

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211120004

## 孔隙液体相态对饱和砂土力学特性影响试验\*

季伟伟<sup>1,2</sup>, 杨庆<sup>1</sup>, 孔纲强<sup>2</sup>, 杨钢<sup>1</sup>, 徐洁<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 天然气水合物开采过程中, 水合物分解会引起沉积物孔隙液体相态变化, 降低海床的安全稳定性。基于低温、高压三轴试验仪, 以粉细砂土为骨架, 制备含冰/不含冰甲烷水合物沉积物试样以及饱和砂土试样, 开展三轴压缩试验, 分析饱和砂土中孔隙液体处于不同相态条件下试样的应力-应变和强度特性, 比较在剪切过程中孔隙水压力以及切线模量等参数变化。试验结果表明: 含冰/不含冰甲烷水合物沉积物以及饱和砂土的强度比值约为 2.6:1.7:1, 且均表现为应变硬化; 含冰水合物沉积物的结构性较其余两者相对更强, 即初始切线模量值相对更高; 但是在遭受剪切后结构均破坏, 切线模量迅速降低。

**关键词:** 相态变化; 砂土; 力学特性; 三轴试验

**中图分类号:** TU398<sup>+.9</sup> **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0871-07

## Triaxial Test on Mechanical Properties of Saturated Sand Influenced by Pore Liquid Phase State

Ji Weiwei<sup>1,2</sup>, Yang Qing<sup>1</sup>, Kong Gangqiang<sup>2</sup>, Yang Gang<sup>1</sup>, Xu Jie<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The decomposition of hydrate will cause changes in the pore liquid phase of the sediments during the process of natural gas hydrate mining, which reduces the safety and stability of the seabed. Based on the low temperature and high pressure triaxial test apparatus, using silt fine sand as the skeleton, the ice-containing/ice-free methane hydrate sediment samples and saturated sand samples were prepared, and the triaxial compression tests were carried out. The stress-strain and strength characteristics of the sample with different pore liquid phases were analyzed. The changes in parameters such as pore water pressure and tangent modulus during the shearing process were compared. The test results show that the strength ratio between ice-containing/ice-free methane hydrate sediments and saturated sand is about 2.6:1.7:1, and all three samples show strain hardening; the structure of the ice hydrate sediment is stronger than the others, which means a high initial tangent modulus of the ice hydrate sediment; but its tangent modulus decreases rapidly when the structure is destroyed after shearing.

**Keywords:** phase change; sand; mechanical properties; triaxial test

\* 收稿日期: 2021-11-20; 修回日期: 2021-12-09

基金项目: 海岸和近海工程国家重点实验室开放基金重点项目(LP21V2)资助

作者简介: 季伟伟(1996—), 男, 硕士研究生。主要从事能源岩土工程方面的研究。E-mail: wjihu@163.com

通讯作者: 孔纲强(1980—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事能源岩土工程方面的研究。E-mail: gqkong1@163.com

## 0 引言

天然气水合物(俗称可燃冰)是一种由水和甲烷气体在高压、低温条件下形成的类冰状的结晶化合物,储量巨大、清洁高效,被视作一种可代替石油等传统能源的潜在清洁能源<sup>[1]</sup>,主要分布于海洋及部分内陆湖的深水区,或冰点以上的永久冻土带(例如我国祁连山地区)<sup>[2]</sup>。水合物沉积物主要由水合物和土骨架组成,由于其赋存条件不同,如海底天然气水合物一般存在于高压(10 MPa以上)和低温(2℃~15℃)环境下<sup>[3]</sup>,而祁连山冻土区水合物储层位于冻土层以下的含冰沉积物冻土层<sup>[4-5]</sup>,埋深较浅,赋存所需的温度更低,沉积物孔隙中可能会存在气体、液体或者冰颗粒等多相介质混合<sup>[3]</sup>。

由于海底和陆地水合物开采过程均需要通过降压或者注热手段,改变其赋存状态。水合物分解容易导致水合物储层发生破坏,进而引发崩塌、滑坡等地质灾害,溢出的甲烷等气体会进一步加剧全球温室效应<sup>[4-5]</sup>。针对海底原状水合物岩芯试样或者室内合成试样,国内外学者利用三轴压缩试验,基于不同的制样方法,针对水合物的土体种类、围压、水合物饱和度、气体种类等参数,并基于形成、分解等过程,探究了水合物对沉积物强度特性及变形参数的影响规律<sup>[6-10]</sup>。对于陆地水合物储层,陈玉凤等<sup>[11]</sup>采用扫描电镜对祁连山冻土区天然气水合物储层微观结构进行了观测,获得了储层岩石的导热系数和热扩散率等参数;张旭辉等<sup>[9]</sup>在冰点以下生成甲烷水合物沉积物、四氢呋喃水合物、二氧化碳水合物和冰沉积物试样,并分别进行三轴压缩试验,试验结果发现冰的存在或水合物的种类对强度参数存在明显影响。

