

水合物沉积物力学性质的研究现状*

王淑云[†] 鲁晓兵

中国科学院力学研究所, 北京 100190

摘要 天然气水合物(简称水合物)是一些具有相对较低分子质量的气体如甲烷、二氧化碳、氮气等在一定温度和压力条件下与水形成的内含笼形孔隙的冰状晶体. 天然气水合物沉积物(简称水合物沉积物)是指蕴含水合物的砂、黏土以及混和土等土质的沉积物质. 主要从现场调查、室内试验和理论模型分析 3 个方面对甲烷水合物沉积物力学性质的研究现状做了介绍. 在现场调查方面着重介绍水合物沉积物原位和调查船上的物性试验, 并对原位带孔压测量的圆锥静力触探试验在水合物沉积物力学性质现场调查中的应用前景进行了阐述; 在室内试验方面主要介绍了原状和人工合成的水合物沉积物的三轴试验结果, 测定弹性参数的声波测试试验结果, 天然气和水的含量及沉积物特性对水合物沉积物强度影响的试验结果, 以及与水合物开采有关的水合物分解对水合物沉积物强度影响的室内试验和结果; 在理论模型方面着重介绍了日前经常采用的几个模型的特点及应用范围. 最后提出了今后在水合物沉积物力学性质研究方面应开展的工作重点及发展方向.

关键词 水合物沉积物, 原位试验, 室内试验, 理论模型

1 引言

水合物是一些具有相对较低分子质量的气体如甲烷、二氧化碳、氮气等在一定温度和压力条件下与水形成的内含笼形孔隙的冰状晶体(图 1). 水合物沉积物是指蕴含这种固态水合物的砂、黏土以及混和土等土质的沉积物质, 常存在于低温和高压下的海洋和湖泊的深水环境以及大陆永久冻土带中, 成分以甲烷为主的为多见.

英国科学家 Humphrey Davy 在 1810 年首次发现水合物, 但直到美国科学家 Hammersmidt 在 1934 年发现了天然气管道的阻塞主要是由水合物造成的, 对水合物的研究才正式开始. 20 世纪 60 年代, 前苏联在西伯利亚麦索雅哈永冻区开发出了水合物, 70 年代美国开始进行海洋水合物的探测工作, 之后通过大洋钻探计划(ocean drilling program)取得了水合物沉积物岩芯^[1]. 从此, 围绕对水合物的勘探、室内合成、相平衡研究、模拟开采和环境影响评价研究工作才广泛开展起来.

目前已有 30 多个国家和地区进行了水合物的

调查和研究, 并在 70 多个国家和地区的 100 多处发现了水合物, 其中有 80 多处是在海洋^[2]. 我国也在南海海域发现多处水合物存在的地震勘探标志拟海底反射层(bottom simulating reflector, BSR), 并在 2007 年 5 月通过钻探取得实际水合物样品. 在常温和常压条件下, 每 1m^3 的甲烷纯水合物(仅含甲烷和水)可分解产生 164m^3 的甲烷气体和 0.8m^3 的纯水, 因而是一种重要的潜在资源^[3].

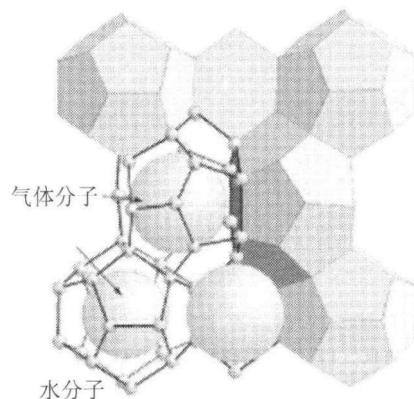


图 1 水合物笼形结构示意图

收稿日期: 2007-11-11, 修回日期: 2008-09-11

* 国家高技术发展研究专项(863)、中国科学院二期创新方向性项目(KJJCX2-YW-L02)和国家自然科学基金(1077218)资助项目

[†] E-mail: sywang@imech.ac.cn

在目前全球能源紧张和能源战略的形势下, 对水合物的开发更引起了各国的重视, 美国和日本分别制定了 2015 年和 2016 年进行水合物商业开采的计划^[4]. 我国近几年也加快了对水合物勘探和开发的研究工作, 并预计于 2016 年实现对水合物的开采.

水合物沉积物中一般有 4 种介质共存: 生成气、岩土骨架、水和固体水合物. 随着水合物饱和度增加或减少, 生成气和水的含量也随之变化, 水合物沉积物的强度和模量等力学性质从而发生明显的变化.

水合物开发涉及到含相变的渗流和水合物沉积物与结构物相互作用, 水合物沉积物的基础力学参数是所有这些分析和研究的基础, 但是由于研究时间不长, 难度大, 这方面的数据非常缺乏. 因此针对水合物和水合物沉积物的力学性质的研究是非常重要的和基础的.

对水合物沉积物的力学性质实验研究少的原因主要有: (1) 是以前的注意力主要集中在对实验室合成的纯水合物的研究, 针对海洋水合物开发的研究还刚刚起步; (2) 是由于现有的技术和设备仍很难取得和保持原状水合物样品来进行常规的室内强度测量实验; (3) 是目前尚未开发出针对水合物沉积物力学性质实验和测量的合适设备; (4) 是针对水合物地层(含水合物的地层)的地球物理反演技术还不成熟.

对水合物沉积物力学性质研究和数据获取手段主要包括现场调查、实验室试验、理论模型分析 3 方面. 现场调查一般采用的探测手段和技术有地震地球物理方法, 钻孔取芯法、声波探测和测井法等; 同时继续探索一些新技术和新方法, 如热力学法等. 实验室研究目前主要是水合物沉积物的人工制备方法和分解特性、热传导性质, 这些工作包括水合物沉积物的相平衡图和热传导系数获取等. 关于水合物沉积物力学性质的理论模型分析主要是基于各种假设的水合物沉积物弹性常数的确定模型.

下面从现场调查、室内试验和理论模型分析 3 方面概述国内外对水合物沉积物力学性质的研究现状和主要成果.

2 现场调查进展

现场调查主要分为地震波法、钻孔取芯法和

测井法等.

2.1 地震波法

地震波法主要有单波束法、多波速法、多频法、多分量法等. 主要是通过测量水合物沉积物的波速和衰减特性, 结合理论公式, 来得到水合物地层的弹性模量、阻尼以及水合物的含量等参数^[5]. Coren 等^[6~8]应用多属性分析 (multi-attribute analysis) 方法测量布莱克海岭 (Blake Ridge) 地区的波速、孔隙率、密度等参数. 实践表明这是一种可以获得水合物地层二维情况的很好方法. Rajput 等^[9]讨论了振幅与偏移 (amplitude versus offset, AVO) 技术, 即利用地层的纵横波特性及由此形成的反射振幅与偏移距的关系来判断岩层性质的方法, 以及其在水合物地层探测分析中的应用.

但是, 水合物地层(含有水合物的地层)厚度最大为百米量级, 最小的小于 1 m, 通常的地震波勘探受到分辨率的限制, 使获取的水合物地层厚度存在较大误差. 从目前的现场结果看, 一般估计的厚度偏大. 只有采用高分辨率的地震波勘探, 才有可能解决该问题. 到现在为止, 还没有比较统一的关于力学性质和波速间的关系, 而提取的力学性质参数的准确与否和采用的分析模型密切相关; 同时由于地震波反演具有多解特性, 而人们对水合物地层力学特性了解甚少, 因此对水合物地层的地震波反演技术仍然是水合物勘探的难题^[10,11].

