

含水合物松散沉积物三轴试验及应变关系模型

李彦龙^{1,2}, 刘昌岭^{1,2}, 刘乐乐^{1,2}, 黄 萌^{1,3}, 孟庆国^{1,2}

(1. 青岛海洋地质研究所国土资源部天然气水合物重点实验室, 山东 青岛 266071;

2. 海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071;

3. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100)

摘要:通过系列含水合物松散沉积物三轴试验, 分析了沉积物应力—应变曲线基本变形规律, 建立了用于描述轴向应变—体积应变、轴向应变—侧向应变关系的半经验模型, 探讨了不同模型参数的敏感性及其物理意义。首次建立了三轴剪切破坏条件下含水合物松散沉积物发生应变软化、应变硬化2种破坏形式临界条件的判别方法。结果表明: 建立的软化、硬化临界条件预测模型与试验结果吻合较好; 在一定起始孔隙比条件下, 含水合物沉积物破坏过程中的应变硬化、应变软化特性是由有效围压、水合物饱和度共同控制的; 应变关系模型中不同的模型参数对曲线形态的影响机理不同, 明确各模型参数的物理意义对于进一步认识应变关系曲线演化规律具有重要意义。

关键词:含水合物沉积物; 三轴试验; 体积应变; 轴向应变; 侧向应变

中图分类号: TE53

文献标志码: A

文章编号: 1672-1926(2017)03-0383-08

引用格式: Li Yanlong, Liu Changling, Liu Lele, *et al.* Triaxial shear test and strain analysis of unconsolidated hydrate-bearing sediments[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(3): 383-390. [李彦龙, 刘昌岭, 刘乐乐, 等. 含水合物松散沉积物三轴试验及应变关系模型[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(3): 383-390.]

0 引言

天然气水合物资源具有分布广、资源量大、能量密度高等优点^[1], 是重要的替代能源。准确预测含水合物储层的力学性质, 揭示含水合物沉积物的变形规律, 可以有效避免水合物资源开发过程中工程灾害的发生, 为天然气水合物的有效安全开发提供保障。

三轴剪切试验是获取含水合物沉积物力学参数最直接、最有效的手段之一。国外含水合物沉积物三轴测试数据集集中在 Winters 等^[2,3]、Hyodo 等^[4,5]、Masui 等^[6]、Yoneda 等^[7]、Priest 等^[8]、Santamarina 等^[9]学者的研究报道中。国内鲁晓兵等^[10]利用内

蒙古砂和空心砖作为水合物赋存骨架, 通过三轴测试证明水合物形成对骨架强度具有强化作用, 此后张旭辉等^[11,12]、刘芳等^[13]、颜荣涛等^[14,15]、魏厚振等^[16]、李洋辉等^[17,18]、于锋等^[19]、李令东等^[20]、孙晓杰等^[21]、石要红等^[22]、刘文涛等^[23]从不同的角度进行了大量研究, 在试样制备方法、饱和度测试技术、试验温压条件控制、剪切速率控制等方面取得了很大进步^[24]。然而, 由于试验条件限制, 目前研究主要集中在对沉积物轴向应变—偏应力关系的测试及其本构分析方面, 对三轴剪切过程中沉积物体积应变的直接测量鲜见报道, 仅有部分学者利用本构模型对侧向应变、体积应变及其与轴向应变间的关系进行了初步描述, 如 Miyazaki 等^[25]初步建立了含

收稿日期: 2016-10-27; **修回日期:** 2017-01-21.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(编号: 41376078); 国家自然科学基金青年科学基金项目(编号: 41606078; 11402131); 中国科学院天然气水合物重点实验室基金(编号: Y607ke1001)联合资助。

作者简介: 李彦龙(1989-), 男, 甘肃定西人, 研究实习员, 主要从事水合物开采方面的研究工作. **E-mail:** liyanlongupc@163.com.

通信作者: 刘昌岭(1966-), 男, 山东威海人, 研究员, 博士生导师, 主要从事天然气水合物模拟试验相关的研究工作.

E-mail: qdliuchangling@163.com.

水合物沉积物轴向应变—侧向应变关系模型,但其模型参数未考虑水合物饱和度的影响,也未对轴向应变—体积应变规律进行深入探讨;虽然不同研究者的测试结果表明不同试验条件下含水合物沉积物可能发生应变硬化、应变软化 2 种破坏模式,但目前尚无含水合物沉积物发生软、硬化破坏临界条件的判别模型,对含水合物沉积物强度参数建模带来一定的困难。

为此,本文将利用自行研制的含水合物沉积物三轴力学参数测量仪,控制不同的试验条件(有效围压、水合物饱和度),直接测量沉积物轴向应变和体积应变随偏应力的变化规律,并探讨沉积物轴向应变与体积应变、侧向应变间的关系,建立用于描述含水合物松散沉积物轴向应变—体积应变、轴向应变—侧向应变关系的半经验模型,探讨不同模型参数的物理意义;基于应变规律模拟结果探索建立含水合物松散沉积物发生应变软化、应变硬化 2 种破坏形式的临界条件判别方法,为不同破坏形式下含水合物沉积物强度参数建模提供科学依据。

1 试验过程及测量方法

1.1 试验过程

本试验采用自行研制的含水合物沉积物 TSZ-2 型三轴仪完成,详细的试验规程在文献[26]中已详细论述。为尽量减少泥质和黏土矿物成分对模拟结果的影响,本文采用经过去泥质处理的纯天然海砂模拟水合物赋存介质,骨架密度为 $2.78\text{g}/\text{cm}^3$ 。天然海砂粒径分布范围为 $0.1\sim 0.85\text{mm}$,属中细砂。

