

水合物沉积物三轴试验存在的关键问题分析*

李彦龙^{1,2,3}, 刘昌岭^{2,3†}, 刘乐乐^{2,3}, 黄萌^{2,4}, 孙建业^{2,3}, 李承峰^{2,3}

(1. 中国科学院天然气水合物重点实验室, 广州 510640;

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

4. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100)

摘要: 三轴剪切试验是获得含水合物沉积物强度参数最有效的途径之一。目前国内研究者从不同的角度进行了大量研究, 在某些关键科学问题上形成了共识, 但仍存在诸多科学问题需要业内同仁共同探讨。本文在充分调研国内外含水合物沉积物三轴力学测试成果的基础上指出: 由于缺乏统一的测试标准和规范, 目前国内含水合物沉积物三轴剪切试验仍存在不同研究成果横向可比较性差、经验模型通用性不足、测试结果与现场实际差距大等关键科学问题; 制样方法、粒度分布规律、沉积物本身固结程度、试验温度、剪切速率、气体类型、饱和度测量方法、试样尺寸等的差异是造成上述问题的关键因素。为了增强研究成果的指导意义, 笔者建议各研究者在发表研究成果的同时公布详细的测试方法和测试条件, 通过建立统一的行业标准来促进含水合物沉积物三轴剪切试验的发展, 从而为水合物资源的安全高效开采提供科学依据。

关键词: 天然气水合物; 水合物沉积物; 三轴试验; 力学特性; 强度参数

中图分类号: TK01; TE53

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2016.04.004

Key Issues for Triaxial Test of Hydrate-Bearing Sediment

LI Yan-long^{1,2,3}, LIU Chang-ling^{2,3}, LIU Le-le^{2,3}, HUANG Meng^{2,4},
SUN Jian-ye^{2,3}, LI Cheng-feng^{2,3}

(1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071,

Shandong, China; 3. The Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao

266071, Shandong, China; 4. Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China)

Abstract: Triaxial test is one of the effective and direct ways to obtain strength parameters of hydrate-bearing sediments. Current researches have reached consensus on some scientific issues, but there are still many critical problems left to be discussed. Extensive literature investigation shows that different research results are profoundly different, empirical models can't be used universally because of lacking of unified testing standard or method. There is still a gap between experimental results and mineral conditions. Difference of sample preparation method, particle size distribution, degree of consolidation, test temperature, shearing rate, gas type, hydrate saturation decision method and sample size are critical factors lead to the above problems. Thus, in order to strengthen guiding significance of test result, detailed experimental conditions and test method should be announced when publishing research papers. What's more, establishing a unified testing standard and method is extremely urgent for triaxial test of hydrate-bearing sediment.

Key words: gas hydrate; hydrate-bearing sediment; triaxial test; mechanical property; strength parameter

0 引言

天然气水合物是一种潜在替代能源^[1]。水合物储层基质属于未固结、弱固结或裂隙发育沉积物^[2], 水合物开采将引起地层胶结强度、孔隙度、有效应力的改变, 导致生产井出砂、地层沉降甚至产生滑

坡等地质灾害, 严重制约水合物资源的安全开发。我国海域天然气水合物储层属于非固结储层, 随着水合物的分解, 水合物对储层的充填和胶结作用降低, 当水合物完全分解后, 储层骨架结构消失, 储层完全处于松散状态, 可能引起严重出砂、井壁坍塌等工程安全问题。因此, 准确预测含水合物储层

* 收稿日期: 2016-05-03

修订日期: 2016-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(41606078, 41376078, 11402131); 中国科学院天然气水合物重点实验室开放基金(Y607ke1001)