一般来说, 通过地球物理勘探获得的力学性质参数是平均的, 粗糙的. 为了获得较准确的数据, 必须采用其它的方法, 如钻孔取芯法、测井法等.

2.2 钻孔取芯法

钻孔取芯法是直接通过钻孔, 将水合物沉积物地层的岩芯取出, 然后在现场调查船上或运回实验室内进行相关的试验获得所需要的力学参数^[12], 钻孔取芯法被广泛应用于大洋钻探计划中^[13]. 通过钻孔取芯后的试验可以进行^[14]: (1) 水合物宏观组分和含量的测量及分析. 这些组分和含量与力学性质密切相关. 分析手段有 X 射线衍射分析、颜色反射分光光度学分析、生物地层学分析、钙微化石分析、孔隙水地球化学等方法测量碳氢气体和其它要素的含量. (2) 水合物沉积物的物理性质试验, 如用多传感器跟踪 (multisensor track, MST) 测量方法对水合物的热传导系数、湿度和密度以及强度参数进行测量和分析.

在保持原位压力和温度条件下获取水合物沉积物的岩芯对于测定和获得符合实际场地条件的水合物沉积物的力学性质非常重要。天然气在深海沉积物中随深度的不同可以以固体、液体和气体三相方式存在。如果气体分布在孔隙水中的浓度小于溶解度,天然气就处于被溶解状态;反之则有气泡,即大于溶解度部分的气体以气相存在,在一定的温度和压力条件下,天然气又可以以固态的水合物形式存在。在深海沉积物中气体的集中程度和存在方式是了解水合物形成动力学和天然气对沉积物物性影响的重要数据,而成功钻取岩芯并能保持岩芯的原位高压条件是获得这些数据的唯一途径。大洋钻探计划(ocean drilling program, ODP)的工作表明钻孔取芯器是非常重要的工具。目前的这套装备对估算水合物的气体集中程度非常有效,但对水合物沉积物和水合物地层的测量还不太有效。

一般来讲,水合物的形成对原地层有强化作用,分解作用则相反。这是由于水合物分解后地层骨架的结构遭到破坏,同时原水合物承担的作用转移到孔隙水和气体上。因此如果取芯过程中水合物发生分解,最后通过试验获得的数据就不能反映实际情况。由于水合物对温度和压力敏感,这就要求在水合物取芯过程中有严格的压力和温度控制^[14]。尽管人们在取芯器的温度和压力控制方面已经做了很多努力,但是在保温和保压的精度和控制方面还有很多的工作要做。目前人们一般采用弥补措施,如通过测定岩芯电流来测定水合物沉积物物理沉积结构的扰动程度,并将扰动程度分为4级。在水合物沉积物物理和力学测定试验结果中考虑到扰动程度的影响,对试验结果进行合理的修正,从而得到符合实际水合物沉积物的物性和力学特性参数。

总之,目前困扰取芯法探测成功的瓶颈是保温保压取芯器和从取芯器中将样本取出放入试验装置过程中温度和压力的控制技术。

2.3 测井法

地球物理测井法是根据在井筒中的测试获得地球物理资料来提取钻孔剖面中可能含有的水合物沉积物稳定带(水合物相对稳定,未发生分解的区域)的物理和力学特性,为水合物勘探中地震波法和钻孔取芯法之后的又一有效手段。这种方法在油气勘探方面是成熟的,可供借鉴。地球物理测

井方法包括井径、伽玛射线、自然电位、电阻率、声波和中子孔隙度测井等方法^[15,16]。相对于周围沉积物,水合物沉积物稳定带的物理特征通常表现为声波速率、电阻率、孔径测定值增大以及密度测井读数减少等特点。因此,在众多的测井曲线中,电阻测井和声波测井特征曲线最为有用,但这种测井方法对水合物含量不大的粉砂及黏土质的水合物沉积物测量效果不明显。测井方法能探测到的范围受到波长、发生能量的限制,一般较常规地球物理勘探的范围小。研究证实,电阻率测井和声速测井特性曲线最为有用。测井法需要现场打井,在目前海底水合物地层中钻进完井技术不成熟的情况下,该方法受到限制,同时测井方法成本高。因此一般只有在正式开采前或试开采时采用,如在美国、日本和加拿大等国家共同开展的国际合作项目中,即加拿大 Mallik L-38 钻井试开采时曾采用几种测井方法获取数据。

2.4 应用及展望

地球物理勘探一般用于水合物的存在性探测,同时根据声波特性反演获取水合物沉积物的力学性质,在大洋钻探计划执行期间被广泛采用;取芯方法目前只在初步判断存在水合物的地区,以验证水合物的存在与否,同时进行一些物理和力学性质试验。

开展水合物沉积物力学性质试验和获取数据较多的主要在加拿大的 Mallik 永冻地区 1150m 深的探测井。其研究的目的,一方面是为了证实北极圈内水合物的存在,另一方面是为了用通过取芯法获得的水合物沉积物样品进行室内实验获得物理性质,并校验地震波勘探数据,同时确定水合物存在的位置。试验结果还表明:水合物含量高的位置在深度 897~922m 之间的砂和砾石层中,位于深度 926~952m 之间的淤泥层中水合物含量很少或没有,这可能是该层孔隙太小的缘故^[17]。

在 ODP Leg 164 位置,即在布莱克海岭区的水合物地层中获得了剪切波速和一些其它地球物理学的数据^[18]。从这些数据中得到的水合物沉积物体积模量和弹性固结理论模型结果的比较得出:在拟海底反射层上面,即海床下 440m 的沉积物地层中水合物的存在是超固结的;在海床下 520m,即水合物沉积物稳定带底部的下面,是典型的在游离气的部分饱和沉积层,这种区域存在着高可压缩性和单极音速波形的衰减;在这两个深度

之间,是水合物和游离气共存.在水合物沉积物稳定带,采用了基于多相流的波扩散和颗粒黏固理论的多种模型来预测水合物的含量,其与离散的水合物原位试样的测量结果相一致.

日前对水合物沉积物的现场调查和试验基本上是以物性试验居多,力学性质试验缺乏.主要原因是:(1)水合物沉积物的原位取芯难度大、成本高,而且现有技术水平还很难保持原位的高压和低温条件在水合物未发生分解情况下进行力学性质试验;(2)水合物沉积物结构复杂,组分多样(微生物学复杂)且气体可呈三相存在,日前对其了解还不够,对其物性试验和分析是了解和分析力学性质的前提;(3)水合物沉积物的强度比一般沉积物的大许多,而且温度或压力的微小变化就可能使水合物分解,引起水合物沉积物强度降低,并可能由此引发滑坡和井喷等灾害.因此原有的一些常规地质调查和土工评价的方法不再适用,必须进行改进或重新研制专用设备.

带孔压测量的原位静力圆锥触探试验 (pizocone penetration test, CPTU) 由于其试验数据重复性好、试验技术较为成熟,数据分析方法和经验较多,因此一直被广泛地应用在海洋土工调查和评价中,且是必不可少的原位试验之一^[19].日前,根据 CPTU 试验数据,可获知海洋土的土层剖面、强度、相对密度、固结和渗透参数、液化可能性等较可靠的土性参数和信息.它不仅具有在原位地层实际应力状态进行试验的优点,而且可减少昂贵的原位取芯费用,是非常有前景的水合物沉积物原位力学性质测试方法.