具体的试样制备方法及试验过程如下:①称量 192g 经烘干处理的天然海砂,分别加入 8mL 、 16mL 、 24mL 浓度为 0.03% 的 SDS 溶液搅拌,使两者充分混合(制备水合物饱和度为 0% 的试样,无需加入 SDS 溶液),密闭静置 6h ;②分 4 次将砂样装入橡胶桶,分层压实,测算得沉积物初始孔隙比为 53% ;③安装反应釜,向围压腔注水,施加 0.5MPa 围压,从下部进气管路缓慢通入甲烷气体,上部进气管路敞开,排除试样及管路中的空气;④连接上部进气管路,上下进气管路同时通入甲烷,逐步增大围压至 5.5MPa ,孔压 4.5MPa ;⑤启动恒温控制系统,设定系统温度 $1.0^\circ\text{C}(\pm 0.5^\circ\text{C})$,降温合成水合物;⑥维持上述温压条件 $48\sim 60\text{h}$,制备不同饱和度的含水合物沉积物试样,试样规格: $\Phi 39.1\text{mm} \times 120\text{mm}$;⑦调整有效围压(根据试验条件,分别控制有效围压为 1MPa 、 2MPa 、 4MPa),设定三轴仪剪切速率为

$0.9\text{mm}/\text{min}$;⑧开始剪切试验,每隔 5s 记录应变、应力数据并在采集界面上实时显示,试验过程中维持系统温度 $1.0^\circ\text{C}(\pm 0.5^\circ\text{C})$,保证剪切过程中水合物不分解。若剪切过程中试样呈应变硬化趋势,则当试样轴向应变达到 $12\%\sim 15\%$ 时停止剪切;若试样剪切过程中出现应变软化现象,则当试样偏应力趋于稳定时停止剪切。

1.2 水合物饱和度测量方法

去泥质处理后中细砂堆积形成的孔隙尺寸较大,在恒温恒压、气过量条件下毛细效应不显著,气体与液体可以充分混合,再加上 SDS 溶液的促进作用,本文假设沉积物中的液体全部形成水合物,进而根据式(1)估算沉积物中的水合物饱和度:

$$S_h = V_h / V_\varphi \times 100\% \quad (1)$$

其中: $V_h = \frac{m_h}{\rho_h}$,

$$m_h = \frac{N \times M_w + M_c}{N \times M_w} \times m_w,$$

$$m_w = V_w \times \rho_w.$$

式中: m_w 、 m_h 分别表示 SDS 溶液、水合物的质量, g ; ρ_w 、 ρ_h 分别表示 SDS 溶液、水合物的密度, $\rho_w = 1.02\text{g}/\text{cm}^3$ 、 $\rho_h = 0.91\text{g}/\text{cm}^3$; V_w 、 V_h 分别表示 SDS 溶液、水合物体积, cm^3 ; V_φ 表示孔隙体积,根据胶桶体积、骨架比重及砂总重计算,本试验中 $V_\varphi = 77.9\text{cm}^3$; N 表示甲烷水合物的水合数, $N = 5.75$; M_w 、 M_c 分别表示水、甲烷的摩尔质量, $M_c = 16\text{g}/\text{mol}$ 、 $M_w = 18\text{g}/\text{mol}$ 。根据上述方法可得初始含液量 8mL 、 16mL 、 24mL 时沉积物中水合物饱和度分别为 13.3% 、 26.6% 、 40.0% 。

1.3 体积应变及侧向应变测量方法

本试验采用蒸馏水作为围压液,试验过程中随着三轴仪活塞压入试样胶桶,胶桶膨胀,排出部分围压液,根据活塞压入体积与围压液排出体积的差值计算沉积物体积变形量,继而测量含水合物沉积物的体积应变:

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\Delta V = V_{in} - V_{out}$, V_{in} 、 V_{out} 分别表示三轴仪活塞压入体积和围压液排出量, cm^3 ; V_0 表示胶桶(试样)初始体积, cm^3 。

试验结果表明,含水合物松散沉积物在三轴剪切过程中侧向应变值沿试样纵向的分布不可能是均匀的,而表现为试样中部的“大肚子”扩张,因此无法用应变片直接测量含水合物松散沉积物的整体侧

向变形规律,本文采用平均侧向应变值描述含水合物松散沉积物侧向变形规律。含水合物沉积物TSZ-2型三轴仪测量侧向应变的表达式为:

$$\epsilon_1 = \left(1 - \sqrt{\frac{1 - \epsilon_v}{1 - \epsilon_n}}\right) \times 100\% \tag{5}$$

2 轴向应变—偏应力关系曲线

本文分别在水合物饱和度 0%、13.3%、26.6%、40.0%，有效围压 1MPa、2MPa、4MPa 条件下进行试验。图 1 所示为不同有效围压、水合物饱和度条件下的轴向应变—偏应力关系曲线。

