

# 天然气水合物岩样三轴力学试验研究

孙晓杰<sup>1,2</sup>, 程远方<sup>2</sup>, 李令东<sup>2</sup>, 崔 青<sup>2</sup>, 李清平<sup>3</sup>

(1. 天津中油渤星工程科技有限公司, 天津 300451; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 3. 中海油研究总院, 北京 100027)

**摘 要:** 天然气水合物是一种洁净、高效、资源量巨大的新型能源, 而天然气水合物的力学性质与水合物的钻探、海底地质灾害等密切相关, 因此, 开发天然气水合物需要了解其力学性质。为此, 用覆膜砂烧结成岩样, 采用原位合成方式制取不同水合物饱和度的水合物沉积物岩样, 利用自主研制的水合物原位测量系统, 在不同围压条件下研究了不同水合物饱和度的水合物沉积物岩样的力学性质。结果表明, 水合物沉积物岩样的抗压峰值强度随着围压、水合物饱和度的增大而增大, 内聚力随着水合物饱和度的增大而增大, 而泊松比、内摩擦角不随水合物饱和度变化。根据库伦-摩尔准则并结合试验结果建立了围压、水合物饱和度与含水合物岩样峰值强度的半经验数学模型, 可为深水水合物钻探所涉及的水合物强度参数的选取, 以及室内试验的理论分析及数值模拟提供一定的支持。

**关键词:** 天然气水合物 原位合成 力学性质 封闭压力 饱和度 数学模型

**中图分类号:** TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2012)04-0052-06

## Triaxial Compression Test on Synthetic Core Sample with Simulated Hydrate-Bearing Sediments

Sun Xiaojie<sup>1,2</sup>, Cheng Yuanfang<sup>2</sup>, Li Lingdong<sup>2</sup>, Cui Qing<sup>2</sup>, Li Qingping<sup>3</sup>

(1. Tianjin Bo-Xing Engineering Science & Technology Co., Ltd., CNPC, Tianjin, 300451, China; 2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China; 3. CNOOC Research Institute, Beijing, 100027, China)

**Abstract:** Natural gas hydrate is a new energy of clean, efficient and large amount of resources. The researches on mechanical properties of hydrate-bearing sediments is closely connected with hydrate drilling, geological hazards and many other aspects. Therefore, the developments of gas hydrate need to know the mechanical properties of the gas hydrate. For this reasons, coated sand in the laboratory was sintered into the test specimen, and then synthetic hydrate-bearing sediments with different saturation were made as the in-situ hydrate. A series of triaxial shear tests were carried out on artificial hydrate bearing sediments with different hydrate saturation and confining pressure. The testing results showed that with the increasing of confining pressure and hydrate saturation, the compressive peak strength was enhanced, and the cohesion also increased, but internal frictional angle and Poisson ratio have no remarkable change. According to the experimental results and Mohr-Coulomb Criterion, the semi-empirical mathematical model of the peak strength about different hydrate saturation and confining pressure was established, providing some supports for the selection of strength parameters of hydrate for deep-water hydrate drilling, and for the theoretical analysis and numerical simulation of laboratory experiments.

**Key words:** gas hydrate; in-situ synthesis; mechanical properties; confining pressure; saturation; mathematical model

## 1 概 述

大约 27% 陆地(主要在冻土层)及 90% 海域都含有天然气水合物<sup>[1]</sup>。据估计, 世界上天然气水合物的总能量约为煤、油、气总和的 2~3 倍, 因此, 开

收稿日期: 2011-08-17; 改回日期: 2012-06-29。

**作者简介:** 孙晓杰(1986—), 男, 山东昌邑人, 2008 年毕业于大庆石油学院过程装备与控制工程专业, 2011 年获中国石油大学(华东)油气井工程专业硕士学位, 主要从事岩石力学及水合物钻探方面的研究工作。

**联系方式:** (022)66310331, sxjbz2008@163.com。

**基金项目:** 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”课题 4“深水流动安全保障与水合物风险控制技术”子课题 11“水合物区钻探过程风险评价技术”(编号: 2008ZX05026-04-011)部分研究内容。