但日前的 CPTU 主要是用于深海或浅海一般地层的原位力学性质测试,如果用于水合物地层时则需要作相应的技术改进.例如:为避免水合物受热分解而在探头探入过程中进行降温处理、加入声波和温度测定的综合探头的研制等.另外,由于水合物沉积物的强度较大,水合物沉积物中的水会以液态和固态存在,气体会以气态、固态和液态存在,因此对探头的阻力设计、孔压和气压的设计难度加大,尤其在孔压的测量方面.

3 室内试验研究进展

由于近几年水合物及其水合物沉积物室内合成设备的建成,水合物原状岩芯样的缺乏,人们对水合物沉积物力学性质的研究逐渐向室内试验方

面开展.室内试验具有可控性,人工合成样品的成本较原位取芯和现场调查低很多.室内试验主要通过声波测量、电阻测量、三轴压缩、扭剪或共振柱试验等手段获得水合物沉积物的模量、阻尼和强度等参数.

水合物沉积物的声学性质会随着沉积物中水合物的形态和含量不同而呈现戏剧性的变化,声速的大小和衰减是水合物沉积物的两个重要性质,通过它可了解水合物沉积物的力学性质,并可得到其力学性质与水合物浓度、密度、孔隙和围压、频率,以及气体和水的饱和程度的关系^[20,21].Gei 等^[22]的研究表明声速和水合物沉积物的力学性质主要是孔压、温度和饱和度的函数.

相对而言,电阻法在测量二氧化碳水合物形成过程中观测效果明显,但是在甲烷水合物中则相反.这是因为前者水溶液中的离子多于后者^[23].

一般地,水合物的存在会增加水合物沉积物的剪切强度;但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在这个过程中会随之降低.水合物的分解和天然气的排出过程一方面使水合物沉积物中原有土颗粒之间的连接松动,土骨架受到大幅扰动;另一方面使分解释放的天然气超过气体饱和度,在沉积物中产生气泡,在不排水或低渗条件下,孔隙压力就会增加,体积也会膨胀,有效应力减小,从而使沉积物的强度大大衰减.最后土颗粒和水以及少许未排出的天然气形成一种强度低得多的非饱和且欠固结的沉积物,这对建在水合物地层上的平台或处于其中的井口和管道的稳定性是严重的威胁,而且还可能引发海底大面积的滑坡.

日前还发现,在实际开采天然气田的过程中,天然气的上覆地层有水合物存在的情况,这时天然气开采过程中管道升温等因素均会引发水合物地层中水合物的分解,因而也对上部结构物的安全构成威胁.因此对蕴含水合物地层中结构物的安全和稳定性评价是非常重要的,而其更关键的在于准确获得水合物分解前后以及分解过程中水合物沉积物的强度等力学参数.

有关水合物沉积物力学性质的试验和研究文献非常少,日前能查到和被引用最多的当属 Winters 等^[24,25]的对水合物沉积物原状样和室内制备样的力学性质实验结果.但因原状和重塑水合物沉积物样品少和取样地区的局限,试验研究结果

仅是对水合物沉积物的应力 - 应变关系和强度等力学特性的初步认识. 文 [24,25] 中试验采用的样品包括: (1) 北美大陆架马更歇三角洲 (Mackenzie Delta), Malik2l-38 钻井所取的水合物沉积物原状岩芯样; (2) 含甲烷水合物的渥太华砂沉积物的室内合成样; (3) 含冰的人工砂样. 已进行的压缩波和三轴压缩试验结果表明: 与未含天然气水合物的试样相比, 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、沉积物的性质和试验条件.

Winters 等 [24] 对 Malik 原状样的应力 - 应变关系和声学物理模型分析还表明部分自然界的天然气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. 因此水合物对水合物沉积物物理和力学性质的影响在原状与室内合成水合物沉积物样中的结果是不同的. 这些不同很可能是由形成水合物的水分子的位置引起的. 因此, 当使用基于人工合成样品的试验结果建立物理模型, 来预测实际水合物沉积物的物理特性时, 必须考虑到这一点.

Winters 等 [25] 通过声波测量、三轴剪切实验, 考察了在沉积物的孔隙中分别充满水合物和冰时, 其样品的声波特性的区别, 不同机制条件下形成水合物的声波特性的区别, 以及孔隙总量对强度的影响等. 结果表明, 在不同孔隙空间充满条件下, 纵波速度范围很宽, 从充满气体时的低于 1 km/s 到全部充满水时的 1.77~1.94 km/s, 充满不同水

合物含量时, 波速为 2.91~4.00 km/s, 充满冰时为 3.88~4.33 km/s. 相对来说, 细颗粒水合物沉积物的波速则较低 (1.97 km/s). 粗颗粒水合物沉积物中的孔压在剪切过程中降低而细颗粒水合物沉积物中的则相反. 总的来说, 水合物或冰填充的沉积物的波速增加, 增加程度与其含量和填充物与岩土颗粒间的胶结特性有关.

Winters 等 [24,25] 对水合物沉积物的试验结果和所用样品的性质如图 2, 图 3 和表 1 所示. 表 1 中 GH 为水合物, DW 为蒸馏水, MD 为马更歇三角洲, Ms 为固体质量, Mw 为水的质量, SOS 为过筛的渥太华砂 (1-2phi). 试验过程: 1 为天然的水合物沉积物, 4 为初始饱和, 压入甲烷, 降温, 5 为冻结孔隙中蒸馏水, 6 为冻结蒸馏水以确认成冰样, 8 为湿式砂雨法, 无甲烷, 9 为干的筛分渥太华砂, 11 为初始部分水饱和. d 为水合物/部分冻结, $\sigma'_c=0$ MPa, e 为水合物/部分冻结, $\sigma'_c=2.0$ MPa, f 为水, $\sigma'_c=0.125$ MPa, g 为水合物, $\sigma'_c=0.25$ MPa, h 为水, $\sigma'_c=0.25$ MPa, j 为水合物/部分冻结, $\sigma'_c=0.25$ MPa, k 为可能包含气, p 为冻结的沉积物, T 为内部温度 $-3.8^\circ\text{C}\sim-1.9^\circ\text{C}$, x 为可观察到水合物的胶结, ai 为 $\sigma'_c=0$ MPa, aj 为 $\sigma'_c=0.25$ MPa, bn 为 $\sigma'_c=1.0$ MPa. GH58, GH59, GH60 是在水合物分解、再冻结、再击和再固结后剪切的. GH62 在轴向应变为 8.8% 停止剪切以防止由于高的负孔压引起橡皮膜破裂. 破坏时的 "A" 系数为孔压变化除以主应力差变化. q 为作用在与水平面成 45° 夹角的斜面上的剪应力, $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$.