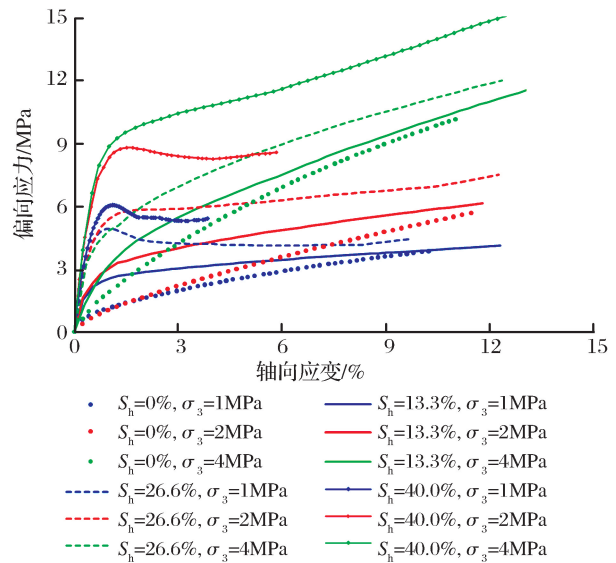


图 1 含水合物松散沉积物轴向应变—偏应力曲线
Fig.1 Axial strain VS deviator stress relationship of unconsolidated hydrate-bearing sediments

由图 1 可知,在相同有效围压条件下,随着水合物饱和度的增大,沉积物应力—应变规律呈现出由应变硬化向应变软化转化的趋势;在相同的水合物饱和度条件下,随着有效围压的增大,沉积物的应力—应变规律呈现出由应变软化向应变硬化转化的趋势。沉积物应力—应变曲线的应变软化、应变硬化形态由有效围压、水合物饱和度共同控制。

石要红等^[22]通过试验证明,含水合物黏土沉积物三轴剪切过程中当轴向应变达到 6% 附近时,偏应力会出现明显的“平台期”,但图 1 所示中细砂松散沉积物并未观察到明显的应力“平台期”。此外,含水合物松散沉积物应力—应变曲线不存在明显的压密段,随着水合物饱和度的降低和有效围压的增大,弹性增长阶段减小,塑性屈服段变长,这与含水合物烧结岩样的测试结果完全不同^[21]。上述现象

说明,沉积物本身的矿物组成、粒度分布、固结程度等因素的差异可能导致应力—应变规律出现非常大的差异,因此亟需建立统一的测试标准和方法,从而增强不同研究成果间的可对比性。这也是本文采用去泥质处理的纯天然海砂模拟水合物赋存介质的根本原因。文献[27]已利用含水合物松散沉积物损伤统计本构对轴向应变—偏应力关系进行了详细描述,以下仅讨论体积应变、侧向应变的演化规律。

3 轴向应变—体积应变关系分析

3.1 轴向应变—体积应变模型

图 2(a)、图 2(b)中实线分别为一定有效围压、水合物饱和度条件下含水合物松散沉积物典型轴向应变—体积应变关系试验测试结果。其中体积应变为正表示剪缩,为负表示剪胀。

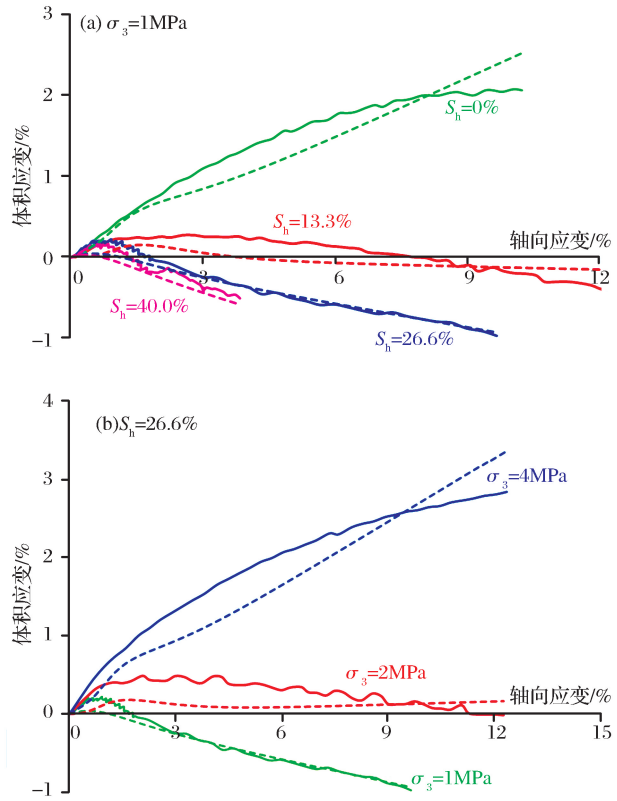


图 2 轴向应变—体积应变试验值(实线)与计算值(虚线)对比

Fig.2 Experimental(solid lines) and calculated(broken lines) axial strain VS volumetric strain relationships of unconsolidated hydrate-bearing sediments

由图 2(a)可知,在相同的有效围压条件下(1MPa),高水合物饱和度的沉积物首先发生轻微的剪缩,之后迅速发生改变,表现出明显的剪胀现象。随着水合物饱和度的降低,沉积物体积应变由正转

负,的临界点对应的轴向应变增大,这说明水合物饱和度的降低可能导致沉积物剪缩性增强,剪胀性变差;图 2(b)表明,当水合物饱和度相同(26.6%)时,低围压下沉积物体积先轻微减小,之后很快发生改变,体积开始增大;高围压条件下沉积物体积逐渐减小,最终趋于稳定。这说明随着有效围压的增强,含水合物沉积物剪缩性增大,剪胀性降低。上述体变规律与图 1 得到的结论对应:有效围压越高,水合物饱和度越低,沉积物剪缩性越显著,应力应变曲线表现为应变硬化型,反之则沉积物表现为应变软化破坏趋势。

