第 24 卷 第 5 期
2009 年 10 月

实 验 力 学
JOURNAL OF EXPERIMENTAL MECHANICS

Vol. 24 No. 5
Oct. 2009

文章编号:1001-4888(2009)05-0413-08

水合物沉积物力学性质的实验装置和研究进展*

王淑云, 鲁晓兵, 张旭辉
(中国科学院力学研究所,水动力学与海洋工程重点实验室,北京 100190)

摘要: 天然气水合物是一种高效、洁净和储量巨大的新型能源,一般蕴含于砂岩、粘土以及其它土质的沉积物中。对水合物沉积物力学性质的实验研究,是水合物地层中基础稳定性分析和水合物开发评价重要的热点课题之一。本文首先介绍了水合物沉积物合成与分解实验、物性参数测量技术以及力学性质实验装置的主要组成部分和特点,然后介绍了目前国内外在水合物沉积物合成和分解及力学性质实验一体化装置和实验研究两个方面所取得的成果,最后指出在实验装置、测试技术和实验研究方面存在的问题以及今后研究的重点和方向。

关键词: 水合物; 水合物沉积物; 合成与分解; 力学性质; 实验装置
中图分类号: TU41 **文献标识码**: A

0 引言

天然气水合物(简称水合物)是甲烷、二氧化碳、氮气等气体在一定低温和高压条件下与水形成的冰状晶体,多存在于深水海洋和湖泊以及大陆永久冻土带的沉积物中(含有水合物的沉积物称为水合物沉积物)。水合物是一种高效、洁净和储量巨大的新型能源,已被美国、日本、印度等国家列入重点研究或开发计划,我国近几年也加快了对水合物勘探和开发的研究工作,并在 2007 年 5 月通过钻探取得实际水合物样品,预计于 2016 年实现对水合物的试开采[1-3]。由于水合物沉积物存在气体、岩土骨架、水和固体水合物四种介质,其力学性质随着相变而非常复杂。在水合物的开发和开采过程中,降压或升温等方法使得水合物不同程度的分解,水合物沉积物的强度和模量等力学性质会发生明显的变化,水合物沉积物强度降低,使坐落在地层中的平台、井口和管道失去稳定性,甚至发生大面积的海底滑坡,因此水合物沉积物的强度是基础稳定性分析和水合物开发评价最重要的参数[4,5]。

鉴于现场取芯和原位实验技术的局限,目前对水合物沉积物强度和变形等力学特性的研究主要基于水合物沉积物合成样品的室内实验方面,尤其在水合物沉积物强度实验装置和测试技术方面远不够成熟,制约着实验研究工作的深入,已有的实验结果也是对于水合物沉积物力学性质的初步认识。有关水合物沉积物力学性质室内实验研究装置和实验结果的文献资料均很少。实验装置基本是在原有的岩土类强度实验仪器基础上,通过增加低温制冷室和高压气体进出系统以及一些物性参数测量系统而成。室内实验研究主要针对甲烷在砂土类松散介质中形成的水合物沉积物样品,初步探究其在不同温度和压力条件下形成、以及不同气体饱和度下的应力、应变和体变等力学性质。

* 收稿日期: 2009-04-01; 修订日期: 2009-06-15
基金项目: 国家高技术发展研究专项(863);中国科学院三期创新方向性项目(KJCX2-YW-L02)和国家自然科学基金项目(No. 1077218)资助
通讯作者: 王淑云,高级工程师,从事岩土力学和水合物力学性质实验研究工作。E-mail: sywang@imech.ac.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

本文介绍了近几年国内外研制的水合物沉积物合成与分解和力学性质实验一体化装置的特点和实验研究成果,指出了目前水合物沉积物实验装置和实验研究中存在的问题,并对今后水合物沉积物力学性质实验和研究工作提出建议。

1 实验装置

水合物沉积物合成与分解及力学性质实验一体化装置主要包括:水合物沉积物合成与分解实验系统、物性测量系统和岩土类力学性质实验系统。

1.1 合成与分解实验系统

水合物沉积物合成与分解实验系统主要包括反应釜、低温控制、高压供气以及计算机自动采集、处理和控制系统。它的总体特点为:设计压力高(已有的最大设计压力为 200MPa),温度低(已有的最低设计温度为 - 40 度),自动化程度高(计算机采集数据、自动控制和预警等),可视化程度(利用蓝宝石材料)高等,并可通过增加压力,填入表面活性剂以及高频振动和搅拌来加速水合物合成的速度、缩短水合物合成实验的时间。目前关于纯水合物(即天然气和水两种介质)的合成技术已较成熟,国内外已有多家拥有纯甲烷水合物的合成装置。近几年,对水合物沉积物的合成与分解装置的开发和测试技术的研究比较多。