综上所述,既有研究主要针对不同赋存状态下的水合物沉积物展开试验及理论分析,但是对于不同相态下饱和砂土的力学特性对比分析仍相对较少。因此,本文制备了常规饱和砂土试样、冰点以上或以下的含冰/不含冰甲烷水合物沉积物试样,分别对其进行了三轴压缩试验,探索比较孔隙液体处于不同相态条件下试样的力学特性,以期工程实践提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试验设备

FRTR-1500高/低温高压差岩土静/动力学测试系统(图1)包括数字采集与控制器;孔压增压器;围压增压器气体循环控制系统;加载架、操作台及压力室;制冷和加热单元;水冷机;液压源;空压机(序号与图1中编号对用)。两套压力腔系统可以分别测试低温、高压岩土特性测试试验,可以模拟天然气水合物沉积物特性研究。天然气水合物沉积物特性测试部分单元构成包括:CCR制冷和加热单元、GCS-20气体循环单元、气体监测及声光报警单元。压力室为可容纳高度25~100 mm、高径比2.0的实心圆柱试样的不锈钢筒,可以控制应力/应变路径试验,B值反压饱和,固结试验,冻土及可燃冰相关试验。其主要技术参数见表1。

表1 仪器参数

Table 1 Instrument parameter table

	仪器参数	量程
轴向	轴向位移/mm	±50
	轴向荷载/kN	200
	内部荷载/kN	4.5
围压	围压位移/mm	±127
	围压/MPa	30
孔压	孔压位移/mm	±127
	孔压/MPa	30
温度	温度/℃	-30~80



图1 FRTR-1500高/低温高压差岩土静/动力学测试系统  
Fig.1 FRTR-1500 high/low temperature and high pressure differential geostatic/dynamic testing system

## 1.2 试验材料

选用砂土和甲烷气体作为试验材料。砂土具有良好的渗透性并且对孔隙水的吸附力不强,有助于水合物的快速生成。砂土比重2.67,试验试样控制孔隙率为0.4,相对密度为0.77,干密度为 $1.60 \text{ g/cm}^3$ 。试验所用砂土与南海海槽水合物富集区的砂级配相近<sup>[12]</sup>,粒径分布曲线如图2所示。

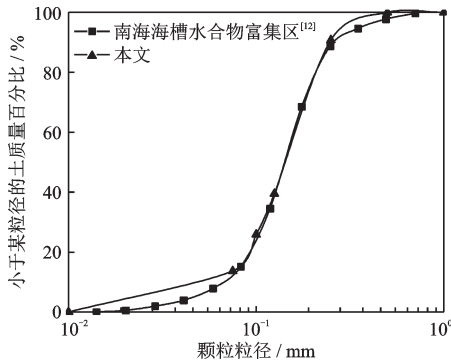


图2 砂土颗粒分布曲线

Fig.2 Gradation curves of the test sand

## 1.3 制样方法与过程

采用试样高度100 mm、直径50 mm的标准圆柱体,试验分别对3种不同相态的试样进行三轴剪切试验,操作步骤遵循《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)<sup>[13]</sup>。具体的装样步骤是:

(1)将过筛后的试样按所需级配配置完成,并置于 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干24 h。

(2)在下压头上橡皮膜,并套上标准规格的承模筒。

(3)将上述干砂分五次倒入并击实,降下轴向压杆直至接触,将橡皮膜固定在上压头上。

(4)抽去试样及管路内的空气及残留液体后降下压力室罩。

3种不同相态下砂土试样的制样方法分别为:

(1)饱和砂土试样:装样后,施加3 MPa反压对试样进行注水饱和(并保持围压大于反压0.5 MPa),保证砂样的孔压系数B达到95%以上。

(2)甲烷水合物沉积物试样( $1 \text{ }^\circ\text{C}$ ):借鉴魏厚振等<sup>[14]</sup>提出的海底扩散体系含天然气水合物沉积物制样方法,首先利用孔压增压器向气水混合罐内注水后,从气瓶向罐内通入甲烷气体,并保持一定气