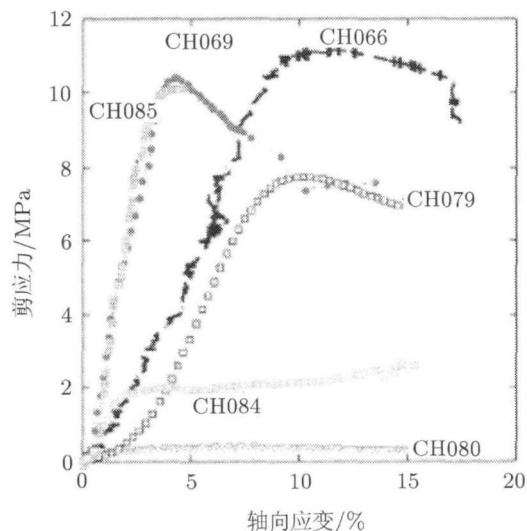


图 2 在孔隙中包含不同物质的筛分渥太华砂的应力 - 应变关系 [24]

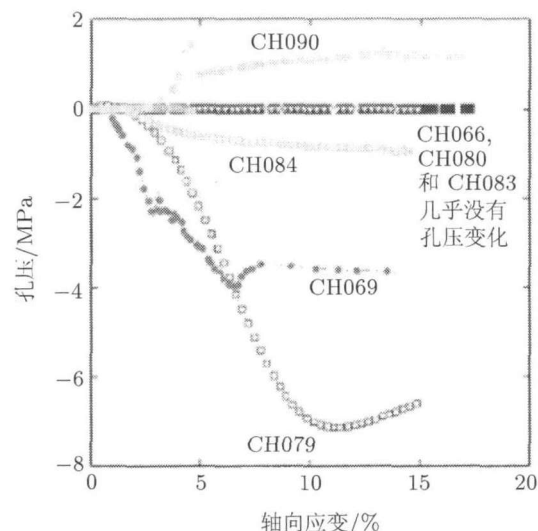


图 3 筛分渥太华砂及黏质粉土的孔压 - 应变关系 [25]

表 1 试验样品的性质和试验参数 [25]

试验标号 (GH)	58	59	60	62	66	67	69	73	79	80	83	84	85	90
常规信息														
有无含水合物	有	有	有	有	无	无	有	无	无	无	有	有	有	有
材料类型/ 取样位置	MD	MD	MD	MD	SOS	MD (GH 062)	SOS	MD (GH 062, 067, 071)	SOS	SOS	SOS	SOS	SOS	粉土
试验过程	1	1	1	1	5	5	4	8	8	9	11(70%水)	11(40%水)	11(20%水)	11(60%水)
顶部深度/m	913.13	913.13	898.97	899.23										
底部深度/m	913.13	913.26	899.1	899.36										
孔隙水	天然	天然	天然	天然	DW 冰 (T)	DW 冰	DW	DW	DW	无	DW	DW	DW	DW
水合物形成技术	天然水合物	天然水合物	天然水合物	天然水合物	无	无	初始完全饱和	无	无	无	初始饱和	初始饱和	初始饱和	初始饱和
初始物性参数														
含水量 (M_w/M_s)/%	21.3	20.6	15.5	17.9	18.5	15.1	18.5	16.4	18.98	0	12.9	7.8	3.8	22.7
孔隙水盐度/ppt	12	12	4	4	0	4	30	0	0	0	0	0	0	0
比重/ $g \cdot cm^{-3}$	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
孔隙率/%	38.55	40.75	34	37.45	32.65	28.6	32.8	31.6	33.04	39.4	36.9	39.4	37.9	49
气体和水合物的数量														
水合物充满孔隙的 90%	occ/%	-	50.3	69.2	-	-	<100	-	-	-	70	37	19.4	21.4
孔隙空间时速度/%														
底线 $V_p/km \cdot s^{-1}$	1.80(f)	1.54 (h,k)	1.77(h)	-	1.86	1.86	1.9	1.89(ai)	1.86 (ai)	-	0.86	1.4	-	0.67
$V_p/km \cdot s^{-1}$	2.73(d)	2.37(g)	2.65(j)	2.61(g)	1.91(h)	1.91(h)	3.95	1.9(aj)	1.91(aj)					
最大的 $V_p/km \cdot s^{-1}$	3.23(e)	2.91(g)	3.88(d)	2.8(d)	4.23(p)	4.33(p)	3.95	1.94(bn)	4.00			3.36	3.08	1.97
强度性质														
剪切中的孔隙	水	水	水	水合物/水	冰	水合物/水	水合物/水	水	水	空气	水合物/蒸馏水/气	水合物/蒸馏水/气	水合物/蒸馏水/气	水合物/蒸馏水/气
所含物质														
固结应力	0.24	0.22	0.26	0.36	-	0.34	0.34	0.252	0.252	0.248	0.235	-	0.266	4.89
σ_c/MPa														
破坏时的 "A" 系数	-0.33	-0.31	-0.26	-0.26	-	-0.131	-0.131	-0.4	-0.4	0	-0.0005	-0.18	-0.192	0.12
破坏时的最大 σ_{max}/MPa	1.55	1.38	0.82	6.69	11.17	10.42	10.42	7.734	7.734	0.39	10.111	2.613	2.445	4.739
破坏时的轴向应变/%	15	13.4	15	8.8	11.46	4.22	4.22	10.25	10.25	6.96	4.657	15.02	11.41	16.81

Hyodo 等^[26]对甲烷水合物砂样进行了一系列的室内三轴压缩试验,并比较了砂样孔隙中不同甲烷饱和度对甲烷水合物砂样力学性质的影响,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体积应变的变化与有效围压、剪应力和临界孔隙比的关系.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温度、反压、有效围压和甲烷水合物的饱和度.另外,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.

Clayton 等^[27]通过对一系列室内合成甲烷水合物砂样的共振柱试验,着重调查了在 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.试验结果表明:这种在试验过程中形成的围绕在砂粒间的水合物胶接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);具有水合物胶接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.此试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.

Masui 等^[28,29]在对日本南海海槽 (Nankai Trogh) 地区钻取的 4 个原状水合物岩芯样 (原状样) 和室内合成水合物 Toyoura 砂样 (合成样) (其物理性质参见表 2) 的三轴压缩试验结果表明: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 E_{50} 平均值明显低于后者约 200 MPa;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 (参见图 4 和图 5). 此项研究工作对确定今后开展室内合成水合物沉积物的力学性质研究工作的重点和如何将室内研究结果应用于实际具有很重要的指导意义.

表 2 水合物岩样的物理性质

试样	初始孔隙率/%	颗粒密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	初始含水量/%	体积密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
a	49.0	2.680	27.9	1.748
b	50.8	2.717	20.4	1.721
c	44.2	2.660	23.0	1.827
d	49.3	2.720	28.7	1.774

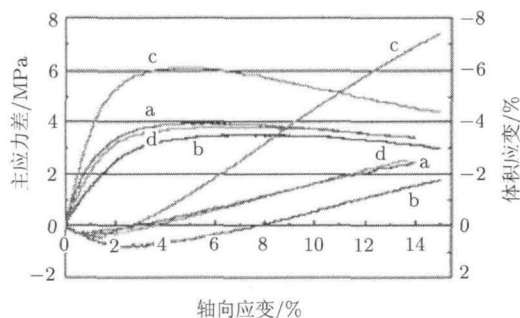


图 4 水合物原状岩芯的应力-应变关系

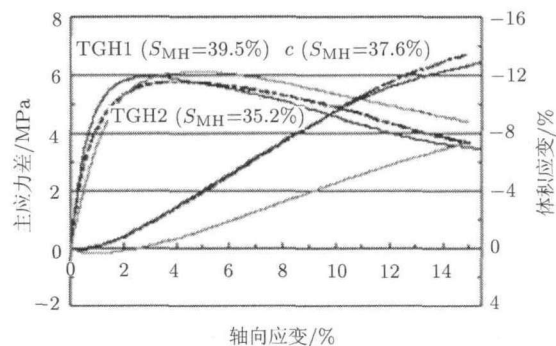


图 5 原状和合成水合物样品的应力-应变关系

目前对水合物沉积物力学性质的研究仍局限在室内合成沉积物样品和室内试验方面。因室内合成甲烷水合物的沉积物样品并保持原样到三轴试验机上继续进行试验还有一定的技术难度和局限,因此 Hyodo^[26] 和 Clayton^[27] 分别在原有的土工共振柱仪和三轴剪切仪的基础上改装,使之成为水合物沉积物合成和强度一体化装置,然后对合成的水合物沉积物进行强度试验和分析。此外,