为了进一步阐述含水合物松散沉积物发生应变硬化、应变软化的机理及其转化临界条件,本文提出用下式(6)拟合图(2)中的轴向应变—体积应变关系曲线,拟合结果如图 2 中虚线所示。

$$\epsilon_v = \frac{\ln(\epsilon_a^n + 1)}{\exp(\epsilon_a)} + \beta \times \epsilon_a \quad (6)$$

式中: ϵ_v 、 ϵ_a 分别为含水合物松散沉积物的体积应变、轴向应变值,%; n 为与体积应变“极大值”和沉积物初始孔隙比有关的参数,本试验采用固定初始孔隙比(53%)沉积物,因此暂时不考虑初始孔隙比变化对 n 值的影响; β 为与应力—应变曲线软、硬化破坏形式相关的参数,可以通过非线性最小二乘拟合方法确定不同试验条件下 n 、 β 的取值。

图 3 中数据点分别为不同试验条件下用(6)式拟合轴向应变—体积应变测试结果得到的模型参数取值,由图可知,随着水合物饱和度的增大和有效围压的减小, β 、 n 值均减小。通过线性最小二乘回归得到 n 、 β 值的计算模型分别为:

$$\begin{aligned} \beta &= 0.074\,5 - 0.874\,8 \times S_h + 0.103\,9 \times \sigma_3 \\ n &= 3.825 - 10.26 \times S_h + 1.027 \times \sigma_3 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: S_h 为水合物饱和度,%。

3.2 模型参数物理意义探讨

含水合物松散沉积物轴向应变—体积应变模型参数 β 、 n 是影响其曲线形态的根本因素。为了探讨模型参数物理意义及其对曲线形态的影响规律,笔者模拟对比了不同 β 、 n 条件下的轴向应变—体积应变关系曲线。

图 4 为其他参数固定条件下含水合物松散沉积物轴向应变—体积应变曲线随 β 值的变化规律。

由图 4 可知, β 值是沉积物发生应变软化、应变硬化 2 种不同破坏形式的绝对控制因素。当 $\beta > 0$ 时,体积应变随着轴向应变的增大而增大,沉积物被压缩,应力应变曲线形态表现为应变硬化破坏趋势;

当 $\beta < 0$ 时,随着轴向应变的增大,沉积物被压胀,相应的应力应变曲线表现为应变软化破坏形态。当 $\beta = 0$ 时,随着轴向应变的增大,沉积物破坏前发生略微的剪缩效应,破坏后产生的轴向应变被侧向应变抵消,呈理想塑性变形状态。

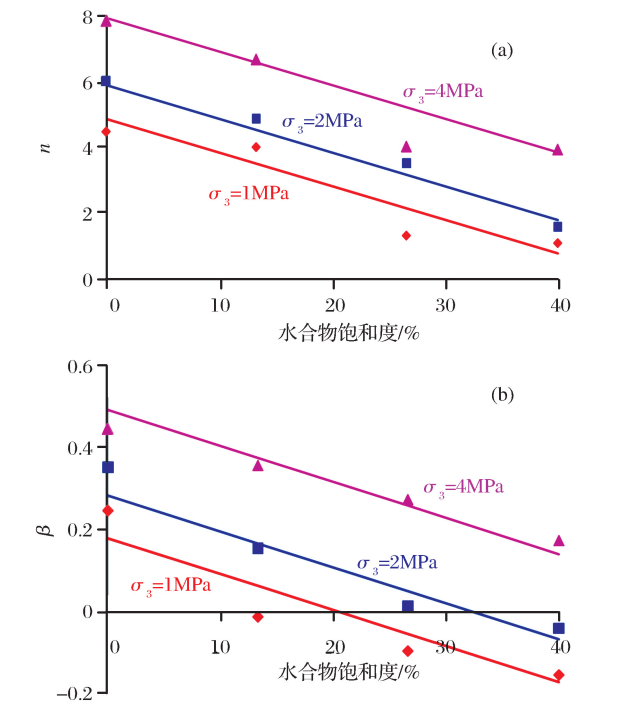


图 3 轴向应变—体积应变模型参数变化规律
Fig.3 Model coefficients of axial strain VS volumetric strain relationship

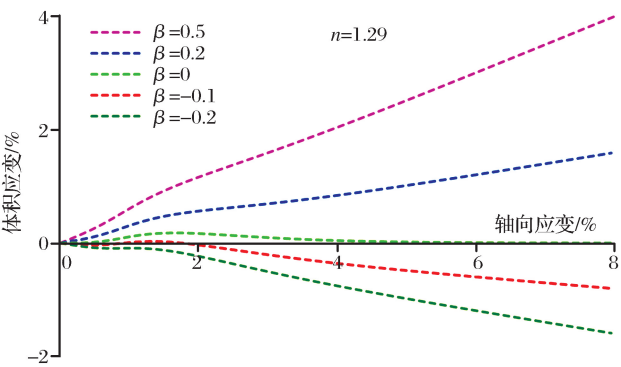


图 4 β 对轴向应变—体积应变曲线形态的影响规律模拟结果
Fig.4 Theoretical volumetric and axial strain simulation curves at different β values

图 5 为其他参数固定条件下含水合物松散沉积物轴向应变—体积应变曲线随 n 值的变化规律。通过对比分析可知,无论沉积物表现为应变硬化破坏还是应变软化破坏, n 值对沉积物破坏后的轴向应变—体积应变曲线形态影响较小,其主要影响的