† 通信作者: 刘昌岭, E-mail: qdliuchangling@163.com

的力学性质,揭示含天然气水合物沉积物的变形规律,可以有效避免工程灾害的发生,为天然气水合物的有效安全开发提供保障。

由于现场保压取心困难,目前对含水合物沉积物力学特性的研究主要是利用室内人工制得的含水合物沉积物试样进行试验。通过高压低温三轴仪进行剪切试验是获取含水合物沉积物力学参数最有效的方式。国外水合物沉积物三轴测试数据集中在 WINTERS (2007, 2014)^[3-4]、HYODO (2007, 2013)^[5-6]、MASUI 和 YONEDA (2007, 2015)^[7-8]、MIYAZAKI (2011, 2012)^[9-10]、PRIEST (2014)^[11]、SANTAMARINA (2007)^[12]等学者的研究报道中。国内鲁晓兵 (2007)^[13]等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 (2010, 2011)^[14-15]、颜荣涛 (2012, 2013)^[16-18]、李洋辉 (2011, 2012)^[19-21]、程远方 (2012)^[22-23]、石要红 (2014, 2015)^[24-25]等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,但目前仍存在许多问题。为此,本文将在充分调研国内外含水合物沉积物三轴剪切试验相关文献基础上,梳理目前含水合物沉积物三轴力学参数测试存在的主要问题及造成这些问题的原因,供业内同仁共同探讨,促进含水合物沉积物力学参数试验技术向前发展,增强三轴试验测试数据对工程实践的指导作用。

1 国内含水合物沉积物三轴试验存在的主要问题

为了对国内含水合物沉积物力学参数测试进行全面分析,笔者统计分析目前国内主要研究机构的研究成果,如表 1 所示。

不同研究成果主要在以下几个方面形成共识:(1)不同含水合物沉积物制样方法、水合物形成介质等因素是导致沉积物宏观强度参数差异的重要原因;(2)含水合物沉积物的三轴剪切强度随着水合物饱和度的增大而增大,水合物分解将导致沉积物强度降低;(3)含水合物沉积物三轴强度与试验条件相关,如温度、围压、加载速率、初始孔隙率等^[26]。

然而,纵观国内外相关的文献报道,目前水合物沉积物三轴试验相关的研究主要存在以下问题:

(1)定量角度很难形成共识。目前水合物沉积物三轴力学参数测试所形成的共识基本上停留在定

性表述上,而很难从定量的角度达成共识。如水合物饱和度对沉积物强度参数的影响规律,虽然不同的学者试图从自身试验角度出发建立强度参数随饱和度的动态变化规律,但因目前学者们三轴试验数据量有限,造成部分学者强度参数定量计算模型适用性低,不同研究者的定量表征方法很难形成一致。

(2)试验数据横向对比性差。含水合物沉积物三轴测试的根本目的是建立沉积物强度参数的计算方法,探讨水合物成藏或开采过程中可能导致的地质变形规律,从而指导工程设计、预防地质灾害,为水合物的长效开采提供依据。但国内外尚无统一的含水合物沉积物三轴测试标准与规程,导致目前不同研究学者进行三轴试验过程中采用的试验方法差异较大,不同研究学者的研究数据横向对比性较差,很难将不同研究学者的试验数据联合起来,建立统一的含水合物沉积物强度参数演化规律模型。

(3)经验模型通用性差。由于试验条件及控制参数等方面的差异,虽然已有部分研究者根据自身的室内测试结果尝试建立不同的强度参数随含水合物饱和度、有效围压等变量的演化规律,但由于这些模型都只是针对一定试验条件的经验或半经验公式,不同计算模型间的差异较大,不具有通用性。

(4)试验主控因素设置不明确。要对比分析不同的试验主控因素对含水合物沉积物强度的影响,必须保证其他影响因素相同,否则其试验结果对实际建模的指导意义将降低。如目前存在的沉积物中水合物饱和度估算方法均存在一定误差,相互叠加的结果是误差成倍放大。部分学者用不同的饱和度估算方法进行计算,然后对比不同的水合物类型对沉积物强度参数的影响,这种做法实际上有待商榷。

(5)与矿场实际条件差异大。目前含水合物沉积物室内三轴剪切模拟温压条件与实际水合物储层存在差异,对实际工程设计指导性差。如我国南海北部神狐海域海洋水合物储层平均温度在 10 ~ 15℃,平均储层压力在 12 MPa ~ 16 MPa,但由于目前试验条件限制,很难在三轴仪条件下模拟实际海洋水合物储层条件,这是导致目前试验结果工程指导价值不高的重要因素。

综合目前国内外含水合物沉积物力学性质测试相关文献的报道,笔者认为制样方法、沉积物粒度分布规律、沉积物本身固结程度、试验温度、剪切速率、水合物合成介质类型、饱和度测量方法、试样尺寸等因素的差异是导致上述问题的主要原因。

以下结合目前国内外已有典型文献报道数据，重点 探讨造成上述关键问题的原因。

表1 目前国内水合物沉积物三轴力学测试主要成果及其参数汇总

Table 1 Domestic research results and relevant test parameters for triaxial test of hydrate-bearing sediment