人们还用人工合成的四氢呋喃水合物作为甲烷水合物的替代物进行力学性质试验^[30]。因为四氢呋喃在摄氏 +4°C 以下和常压条件下即可形成水合物,室内试验简单易行,而且四氢呋喃水合物沉积物在一定程度上也能反映甲烷水合物的力学性质。表 3 为四氢呋喃水合物与甲烷水合物一些物理性质的对比情况。

人们对纯水合物和水合物沉积物的热物理性

表 3 四氢呋喃水合物与甲烷水合物物理性质对比

	四氢呋喃水合物	甲烷水合物
热传导系数/ $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$	0.45~0.54	0.4~0.6
比热/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.123	1.6~2.7
容重/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	997	913
分解热/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	270	$-1050T+3527000$ (T 为温度)
热扩散系数/ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$0.2\times 10^{-7} \sim 0.4\times 10^{-7}$	

质开展了一些研究工作,获得了部分相关参数,如甲烷水合物的热扩散率 ($3.1 \times 10^{-7} \sim 3.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)、甲烷水合物和砂土混和物的热扩散率和温度的关系。但是这些研究离揭示实际情况还有相当的距离^[31,32],如水合物沉积物的热物性参数与其组成和结构是什么关系?如何确定等,还需要进行更深入的研究。

水合物沉积物骨架的渗透性对水合物的形成过程和分解过程有重要的影响。随着水合物在孔隙中形成,骨架的渗透性逐渐减弱,则导致气体渗透变慢甚至堵塞,水合物形成的速度就逐渐变慢甚至在离表面一定距离处水合物无法形成。随着水合物分解,孔隙逐渐增加,渗透性增加,有利于水合物分解后的气体和水的排出。我们目前对于水合物形成和分解过程中骨架渗透性的变化规律知之甚少,尤其是通过实验获得的基础数据极少,这严重限制了我们对水合物成藏机制和开采方法的研究^[33~35]。

实验室研究中的难题是实际的水合物沉积物是在几千甚至几万年间逐渐形成的,而实验室内的合成时间一般为几天或十几天,这样合成的水合物沉积物的结构性、胶接性等特性与原位的水合物沉积物有较大区别;同时实际的水合物在地层中的分布常常是非饱和的和非均匀的,沉积物的土质及分布更是千变万化,这样的实际样本在

实验室很难复制或合成出来。再者,实验室内的制样和试验过程中的温度和压力条件的保持也是关键和难点。

4 影响水合物沉积物力学性质的主要因素

水合物是在一定条件(合适的温度、压力、气体饱和度、水的盐度、pH 值等)下形成,保持其结构稳定的条件称为相平衡条件,一般所有符合条件的温度和压力构成一条相平衡曲线。人们针对纯水合物、不同骨架的水合物沉积物的相平衡条件进行了大量的研究^[36~41],提出了多种相平衡模型,如修正的 van der Waals-Plateeuw 模型,Chen-Guo 模型等^[42]。研究发现不同的骨架条件下,水合物相平衡条件会不同,如黏土骨架中相平衡曲线(压力为纵坐标,温度为横坐标)会较砂土的在水平方向左移 $1^\circ \sim 2^\circ$ 。但是同样的介质条件下,即使水合物形成过程中的温度和压力变化路径不同,平衡状态不同,其强度却相同^[26]。

现场调查和室内试验研究表明,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接方式和微生物含量等因素密切相关。

首先,气体分子可以单独与水形成 I 型或 II 型水合物,也可由多种气体分子与水形成混杂型的 H 型水合物。水合物在沉积物中的形成过程很

复杂^[43](图 6). 由于形成水合物的分子和结构不同, 在不同地区的环境条件下的水合物含量不同, 致使水合物沉积物的物理和力学性质会存在较大

的差别. 一般地, 水合物的含量越高, 水合物沉积物的强度就越高.

其次, 水合物沉积物的沉积特性与其力学性

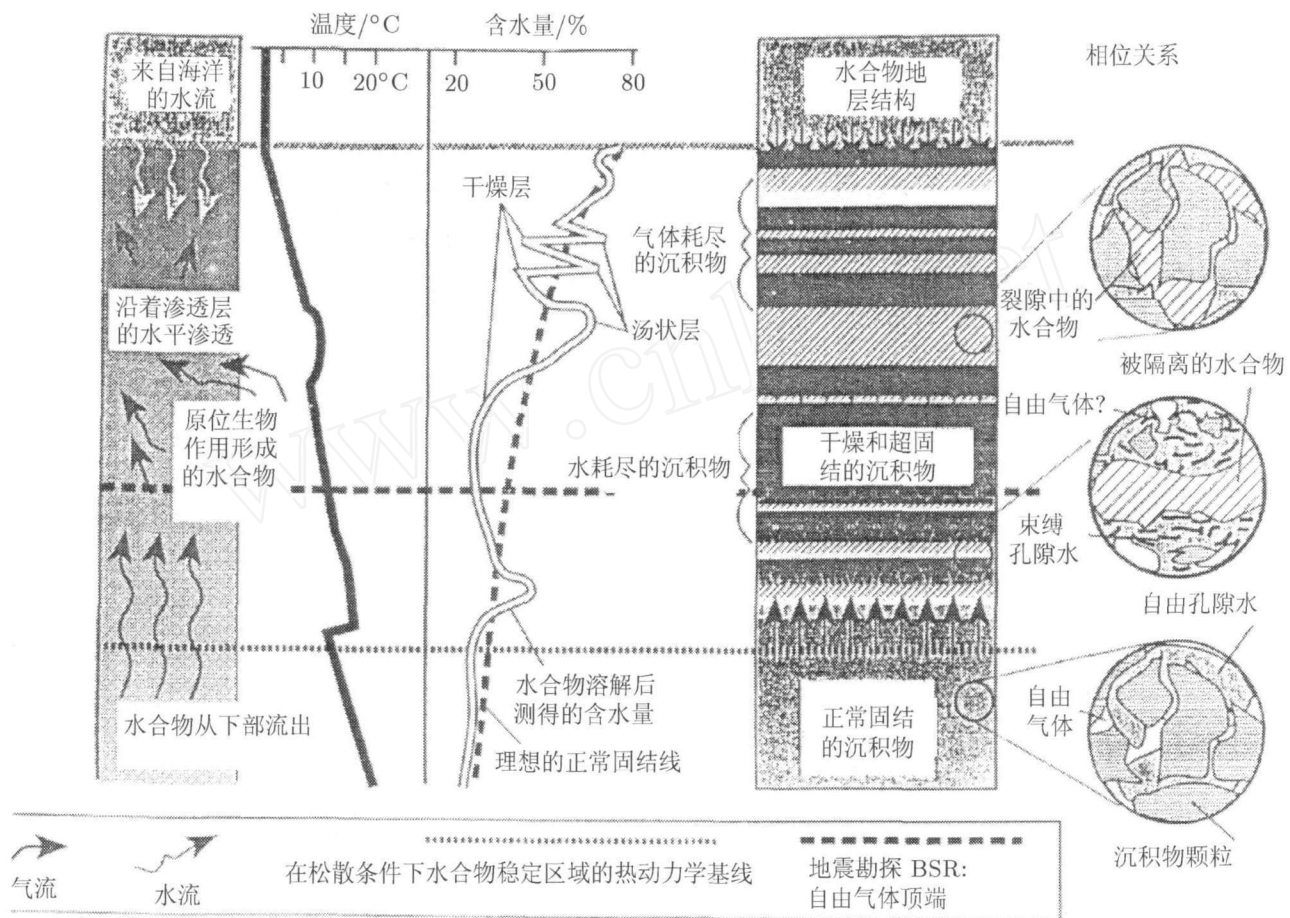


图 6 水合物在沉积物中的形成

质密切相关. 这些特性除了扰动程度, 还包括岩性、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、黏土和混和砂、黏土等不同土质外, 还有互层沉积和混合沉积^[44]. 图 7 分别给出了大洋钻探计划获得的不同岩性的水合物沉积物岩芯样, 仅从宏观上就可以看出, 水合物沉积物组分和结构明显不同. 不同岩性和结构的水合物沉积物的强度有较大的差别, 一般黏土水合物沉积物强度低, 砂岩强度高. 如在加拿大马更歇三角洲, 水合物出现在粗颗粒的沉积物中, 水合物沉积物的剪切强度值就高, 分解后也相对较高; 而在墨西哥湾海底表面细颗粒的沉积物中就有水合物存在, 水合物沉积物的剪切强度值就低些, 分解后也相对较低.