压,使气水充分混合(溶气水为乳白色);而后利用气压将溶气水抽回孔压增压器内;将压力室温度控温到 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 并保持6 h后,将溶气水以3 MPa压力通入试样内(控制围压比孔压大0.5 MPa),直至平衡状态;最后升高压力室温度至室温使水合物分解后,再降温至 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,生成水合物,经过冻融循环后,可使水合物分布更为均匀。

(3)甲烷水合物沉积物试样( $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ ):按(2)所述方法制备后,降温至 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,冻结试样,保持12 h。

## 1.4 三轴剪切条件

制备完成后,施加试验条件,调整压力状态为4 MPa围压及3 MPa孔压进行固结,持续24 h。固结完成后,关闭排水阀,以 $0.1\%/ \text{min}$ 的剪切速率进行剪切。试验过程应力路径如图3所示。

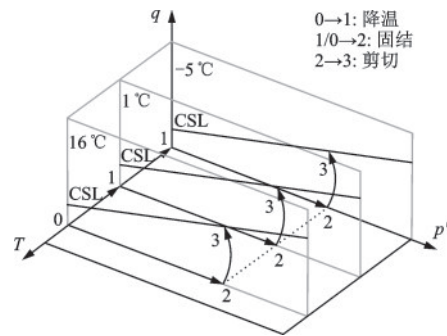


图3 应力路径

Fig.3 Stress path diagram

表2 试验条件

Table 2 Experimental program

编号	$\sigma_3/\text{MPa}$	$u/\text{MPa}$	$T/^\circ\text{C}$	$\sigma_3'/\text{MPa}$
S1	4	3	16	1
H1	4	3	1	1
H2	4	3	-5	1

注:净围压 $\sigma_3' = \sigma_3 - u$ ,  $\sigma_3$ 为围压, $u$ 为孔压; $T$ 为试样温度

## 2 试验结果与分析

### 2.1 应力-应变关系

不同孔隙液体相态条件下砂土的应力-应变曲线及有效应力路径分别如图4及图5所示。如图4所示,H2、H1和S1试样的强度分别为4.2、2.7和1.6 MPa,三者的比例系数约为2.6:1.7:1.0。

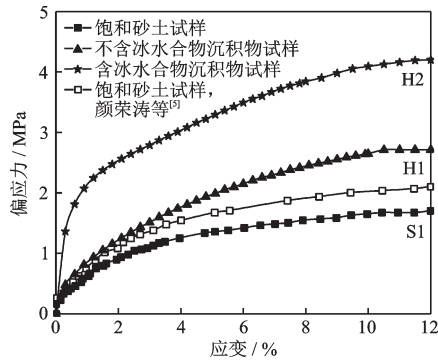


图4 应力-应变关系曲线

Fig.4 Curves on stress and strain

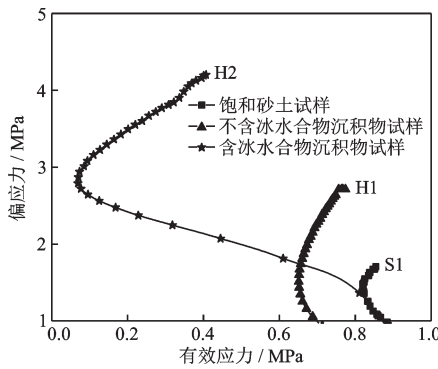


图5 有效应力路径

Fig.5 Effective stress path

在 $-5^{\circ}\text{C}$ 温度环境中赋存的含冰水合物沉积物试样,冻土应力-应变关系曲线保持为硬化型,曲线应力随应变持续增长,最终趋于平缓; $1^{\circ}\text{C}$ 环境中的不含冰水合物沉积物试样与饱和砂土试样同样表现为应变硬化。随着应变的增大,当试样S1、H1和H2的轴向应变分别不大于 $0.6\%$ 、 $0.1\%$ 及 $0.06\%$ 时,试样的轴向偏应力随着轴向应变的增大几乎线性增大。随着轴向应变的不断增大,试样偏应力的增长速率逐渐减缓,表现为应力-应变曲线的斜率逐渐降低。这可能是因为相较于饱和砂土内水分子与砂颗粒间形成的凝聚力,水合物在砂土内生成时,主要分布于土颗粒表面,对土颗粒形成了胶结作用,强度增大,而在水合物沉积物在 $-5^{\circ}\text{C}$ 条件下,孔隙水发生冻结,其结构强度通常被认为由粒间分子键结力(范德华力),结构键结力和冰胶结键结力三种键结力组成,其中冰胶结键结力对冻结膨胀土强度起控制作用,胶结强度较水合物试样更大。