发天然气水合物对于缓解油气资源紧张的现状具有重大意义<sup>[2-3]</sup>,而开发天然气水合物首先需要了解天然气水合物岩样的力学性质。

W. J. Winters 等人<sup>[4]</sup>对水合物沉积物原状样和室内制备样进行了力学性质研究,得到了水合物沉积物的应力-应变关系和强度等力学指标,并通过声波测量和三轴剪切试验,研究了在沉积物的孔隙中充填水合物和冰时的声波特性,以及孔隙度对水合物强度的影响。

M. Hyodo 等人<sup>[5]</sup>对天然气水合物砂样进行了室内三轴试验研究,比较了砂样孔隙中不同水合物饱和度对试验砂样力学性质的影响,绘制了甲烷水合物砂样的力学性质与温度、有效围压和甲烷饱和度的关系图,分析了水合物分解过程中砂样体积应变的变化与有效围压和临界孔隙比的关系。

K. Miyazaki 等人<sup>[6]</sup>研究了不同围压对水合物沉积物力学性质的影响,采用 Toyoura 砂(平均颗粒直径为 230  $\mu\text{m}$ )合成水合物岩样,在 278 K 温度和 8 MPa 孔隙压力下采用 0.1%/min 的应变速率进行了试验,认为水合物沉积物岩样随着围压的增大,塑性增大,强度增大。

中国科学院的鲁晓兵等人<sup>[7]</sup>利用低温高压三轴试验仪对水合物沉积物进行了力学试验研究,研究对象主要是:实验室内合成的四氢呋喃水合物和用蒙古砂、空心砖作为骨架的水合物沉积物,得到了蒙古砂和空心砖的强度和应力-应变关系,四氢呋喃水合物和骨架填充形成的水合物沉积物的应力-应变曲线、强度以及水合物分解后沉积物的强度。

有关水合物沉积物力学性质研究的文献报道仅限于 W. J. Winters、M. Hyodo、K. Miyazaki 等人的室内试验研究,而且没有根据试验结果建立水合物力学性质与饱和度等的定量模型。深海水合物地层的力学强度受到弱化后,很容易引起储层的破坏,导致海底滑坡等地质灾害的发生以及生命财产损失<sup>[8-9]</sup>,所以开展水合物地层力学参数的研究显得非常重要。笔者进行了水合物三轴试验研究,得到水合物沉积物的弹性模量、泊松比、内聚力和内摩擦角等力学参数,并建立了水合物沉积物的抗压峰值强度与饱和度、围压的定量模型。

## 2 试验设备及试验步骤

在综合参考国内外关于水合物三轴试验装置的基础上<sup>[10-13]</sup>,自主研制了一套水合物原位测量试验

系统。该试验系统主要包括低温冷库系统、天然气水合物低温三轴试验机以及水合物原位合成系统。水合物原位合成系统如图 1 所示。

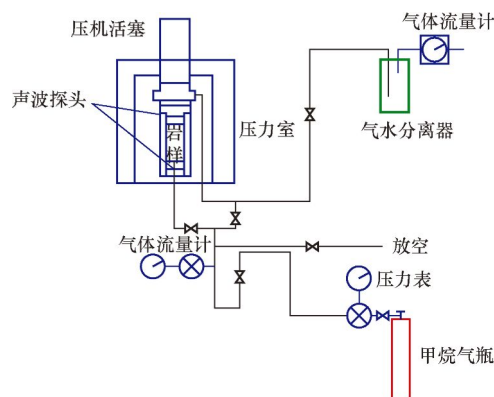


图 1 水合物原位生成系统

Fig. 1 Synthetic hydrate for in-situ system

试验采用 250~420  $\mu\text{m}$  的覆膜砂烧结岩样。250~420  $\mu\text{m}$  覆膜砂烧结岩样的制作步骤如下:

- 1) 先用电子天平称量 41 g 覆膜砂,将覆膜砂均匀倒入制样模具中,然后采用三轴试验机的轴压系统给制样模具加压,加压 20 MPa,加压时间为 5 min;
- 2) 将压实的模具放入功率为 3 kW 的高温烤箱中加热,温度设定为 300  $^{\circ}\text{C}$ ,加热 15 min 后取出模具;
- 3) 等到模具冷却后,将模具打开,取出烧结好的岩样,岩样尺寸为  $\phi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。