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. 一般水合物与沉积物胶接程度越高, 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, 但目前尚未开展其如何定性影响水合物强度的研究.

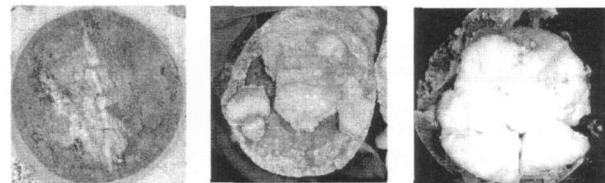


图 7 大洋钻探计划 (ODP) 获取的水合物沉积物岩芯样横剖面

目前人们对上述这些因素如何改变和影响水

合物沉积物力学性质的试验和认识还远远不足,更缺乏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。

5 水合物沉积物力学参数的理论模型研究

通过对地震或声波测量获得的波速和衰减特性等数据进行反演,就可以确定水合物的含量并推断水合物沉积物的力学性质,但是首先必须确定地震波速及其衰减特性与沉积物孔隙中水合物的含量、微结构以及力学参数间的关系^[45,46]。关于水合物沉积物弹性常数的理论模型分为两方面:(1)建立各相组分及各相纯介质时的波速与水合物沉积物的波速间的关系;(2)建立测得的水合物沉积物的波速与其弹性模量和剪切模量等参数间的关系,建立各相组分及其弹性常数与水合物沉积物的弹性常数间的关系,从而可以获得水合物沉积物波速与各组分弹性常数与其它力学性质间的关系。根据建立的上述两方面的关系,一方面可以根据测得的水合物沉积物的波速特性,通过反演获得水合物沉积物的弹性常数、各组分含量等力学性质;另一方面可以通过各组分含量和对应的纯介质的力学常数确定水合物沉积物的力学参数。

水合物沉积物是多相孔隙介质,一般认为水合物在岩土固体骨架中有 3 种存在方式:(1)水合物是孔隙流体的一部分;(2)水合物是固体骨架的一部分;(3)水合物胶结在固体颗粒表面上。不同的存在方式对水合物沉积物的力学性质的影响是不一样的。针对不同的存在方式,人们提出了多种理论模型。

目前提出的多种模型都是以 Biot 多孔介质理论^[47,48]为基础,在上述 3 种水合物在骨架中的存在方式的假设下,骨架借鉴固体力学的复合材料理论^[49]建立的。主要有:(1)时间变化平均方程^[50,51];(2)胶结理论^[52~54];(3)孔隙填充模型^[55];(4)加权平均模型^[56~59];(5)有效介质理论模型^[60,61]。

孔隙充满水合物与充满流体的情况相比,前者具有相对较高的弹性压缩波和剪切波波速,水合物沉积物的声波速度一般也较高。下面重点介绍几种最常用的模型。

Pearson 等^[56]将水合物充满孔隙的特性与近表面沉积物的欠固结属性相结合,提出了加权平

均模型。该模型的主要特点是将水合物沉积物的波速由几种方法确定的值进行加权平均获得,主要公式为

$$\frac{1}{V_p} = \frac{\phi(1-S)}{V_w} + \frac{\phi S 1 - (1-S)}{V_h V_m} \quad (1)$$

式中 V_p 是水合物沉积物的压缩波速, V_w 是孔隙流体的压缩波速, V_h 是纯水合物的压缩波速, V_m 是骨架的压缩波速, ϕ 是孔隙率, S 是孔隙中水合物的含量。研究发现,式(1)只是在低骨架波速,即非固结情况下适用^[62]。

Lee 等^[57]根据 Pearson 等^[56]的加权思想,用 Nobes 等^[63]的方法,将时间平均方程与 Wood 方程^[64]结合,提出了如下的加权平均方程

$$\frac{1}{V_p} = \frac{W\phi(1-S)^n}{V_{p1}} + \frac{1-W\phi(1-S)^n}{V_{p2}} \quad (2)$$

其中 V_{p1} 是由三相 Wood 方程确定的水合物沉积物的压缩波速, V_{p2} 是由三相时间平均方程确定的水合物沉积物的压缩波速, W 是权重系数, n 表示随水合物含量增长的岩质化速率的一个常数。

加权方程能较好地预测疏松含气的水合物沉积物的弹性性质,缺点是采用的时间平均方程的经验关系式作为方程的一部分,使得分析结果具有经验性。针对实际情况,还需要考虑黏粒含量、有机质含量等因素的影响。

Lee 等^[58,59]基于 Biot^[47,48]和 Gassmann^[65]的理论,并假定剪切波和压缩波的速度比与沉积物骨架的速度比和密度成比例,提出了预测欠固结水合物沉积物弹性波速的方法。由于此公式明确使用了由加权方程或有效介质理论计算的比奥系数,所以它已被应用在加拿大 Mallik-2L 钻井水合物勘探的数据采集中。主要公式为

$$V_p = \sqrt{\frac{K+4G/3}{\rho}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (3)$$

$$\rho = (1-\phi)\rho_{ma} + \phi\rho_{fl}$$

式中 V_s 为水合物沉积物的剪切波速, K , G , ρ 分别为体积模量、剪切模量和密度, ρ_{ma} 为骨架密度, ρ_{fl} 为孔隙流体密度。

Helgerud 等^[62]和 Jakobsen 等^[61]分别改进了基于有效介质理论的速率方程。该方程为

$$V_p = \sqrt{(K_{sat} + 4G_{sat}/3)/\rho_B}, \quad V_s = \sqrt{G_{sat}/\rho_B} \quad (4)$$

其中 ρ_B 为体积密度, K_{sat} 为饱和沉积物的体积模量, G_{sat} 为饱和沉积物的剪切模量且与干的沉积

物的剪切模量 G_{dry} 相同。

$$K_{\text{sat}} = K \frac{\phi K_{\text{dry}} - (1 + \phi) K_f K_{\text{dry}} / K + K_f}{(1 - \phi) K_f + \phi K - K_f K_{\text{dry}} / K} \quad (5)$$

其中 K 为骨架的体积模量, K_{dry} 为干的沉积物的体积模量, K_f 为孔隙流体的体积模量。

有效介质理论模型的优点与加权平均方程一样, 对预测疏松含气水合物沉积物的弹性性质较有效, 缺点是在预测高孔隙地层的横波波速值时高的不合理。

由于目前获得的水合物沉积物力学性质与各组分性质的数据不够, 对水合物各相组分与弹性模量和剪切模量之间的关系只是给出了基于多种假设的经验关系, 尚缺乏验证。在水合物弹性常数和声波特性的理论模型研究上, 应该考虑水合物与骨架间的胶接与否、水合物的形成对沉积物微结构的改变等因素的影响, 尤其是需要建立不同水合物含量、分布状况、微结构特征、化学和生物特征与水合物沉积物的弹性常数和声波特性间的关系, 从而为水合物的精细勘探提供依据。