本文制备甲烷水合物沉积物试样的方法是在特定温压条件下,通入溶气水以形成水合物,从而填充土颗粒骨架。虽然此方法可以有效避免直接向试样中注入甲烷气体时,导致生成的水合物分布

不均匀问题,但是由于甲烷气体难溶于水,在通过此方法制样时,无法制备高饱和度水合物试样。颜荣涛等<sup>[5]</sup>研究了不同 $\text{CO}_2$ 水合物饱和度条件下,剪切速率为 $0.5\%/min$ 条件时,含 $\text{CO}_2$ 水合物砂在 $1\text{MPa}$ 强度下的强度特性,由表3可以看出,本文含甲烷水合物砂土试样的强度位于含 $\text{CO}_2$ 砂土水合物试样的饱和度为 $6.3\%$ 及 $12.6\%$ 之间,甲烷水合物饱和度相对较低。

表3 甲烷水合物沉积物试样强度对比

Table 3 Comparison of the strength of methane hydrate sediment samples

编号	气体种类	净围压 $\sigma_3'/\text{MPa}$	温度 $T/^{\circ}\text{C}$	饱和度 $Sh/\%$	强度 $\sigma/\text{MPa}$	文献来源
1	$\text{CH}_4$	1	1	/	2.7	本文
2	$\text{CH}_4$	1	$-5$	/	4.2	本文
3	$\text{CH}_4$	3	$-5$	44.0	5	刘芳等 <sup>[12]</sup>
4	$\text{CH}_4$	1	5	52.6	1.15	M. Hyodo
5	$\text{CH}_4$	3	5	52.3	2.72	等 <sup>[15]</sup>
6	$\text{CH}_4$	5	5	53.1	5.3	
7	$\text{CO}_2$	1	1	6.3	2.7	颜荣涛等 <sup>[5]</sup>
8	$\text{CO}_2$	1	1	12.6	4.2	

## 2.2 孔压-应变关系

剪切过程中试样处于不排水条件下,土颗粒间孔压增大,试样内部产生超静孔隙水压力。如图6所示,在剪切初期孔压随着应变的增加而不断增大,试样S1、H1、H2的孔压增量的最大值分别为 $0.18$ 、 $0.35$ 和 $0.92\text{MPa}$ ,含冰与不含冰水合物沉积物试样的孔压增量分别为饱和砂土试样的 $5.1$ 倍和 $1.9$ 倍。

$1^{\circ}\text{C}$ 条件下赋存的不含冰水合物沉积物内主要是由水合物晶体、液态水和砂颗粒组成, $-5^{\circ}\text{C}$ 时的

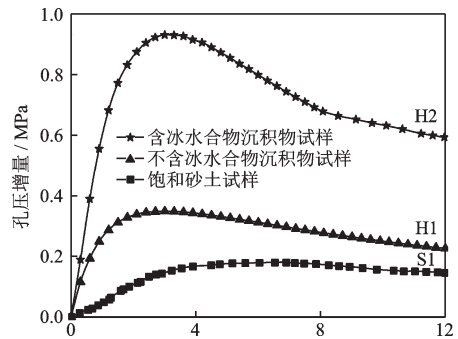


图6 孔隙水压力增量与应变关系曲线

Fig.6 Curves of pore pressure increment and strain

含冰水合物沉积物内主要由固态冰颗粒、水合物晶体及砂颗粒组成,孔隙内液态水在低温条件下形成了冰颗粒,因此后者的弹性模量大于前者,但此时孔隙内仍存在少部分自由水。饱和砂土在室温条件下仅由液态水与固态砂颗粒组成,弹性模量均小于前两者。

在相同试验条件下,剪切过程初期,含冰水合物沉积物固态部分占比较大,不易被压缩,孔隙水压力迅速增大;饱和砂土孔隙内均为液态水,可压缩体积大于含冰水合物沉积物,孔隙水压力增量较小;由于水合物晶体及液态水的存在,不含冰水合物沉积物弹性模量以及孔隙水压力增量均介于两者之间。