序号	制样方法	试验温度/℃	砂样类型	砂样粒径/mm	试样尺寸 (mm×mm)	剪切速率 (mm/min)	饱和度测试 方法	水合物类型	参考文献
1	1	--	蒙古砂/ 空心砖	0.07 ~ 1.0/--	--	0.9	未测量	THF	鲁晓兵 ^[13] (2007)
2	1/2	-9	粉细砂	0.006 ~ 1	Φ39.1×80	0.9	6/1/2	冰、CO ₂ 、 CH ₄ 、THF	张旭辉 ^[15] (2010)
3	1	-9	粉细砂、 蒙古砂	0.006 ~ 1.0、 0.07 ~ 1.0	Φ39.1×80	0.9	6	THF	张旭辉 ^[14] (2011)
4	2	1	粉质砂	0.0015 ~ 0.25	Φ--×100	0.5	3	CO ₂	魏厚振 ^[18] (2011)
5	2	-5、-10、-20*	--	--	Φ50×75	1.125	未测量	甲烷	于 锋 ^[21] (2011)
6	1	-4	黏性土粉砂	0.005 ~ 0.21	Φ39.1×80	0.9	3	THF、甲烷	刘 芳 ^[26] (2013)
7	1	2	南海粉质 黏土	0.001 ~ 2	Φ39.1×80	0.9	3	THF	刘文涛 ^[25] (2014)
8	1	2	南海粉质 黏土	0.005 ~ 0.05	Φ39.1×80	0.9	3	THF	石要红 ^[24] (2015)
9	2/1	2	覆膜砂烧结/ 膨润土	0.25 ~ 0.42/--	Φ25×50	--	1/6	甲烷	李令东 ^[22] (2012)
10	2	2	覆膜砂烧结	0.25 ~ 0.42	Φ25×50	0.3	1/6	甲烷	孙晓杰 ^[23] (2012)
11	2	1	细粉砂	0.005 ~ 0.07	--	0.5	2	CO ₂	颜荣涛 ^[16] (2012)
12	2	1	细粉砂	0.005 ~ 0.07	--	0.5	2	CO ₂	颜荣涛 ^[17] (2013)
13	1	-10	高岭土	0.00005 ~ 0.041	Φ50×100	1.0	6	天然气 (成分未知)	李洋辉 ^[20] (2011)
14	1	*	高岭土	0.00005 ~ 0.041	Φ50×100	*	6	天然气 (成分未知)	李洋辉 ^[19] (2012)
15	2	1	天然砂	0.15 ~ 0.25	Φ39.1×100	0.8	5	甲烷	孙中明 ^[27] (2013)
16	2	0.5	煤粉	0.18 ~ 0.25	Φ50×100	手动控制	3	甲烷	高 霞 ^[30] (2015)
17	2	0.5	煤粉	0.18 ~ 0.25	Φ50×100	手动控制	3	甲烷	张保勇 ^[31] (2015)

注：表中“--”表示原作者未公布该数据；“*”表示该数据为控制变量；制样方法、饱和度测试方法在下文详细阐述。

2 导致关键问题的原因探讨

2.1 制样方法的差异

目前国内外尚无含水合物沉积物三轴力学测试试样的统一制备方法及其标准，目前三轴试验中用到的含水合物沉积物合成方法主要有以下两类：

(1) 混合制样法。先在一定的压力和温度条件下利用水雾与气体相结合形成粉末状的水合物，然后将固体水合物颗粒与沉积物颗粒混合，再把制成的混合物放入低温的环境中以开展三轴剪切试验。目前四氢呋喃（THF）水合物沉积物试样大都采用

该方法合成。

(2) 原位合成法。将沉积物砂样(饱和或不饱和)安装在压力舱,然后控制温度,施加一定压力的气体,经一定的时间形成含水合物沉积物试样。该方法在具体操作过程中根据实验仪器的不同而存在较大差异。如孙中明(2012)^[27]等直接将一定含水量的砂土填装到压力室,然后用气过量法合成水合物;颜荣涛(2013)^[17]等则为了试样便于安装,首先将试样冰冻,安装到压力舱后再升温使冰融化并合成水合物;也有部分研究者,如石要红(2015)^[24]等直接将 THF 水溶液与干砂混合,然后置于压力室加围压,制冷 2~3 天自动形成水合物沉积物。