是沉积物发生破坏之前的曲线形态; $\beta > 0$ 条件下, n 值越大,曲线“极大值”对应的轴向应变越大;在曲线达到“极大值”之前,当轴向应变 $\epsilon_a < 1\%$ 时, n 值越大,体积应变速率越小;在轴向应变 $\epsilon_a > 1\%$ 时, n 值越大,体积应变速率越大。在 $\beta < 0$ 条件下, n 值越大,曲线“极大值”和体积应变由正转负对应的横坐标值越大,即由被压缩向被压胀转化的临界轴向应变值越大。

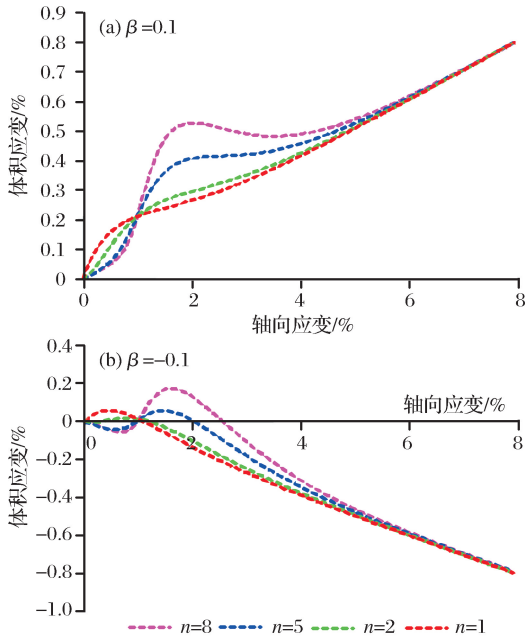


图5 n 值对轴向应变—体积应变曲线影响规律模拟结果

Fig.5 Theoretical volumetric and axial strain simulation curves at different n values

3.3 应变软化—应变硬化临界状态模型

由上述分析可知, β 值是含水合物松散沉积物发生应变软化、应变硬化2种不同破坏形式的绝对控制因素。当 $\beta > 0$ 时,应力应变曲线表现为应变硬化特性;当 $\beta < 0$ 时,应力应变曲线表现为应变软化特性。因此 $\beta = 0$ 对应的水合物饱和度、有效围压即为含水合物松散沉积物发生应变硬化、应变软化的临界点。即:

$$S_h |_{\text{critical}} = (0.086 + 0.12 \times \sigma_3) \times 100\% \quad (8)$$

式(8)对应的函数关系在水合物饱和度—有效围压平面内的曲线称之为含水合物沉积物发生应变软化、应变硬化破坏形式的临界状态线(图6)。临界状态线左上方为应变硬化区间,右下方为应变软化区间。如果沉积物初始状态处于应变软化区间,则三轴剪切过程中应力应变曲线表现为应变软化破坏形态;如果沉积物初始状态处于应变硬化区间,则三轴剪切过程中应力应变曲线表现为应变硬化破坏

形态。图6中数据点为本文试验中使用的试样初始条件数据,由图可知,模型预测结果与试验结果吻合较好。

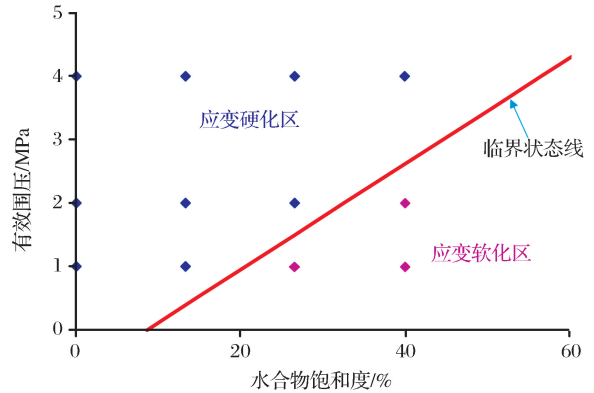


图6 含水合物松散沉积物破坏形式识别图版

Fig.6 Identification chart for failure mode of unconsolidated hydrate-bearing sediments

由于上述模型中各系数是利用相同骨架沉积物作为水合物赋存介质拟合得到的,因此不能反映不同初始孔隙比、矿物组成等复杂条件下的软、硬化转换临界条件。为使上述临界状态线方程预测结果具有普遍意义,式(8)可以改写为:

$$S_h |_{\text{critical}} = (a_1 + b_1 \times \sigma_3) \times 100\% \quad (9)$$

式中:模型参数 a_1 、 b_1 可通过相同沉积物不同试验条件下的轴向应变—体积应变数据根据式(6)拟合得到。需要说明的是,由于目前尚缺乏不同温度条件下含水合物松散沉积物三轴剪切试验数据,上述临界状态模型未考虑温度条件的影响,这将是后续主要研究方向之一。

4 轴向应变—侧向应变关系分析

4.1 轴向应变—侧向应变模型

简单起见,此处仅选取典型试验($\sigma_3 = 1\text{MPa}$ 、 $S_h = 26.6\%$)条件下的轴向应变—侧向应变关系曲线进行分析,试验结果分别如图7(a)、图7(b)实线所示,图中侧向应变始终为负,表明三轴剪切过程中松散沉积物侧向处于压胀状态;在较小轴向应变范围内,轴向应变—侧向应变曲线呈线性变化规律,随着轴向应变的增大,线性变化趋势减弱。当试样所承受的有效围压相同时[图7(a)],水合物饱和度越大,轴向应变—侧向应变曲线斜率的绝对值越大,即侧向膨胀速率越大。当沉积物中水合物饱和度相同时[图7(b)],有效围压越大,侧向膨胀速率越小。