6 结 语

对水合物沉积物力学性质的研究结果表明: 水合物的类型、水合物沉积物的形成过程、沉积物骨架和结构的性质、沉积物中的气体含量和分布、微生物以及硅藻属、钙微化石含量等因素都与水合物沉积物的力学性质密切相关。

目前对水合物沉积物的力学性质的研究结果还很少, 还缺乏对水合物沉积物的定性、定量和系统的研究。今后应该开展的工作包括: 在现场原位调查方面, 采用更有效易行的测量手段, 如 CPTU 方法; 在室内试验方面, 首先要建成合成和试验一体化的装置, 测量方面应尽量采用非接触式和可探测内部结构和性质的方法; 在理论模型方面应考虑水合物的结构性和胶接性。通过实验和理论分析获得水合物开采和相关灾害分析所必需的水合物分解前后的力学性质和热物性, 包括弹性常数、强度、波速衰减特性、蠕变特性、渗流特性、热传导系数等, 同时要考虑不同骨架材料和不同水合物饱和度情况下的结果; 获得水合物沉积物微观特性与宏观力学参数间的关系。

鉴于在日前基础数据非常缺乏, 而现场试验成本高, 难度大的特点, 研究工作应以室内试验为主, 在大量的试验基础上, 进行理论分析和数值模

拟, 获得所需要的力学性质。

参 考 文 献

- 1 考克斯 John L. 天然气水合物(性质、资源与开采). 曾昭懿, 吕德本译. 北京: 石油工业出版社, 1988
- 2 Kvenvolden K A, Lorenson T D. The global occurrence of natural gas hydrate. *Geophysical Monograph*, 2001, 124: 3~18
- 3 Kono H O, Narasimhan S, Song F, et al. Synthesis of methane gas hydrate in porous sediments and its dissociation by depressurizing, *Powder Technology*, 2002, 122: 239~246
- 4 Tréhu A M, Bohrmann G, Rack F R, et al. Explanatory notes(Shipboard Scientific Party). In: Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports, Electronic Presentation by ODP. 2003. 204
- 5 Carcione J M, Gei D. Gas-hydrate concentration estimated from P- and S-wave velocities at the Mallik 2L-38 research well, Mackenzie Delta, Canada. *Journal of Applied Geophysics*, 2004, 56: 73~78
- 6 Weitemeyer K, Conatable C, Key K. Marine EM techniques for gas-hydrate detection and hazard mitigation. *The Leading Edge*, 2006, 25(5): 629~632
- 7 Coren F, Volpi V, Tinivella U. Gas hydrate physical properties imaging by multi-attribute analysis- Blake Ridge BSR case history. *Marine Geology*, 2001, 178: 197~210
- 8 Rajput S, Rao P P, Thakur N K. Two dimensional elastic anisotropic/AVO modeling for the identification for the BSRs in marine sediments using multicomponent receivers. *Geo Mar Lett*, 2005, 25: 241~247
- 9 Willoughby E C, Latychev K, Edwards R N, et al. Resource evaluation of marine gas hydrate deposits using seafloor compliance methods. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2000, 912: 146~158
- 10 Andreassen K, Hart P E, Mackey M. Amplitude versus offset modeling of the bottom simulating reflection associated with submarine gas hydrate. *Marine Geology*, 1997, 137: 25~40
- 11 Lu S M, McMechan G A. Elastic impedance inversion of multichannel seismic data from unconsolidated sediments containing gas hydrate and free gas. *Geophysics*, 2004, 69(1): 164~179
- 12 汤凤林, 张时忠, 蒋国盛等. 天然气水合物钻探取样技术介绍. *地质科技情报*, 2002, 21(2): 97~99
- 13 Dickens G R, Paull C K, Wallace P. Direct measurement of in situ methane quantities in a large gas-hydrate reservoir. *Nature*, 1997, 385(6615): 426~428
- 14 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. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237(3-4): 924~939
- 15 Mathews M., Logging characteristics of methane hydrate. *The Log analyst*, 1986, 27(3): 26~63
- 16 Murray D R, Kleinberg R L, Sinha B K, et al. saturation, acoustic properties, growth habit, and state of stress of a gas hydrate reservoir from well logs. *Petrophysics*, 2006, 47(2): 129~137
- 17 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. *Annals New York Academy of Sciences*, 2000, 912: 94~100