1.2 物性测量系统

物性测量系统主要包括用各种声、电和光学方法来测量水合物的组成成份、密度、孔隙率、渗透率和热传导性等性质的传感器、放大器以及配套的接口、连接件等硬件和一些软件。目前较常用的能测量水合物组成成份、密度、孔隙率、渗透率和热传导性等性质的方法主要有:超声检测、光学摄像、电学检测、时域反射技术(TDR)、CT 和 MRI 及中子衍射技术等[6 - 9]。

超声波测量是通过观察声波的频率变化判断岩芯中水合物生成和分解的过程,并可间接换算得到水合物浓度、密度、孔隙和围压、频率以及气体和水饱和程度的关系。目前在水合物沉积物中应用的主要技术难点为超声频率的选择、探头和介质外测橡皮膜等的密封问题,以及对超声波谱变化与松散介质特性相结合的定量分析方法。电阻法是根据测量的水消耗引起的电阻减少量来判断水合物生成,在测量二氧化碳水合物形成过程中观测效果明显。TDR 技术是通过测量水合物在生成和分解时水合物沉积物的介电常数,并根据介电常数随含水量变化的关系式,得到水合物的饱和度。目前 TDR 测量探头有很多类型,可实现非扰动定位的瞬时测量。CT 和 MRI 及中子衍射技术,是观测水合物生成微细观结构理想的方法,可观察水合物沉积物生成、分解过程中样品的密实度、水合物分布情况以及剪切过程中内部微观裂缝的发生和发展情况。

1.3 力学性质实验系统

力学性质实验系统主要包括压力室、轴向加压或扭剪系统、围压和反压系统、变形和孔压测量系统等。通过在实验过程中测量试样的应力、孔压、轴变或扭剪变形、体变等数据,从而得到水合物沉积物的力学性质及强度指标。

与一般的粘土、砂等沉积物样品不同,水合物沉积物样品对周围压力的降低和温度的升高非常敏感,温度和压力的稍微变化和样品短时间地暴露到空气中,都会引起水合物的分解,而且分解速度很快。在常温和常压条件下,水合物沉积物样品的开样、切样和装样等操作,会使水合物发生很大程度的分解,影响对水合物沉积物样品强度的准确评估。另外,目前的原位保压和保温取芯技术很难取得实际的水合物沉积物岩芯,即使取到了也很难保证样品在运输和保存过程中的水合物不分解,所以目前水合物沉积物力学性质的室内实验研究对象主要还是人工合成的样品。基于上述原因,水合物合成与分解、物性测试和力学性质一体化实验装置应运而生,它避开了开样、装样等操作过程,把水合物沉积物合成与分解及力学性质的实验系统有效地衔接起来,实现了对水合物沉积物样品的物性及力学性质参数的一系列实验和同步测量。

1.4 一体化实验装置

目前国内外水合物沉积物合成与分解及力学性质实验一体化装置的主要特点是:1) 将水合物反应

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

釜与三轴压力室合二为一，水合物合成高压供气和低温制冷系统围绕三轴压力室设计，并保持岩土类力学性质实验加载和测量系统不变；2) 水合物合成、分解及力学性质实验系统之间既可进行独立实验，又可进行整套流程实验。

目前国外已报道的水合物沉积物合成与分解及力学性质实验一体化装置有：美国地质调查局的天然气水合物和沉积物模拟实验装置 GHASTLI(参见图 1)，日本先进工业科学和技术国际研究所的水合物沉积物合成与分解及三轴实验一体化装置(参见图 2)，英国的水合物沉积物合成和扭剪共振柱实验一体化装置(参见图 3)。国内有力学所研制的水合物沉积物合成与分解及三轴实验一体化装置(参见图 4)。