Miyazaki等^[25]提出用式(10)模拟含水合物沉

积物侧向应变规律：

$$\epsilon_l = -f \times \epsilon_a^2 - g \times \epsilon_a \quad (f > 0, g > 0) \quad (10)$$

式中： f 、 g 为模型参数，可以通过最小二乘拟合确定不同试验条件下轴向应变—侧向应变数据对应的 f 、 g 值。

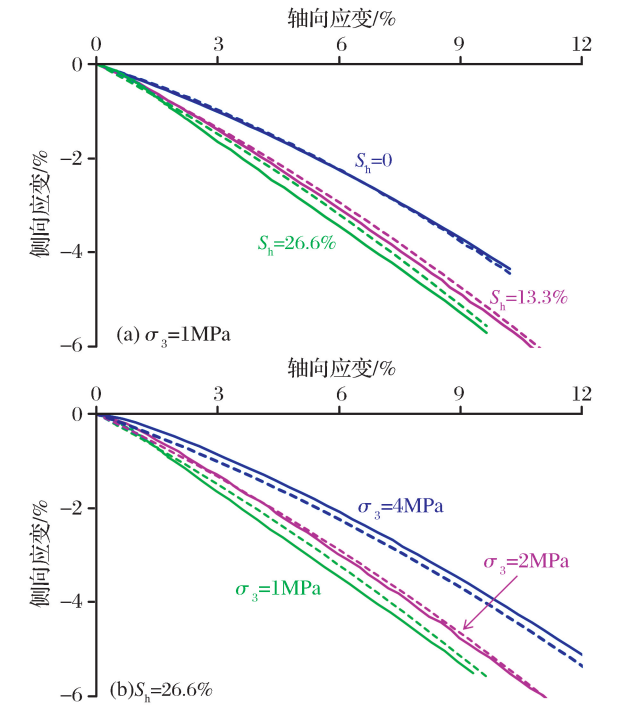


图 7 轴向应变—侧向应变试验值(实线)与计算值(虚线)对比
Fig.7 Experimental(solid lines)and calculated(broken lines) axial strain VS lateral strain relationships of unconsolidated hydrate-bearing sediments

图 8(a)中数据点分别表示不同试验条件下 f 、 g 值拟合结果。由图可知， f 值随着有效围压和含水合物饱和度的变化较小，本文直接取 $f = 0.012$ ； g 值随有效围压的增大而减小，随水合物饱和度的增大而增大，通过非线性最小二乘回归得到 g 与有效围压、水合物饱和度的关系可用式(11)表示：

$$g = a_2 \times S_h^{n_2} + b_2 \times \sigma_3 + c_2 \quad (11)$$

式中： n_2 、 a_2 、 b_2 、 c_2 为模型参数， $a_2 = -0.2887$ ， $b_2 = -0.0536$ ， $c_2 = 0.3566$ ， $n_2 = 0.4543$ 。

式(11)的模拟结果如图 8(b)实线所示。将 f 、 g 值的计算结果代入式(10)即可得到不同试验条件下含水合物沉积物侧向应变随轴向应变的演化规律，模拟结果如图 7 中虚线所示。由图可知，本文拟合得到的含甲烷水合物松散沉积物轴向应变—侧向应该关系曲线与实测结果拟合较好。

4.2 模型参数物理意义探讨

轴向应变—侧向应变曲线斜率的绝对值表示含

水合物沉积物三轴剪切过程中的切线泊松比，可用式(10)求导得到：

$$\mu_t = -\frac{d\epsilon_l}{d\epsilon_a} = 2f \times \epsilon_a + g \quad (12)$$

当 $\epsilon_a = 0$ 时，即可得到含水合物沉积物的初始泊松比：

$$\mu_i = -\left.\frac{d\epsilon_l}{d\epsilon_a}\right|_{\epsilon_a=0} = g \quad (13)$$

因此图 8(b)所示 g 值的变化规律即为含甲烷水合物松散沉积物初始泊松比的变化规律，即随着有效围压的增大，含水合物松散沉积物初始泊松比降低，水合物饱和度对初始泊松比的影响存在临界值(5%~6%)，在该临界值以下，初始泊松比随着水合物饱和度的增大上升较快，当水合物饱和度超过该临界值以后，初始泊松比随饱和度的增大变化幅度较小。含水合物松散沉积物起始泊松比整体处于 0.19~0.48 之间。

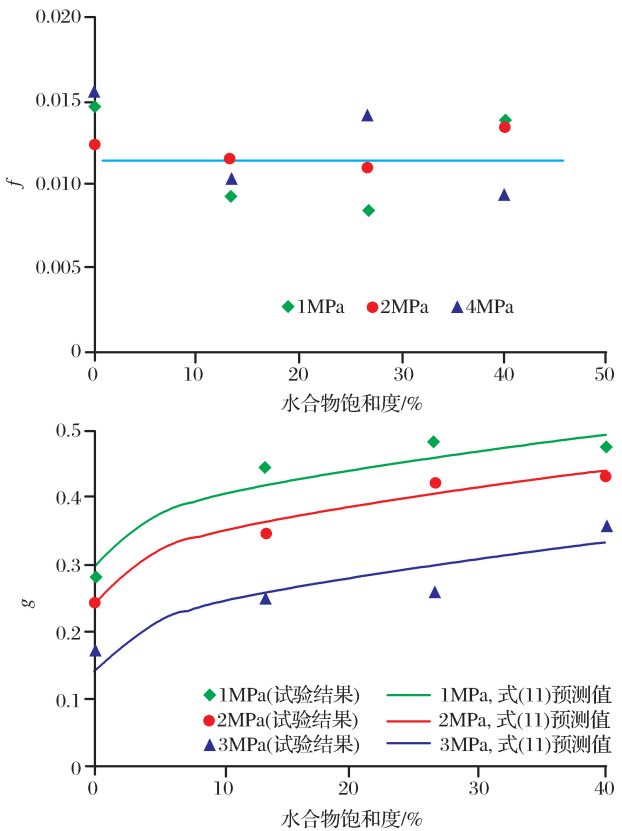


图 8 模型系数 f 、 g 随水合物饱和度和围压的变化曲线
Fig.8 f 、 g variation with hydrate saturation and confining pressure

