second stage	第三段 The third stage
2.5	15	$0 \leq \epsilon_d \leq 0.015$ $\sigma_d = 14\epsilon_d$	$0.015 < \epsilon_d \leq 0.05$ $\sigma_d = 0.25$	$0.05 < \epsilon_d \leq 0.15$ $\sigma_d = 0.42 + \frac{\epsilon_d - 0.06}{0.0436 + 1.628(\epsilon_d - 0.06)}$
	25	$0 \leq \epsilon_d \leq 0.015$ $\sigma_d = 16\epsilon_d$	$0.015 < \epsilon_d \leq 0.04$ $\sigma_d = 0.27$	$0.04 < \epsilon_d \leq 0.15$ $\sigma_d = 0.51 + \frac{\epsilon_d - 0.045}{0.0213 + 0.584(\epsilon_d - 0.045)}$
	45	$0 \leq \epsilon_d \leq 0.01$ $\sigma_d = 25\epsilon_d$	$0.01 < \epsilon_d \leq 0.025$ $\sigma_d = 0.325$	$0.025 < \epsilon_d \leq 0.15$ $\sigma_d = 0.74 + \frac{\epsilon_d - 0.03}{0.021 + 0.438(\epsilon_d - 0.045)}$
5	15	$0 \leq \epsilon_d \leq 0.015$ $\sigma_d = 15.3\epsilon_d$	$0.015 < \epsilon_d \leq 0.05$ $\sigma_d = 0.275$	$0.05 < \epsilon_d \leq 0.15$ $\sigma_d = 0.48 + \frac{\epsilon_d - 0.06}{0.0327 + 1.234(\epsilon_d - 0.06)}$
	25	$0 \leq \epsilon_d \leq 0.015$ $\sigma_d = 9.5\epsilon_d$	$0.015 < \epsilon_d \leq 0.04$ $\sigma_d = 0.22$	$0.04 < \epsilon_d \leq 0.15$ $\sigma_d = 0.24 + \frac{\epsilon_d - 0.045}{0.0167 + 0.39(\epsilon_d - 0.045)}$
	45	$0 \leq \epsilon_d \leq 0.01$ $\sigma_d = 28\epsilon_d$	$0.01 < \epsilon_d \leq 0.035$ $\sigma_d = 0.35$	$0.035 < \epsilon_d \leq 0.15$ $\sigma_d = 0.84 + \frac{\epsilon_d - 0.04}{0.0059 + 0.531\epsilon_d - 0.04}$

破坏应力随饱和度增加而增大, 且在 25% 时出现跳跃。下面给出 2.5 和 5.0 MPa 对应的破坏应力  $\tau_s$  随水合物饱和度  $S_h$  (占孔隙的比例) 变化的分段函数表示式。

围压 2.5 MPa,  $\epsilon_d < 25\%$  时,

$$\tau_s = 0.267 + 4.34S_h \quad (1)$$

$\epsilon_d \geq 25\%$  时,

$$\tau_s = 2.14 - 2.9S_h + 6.5S_h^2 \quad (2)$$

围压 5 MPa,  $\epsilon_d < 25\%$  时,

$$\tau_s = 0.441 + 5.03S_h \quad (3)$$

$\epsilon_d \geq 25\%$  时,

$$\tau_s = 2.73 - 6S_h + 13S_h^2 \quad (4)$$

从图 4 可以看出, 利用上述公式 (1)~(4), 可以很好地拟合实验数据。

考虑到在实际开采中, 水合物饱和度随位置和时间变化, 为了实际应用的方便, 下面提出将上述公式表

述为破坏强度和应力应变随空间位置和时间变化的函数的方法。本文仅以破坏应力随水合物饱和度变化为例来说明这种方法。

水合物分解速率可以表示成:

$$\frac{\partial S_h}{\partial t} = k_d M_g A_s (p_e - p) \quad (5)$$

其中:  $k_d$  是一个系数;  $M_g$  是甲烷气体的摩尔分数;  $A_s$  是表面积;  $p_e$  是水合物平衡时的孔隙压力;  $p$  是实时孔压。

如果知道  $p$  随时间的变化, 则可以通过上式求解出  $S_h$  随时间的变化, 进而通过前面得到的函数得到应力应变关系和破坏应力随时间的变化。以  $p$  为常数为例, 忽略表面积的变化, 则有:

$$S_h = k_d M_g A_s (p_e - p) t \quad (6)$$

在实际生产过程中,  $p$  是随时间和空间位置变化的, 以降压开采为例, 如果边界给定压力  $p_0$ , 内部压力

$p_l$ , 空间尺度为  $l$ , 则孔压随时间和空间位置的变化为:

$$p = p_i + \frac{p_0 - p_l}{l}x + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2(p_0 - p_l)}{n\pi} e^{-\frac{n^2 \pi^2 t}{l^2} \tau_0} \sin \frac{n\pi}{l} x \quad (7)$$

将式(6)代入(5)(如考虑孔压变化, 则将式(7)代入(5))代入到破坏应力关系式(1)和(2)(以围压 2.5 MPa 情况为例):

$$\epsilon_d < 25\%, \quad \tau_s = 0.267 + 4.34(S_{h_0} - k_d M_g A_s (p_e - p)t) \quad (8)$$

$$\epsilon_d \geq 25\% \text{ 时}, \quad \tau_s = 2.14 - 2.9 \times (S_{h_0} - k_d M_g A_s (p_e - p)t) + 6.5(S_{h_0} - k_d M_g A_s (p_e - p)t)^2 \quad (9)$$

式中:  $S_{h_0}$  为初始水合物饱和度。上式即可反映破坏应力随水合物开采时间的变化情况。如将式(7)中的压力代入, 则可将破坏压力随地点和时间的变化; 如其代入表 1 中的应力应变关系式, 则可得到反映应力应变随水合物开采时间和地点的变化关系式。