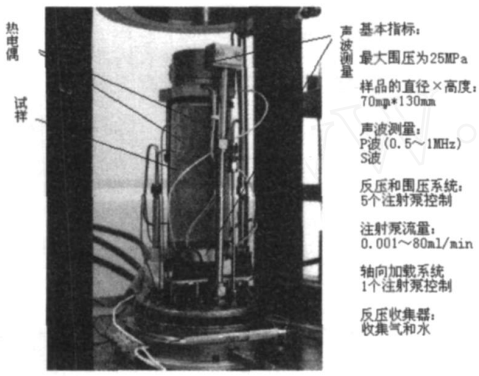

图 1　GHASTLI 主部件图(Winters，2007)

Fig. 1　Close-up view of a main apparatus for gas hydrate sediment in GHASTLI(Winters，2007)

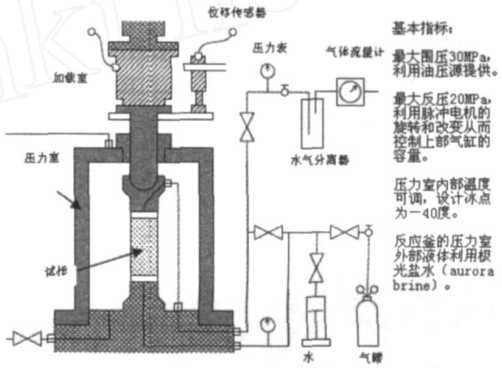

图 2　水合物沉积物三轴实验一体化装置(Hyodo，2007)

Fig. 2　Illustration of tri-axial compression apparatus for gas hydrate sediment(Hyodo，2007))

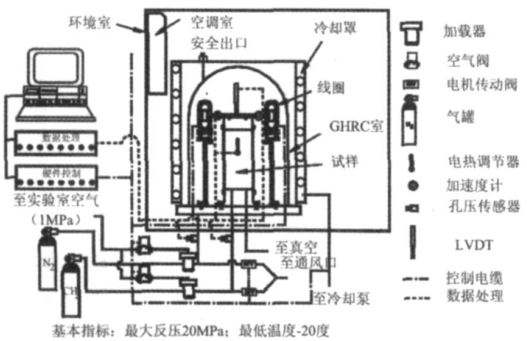

图 3　水合物沉积物共振柱实验一体化装置(Clayton，2005)

Fig. 3　Schematic layout of resonant column apparatus for gas hydrate sediment(Clayton，2005)

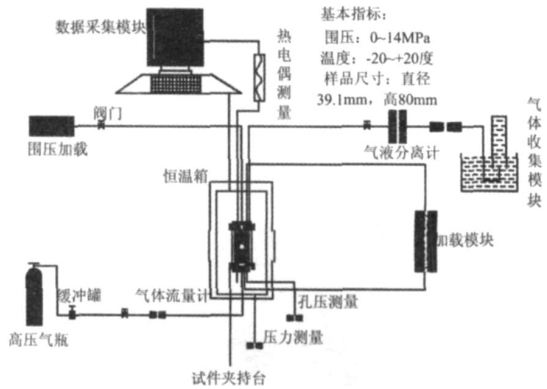

图 4　水合物沉积物三轴实验一体化装置(力学所，2008)

Fig. 4　Schematic layout of tri-axial compression apparatus for gas hydrate sediment(Institute of Mechanics，2008)

上述装置在高压和低温条件下合成水合物的原理和设计方面基本相同，但又各有特点。GHASTLI 的主要特点是由反压和围压系统控制进气，并设计了反压收集器来收集水合物分解产生的气体和水量，此外还增设了声波测量系统[10]。图 2 装置的主要特点是利用脉冲电机的旋转和改变来实现对上部气缸容量的控制，压力室温度也在较大范围内可控和可调，能进行水合物的合成和分解操作[11]。图 3 装置则可测量水合物沉积物合成样品的剪切模量和阻尼比[12]。

目前在室内合成水合物沉积物样品还局限在细砂沉积物中。Winters 利用渥太华砂，采用两种制样方法合成甲烷水合物沉积物：一种是在饱和的砂样中慢慢注入甲烷气体，直到有预估的水量被排出(通过此控制含水量以及甲烷水合物的饱和度)，然后降温和升压至甲烷水合物生成的相平衡稳定区域。另一种是使沉积物砂样初始饱和，并在甲烷气体注入过程中不容许排水，然后降温和升压直至水合物生