5 结论

(1)随着水合物饱和度的增大和有效围压的减小，沉积物应力应变曲线呈现出由应变硬化向应变

软化转化的趋势;沉积物轴向应变—体积应变关系模型参数 n 、 β 对沉积物应力—应变曲线的影响机理不同, n 主要影响曲线的“极大值”, β 对沉积物软、硬化破坏形式起决定性作用,当 $\beta > 0$ 时,沉积物表现为应变硬化破坏规律;当 $\beta < 0$ 时,沉积物表现为应变软化破坏规律。当 $\beta = 0$ 是含水合物松散沉积物应变软化、应变硬化破坏形式转化的临界条件。

(2) 含水合物松散沉积物轴向应变—侧向应变曲线形态受有效围压、水合物饱和度等因素的共同控制,曲线斜率绝对值表示切线泊松比的变化规律;随着有效围压的增大和水合物饱和度的降低,相同轴向应变条件下的切线泊松比、初始泊松比均降低,含水合物松散沉积物起始泊松比整体处于 0.19~0.48 之间。

(3) 由于试验数据的限制,本文建立的含水合物松散沉积物轴向应变—体积应变、轴向应变—侧向应变以及软、硬化破坏临界条件预测模型均未考虑温度、剪切速率等因素的影响,模型中暂时未考虑泥质、细粉砂等因素的影响,需要在后续工作中进一步完善,从而增强模型的工程实践意义。

参考文献(References)

- [1] Ye Yuguang, Liu Changling. Natural Gas Hydrates Experimental Techniques and Their Applications[M]. Germany: Springer, 2013; 3-10.
- [2] Winters W J, Waite W F, Mason D H, *et al.* Methane gas hydrate effect on sediment acoustic and strength properties[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2007, 56(s1-3): 127-135.
- [3] Winters W J, Wilcox-Cline R W, Long P, *et al.* Comparison of the physical and geotechnical properties of gas-hydrate-bearing sediments from offshore India and other gas-hydrate-reservoir systems[J]. Marine & Petroleum Geology, 2014, 58: 139-167.
- [4] Hyodo M, Nakata Y, Yoshimoto, *et al.* Shear behavior of methane hydrate-bearing sand[C]//Proc. 17th Int. Offshore and Polar Engineering. Conference. Lisbon: The International Society of Offshore and Polar Engineers, Portugal, 2007: 1326-1333.
- [5] Hyodo M, Li Y, Yoneda J, *et al.* Effects of dissociation on the shear strength behaviour of methane hydrate-bearing sediments[J]. Marine & Petroleum Geology, 2013, 51(2): 52-62.
- [6] Masui A, Haneda H, Ogata Y, *et al.* Mechanical properties of sandy sediment containing marine gas hydrates in deep sea offshore Japan[J]. Journal of Management, 2007, 26(5): 839-861.
- [7] Yoneda J, Masui A, Konno Y, *et al.* Mechanical behavior of hydrate bearing pressure core sediments visualized under triaxial compression[J]. Marine & Petroleum Geology, 2015, 66: 451-459.
- [8] Priest J A, Clayton C R I, Rees E V L. Potential impact of gas hydrate and its dissociation on the strength of host sediment in the Krishna- Godavari Basin[J]. Marine & Petroleum Geology, 2014, 58: 187-198.
- [9] Yun T S, Santamarina J C, Ruppel C. Mechanical properties of sand, silt, and clay containing tetra-hydrofuran hydrate[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007, 112(B4): 93-101.
- [10] Lu Xiaobin, Wang Li, Wang Shuyun, *et al.* Triaxial test on THF Hydrate-bearing Sediment[C]//Ocean Engineering Society of China. 13th China national ocean science symposium. Beijing: China Ocean Press, 2007: 681-684. [鲁晓兵, 王丽, 王淑云, 等. 四氢呋喃水合物沉积物力学性质研究[C]//中国海洋工程学会. 第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2007: 681-684.]
- [11] Zhang Xuhui, Lu Xiaobing, Wang Shuyun, *et al.* Experimental study of static and dynamic properties of tetrahydrofuran hydrate-bearing sediments[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(supplement1): 303-308. [张旭辉, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 四氢呋喃水合物沉积物静动力学性质试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1): 303-308.]
- [12] Zhang Xuhui, Wang Shuyun, Li Qingping, *et al.* Experimental study of mechanical properties of gas hydrate deposits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3069-3074. [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[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3069-3074.]
- [13] Liu Fang, Kou Xiaoyong, Jiang Mingjing, *et al.* Triaxial shear strength of synthetic hydrate-bearing sediments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1565-1572. [刘芳, 寇晓勇, 蒋明镜, 等. 水合物沉积物强度特性的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1565-1572.]
- [14] Yan Rongtao, Wei Changfu, Wei Houzhen, *et al.* Effect of hydrate formation on mechanical strength of hydrate bearing sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1234-1240. [颜荣涛, 韦昌富, 魏厚振, 等. 水合物形成对含水合物砂土强度影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1234-1240.]
- [15] Yan Rongtao, Wei Changfu, Fu Xinhui, *et al.* Influence of occurrence mode of hydrate on mechanical behavior of hydrate-bearing soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 4115-4122. [颜荣涛, 韦昌富, 傅鑫晖, 等. 水合物赋存模式对含水合物土力学特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 4115-4122.]
- [16] 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[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 198-203. [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[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 198-203.]
- [17] Li Yanghui, Song Yongcheng, Liu Weiguo, *et al.* Temperature