利用烧结好的岩样进行水合物原位合成,具体合成步骤如下:

- 1) 将覆膜砂烧结的岩心按照需要制取的水合物饱和度加入预定的蒸馏水<sup>[14-16]</sup>,然后放入冰箱冷冻 24 h,温度为 -20  $^{\circ}\text{C}$ ;
- 2) 拿出冰冻好的岩样,将岩样用橡胶套包裹好后装入三轴压力釜中,然后同步施加围压跟孔隙气压使围压达到 4.5 MPa,温度为 2  $^{\circ}\text{C}$ ,孔隙气压达到 4 MPa,保证围压高于孔压,从而可以保证橡胶套的气密性;
- 3) 采用两端供气,通过气体流量计读出甲烷气体的累积流量,当流量计的读数不再变化时稳定 24 h,水合物生成反应完成;
- 4) 水合物生成后,进行三轴试验测试。

甲烷气体与水生成水合物的反应化学方程式为:



式中:  $n$  为水合物系数,试验中取 5.75。

试验时,根据要制取的水合物饱和度预先加入一定质量的蒸馏水,反应釜温度和压力稳定在水合物反应区,由于气相过量,因此可认为所有注入的水完全反应。根据物质守恒定律,可以获得甲烷水合

物的物质的量,然后根据密度求得水合物体积,从而求得水合物的饱和度。

对于不同饱和度的水合物岩样在不同围压下进行三轴试验。水合物岩样原始数据见表 1。

表 1 水合物岩样原始数据

Table 1 Initial data of hydrate-bearing sediments

试验组号	岩样编号	直径/mm	高度/mm	质量/g	密度/(kg·L <sup>-1</sup> )	孔隙度, %	水合物饱和度, %
1	1-1	25	50.20	40.87	1.66	30.64	0
	1-2	25	50.00	40.88	1.67	30.37	0
	1-3	25	50.5	40.87	1.65	31.06	0
2	2-1	25	49.76	40.98	1.68	30.03	80.71
	2-2	25	50.20	41.05	1.67	30.64	80.13
	2-3	25	50.32	40.97	1.66	30.81	79.63
3	3-1	25	50.24	40.91	1.66	30.70	60.63
	3-2	25	49.44	40.93	1.69	29.58	60.32
	3-3	25	49.86	40.92	1.67	30.66	59.70
4	4-1	25	49.38	40.79	1.68	29.99	39.89
	4-2	25	50.00	40.91	1.67	30.85	39.49
	4-3	25	49.86	40.99	1.68	30.17	40.22

3 试验结果分析

试验时要保证冷库中的温度恒定,并根据水合

物的相图<sup>[17-18]</sup>将冷库中的温度设定在 2℃。这样可以消除温度对水合物性质的影响,亦可以消除结冰对水合物的影响。试验的加载方式采用位移控制方式,加载速率为 0.3 mm/min,结果见表 2。

表 2 水合物岩样的试验结果

Table 2 Experimental results of hydrate in core sample

试验组号	岩样编号	围压/MPa	水合物 饱和度, %	抗压峰值强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
1	1-1	5	0	21.53	2.18	0.25	3.56	22.21
	1-2	10		33.11	2.61	0.26		
	1-3	15		43.69	3.08	0.29		
2	2-1	5	80	26.09	3.63	0.23	4.69	23.67
	2-2	10		37.78	3.74	0.19		
	2-3	15		49.51	3.85	0.19		
3	3-1	5	60	23.69	2.05	0.22	4.25	23.57
	3-2	10		35.75	2.55	0.23		
	3-3	15		47.02	2.85	0.19		
4	4-1	5	40	22.87	2.84	0.18	3.97	21.10
	4-2	10		34.01	2.91	0.21		
	4-3	15		44.12	3.14	0.23		

抗压峰值强度是指岩样在围压作用下达破坏时所能承受的最大轴向压力。在进行三轴试验时,给岩样施加一个围压,然后增加垂向压力直至破坏,得到一个抗压峰值强度,根据摩尔-库伦准则可以得到一个破坏时的应力圆。采用相同岩样,改变围压,