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

成。Hyodo 利用 Toyoura 砂,先制成一定密度和含水量的砂样,通过调高围压和气压,并让甲烷气体进入砂样的过程持续 6～9 个小时,然后予以降温至水合物生成。Clayton 利用一种 Leighton Buzzard 的干砂,通过与冰粒在低温下均匀混和成样,而后再升温使冰粒融化,最后注入甲烷气体并在低温和高压下形成水合物。

在力学所研制的装置中[13],压力室内温度采用热敏电偶测量,气体收集系统由两个有机玻璃容器连接而成。甲烷水合物沉积物的合成和强度实验的具体操作过程为:首先,将制备好的沉积物砂样用橡皮膜包好并置于三轴压力室内,通过样品底部管路注入含有少量十二烷基硫酸钠与四氢呋喃(加速水合物合成)的水溶液使土样达到一定的饱和度。同时分别缓慢施加围压和气压至水合物合成所需要的压力值,并在此过程中始终保证围压稍大于气压。保持此压力并通气 24h 使气体尽量均匀分布并溶解在土样的孔隙水中。然后启动制冷机使恒温箱内降温至水合物合成所需要的温度值,并根据不同水合物的合成情况,保持适当的时间直到进气量和孔隙压力不再变化,然后通过反复 2 次升温和降温的合成和分解过程,以提高水合物合成的饱和度,至孔隙压力为零时初步判断水合物合成完成。最后调整至不同围压值,给定剪切速率,对样品进行剪切试验,同时记录应力应变数据。待剪切结束,升高压力室温度使水合物分解,通过收集系统测量气体量,并计算水合物含量。

2 实验研究成果

Winters 等人[14,15]利用 GHASTLI 对加拿大 Mallik 永冻地区钻取的水合物沉积物岩芯样和室内合成甲烷水合物的渥太华砂样进行了水合物的力学性质实验。通过声波测量和三轴实验,得到了在沉积物的孔隙中分别充满水合物和冰时的声波特性,不同条件下形成的水合物声波特性,以及孔隙总量对强度的影响等。实验结果(参见图 5)表明:细颗粒水合物沉积物的波速较低(1.97 km/s),水合物或冰填充的沉积物的波速增加,其增加程度与水合物和冰的含量以及填充物与岩土颗粒间的胶结特性有关。而且发现:部分自然界的水合物并未与沉积物颗粒胶结,而实验室合成的甲烷水合物的渥太华砂沉积物样品中的水合物却与沉积物颗粒存在胶结现象。已进行的压缩波和三轴压缩实验结果还表明:与未含水合物的试样相比,原状和重塑水合物沉积物样品的剪切强度和压缩波波速都增大,增大的比例取决于水合物的含量和分布、沉积物的性质和实验条件。

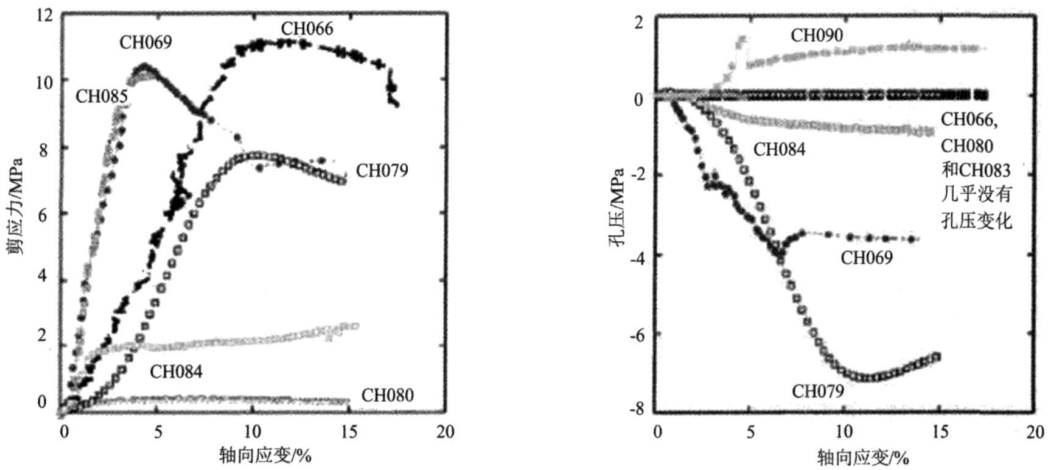

图 5 甲烷水合物渥太华砂样的应力 - 应变和孔压 - 应变关系(Winters et al,2004b,2007)