不同的制样方法合成的试样中水合物分布型态差异巨大,根据颜容涛(2011)等^[18]的研究结论,不同的水合物分布模式对含水合物沉积物三轴力学参数的影响是巨大的。因此,要研究相同含水合物饱和度条件下其他试验控制因素对沉积物强度的影响,必须首先保证制样方式是一致的。李令东(2012)等^[22]采用不同的制样法分别制得覆膜砂试样和膨润土试样并进行强度测试,得到覆膜砂试样的弹性模量约为膨润土试样弹性模量的 3.6~3.8 倍,这种在非单一变量条件下得到的结论可靠性有待商榷。

2.2 水合物合成介质的差异

目前,含水合物沉积物制样过程中用到的水合物合成介质主要有气体和液体两种。气体主要有 CO₂、CH₄ 及模拟实际天然气组分的混合气体等。液体主要为四氢呋喃溶液,由于四氢呋喃合成水合物沉积物试样周期短、合成条件要求低(1 atm 下,当温度低于 4.4℃时即可生成水合物),目前国内关于水合物沉积物三轴试验相关的研究中,有超过 50% 集中在四氢呋喃水合物沉积物的研究方面。

张旭辉(2010)^[15]等通过设计对比试验,对比了甲烷、CO₂、四氢呋喃水合物沉积物及冰沉积物的强度性质。试验表明,虽然 4 种沉积物均表现为塑性破坏,但即使在水合物含量及其他试验条件相同情况下,不同介质形成的水合物会导致沉积物强度的巨大差异。因此用 THF 水合物沉积物的试验结果可定性描述实际含水合物储层的强度参数变化规律,但很难直接应用到实际生产中进行定量的计算。

因此,合成水合物试样所用的介质类型不同,其强度参数计算模型或模型系数应有所区别。如果针对特定区域的水合物储层进行强度参数测试,建议结合实测的气体成分,使用与实际气体成分接近

的模拟混合气体进行试验,以增强三轴测试结果的实践指导意义。

2.3 沉积物本身固结程度的差异

国内大部分含水合物沉积物试样三轴剪切试验采用的是直接在松散沉积物中合成水合物,研究水合物形成对松散沉积物强度的影响。也有部分研究者^[22-23]用覆膜砂烧结制得弱胶结岩样,然后在岩样中合成水合物并进行剪切试验。上述研究均表明,含水合物沉积物的强度随含水合物饱和度的增大而增大。

由于以上两种类型的沉积物其本身固结强度差异巨大,因此无法做横向对比分析,只能在各自的本身胶结强度条件下进行纵向对比分析。这也是导致目前部分研究成果无法进行整合,建立沉积物强度通用模型的关键因素之一。

由于海洋天然气水合物储层多属于非固结储层,水合物对储层的充填和胶结作用随其分解而逐渐降低。水合物完全分解后储层颗粒处于松散状态,因此非固结储层的胶结强度是由水合物饱和度控制的,沉积物本身可视为粘性土。为此,三轴试验模拟需考虑实际模拟储层本身的胶结强度,室内模拟水合物对沉积物抗剪指标影响规律需首先进行水合物饱和度为 0% 条件下沉积物三轴剪切试验,从而排除沉积物本身胶结程度对试验结果的影响。

2.4 沉积物粒度分布的差异

由于目前原状含天然气水合物沉积物试样获取难度大,含水合物沉积物三轴强度测试试样主要通过人工砂样合成。导致实际试样与合成试样差异的重要因素就是沉积物砂粒的粒度分布规律。

沉积物粒度分布规律对试样强度参数的影响主要表现在粒径大小、不均匀系数、泥质含量等方面。目前国内研究者常用的水合物赋存介质主要包括蒙古砂^[14]、粉细砂^[15]、高岭土^[20]、高温烧结覆膜砂^[22]、粘性土粉砂^[26]、天然海砂^[27]等。也有部分研究者利用实际采样得到的南海粉质黏土^[25-26]进行含水合物沉积物强度测试试验。上述沉积物颗粒的粒度分布各异,均匀系数差距较大,导致试验结果差异较大,如刘文涛(2014)等^[25]利用南海粉质黏土进行三轴测试表明,含水合物沉积物在小的应力范围内近似为弹性变形,当轴向应变达到约 6% 会出现明显的应力“平台期”。石要红(2015)等^[26]用同样的沉积物,观察到了同样的现象并完善了高含水合物饱和