施加垂向力直至破坏,得到另一抗压峰值强度,从而又得到一个破坏应力圆心。采用不同围压重复上述试验,可以得到数个应力圆,绘制这些应力圆的包络线,将其看作一条近似直线,该线在纵轴上的截距和该线与水平线的夹角,即为岩样的内聚力和内摩

擦角<sup>[19]</sup>。

图 2 为不同水合物饱和度岩心抗压峰值强度与围压的关系。从图 2 可以看出,水合物沉积物的抗压峰值强度随着围压的增大而增大,并且同一围压下饱和度越高峰值强度越高。图 3 为内聚力与水合物饱和度的关系。从图 3 可以看出,内聚力随着水合物饱和度的增大而增大,这主要是因为水合物的形成对骨架的颗粒之间有黏结强化作用,使相互间的咬合力增强,即抗摩擦能力增强。由表 2 可知,水合物岩心的泊松比为 0.18~0.29,与围压和饱和度之间没有明显的相关性。A. Masui 等人<sup>[20]</sup>对日本南海海槽地区钻取的原状水合物岩样和室内合成水合物砂样进行了三轴试验研究,结果表明:水合物沉积物的抗压强度随着水合物孔隙饱和度的增加而增大<sup>[20]</sup>,这与笔者试验结果相吻合。

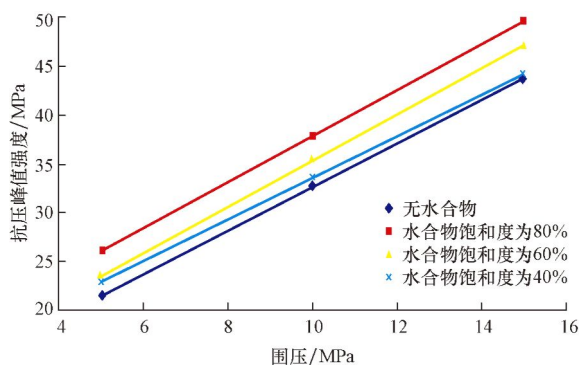


图 2 不同水合物饱和度岩心峰值强度与围压的关系

Fig. 2 Relationship between peak strength of core and confining pressure under different hydrate saturations

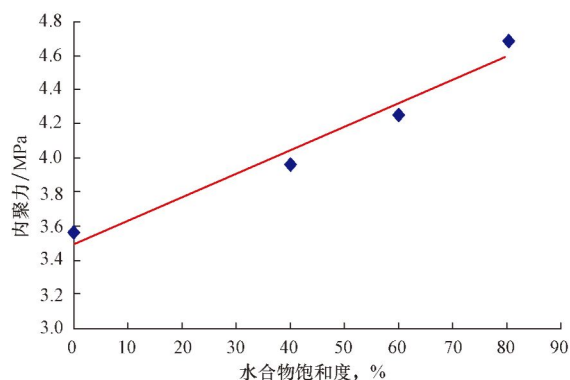


图 3 水合物岩样内聚力与水合物饱和度的关系

Fig. 3 Relationship between cohesion and hydrate saturation in core sample

图 4 为水合物岩样的莫尔圆。该图中给出了 3 组莫尔圆及 3 组莫尔圆的切线,切线与纵坐标轴的交点为岩样的内聚力,切线与横坐标轴的夹角为内摩擦角。从图 4 可以看出,水合物岩样的内聚力大