Fig. 5 Stress versus strain and pore pressure versus strain of methane hydrate Ottawa sand samples

Hyodo 等人[11]对含有甲烷水合物的砂样进行了一系列的室内三轴压缩实验,得到了甲烷水合物砂样的力学性质与温度、反压、有效围压和甲烷饱和度的关系,以及甲烷分解过程中砂样应变、体变与有效围压、剪应力和临界孔隙比的关系(参见图 6)。实验结果表明:形成甲烷水合物过程中的温度和压力对甲烷水合物砂样的强度没有影响,甲烷水合物砂样的力学性质取决于与温度、反压、有效围压和甲烷水

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

合物的饱和度。在甲烷水合物分解过程中,当无剪应力施加时,不论有效应力是否减少,其体积应变有剪胀的趋势;当有剪应力施加时,其剪切变形的发展和变化趋势则根据是否达到临界孔隙比而变化,同时甲烷水合物的饱和度也会影响体积变化量。

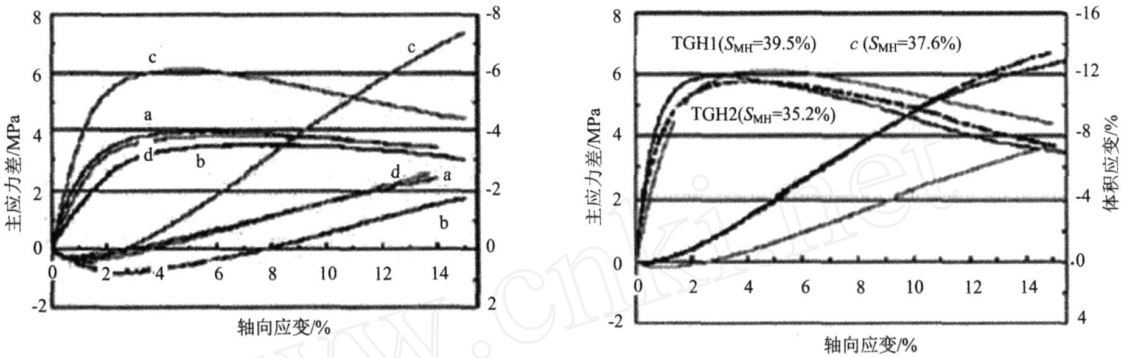

图 6　水合物原状岩芯的应力 - 应变和体变 - 应变关系

Fig. 6　Stress versus strain and volumetric strain versus strain of undisturbed methane hydrate sediment samples

Masui 等人[16,17]通过对日本南海海槽(Nankai Trohgh) 地区钻取的 4 个原状水合物岩芯样和室内合成水合物 Toyoura 砂样的三轴实验,得到如下结论:水合物沉积物的强度随着水合物孔隙饱和度的增加而增加,原状样与合成样的强度基本相同,但两者的应力 - 应变和体变 - 应变关系明显不同。前者的切线弹性模量 E50 平均值明显低于后者约 200MPa;原状样的泊松比一般在 0.1～0.2 之间,合成样的泊松比在 0.05～0.22 之间,两者的泊松比与水合物饱和度之间都没有明显的相关趋势,即泊松比与水合物饱和度关系不大;原状样和合成样的变形特性的不同主要是由于初始孔隙比和沉积物颗粒级配的不同造成的等。

Clayton 等人[12]通过合成甲烷水合物砂样的共振柱实验,得到了在 0.25～2 MPa 范围内甲烷水合物含量对砂样沉积物的剪切模量、体积模量以及阻尼比的影响,并与那些没有与水合物粘结的和分离后的甲烷水合物砂样进行了对比。实验结果表明:这种在实验过程中形成的围绕在砂粒间的水合物胶结对砂样的剪切模量具有很大的影响,而对体积模量的影响则很小;饱和砂样的体积模量和剪切模量的比值从 15～30(取决于有效应力水平)到 2(当水合物含量为增加到充满 20 %孔隙空间时);具有水合物胶结的砂样的阻尼比值高得多,当水合物含量为 3 %～5 %时,砂样的阻尼达到峰值。此实验结果为甲烷水合物沉积物的模型建立和地震波地球物理调查的解释提供了支持和参考。