- 18 Gilles G, David G, Meltser A. Characterization of in situ elastic properties of gas hydrate-bearing sediments on the Blake Ridge. *Journal of Geophysical Research*. 1999, 104(B8): 17781~17795
- 19 王淑云, 鲁晓兵. 深水土工调查技术和分析方法新进展. *海洋工程*, 2007, 259(2): 126~130
- 20 王东, 张海澜, 王秀明等. 天然气水化物的声学探测进展. *应用声学*, 2005, 24(2): 72~77
- 21 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. *现代地质*, 2005, 19(1): 113~118
- 22 Gei D, Carcione J M. Acoustic properties of sediments saturated with gas hydrate, free gas and water. *Geophysical prospecting*, 2003, 51(2): 141~157
- 23 刘昌岭, 业渝光, 张剑等. 海洋天然气水合物的模拟实验研究现状. *岩矿测试*, 2004, 23(3): 201~206
- 24 Winters W J, Pecher I A, Waite W F, et al. Physical properties and rock physical models of sediment containing natural and laboratory-formed methane gas hydrate. *American Mineralogist*, 2004, 89: 1221~1227
- 25 Winters W J, Waite W F, Mason D H, et al. Methane gas hydrate effect on sediment acoustic and strength properties. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 56: 127~135
- 26 Hyodo M, Nakata Y, Yoshimoto N, et al. Shear behaviour of methane hydrate-bearing sand. In: Proc. 17th Int. Offshore and Polar Engng. Conf., Lisbon, Portugal, 2007. 1326~1333
- 27 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. *Geotechnique*, 2005, 55(6): 423~434
- 28 Masui A, Haneda H, Ogata Y, Aoki K. Mechanical properties of sandy sediment containing marine gas hydrates in deep sea offshore Japan. In: Proc. 17th Int. Offshore and Polar Engng. Conf., Ocean Mining Symposium, Lisbon, Portugal, ISOPE, 2007. 53~56
- 29 Masui A, Haneda H, Ogata Y, Aoki K. Effect of methane hydrate formation on shear strength of synthetic methane hydrate sediment. In: Proc. 15th Int. Offshore and Polar Engng. Conf., Seoul, Korea, ISOPE, 2005. 364~369
- 30 Durham W B, Kirby S H, Zhang W. The strength and rheology of methane clathrate hydrate. *Journal of Geophysical Research*. 2003, 108(B4): 2182
- 31 Kumar P, Turner D, Sloan E D. Thermal diffusivity measurements of porous methane hydrate and hydrate-sediment mixtures. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(B1): B01207
- 32 Waite W F, deMartin B J, Kirby S H, et al. Thermal conductivity measurements in porous mixtures of methane hydrate and quartz sand. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(24): 2229
- 33 Nimblett J, Ruppel C. Permeability evolution during the formation of gas hydrates in marine sediments. *J Geophys Res*, 2003, 108(B9): B001650
- 34 Sakamoto Y, Komai T, Kawamura T, et al. Field scale simulation for the effect of relative permeability on dissociation and gas production behavior during depressurization process of methane hydrate in marine sediments. In: Proc. 17th Int. Offshore and Polar Engng. Conf. Ocean Mining Symp., Lisbon, Portugal, ISOPE: 2007. 102~107
- 35 Minagawa H, Nishikawa Y, Ikeda L, et al. Measurement of methane hydrate sediment permeability using several chemical solutions as inhibitors. In: Proc. ISOPE, Ocean Mining Symp., Lisbon, Portugal, 2007. 87~92
- 36 Klauda J B, Sandler S I. Prediction of gas hydrate phase equilibria and amounts in natural sediment porous media. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20: 459~470
- 37 Wilder J W, Seshadri K, Smith D H. Modelong hydrate formation in media with broad pore size distributions. *Langmuir*, 2001, 17(21): 6729~6735
- 38 Henry P, Thomas M, Cleennell M B. Formation of natural gas hydrates in marine sediments 2: Thermodynamic calculations of stability conditions in porous sediments. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(B10): 23005~23022
- 39 Zhang Y X. Methane escape from gas hydrate systems in marine environment, and methane-driven oceanic eruptions. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(7): 1398
- 40 Ostergaard K K, Anderson R, Liamedo M, Tohidi B. Hydrate phase equilibria in porous media: effect of pore size and salinity. *Terra Nova*, 2002, 14(5): 307~312
- 41 Liamedo M, Anderson R, Tohidi B. Thermodynamic prediction of clathrate hydrate dissociation conditions in mesoporous media. *American Mineralogist*, 2004, 89: 1264~1270
- 42 Guo T M, Wu B H, Zhu Y H, et al. A review on the gas hydrate research in China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, 41: 11~20
- 43 Clennell M B, Hovland M, Booth J S, et al. Formation of natural gas hydrates in marine sediments: 1, Conceptual model of gas hydrate growth conditioned by host sediment properties. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 22985~23003
- 44 苏新, 宋成兵, 方念乔. 东太平洋水合物海岭 BSR 以上沉积物粒度变化与气体水合物分布. *地学前缘*, 2005, 12(1): 234~242
- 45 Priest J A, Best A I, Clayton C R I. Attenuation of seismic waves in methane gas hydrate-bearing sand. *Geophys J Int*, 2006, 164: 149~159
- 46 Helgerud M B, Dvorkin J, Nur A. Rock physics characterization for gas hydrate reservoirs. Gas Hydrate Reservoirs: Elastic Properties. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2000, 9: 49~58
- 47 Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. I. Low frequency range; higher frequency range. *Journal of acoustical society of America*, 1956b, 28: 168~191
- 48 Biot M A. Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media. *Journal of acoustical society of America*, 1962, 34: 1254~1264
- 49 宋海斌, 松林修, 吴能友等. 海洋天然气水合物的地球物理研究 (I): 岩石物性. *地球物理学进展*, 2001, 16(2): 118~126
- 50 Bangs N L B, Sawyer D S, Golovchenko X. Free gas at the base of the gas hydrate zone in the vicinity of the Chile triple junction. *Geology*, 1993, 21: 905~908
- 51 Wood W T, Stoffa P L, Shipley T H. Quantitative detection of methane hydrate through high resolution seismic velocity analysis. *J Geophys Res*, 1994, 99(B5): 9681~9695
- 52 Guerin G, Goldberg D, Meltser A. Characterization of in situ elastic properties of gas hydrate-bearing sediments on the Blake Ridge. *J Geophys Res*, 1999, 104(B8): 17781~17795

- 53 Helgerud M B, Dvorkin J, Nur A, et al. Elastic-wave velocity in marine sediments with gas hydrate: effective medium modeling. *Geophy Res Lett*, 1999, 26(13): 2021~2024
- 54 Sakai A. Can we estimate the amount of gas hydrate by seismic methods. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2000, 912: 374~391
- 55 Hyndman R D, Spence G D. A Seismic study of methane hydrate marine bottom simulating reflectors. *J Geophy Res*, 1992, 97(B5): 6683~6698
- 56 Pearson C F, Halleck P M, McGure P L, et al. Natural gas hydrate: A review of in situ properties. *J Phys Chem*, 1983, 87: 4180~4185
- 57 Lee M W, Hutchinson D R, Collet T S, et al. Seismic velocities for hydrate-bearing sediments using weighted equations. *J Geophy Reasearch*, 1996, 101(B9): 20347~20358
- 58 Lee M W, Collett T S. Elastic properties of gas hydrate-bearing sediments. *Geophysics*, 2001, 66(3): 763~771
- 59 Lee M W. Biot-Gassmann theory for velocities of gas hydrate-bearing sediments. *Geophysics*, 2002, 67(6): 1711~1719
- 60 Helgerud M B, Dvorkin J, Nur A. Rock physics characterization for gas hydrate reservoirs-elastic properties. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2000, 912: 116~125
- 61 Jakobsen M, Hudson J A, Minshull T A, et al. Elastic properties of hydrate-bearing sediments using effective medium theory. *J Geophy Res*, 2000, 105(B1): 561~577
- 62 Toyasa, C, Nur A. Effects of diagenesis and clay on compressional velocities in rock. *Geophy Res Lett*, 1982, 9: 5~8
- 63 Nobes D C, Villinger H, Davis F F, et al. Estimation of marine sediment bulk physical properties at depth from seafloor geophysical measurements. *J Geophy Res*, 1986, 91: 14033~14043
- 64 Wood A B. A Textbook of Sound. London: G. Bell and Sons, 1955. 1031~1039
- 65 Gassmann F. Elasticity of porous media. *Vierteljahrsschr Naturforsch Gessellschaft*, 1951, 96: 1~23

ADVANCES OF RESEARCH ON MECHANICAL PROPERTIES OF GAS HYDRATE DEPOSITS*

WANG Shuyun[†] LU Xiaobing

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Gas hydrates (GH) are defined as the crystalline solid, or clathrate hydrates, which are formed by some types of low mass molecular gases, such as methane, carbon dioxide, and hydronitrogen et al, with water under relatively high pressure and low temperature conditions. Gas hydrate deposits (GHD) are some sand, clay and mixture soil sediments which contains gas hydrates. Advances of the research on the mechanical properties of the gas hydrate deposit are summarized in the aspects of in-situ investigation, laboratory test and theoretical model. Firstly, the in-situ investigations, including the in-situ tests (such as downhole test) and the physical properties tests on board, are summarized and the application of pizo-cone penetration test in the GHD geotechnical investigation and the study of mechanical properties of GHD are discussed. Secondly, some recent research advances in the laboratory test are presented, including mainly the tri-axial compression tests on the natural and synthesized GHD samples, the acoustic tests for measuring the elastic coefficients and the tests for studying the effects of the main factors such as the gas and water contents and the soil type on the strength of GHD. Some laboratory tests are also summarized regarding the hydrate dissociation influences on the strength of hydrate deposit during gas hydrate exploitation. Thirdly, several theoretical models for estimating the mechanical properties of GHD are introduced, and their main characteristics and application ranges are discussed. Based on the above summary, emphases and tendency in the future research on mechanical properties of GHD are finally discussed.

Keywords gas hydrate deposits, in-situ test, laboratory test, theoretical model

* The project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program), the Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJJCX2-YW-L02) and the National Natural Science Foundation of China (1077218)

[†] E-mail: sywang@imech.ac.cn