度条件下南海粉质黏土的强度特性。上述现象只有在针对南海实际取芯岩样测试过程中被观察到，在其他室内模拟试验中均未观察到上述“平台期”现象。这说明沉积物骨架颗粒的差异是导致目前公开发表的试验结果多样性的重要原因。

文献调研结果显示，部分国内研究文献发表过程中甚至未公布其沉积物类型及其粒度分布，这很不利于将不同研究者的研究结论进行横向对比分析，导致其研究成果应用价值较低。

2.5 试样规格的差异

目前暂无报道表明试样高径比和具体尺寸对含水合物沉积物试样强度参数的影响规律，国内文献中采用的含水合物沉积物尺寸和高径比通常参照土工试验方法标准(GB/T 50123-1999)、煤与岩石物理力学性质测定方法(GB/T 23561.9-2009)等或直接参考国外文献报道确定。目前可见的含水合物沉积物三轴剪切试验试样尺寸规格为： $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 、 $\Phi 39.1\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 、 $\Phi 25\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ ，高径比为2:1；但也有部分研究者用 $\Phi 50\text{ mm}\times 75\text{ mm}^{[21]}$ 、 $\Phi 39.1\text{ mm}\times 100\text{ mm}^{[27]}$ 的试样进行测试，高径比分别为1.5:1和2.5:1。

针对常规粗粒土沉积物的研究表明：试样高径比^[28]和尺寸^[29]对试验的内摩擦角、峰值强度、割线模量等参数会产生较大的影响。因此，试样规格的差异是导致目前不同研究者的研究数据无法进行整合的重要原因，需要针对不同尺寸、高径比的含水合物沉积物试样进行系列研究。

2.6 饱和度测量方式的差异

水合物饱和度是指沉积物多孔介质中所含水合物的体积占孔隙体积的百分比。已有研究中关于水合物饱和度的测量方法主要有以下几种。

(1) 首先按常规步骤进行剪切试验，剪切完成后升温分解水合物，通过气体(甲烷)收集装置测量水合物分解释放的气体体积，间接换算出水合物饱和度。

需要特别注意的是，由于 CO_2 水溶性较强，且反应釜体积有限，本身合成水合物的量有限，所以采用该方法将产生较大误差，故不能用该方法测量 CO_2 水合物饱和度。即使对于甲烷等难溶于水的气体，该方法也存在一定的误差：水合物合成、剪切过程中经过长时间的高压饱和，多孔介质中含有大量的游离气，剪切结束后降压升温过程中不仅能排

出水合物分解气，更重要的可能是空隙中本身存在的游离气。因此该饱和度测量方法最关键的是降低游离气体对测量结果的误差影响。

(2) 安装试样前称量试样(含水)及密封袋的总重，然后按常规步骤进行剪切试验，剪切完成后将试样快速取出并放入密封袋，通过称量样品在试验前、后的质量差，换算出含水合物饱和度。 CO_2 水合物沉积物尤其适合用该法进行饱和度测量。

(3) 对于非饱和制样法制得的含水合物沉积物，甲烷过量条件下，部分学者假设沉积物中的水完全转化为水合物。根据质量守恒原理，利用参加反应的水的质量可以获得生成水合物的质量，进而根据水合物密度得到水合物的体积。再结合已测得的骨架孔隙度可以得到沉积物的含水合物饱和度。特别地，对于THF水合物沉积物，由于THF水合物中THF的质量浓度为19%，因此三轴剪切试验可以直接用质量浓度为19%的THF溶液，非饱和制样条件下认为四氢呋喃完全转化为水合物，从而换算出含水合物饱和度。

(4) 利用时域反射技术(time domain reflection, TDR)测量。TDR技术根据电磁波在沉积物中的传播速度来测量其介电常数，可以通过沉积物介电常数的测试结果估算沉积物中的含水率，结合初始含水量测量沉积物中的含水合物饱和度。

(5) 压力降落法确定水合物饱和度。在恒定温度条件下，可以根据水合物生成前、后试样孔压的变化来换算生成的水合物饱和度。

(6) 对于混合制样法，由于混合过程中蒸馏水、纯水合物和沉积物的体积都是已知的，经过压制后可以假设沉积物岩样仅饱和水和水合物，则由其各自的体积可估算出水合物的饱和度。

由于不同的含水合物饱和度测量方法不可避免地存在测量误差，当不同测量方法得到的饱和度数据进行含水合物沉积物强度参数演化规律分析时，误差可能被成倍放大，横向可比较性降低。因此目前需要建立统一的、适用于含水合物沉积物三轴剪切试验的水合物饱和度测试方法，或者对不同测试方法得到的结果进行修正和比对，得出不同测量方法预测结果间的定量关系。