#### 4 结论

利用自行研制的水合物沉积物合成与力学性质测量一体化实验设备, 利用我国近海水合物赋存区域的粉质黏土为骨架制备水合物沉积物, 并进行了三轴实验研究。得到的主要结论如下:

(1) 样品的应力应变曲线为弹塑性形式, 有明显的应变强化特性。

(2) 随着水合物饱和度的增加, 水合物沉积物的破坏应力增大, 且当水合物饱和度超过 25% 时发生跳跃。水合物饱和度小于 25% 时, 破坏应力与饱和度呈现线性快速增长; 大于 25% 时, 破坏应力与饱和度可用二次函数表述。

(3) 样品的应力应变曲线分为弹性段、屈服段和强化段三个阶段, 其关系可用分段函数表示。这个函数是由本文实验结果基础上得到的, 在更大的压力、土骨架类型, 以及含气/水条件下是否适合还有待进一步的探索。鉴于本文采用的是四氢呋喃水合物, 与实际的甲烷水合物应该存在一定的差别, 故在实际应用时应该进行修正。

#### 参考文献:

- [1] Koh C A. Towards a fundamental understanding of natural gas hydrates[J]. Chem Soc Rev, 2002, 31: 157.
- [2] Kvenvolden K A, Lorenson T D. The global occurrence of natural gas hydrate[J]. 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进展[J]. 中国地质, 2007, 34(6): 953-961.  
Zhang H T, Zhang H Q, Zhu Y H. Gas hydrate investigate and research in China: Present status and progress[J]. Geology in China, 2007, 34(6): 953-961.
- [4] 王淑云, 鲁晓兵. 水合物沉积物力学性质的研究现状[J]. 力学进展, 2009, 39(2): 176-188.  
Wang S Y, Lu X B. Advances of research on mechanical properties of gas hydrate deposits[J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(2): 176-188.
- [5] Winters W J, Pecher I A, Waite W F, et al. Physical properties and rock physics models of sediment containing natural and laboratory-formed methane gas hydrate [J]. American Mineralogist, 2004, 89: 1221-1227.
- [6] Li Y H, Song Y C, Liu W G, et al. A new strength criterion and constitutive model of gas hydrate-bearing sediments under high confining pressures[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 109, 45-50.
- [7] Hyodo M, Nakata Y, Yoshimoto N, et al. Shear Behaviour of Methane Hydrate-Bearing Sand [C]. Lisbon, Portugal; Proc. 17th Int. Offshore and Polar Engng. Conf., 2007: 1326-1333.
- [8] Masui A, Haneda H, Ogata Y, et al. Mechanical Properties of Sandy Sediment Cotaining Marine Gas Hydrates in Deep Sea Offshore Japan[C]. Lisbon, Portugal; Proc. 17th Int. Offshore and Polar Engng. Conf., Ocean Mining Symposium, 2007: 53-56.
- [9] Zhang X H, Lu X B, Zhang L M, et al. Experimental study on mechanical properties of methane-hydrate-bearing sediments[J]. Acta Mechanica Sinica, 2012, 28(5): 1356-1366.
- [10] 张旭辉, 王淑云, 李清平, 等. 天然气水合物沉积物力学性质的实验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3069-3074.  
Zhang X H, Wang S Y, Li Q P, et al. Experimental study of mechanical properties of gas hydrate deposits[J]. Rock and soil Mechanics, 2010, 31(10): 3069-3074.
- [11] Lu X B, Wang L, Wang S Y, et al. Study on the Mechanical Properties of the tetrahydrofuran hydrate deposit [C]. Vancouver, Canada: 18th Int. Offshore and Polar Engineering Conf., 2008: 57-60.
- [12] Lu X B, Zhang X H, Wang S Y. Advances in study of mechanical properties of gas hydrate bearing sediments[J]. The Open Ocean Engineering Journal, 2013, 6: 26-40.
- [13] Yun T S, Santamarina J C, Rupple C. Mechanical properties of sand, silt and clay containing tetrahydrofuran hydrate[J]. Journal of Geophysical Research, 112, B04106, doi: 10.1029/2006JB004484.
- [14] 石要红, 张旭辉, 鲁晓兵, 等. 南海水合物黏土沉积物力学特性试验模拟研究[J]. 力学学报, 2015, 47(3): 521-528.  
Shi Y H, Zhang X H, Lu X B, et al. Experimental study on the static mechanical properties of hydrate-bearing silty-clay in the South China Sea[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(3): 521-528.

## Mechanical Properties of Hydrate-Bearing Silty-Clay and Stress-Strain Relation

LU Xiao-Bing<sup>1,3</sup>, ZHANG Xu-Hui<sup>1,3</sup>, SHI Yao-Hong<sup>2</sup>, WANG Shu-Yun<sup>1,3</sup>, LUO Da-Shuang<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 3. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Triaxial tests were carried out to study the stress-strain characteristics of tetra-hydro-furan (THF) hydrate-bearing sediment by using the silty-clay sampled as skeleton from China's offshore area. It is shown that the failure stresses (the variational stress at strain 15%) increase with hydrate saturation and there a jump at strain 25%. In other words, the relation between failure stress and saturation can be divided into two stages; the effects of hydrate saturation are small when the strain is less than 25% while it is large at strain exceeding 25%. The strain-strain curve can be divided into three stages: elastic stage, failure stage and strengthening stage. A subsection function is used to describe the stress-strain curve. The stress-strain curve can be divided into three stages: linear stage, failure stage and strengthening stage at strain 0~45%. Piecewise function was used to describe the relation.

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

责任编辑 徐 环