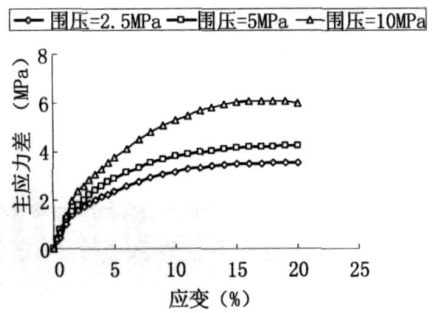

图 7a　甲烷水合物沉积物的应力－应变关系

Fig. 7a　Stress versus strain of methane hydrate sediment samples

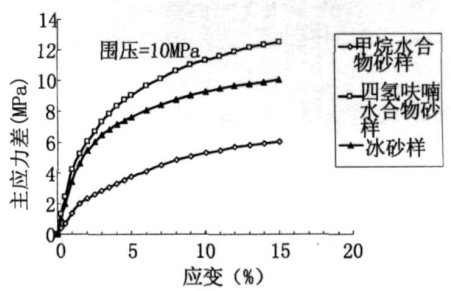

图 7b　甲烷、四氢呋喃水合物沉积物及冰样的应力－应变关系

Fig. 7b　Stress versus strain of methane hydrate sediment, tetrahydrofuran hydrate sediment and ice samples

力学所进行的四氢呋喃、甲烷水合物和冰在细砂沉积物中的合成和三轴实验结果(参见图 7)表明:甲烷水合物沉积物在水合物饱和度为 30 %时,围压分别为 2.5MPa、5MPa 和 10MPa 条件下得到的不排水抗剪强度参数 C 和 ϕ 分别为 1.17MPa 和 8.5°。四氢呋喃水合物、甲烷水合物、冰样品在围压

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

10MPa 条件下的应力应变关系均呈塑性破坏行为,但其剪切强度明显不同。在 2 %应变之前,含冰土样的弹性模量最大,甲烷的弹性模量最小。四氢呋喃水合物沉积物的强度最高,冰样品次之,甲烷水合物沉积物的强度最小。

3 存在的问题

3.1 实验装置和测试技术

目前水合物沉积物合成分解和力学性质实验一体化装置存在的问题和原因如下:

(1) 水合物合成分解时甲烷气体进出量的控制和计量问题

如何使甲烷气体在水合物生成前尽可能均匀充满沉积物样品的孔隙以及控制甲烷的饱和度,是水合物沉积物力学性质实验研究的关键。Winters 和 Waite 对甲烷水合物渥太华砂样沉积物的实验研究中发现,这些因素将直接影响水合物沉积物强度参数的大小,有时影响甚至很大。而 Priest[18] 和 Masui 在他们发表的水合物沉积物实验结果中均没有介绍这些实验技术是否在实验中得到重视和应用的情况。目前国外技术保密和水合物控制合成技术的不成熟以及缺乏技术交流等原因,使得此方面的进展很缓慢。

在三轴仪中合成水合物沉积物样品难度大的主要原因:土样的标准尺寸一般较小,沉积物样品通常提前制备成标准尺寸,被包裹在橡皮膜内,甲烷气体通过细管从土样底部充入。在甲烷气体充入过程中,为保证样品的原有形状,样品的周围压力应该始终保持比甲烷气体的进气压力稍小。如果周围压力和进气压力的控制不好,实验样品会过度收缩或膨胀,甲烷气体在沉积物中自下而上的流动就会不顺畅和不均匀,而且水合物形成过程中的表面效应也会更明显,从而使水合物合成速度减慢,水合物在沉积物样品中的初始分布会明显不均匀。此外,水合物的合成需要有足够的水分、要求气体处于脉动和紊流等扰动并有结晶中心存在,达到这些标准就需要像在单纯水合物沉积物合成和分解装置中那样,在实验样品内及附近空间加装填入表面活性剂以及高频振动和搅拌装置,但三轴压力室内空间有限且样品底座有好多进排水、孔压和压力传感器的管路,因此目前尚无成功加装这些附属装置的实例。