随着剪切应变的不断增大,孔隙水压力逐渐降低,并逐渐趋于平缓,三者的最终增量分别约为0.6、0.22和0.15 MPa。这可能是由于砂土的剪胀引起的,剪切过程中,密砂的颗粒间相互错动,导致体积膨胀,在当前阶段有吸水的趋势,原先压缩状态的水得到释放,孔隙水压力降低。

### 2.3 切线模量-应变关系

随着试样的剪切,试样的变形模量会不断发生变化,本文中用切线模量来进行表述。因为三轴剪切过程开始时,根据采集的数据计算初始切线模量

准确性较低,因此选取轴向应变为0.2%时的切线模量作为初始值。含冰/不含冰水合物沉积物试样以及饱和砂土试样的切线模量 $E_t$ 随着轴向应变的变化关系曲线如图7所示。通过比较3种试样的切线模量,可以确认相态对切线模量的影响程度。

砂颗粒与孔隙内容物会形成一定的结构性,使试样在剪切初期一段时间内颗粒间结构在遭受破坏时,土体结构发生大规模变化,切线模量急剧降低,直至结构破坏完全,切线模量趋近于0。在结构未遭受破坏时,含冰水合物沉积物试样的结构性比另外两者更为明显,初始切线模量远大于另外二者;饱和砂土由于颗粒间结构力最弱,初始切线模量最低。

随着剪切过程的发展,试样的切线模量从初始值不断减小,并逐渐趋近于0,此时强度逐渐趋于最大值。由图7可知,三者切线模量始终表现为正值,因此试样不存在应变软化现象。将本文试验所得的切线模量与J. M. Duncan等<sup>[15]</sup>提出的未胶结土的切线模量与应变关系经验公式的计算结果进行比较。

$$E_{tan} = E_0 \left( 1 + \frac{\epsilon_a}{\tau_{max}/E_0} \right)^{-2} \quad (1)$$

式中, $E_{tan}$ 为切线模量计算值; $\epsilon_a$ 为应变; $\tau_{max}$ 为抗剪强度; $E_0$ 为初始切线模量(本文中取轴向应变为0.2%时的切线模量)。

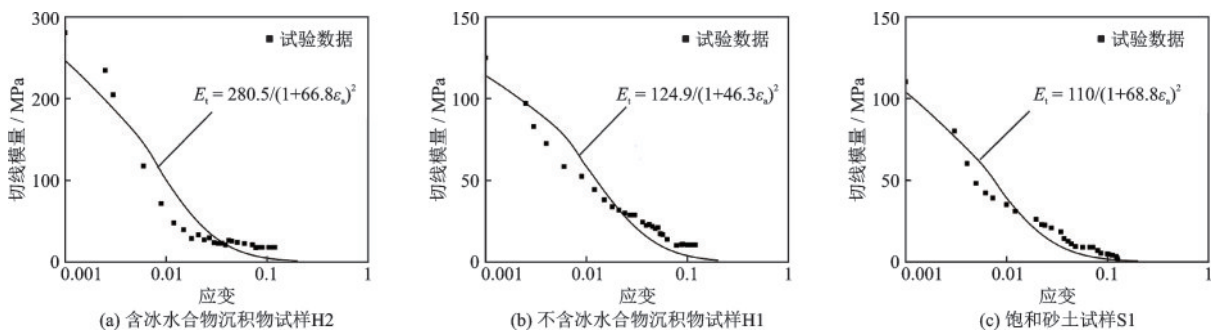


图7 切线模量与应变关系曲线

Fig.7 Curves of tangent modulus and strain

可以看出甲烷水合物沉积物试样与饱和砂土试样的试验数据与经验公式的计算结果一致性较好,砂土内部结构间胶结较少,与无胶结土比较相似。含冰水合物沉积物试样的实际切线模量在应变开始阶段的减幅明显小于计算结果,应变经过一定时间发展,两者逐渐接近。其强结构性使颗粒之间的胶结作用得到增强,在应变开始阶段可以保持