2.7 剪切速率的差异

李洋辉(2012)等^[19]研究了含冰水合物沉积物试样在剪切速率分别为1 mm/min、0.1 mm/min、

0.5 mm/min 时的应力应变规律, 试验结果表明含水合物沉积物试样的破坏强度随着剪切速率的增大而增大。因此剪切速率是影响含水合物沉积物三轴强度参数差异的重要因素之一。

目前研究文献中控制剪切速率的方法主要有两种: 一种是控制三轴仪的推进速度, 单位是 mm/min; 另一种是控制三轴仪的施压过程中试样的应变速率, 单位是 %/min。如果已知含水合物沉积物试样高度, 则两者之间可以相互转化:

$$v_{\text{mm}} = v_{\%} h \quad (1)$$

其中: h 为试样高度, mm; v_{mm} 为用三轴仪推进速度表示的剪切速度, mm/min; $v_{\%}$ 为用试样应变率表示的剪切速度, %/min。

也有部分含水合物沉积物三轴剪切仪采用手摇泵对试样加载^[30-31], 这种方法操作简便, 其缺点是无法精确控制剪切速率, 因此其研究成果无法定量表述加载速率对含水合物沉积物强度性质的影响。

2.8 试验温度的差异

试验温度是影响含水合物沉积物强度性质的重要参数。国内李洋辉等 (2011, 2012)^[19-20]、于峰等 (2011)^[21] 针对冻土区含水合物沉积物, 研究了温度低于冰点温度时含水合物沉积物的力学参数随试验温度的变化规律。研究表明, 在 0℃ 以下时, 含水合物沉积层强度随着温度的降低线性增加, 且试样应力应变曲线均呈应变硬化型, 未出现明显峰值。

目前国内尚无海洋水合物沉积物 (温度在 0℃ 以上) 的强度参数随温度变化规律的公开报道。由于设备承压等条件的限制, 针对海洋含水合物沉积物的三轴模拟试验温度基本上控制在 2℃ 或 1℃ 左右。然而, 我国南海海域含水合物储层, 特别是神狐海域水合物储层, 平均温度 13 ~ 16℃, 温度差异导致目前的室内研究成果与实际工程参数可能存在较大差异, 因此室内研究成果的矿场指导意义有待商榷。

为此, 需要进行系列试验, 验证冰点以上温度条件下含水合物沉积物强度参数随试验温度的变化规律, 并根据我国海域水合物资源试采区域的地质条件合理选择其他试验参数, 才能为试采工程设计提供可靠依据。

上述诸因素的差异是导致目前含水合物沉积物三轴剪切试验结果通用性差、对工程实践指导意义不大的主要原因。为了增强发表文献的参考性, 建议不同研究者在发表其研究成果中公布制样方法、

水合物合成介质、沉积物本身固结程度、沉积物粒度分布、试样规格、饱和度测量方式、剪切速率、试样温度等全部数据。

为了对我国海洋水合物试采工程提供科学参考, 必须综合各家所长, 建立统一的含水合物沉积物力学参数测试模式和测试标准, 从制样方式、气体类型、沉积物粒度、试样尺寸等多方面进行标准化操作, 才能建立行之有效的、较为通用的强度参数演化模型。另外, 引入数值试验的方法^[32], 利用离散元、有限元等方法, 将物理试验结果与数值试验结合, 也是解决目前技术瓶颈的有效途径之一。

3 结论与建议

(1) 目前对水合物沉积物三轴强度参数演化规律的共识停留在定性层面, 定量分析层面仍存在不同研究结果横向对比性差、各经验模型普适性差、室内研究成果对矿场实践指导性弱等关键科学问题。制样方法、水合物合成介质、沉积物本身固结程度、沉积物粒度分布、试样规格、饱和度测量方式、剪切速率、试样温度等的差异是导致上述关键科学问题的原因。

(2) 为了增强研究成果的应用价值, 建议发表含水合物沉积物三轴测试相关的研究成果的同时一并公布结论 (1) 中涉及的全部参数。建立水合物沉积物三轴试验相关的统一标准和测试规程已迫在眉睫, 只有建立统一的含水合物沉积物力学参数测试模式和测试标准, 从制样方式、气体类型、沉积物粒度、试样尺寸等多方面进行标准化操作, 才能建立行之有效的、较为通用的强度参数演化模型。