(2) 水合物各主要物性参数的测量方法和测量技术的研究

已有的研究表明,水合物沉积物的强度和变形等力学特性会受水合物气体分布的均匀性、饱和度、压力、温度、含水量以及沉积物种类等多种因素的影响[19],因此,实现对水合物沉积物中气体的饱和度、含水量等物性参数的实时测量非常重要。但目前除了 GHASTLI 配有声波、渗透率和电阻测量外,其它设备均缺乏对水合物沉积物一些主要物性参数的测试。此外,考虑到水合物沉积物分解过程中的水的液、固两相,天然气的气、液、固三相的可能存在状态,此时水合物沉积物类似于非饱和土,因此应该考虑对样品的孔压和气压以及体积应变等进行测量。但由于三轴仪中土样两端原来设计有多条进出水管路、压力和体变等传感器接口以及线缆的引进和引出,增加其他元器件设计的空间受限;另外水合物的高压和低温环境要求,一些测量方法和技术会很难实现,甚至不再可行。

3.2 实验研究结果

已有的现场调查和室内初步实验研究表明:水合物沉积物的力学性质与水合物的类型和含量、水合物沉积物的沉积特性、以及水合物与骨架的胶结方式和微生物含量等因素密切相关。甲烷气体分子可以与水形成 I 型、II 型或 H 型水合物,并具有不同的水合物分子和结构,因此不同地区和不同环境条件下沉积物中水合物含量不同,水合物沉积物的物理和力学性质也会存在较大的差别。其次,水合物沉积物的沉积特性与其力学性质密切相关。这些特性包括岩性、沉积结构、沉淀、成岩等,其中岩性和结构最为复杂。沉积物岩性除了砂、粘土和混和砂、粘土等不同土质外,还存在互层和混合沉积。一般来讲,粘土水合物沉积物较砂岩水合物沉积物的强度低。还有,水合物在沉积物中的分布和与骨架的结合方式,以及微生物、细菌含量和硅藻属、钙微化石含量等成分也影响水合物沉积物的力学性质。水合物与沉积物胶结程度越高,水合物沉积物的强度越高,应力 - 应变关系越呈现脆性;水合物沉积物中微生物和细菌含量以及硅藻属、钙微化石含量不同,也会导致水合物强度不同。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4 结语

在实验装置和物性参数测试技术方面,亟需对水合物合成和分解实验过程进行有效和规范的控制,以便使水合物在沉积物中的分布尽可能均匀,保证实验样品的可重复性。同时实现声、光、电等测试技术对水合物沉积物物性参数的实时、动态和准确测量,对了解和分析水合物沉积物样品的物性和力学性质参数的相关关系至关重要。在实验研究方面,目前的实验研究尚属初步,今后应着重对影响水合物沉积物力学性质的各主要因素,如水合物饱和度以及在样品中均匀性的影响,合成的压力和温度条件,沉积物类型和结构影响等相关实验,开展对水合物以及水合物沉积物的定性、定量和系统的力学性质研究。

参考文献:

[1] Kvenvolden K A, Lorenson T D. The global occurrence of natural gas hydrate, Natural Gas Hydrate: Occurrence, distribution and detection[M]. Washington D C, American Geophysical Union, 2001: 3 - 18.

[2] Francisca F, Yun T S, Ruppel C, et al. Geophysical and geotechnical properties of near sea-floor sediments in the northern gulf of Mexico gas hydrate province [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 237(3-4): 924 - 939.

[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其进展[J]. 中国地质,2007,34(6):953 - 961(Zhang H T, Zhang H Q, Zhu Y H. Gas hydrate investigation and research in China: Present status and progress[J]. Geology in China, 2007,34(6):953 - 961(in Chinese))

[4] Sultan N, Cochonat P, Foucher J P, et al. Effect of gas hydrates melting on seafloor slope instability [J]. Marine Geology, 2004, 213:379 - 401.

[5] Hovland M, Orange D, Bjorkum P A, Gudmestad O T. Gas hydrate and seeps-effects on slope stability [C]. Proc. 11th Int. Offshore and Polar Engrg Conf., 2001, 11:471 - 476.