约为 4 MPa。

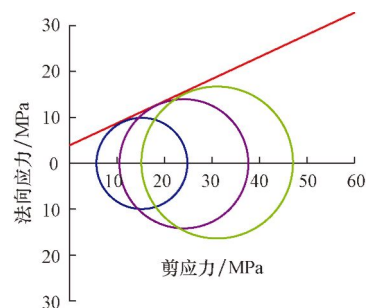


图 4 水合物沉积物莫尔圆

Fig. 4 Mohr circle of hydrate-bearing sediments

图 5 为水合物沉积物岩样的应力-应变曲线。从图 5 可以看出,水合物试样从加载变形到破坏大致经历压密段、弹性增长段、塑性屈服段和破坏段 4 个阶段。

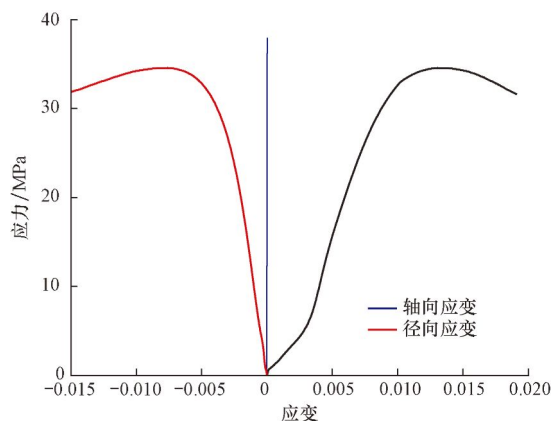


图 5 水合物沉积物应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of hydrate bearing sediments

1) 压密段。随着轴向压力的增大,沉积物岩样内的细微裂隙受压闭合,应力-应变曲线中表现为向下凹的曲线,总体看斜率较小,即较低的应力具有较大的压缩性。

2) 弹性增长段。应力-应变曲线表现为一条近似的直线,该阶段水合物沉积物岩样内的裂隙已经完全压缩。随着应力增大,应变近似线性增大。在该阶段沉积物岩样表现出良好的弹性。

3) 塑性屈服段。随着轴向荷载的进一步增大,应力-应变曲线表现为上凸的曲线,曲率不断减小但始终为正值。从弹性阶段过后,经过比较大的变形才进入了下一阶段,也就是说水合物沉积物试样的塑性比较好。

4) 破坏段。应力-应变曲线变为上凸的曲线,但曲率为负值,且很快到达破坏段;抗压强度降低比较慢,并不像脆性岩心一样呈现垂线向下的迅速



降低,这是因为虽然岩样破坏了,但是其孔隙里面存在的水合物还有一定的胶结作用,还能抵抗一部分压力。

#### 4 水合物抗压峰值强度与饱和度围压定量模型的建立

由摩尔-库伦准则可知,岩石被破坏时,剪切面上的剪应力  $\tau$  必须克服岩石的固有剪切强度  $c$  (亦称内聚力) 和作用于剪切面上的摩擦力  $\mu\sigma$ , 其表达式为:

$$|\tau| = c + \mu\sigma \quad (2)$$

式中:  $\mu$  为岩石的内摩擦系数。

采用图 6 所示计算内摩擦角与内摩擦系数之间的关系,其关系式为:

$$\tan \varphi = \mu \quad (3)$$

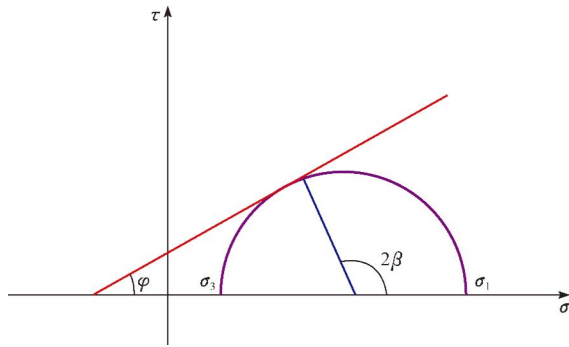


图 6 空间的摩尔-库伦准则

Fig. 6 Mohr-Coulomb Criterion

$\sigma_1$  为抗压峰值强度;  $\sigma_3$  为围压

从图 6 还可以看出:

$$|\tau| = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta \quad (5)$$

$\varphi$  与  $\beta$  的关系式为:

$$\varphi + \frac{\pi}{2} = 2\beta \quad (6)$$

将式(3)和式(4)代入式(1)得:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta &= c + \\ \mu \left[ \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta \right] \end{aligned} \quad (7)$$

将式(2)和式(5)代入式(6)得:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos \varphi &= c + \frac{1}{2}\tan \varphi(\sigma_1 + \sigma_3) - \\ \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\tan \varphi \sin \varphi \end{aligned} \quad (8)$$