(3) 引入离散元、有限元等数值试验方法, 将物理试验结果与数值试验结合, 是解决目前技术瓶颈的有效途径。

参考文献:

- [1] 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[J]. 中国地质, 2007, 34(6): 953-961. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3657.2007.06.001.
- [2] 吴能友, 张海启, 杨胜雄, 等. 南海神狐海域天然气水合物成藏系统初探[J]. 天然气工业, 2007, 27(9): 1-6. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0976.2007.09.001.
- [3] 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(1/3): 127-135. DOI: 10.1016/j.petrol.2006.02.003.
- [4] 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 and petroleum geology*, 2014, 58: 139-167. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2014.07.024.
- [5] HYODO M, NAKATA Y, YOSHIMOTO, et al. Shear behavior of methane hydrate-bearing sand[C]//Proceedings of the 17th International Offshore and Polar Engineering Conference. Lisbon, Portugal: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2007: 1326-1333.
- [6] 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*, 2013, 51: 52-62. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2013.11.015.
- [7] MASUI A, HANEDA H, OGATA Y, et al. Mechanical properties of sandy sediment containing marine gas hydrates in deep sea offshore Japan[C]//Proceedings of the 17th International Offshore and Polar Engineering Conference. Lisbon, Portugal: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2007: 53-56.
- [8] YONEDA J, MASUI A, KONNO Y, et al. Mechanical behavior of hydrate-bearing pressure-core sediments visualized under triaxial compression [J]. *Marine and petroleum geology*, 2015, 66: 451-459. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2015.02.028.
- [9] MIYAZAKI K, MASUI A, SAKAMOTO Y, et al. Triaxial compressive properties of artificial methane-hydrate-bearing sediment [J]. *Journal of geophysical research: solid earth*, 2011, 116(B6): B06102. DOI: 10.1029/2010JB008049.
- [10] 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]//Proceedings of the 21th International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2012.
- [11] 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 and petroleum geology*, 2014, 58: 187-198. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2014.05.008.
- [12] YUN T S, SANTAMARINA J C, RUPPEL C. Mechanical properties of sand, silt, and clay containing tetrahydrofuran hydrate [J]. *Journal of geophysical research: solid earth*, 2007, 112 (B4): B04106. DOI: 10.1029/2006JB004484.
- [13] 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]//第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 南京: 中国海洋工程学会, 2007: 681-684.
- [14] 张旭辉, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 四氢呋喃水合物沉积物静动力力学性质试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(S1): 303-308.
- [15] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2010.10.007.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3177.2012.01.011.
- [20] 李洋辉, 宋永臣, 于锋, 等. 围压对含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.
- [21] 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. DOI: 10.7623/syxb201104019.
- [22] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2012.04.018.
- [23] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0890.2012.04.011.
- [24] 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. DOI: 10.6052/0459-1879-14-424.
- [25] 刘文涛, 石要红, 张旭辉, 等. 西沙海槽东部海底浅表层土工程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.
- [26] 刘芳, 寇晓勇, 蒋明镜, 等. 含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.
- [27] 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. DOI: 10.7520/1001-4888-12-196.
- [28] 陈镠芬, 朱俊高, 殷建华. 三轴试样高径比对试验影响的颗粒流数值模拟[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(7): 2643-2649. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2015.07.035.
- [29] 沙曼, 赵成刚, 康凯. 试样尺寸及制样粒径大小对粗粒土三轴试验抗剪强度的影响[J]. *北京交通大学学报*, 2014, 38(4): 133-136. DOI: 10.11860/j.issn.1673-0291-2014.04.023.
- [30] 高霞, 刘文新, 高橙, 等. 含瓦斯水合物煤体强度特性三轴试验研究[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(12): 2829-2835. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1578.
- [31] 张保勇, 高橙, 高霞, 等. 围压对含瓦斯水合物煤体应力应变关系的影响[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2015, 25(2): 137-142. DOI: 10.3969/j.issn.2095-7262.2015.02.005.
- [32] 杨期君, 赵春风. 水合物沉积物力学性质的三维离散元分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35(1): 255-262.

作者简介:

李彦龙(1989-), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事水合物开采相关的力学问题及出砂与防砂模拟研究。

刘昌岭(1966-), 男, 博士, 研究员, 主要从事天然气水合物模拟试验相关的研究工作。