- and shear rate influences on hydrate-bearing soils[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2012, 35(1): 50-53. [李洋辉, 宋永臣, 刘卫国, 等. 温度和应变速率对水合物沉积物强度影响试验研究[J]. *天然气勘探与开发*, 2012, 35(1): 50-53.]
- [18] Li Yanghui, Song Yongcheng, Yu Feng, *et al.* Effect of confining pressure on mechanical behavior of methane hydrate-bearing sediments [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(5): 637-640. [李洋辉, 宋永臣, 于锋, 等. 围压对水合物沉积物力学特性的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(5): 637-640.]
- [19] Yu Feng, Song Yongcheng, Li Yanghui, *et al.* A study on stress-strain relations of methane hydrates [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(4): 687-692. [于锋, 宋永臣, 李洋辉, 等. 含冰甲烷水合物的应力与应变关系[J]. *石油学报*, 2011, 32(4): 687-692.]
- [20] Li Lingdong, Cheng Yuanfang, Sun Xiaojie, *et al.* Experimental sample preparation and mechanical properties study of hydrate bearing sediments [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2012, 36(4): 97-101. [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[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2012, 36(4): 97-101.]
- [21] Sun Xiaojie, Cheng Yuanfang, Li Lingdong, *et al.* Triaxial compression test on synthetic core sample with simulated hydrate-bearing sediments [J]. *Petroleum Drilling Technics*, 2012, 40(4): 52-57. [孙晓杰, 程远方, 李令东, 等. 天然气水合物岩样三轴力学试验研究[J]. *石油钻探技术*, 2012, 40(4): 52-57.]
- [22] Shi Yaohong, Zhang Xuhui, Lu Xiaobing, *et al.* Experimental study on the static mechanical properties of hydrate bearing silty-clay in China South Sea [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(3): 521-528. [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.]
- [23] Liu Wentao, Shi Yaohong, Zhang Xuhui, *et al.* Geo-technical features of the seabed soils in the east of Xisha trough and the mechanical properties of gas hydrate bearing fine deposits [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2014, 34(3): 39-47. [刘文涛, 石要红, 张旭辉, 等. 西沙海槽东部海底浅表层土工地质特性及水合物细粒土力学性质试验[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(3): 39-47.]
- [24] Li Yanlong, Liu Changling, Liu Lele, *et al.* Key issues for triaxial test of hydrate-bearing sediment [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2016, 4(4): 279-285. [李彦龙, 刘昌岭, 刘乐乐, 等. 水合物沉积物三轴试验存在的关键问题分析[J]. *新能源进展*, 2016, 4(4): 279-285.]
- [25] Miyazaki K, Tenma N, Aoki K, *et al.* A nonlinear elastic model for triaxial compressive properties of artificial methane-hydrate-bearing sediment samples [J]. *Energies*, 2012, 5(10): 4057-4075.
- [26] Sun Zhongming, Zhang Jian, Liu Changling, *et al.* Study on the determination of methane hydrate saturation and mechanical properties of sediments containing methane hydrate [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, 28(6): 747-754. [孙中明, 张剑, 刘昌岭, 等. 沉积物中甲烷水合物饱和度测定及其力学特性研究[J]. *实验力学*, 2013, 28(6): 747-754.]
- [27] Li Yanlong, Liu Changling, Liu Lele. Damage statistic constitutive model of hydrate-bearing sediments and the determination method of parameters [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(10): 1273-1279. [李彦龙, 刘昌岭, 刘乐乐. 含水合物沉积物损伤统计本构模型及其参数确定方法[J]. *石油学报*, 2016, 37(10): 1273-1279.]

Triaxial shear test and strain analysis of unconsolidated hydrate-bearing sediments

Li Yan-long^{1,2}, Liu Chang-ling^{1,2}, Liu Le-le^{1,2}, Huang Meng^{1,3}, Meng Qing-guo^{1,2}

(1. The Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 3. Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Triaxial shear test is one of the effective ways to obtain strength parameters of hydrate-bearing sediment. Both volumetric strain and lateral strain were analyzed through triaxial shear test of unconsolidated hydrate-bearing sediments. A series of new semi-empirical equations were provided for axial-volumetric strain, axial-lateral strain and corresponding model parameters. Based on these analyses, critical failure mode prediction method was firstly provided. The results show that, in case of constant initial void ratio, failure mode of hydrate-bearing sediment is controlled by several parameters, such as effective confining pressure, hydrate saturation. The failure mode prediction method provided in this paper fits well with the experimental data. Furthermore, different model coefficients' effects on strain relationships are different, probing into the physical meaning of each coefficient is essential for further understanding of strain relationships.

Key words: Hydrate-bearing sediments; Triaxial shear test; Volumetric strain; Axial strain; Lateral strain