式(7)两边同时乘以  $2\cos \varphi$ , 并整理得:

$$\sigma_1 = 2c \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (9)$$

由以上试验结果可知,内聚力随着甲烷水合物饱和度的增大而增大,而内摩擦角受水合物饱和度变化的影响不大,因而可以将内聚力  $c$  定义为水合物饱和度  $S$  的参数,内摩擦角  $\varphi$  可以视为不依赖于  $S$  的常量。摩尔-库伦准则可以描述为:

$$|\tau| = c_{(S)} + \mu\sigma \quad (10)$$

进一步整理式(9)得三轴抗压强度表达式:

$$\sigma_1(S, \sigma_3) = 2c_{(S)} \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (11)$$

单轴抗压强度  $\sigma_1(S, \sigma_3=0)$  的表达式为:

$$\sigma_1(S, \sigma_3=0) = 2c_{(S)} \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (12)$$

由于围压增大而增大的抗压强度  $\Delta\sigma(p_c)$  可以从三轴抗压强度减去单轴抗压强度得到:

$$\Delta\sigma(p_c) = \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (13)$$

式(13)不包含水合物饱和度,这表明由于围压增大而导致抗压峰值强度的增大是不依赖于水合物饱和度的。

不含水合物砂样的平均内聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  通过试验得到,  $c_{(S=0)} = 3.56 \text{ MPa}$ ,  $\varphi = 22^\circ$ 。

水合物沉积物(含水合物砂样)由于饱和度的改变而增加的抗压强度  $\Delta\sigma(S_c)$  由式(11)得到:

$$\Delta\sigma(S_c) = \sigma_1(S, \sigma_3) - \sigma_1(S=0, \sigma_3) =$$

$$2 \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} (c_{(S)} - c_{(S=0)}) \quad (14)$$

采用最小二乘法对上述试验结果进行拟合,得到  $\Delta\sigma(S_c)$  与水合物饱和度的关系:

$$\Delta\sigma(S_c) = aS^b \quad (15)$$

其中  $a = 6.4 \times 10^{-5}$ ;  $b = 2.5682$ 。

内聚力  $c$  可以由式(14)和式(15)求得:

$$c_{(S)} = \frac{1 - \sin \varphi}{2\cos \varphi} aS^b + c_{(S=0)} \quad (16)$$

把式(16)代入式(11)得到:

$$\sigma_1(S, \sigma_3) = 2 \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} c_{(S=0)} + aS^b + \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (17)$$

由式(17)可以看出,水合物沉积物抗压峰值强度可以描述为围压与水合物饱和度的函数。将  $c_{(S=0)} = 3.56 \text{ MPa}$ ,  $\varphi = 22^\circ$ ,  $a = 6.4 \times 10^{-5}$ ,  $b = 2.5682$  代入式(17),对表 2 中第 2 组、第 3 组和第 4 组岩样的抗压峰值强度进行了计算,结果见表 3。由表 3 可以看出,计算结果与试验结果基本吻合。

表 3 岩心抗内压峰值强度计算结果

Table 3 The calculation result of peak strength of core

试验组号	围压/MPa	水合物饱和度, %	峰值强度/MPa	
			试验结果	计算结果
2	5	80	26.09	26.48
	10		37.78	37.47
	15		49.51	48.46
3	5	60	23.69	23.9
	10		35.75	34.89
	15		47.02	45.88
4	5	40	22.87	22.35
	10		34.01	33.33
	15		44.12	44.32

## 5 结 论

1) 实验室模拟的水合物沉积物岩样泊松比较大, 抗压峰值强度偏低, 表现出很强的塑性。

2) 水合物沉积物的抗压峰值强度受水合物饱和度的影响较大, 其内聚力随着饱和度的增大而增大。

3) 推导出了水合物沉积物的抗压峰值强度与水合物饱和度和围压的半经验模型, 可为深水水合物钻探所涉及的水合物强度参数的选取、室内实验的理论分析及数值模拟提供一定的支持。