试样的结构性基本稳定,实际切线模量较计算结果明显偏高,而后随着应变的不断发展,颗粒间的胶结作用在荷载作用下受到破坏,实际切线模量迅速较低。

### 2.4 不同孔隙液体相态条件下砂土剪切机理分析

在剪切试验中,剪切会引起塑性体积变化,土

颗粒间的错动滑移、翻转引起的重新分布对水合物砂土的宏观表现具有直接影响。

本文饱和砂土试样土颗粒密实,施加的围压相对于砂土的松密程度约束较小,假设土体受剪方向为水平方向,剪切过程中部分颗粒上抬绕过前面的颗粒,进而产生错动滑移,一直处于剪胀状态。

利用本文方法制备的水合物沉积物试样,水合物饱和度含量较低,水合物晶体不能直接承受剪切力作用,仅作为胶结物胶结于砂土颗粒接触界面。剪切初期,剪切力不足以使胶结破坏,颗粒间错动、滑移现象不明显;随着剪切力的不断增大,颗粒间胶结遭到破坏,砂土颗粒发生相对滑移错动,试样表现为剪胀,直至出现剪切强度峰值。同时,相较于不含冰水合物沉积物试样,当试样温度在冰点以下时,液态水冻结为冰颗粒,可直接作为持力体存在,试样刚度变大,剪切强度峰值更高。

### 3 结 论

基于低温-高压三轴试验仪器,以粉细砂土为骨架,针对含冰/不含冰水合物沉积物试样以及饱和砂土试样进行三轴试验,分析了应力、孔隙水压力增量、切线模量等参数与应变关系曲线,本文试验条件下,可以得到以下结论:

(1)含冰/不含冰水合物沉积物试样以及饱和砂土试样均表现为应变硬化,含冰/不含冰水合物沉积物试样以及饱和砂土试样的强度比值约为2.6:1.7:1。

(2)砂土剪切过程表现为剪胀,孔隙水压力先急剧增大、后逐渐降低,含冰/不含冰水合物沉积物试样以及饱和砂土试样的孔隙水压力峰值比值约为4.0:1.5:1。含冰水合物沉积物试样的弹性模量值相对最高、饱和砂土的弹性模量值相对最低。

(3)含冰/不含冰水合物沉积物试样以及饱和砂土试样的初始切线模量比值约为2.55:1.14:1。含冰水合物沉积物试样的结构性相对更强,但是在遭受剪切后结构均破坏,切线模量迅速降低。

#### 参考文献:

[1] Ginsburg G D, Soloviev V A. Methane migration within the submarine gas-hydrate stability zone under deep-water conditions[J]. *Marine Geology*, 1997, 137(1): 49-57.

[2] 吴茂炳,王新民,李在光.天然气水合物的形成分布特征及其开发前景[J]. *中国石油勘探*, 2003, 8(2): 75-78.

Wu M B, Wang X M, Li Z G. The formation and distribution characteristics of natural gas hydrate and its development prospects[J]. *China Petroleum Exploration*, 2003, 8(2): 75-78. (in Chinese)

[3] 张旭辉,鲁晓兵,李鹏.天然气水合物开采方法的研究综述[J]. *中国科学:物理学/力学/天文学*, 2019, 49(3): 38-59.

Zhang X H, Lu X B, Li P. A comprehensive review in natural gas hydrate recovery methods[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2019, 49(3): 38-59. (in Chinese)

[4] 王平康,祝有海,卢振权,等.青海祁连山冻土区天然气水合物研究进展综述[J]. *中国科学:物理学/力学/天文学*, 2019, 49(3): 76-95.

Wang P K, Zhu Y H, Lu Z Q, et al. Research progress of gas hydrates in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai, Northwest China: Review [J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2019, 49(3): 76-95. (in Chinese)

[5] 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.

Yan R T, Wei C F, Wei H Z, et al. Effect of hydrate formation on mechanical strength of hydrate bearing sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(7): 1234-1240. (in Chinese)

[6] Miyazaki K, Tenma N, Aoki K, et al. Loading-rate dependence of triaxial compressive strength of artificial methane-hydrate-bearing sediment containing fine fraction[C]//The 22th International Offshore and Polar Engineering Conference. Greece: [s.n.], 2012.

[7] Hyodo M, Yoneda J, Yoshimoto N, et al. Mechanical and dissociation properties of methane hydrate-bearing sand in deep seabed[J]. *Soils and Foundations*, 2013, 53(2): 299-314.

[8] Hyodo M, Li Y H, Yoneda J, et al. Effects of dissociation on the shear strength and deformation behavior of methane hydrate-bearing sediments[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 51(3): 52-62.

[9] 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.

Zhang X H, Wang S Y, Li Q P, et al. Experimental