[6] 宁伏龙,蒋国盛,张凌等. 天然气水合物实验装置及其发展趋势[J]. 海洋石油,2008,28(2): 68 - 72(Ning F L, Jiang G S, Zhang L, et al. Development of experimental equipments for gas hydrate research[J]. Offshore Oil, 2008,28(2): 68 - 72 (in Chinese))

[7] 张剑,业渝光,刁少波等. 超声探测技术在天然气水合物模拟实验中的应用[J]. 现代地质, 2005,19(1): 113 - 118(Zhang J, Ye Y G, Diao S B, et al. Application of ultrasonic detecting technology in the experimental study of gas hydrate[J]. Geosciences, 2005,19(1): 113 - 118 (in Chinese))

[8] Wright J F, Nixon F M, Dallimore S R, et al. A method for direct measurement of gas hydrate amounts based on the bulk dielectric properties of laboratory test media[C]. 4th International Conference on Gas Hydrate, Yokohama, 2002:745 - 749.

[9] Waite W F, Kneafsey T J, Winters W J, Mason D H. Physical property changes in hydrate-bearing sediment due to depressurization and subsequent repressurization[J]. Journal of Geophysical Research, 2008,113:B7102.

[10] 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, 56:127 - 135.

[11] Hyodo M, Nakata Y, Yoshimoto N, et al. Shear behaviour of methane hydrate-bearing sand [C]. Proc. 17th Int. Offshore and Polar Engrg. Conf., 2007, Lisben, Portugal, 1326 - 1333.

[12] 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.

[13] Lu Xiaobing, Wang Li, Wang Shuyun, et al. Study on the mechanical properties of Tetrahydrofuran hydrate deposit [C]. Proc. 18th Int. Offshore and Polar Engrg. Conf., Vancouver, 2008: 57 - 60.

[14] Winters W J, Dallimore S R, Collett T S, et al. Relation between gas hydrate and physical properties at the Mallik 2L-38 research well in the Mackenzie Delta [J]. Annals New York Academy of Sciences, 2000, 912: 94 - 100.

[15] Waite W F, Winters W J, Mason D H. Methane hydrate formation in partially water-saturated Ottawa sand [J]. American Mineral, 2004, 89(8-9):1202 - 1207.

[16] Masui A, Haneda H, Ogata Y, Aoki K. Mechanical properties of sandy sediment containing marine gas hydrates in deep sea offshore Japan [C]. Proc. 17th Int. Offshore and Polar Engrg. Conf., Ocean Mining Symposium,

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2007 , Lisben , Portugal , 53 - 56.

[17] Masui A , Haneda H , Ogata Y , Aoki K. Effect of methane hydrate formation on shear strength of synthetic methane hydrate sediment[C]. Proc. 15th Int. Offshore and Polar Engrg. Conf. , Soeul , Korea , 2005 : 364 - 369.

[18] Priest J A , Best A I , Clayton C R I. Attenuation of seismic waves in methane gas hydrate-bearing sand [J]. Geophys. J. Int. 2006 , 164 : 149 - 159.

[19] 王淑云 ,鲁晓兵. 天然气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. Aadvances of research on mechanical properties of gas hydrate deposits[J]. Advances in Mechanics , 2009 ,39 (2) :176 - 188(in Chinese))

Advances in the Laboratory Apparatus and Research on Mechanical Properties of Gas Hydrate Sediment

WANG Shu-yun , LU Xiao-bing , ZHANG Xu-hui

(Key Lab. of Hydrodynamics and Ocean Engineering , Institute of Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100190 , China)

Abstract : Gas hydrate is a new and huge reserve energy resource on the earth with high efficient and pure characteristics. It usually exists in rock , sand , clay and some other types of sediment. The research on mechanical properties of gas hydrate sediment is one of the most important and popular topic related to the stability analysis of foundation in gas hydrate sediment stratum and the gas hydrate exploration estimation. Firstly , the apparatus of synthesis and dissociation , the technique of physical property measurement and the apparatus of mechanical property measurement about gas hydrate sediment testing in laboratory are introduced in this paper. Then , the achievements of integrative apparatus and research on the mechanical properties of gas hydrate sediment are presented with typical abroad and domestic devices. Finally , the problems existing in laboratory test apparatus , measurement technique and laboratory research are pointed out , and the emphasis and tendency in the future research on the apparatus and mechanical properties are suggested.

Keywords : gas hydrate ; gas hydrate sediment ; synthesis and dissociation ; mechanical property ; apparatus

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net