4) 建议对不同骨架原位生水合物的力学性质进行进一步的研究。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 张文亮, 贺艳梅, 孙豫红. 天然气水合物研究历程及发展趋势[J]. 断块油气田, 2005, 12(2): 8-10.
- [2] Zhang Wenliang, He Yanmei, Sun Yuhong. The course of study and the trend of development of natural gas hydrate[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2005, 12(2): 8-10.
- [3] 宁伏龙, 蒋国盛, 张凌, 等. 影响含天然气水合物地层井壁稳定性的关键因素分析[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(3): 59-61.
- [4] Ning Fulong, Jiang Guosheng, Zhang Ling, et al. Analysis of key factors affecting wellbore stability in gas hydrate formations[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(3): 59-61.
- [5] 白玉湖, 李清平, 赵颖. 参数模型对沉积物中水合物降压分解的影响[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(6): 11-17.
- [6] Bai Yuhu, Li Qingping, Zhao Ying. The effects of parameter model on the simulation of gas hydrate dissociation in porous media by depressurization[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(6): 11-17.
- [7] 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(8/9): 1221-1227.
- [8] Hyodo M, Nakata Y, Yoshimoto N, et al. Shear behavior of methane hydrate bearing sand: proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference Lisbon, Portugal, July 1-6, 2007[C].
- [9] Miyazaki K, Masui A, Sakamoto Y, et al. Effect of confining pressure on triaxial compressive properties of artificial methane hydrate bearing sediments: Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 3-6, 2010[C].
- [10] Lu Xiaobing, Wang Li, Wang Shuyun, et al. Study on the mechanical properties of the tetrahydrofuran hydrate deposit: proceedings of the Eighteenth (2008) International Offshore and Polar Engineering Conference Vancouver, BC, Canada, July 6-11, 2008[C].
- [11] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate change 2001: the scientific basis: contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. New York: Cambridge University Press, 2001.
- [12] Dickens G R, O'Neil J R, Rea D K, et al. Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene[J]. Paleoclimatology, 1995, 10(6): 965-997.
- [13] 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 and Engineering, 2007, 56(1/2/3): 127-135.
- [14] Clayton C R I, Priest J A, Best A I. The effects of disseminated methane hydrate on the dynamic stiffness and damping of a sand [J]. Geotechnique, 2005, 55(6): 423-434.
- [15] Winters W J, Dallimore S R, Collett T S, et al. Relation between gas hydrate and physical properties at the Mallik2L-38 research well in the Mackenzie Delta[J]. Annals New York Academy of Sciences, 2000, 912: 94-100.
- [16] 王淑云, 鲁晓兵, 张旭辉. 水合物沉积物力学性质的实验装置和研究进展[J]. 实验力学, 2009, 24(5): 413-419.
- [17] Wang Shuyun, Lu Xiaobing, Zhang Xuhui. Advances in the laboratory apparatus and research on mechanical properties of gas hydrate sediment[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(5): 413-419.
- [18] 任韶然, 刘建新, 刘义兴, 等. 多孔介质中甲烷水合物形成与分解实验研究[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 583-587.
- [19] Ren Shaoran, Liu Jianxin, Liu Yixing, et al. Experimental study on formation and dissociation of methane hydrate in porous media[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 583-587.
- [20] 范德江, 杨作升. 冲绳海槽天然气水合物的发育与分布[J]. 石油学报, 2004, 25(3): 11-17.
- [21] Fan Dejiang, Yang Zuosheng. Development and distribution of natural gas hydrate in the Okinawa Trough[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(3): 11-17.
- [22] 秦积舜, 李爱芬. 油层物理学[M]. 东营: 石油大学出版社, 2004: 111-113.
- [23] Qin Jishun, Li Aifen. Petroleum physics [M]. Dongying: Petroleum University Press, 2004: 111-113.
- [24] Suess E. The evolution of an idea: from avoiding gas hydrates to actively drilling for them[J]. Special Issue of the Joides Journal, 2002, 28, (1): 45-50.
- [25] Zhong Y, Rogers R E. Surfactant effects on gas hydrate formation[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55 (19): 4175-4187.
- [26] 楼一珊, 金业权. 岩石力学与石油工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 35-37.
- [27] Lou Yishan, Jin Yequan. Rock mechanics and petroleum engineering[M]. Beijing Petroleum Industry Press, 2006: 35-37.
- [28] Masui A, Haneda H, Ogata Y, et al. Effect of methane hydrate formation on shear strength of synthetic methane hydrate sediment: proceedings of the Fifteenth (2005) International Offshore and Polar Engineering Seoul, Korea, June 19-24, 2005[C].