

高压下南海神狐水合物区域海底沉积地层 三轴力学性质初步测试*

关进安^{1,2,3,4†}, 卢静生^{1,2,3,4}, 梁德青^{1,2,3,4}, 李栋梁^{1,2,3,4}, 万丽华^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院天然气水合物重点实验室, 广州 510640;
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640; 4. 中国科学院广州天然气水合物中心, 广州 510640)

摘要: 为了解南海神狐海底含甲烷水合物沉积地层的工程地质和力学性质, 使用钻取自当地的多孔沉积细砂, 在可燃冰三轴原位力学测试平台上开展了当地环境下的含甲烷水合物沉积物试样的生成及随后的初步原位三轴力学测试。设计 2°C 和 5°C 两个环境, 设计围压为 9 MPa ~ 15 MPa, 水合物含量为 50%, 测试结果表明试样轴向应力、轴差应力、弹性模量随围压变化表现基本相同, 在 12 MPa 以前均随围压增大, 在 12 MPa ~ 14 MPa 间达到其峰值后下降; 而应力-应变峰值不同, 2°C 时试样峰值强度先降低然后再升高, 而 5°C 时则为先升高然后再降低, 相较而言在 2°C 时试样的变化比较平缓而在 5°C 时变化较大; 同时 2°C 时试样的轴向应力、轴差应力和弹性模量比在 5°C 时更大, 在 2°C 时和在 15 MPa 围压时该试样的应力/应变变化也比分别在 5°C 时和在 10 MPa 下大些, 说明在高围压和低温时含甲烷水合物沉积物力学强度更大。高压低温环境下含水合物沉积地层更可能展现出弹塑性力学特征。

关键词: 南海神狐海域; 含水合物沉积物; 三轴力学测试; 围压; 力学强度

中图分类号: TK01; P642.3

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2017.01.006

Preliminary Tri-Axial Mechanical Test on the Hydrate-Bearing Media from Shenhu Area of South China Sea under High Confining Pressures

GUAN Jin-an^{1,2,3,4}, LU Jing-sheng^{1,2,3,4}, LIANG De-qing^{1,2,3,4},
LI Dong-liang^{1,2,3,4}, WAN Li-hua^{1,2,3,4}

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

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

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China;

4. Guangzhou Center for Gas Hydrate Research, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to understand the geological and mechanical characteristics of the methane hydrate-bearing sediments in Shenhu area of South China Sea, a group of preliminary tri-axial mechanical tests were carried out. The temperatures were set as 2°C and 5°C separately, and the scope of the confining pressure was 9 MPa ~ 15 MPa, with hydrate content of 50%. The results indicate that the axial stresses, deviator stresses and elasticity modulus show similar changes according to the confining pressure. They increase with the confining pressures before 12 MPa. In the range of 12 MPa ~ 14 MPa they reach their peaks and then begin to decline. The peak of the stress-strain relationships at the two temperatures are different, it decreases firstly and then increases at 2°C, but increases firstly and then decreases at 5°C. The axial stress, deviator stress and elasticity modulus at 2°C are larger than at 5°C, and the stress/strain changes at 2°C&15 MPa are also larger than at 5°C&10 MPa respectively. It proves that the hydrate-bearing porous media possess a stronger mechanical strength under the surroundings of high pressure and low temperature.

Key words: Shenhu area of South China Sea; hydrate-bearing sediment; tri-axial test; confining pressure; mechanical strength

* 收稿日期: 2016-11-23 修订日期: 2017-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(41374149, 51474197, 51661165011, 51576197); 国家海洋地质专项项目(GHZ2012006003)

† 通信作者: 关进安, E-mail: guanja@ms.giec.ac.cn

0 引 言

在 2015 年 9 月完成的第三次南海神狐区域实地钻进调查 (GMGS3) 中, 中国地质调查局再次发现并确认了该区域海底沉积物内可高达近 70% 水合物含量的储层^[1], 加上南海北部东沙海域、祁连山冻土区等已勘探出的水合物储藏地带^[2-4], 这些坚实的科学实地调查证明我国拥有丰富的水合物资源潜力。

多孔介质沉积层是自然界水合物赋存的载体, 在实际的宏观自然沉积环境中, 地质构造和沉积特征等工程地质条件会改变水合物聚集/储藏特性。COLLETT^[5] (2014)、刘金龙等^[6] (2015) 认为水合物的聚集受到周围地层的油气运移影响, 它们更应该是一体的共生系统; ARCHER 等^[7-8] 的研究表明主动大陆边缘和被动大陆边缘由于地质特征不同导致水合物的储藏模式差异很大, 而且水合物本身不稳定, 在外界环境变化下极易分解, 严重时会引起钻井地层塌陷、钻井平台及井眼垮塌等地质/工程事故^[9]。目前国内外常见且有效的开采水合物技术主要包括注热法 (蒸汽、热水或盐水)、注化学剂法 (甲醇、乙醇等)、降压法及混合法等^[10], 然而, 无论哪种方法都会涉及到当地地层的力学稳定性等问题, 因此含水合物沉积物的力学和工程地质性质研究是水合物领域内必须开展的课题。

研究自然环境下水合物在多孔介质沉积物内的赋存形态是探讨水合物形成、聚集和成藏的重要步骤。DVORKIN 等^[11] (2003) 认为水合物的分布可以归为在孔隙中间漂浮生长和胶结骨架且贴壁生长两类端元; DAI 等^[12] (2012) 从水合物颗粒与骨架的胶结角度将水合物孔隙赋存分为 6 种不同模式; BEST 等^[13] (2013)、胡高伟等^[14] (2014) 分别通过声学、热学和 CT 扫描等观测了水合物在多孔介质石英砂孔隙内形成的不同阶段形态及水合物饱和度变化过程; COLLETT^[15] (2014) 观察实际地层钻采水合物岩心样品后认为自然界中水合物聚集形态可分为四类, 这些不同赋存模式会使相应地层表现出不同的力学性质; 蒋明镜等^[16] (2012) 运用微观胶结模型探讨了深海能源土的强度和弹性模量等之间的关系; 颜荣涛等^[17] (2013) 通过三轴试验证实不同水合物的赋存模式会使其表现出胶结土结构特性或颗粒摩擦材料的力学特征。

由于实际钻进水合物储藏中遇到了一系列工程问题, 以及更准确地判明水合物储层聚集性质的需求, 近几年来水合物沉积物的黏聚-流变性力学课题越来越受研究人员的重视。国内孙中明等^[18] (2013) 搭建了水合物三轴仪实验平台并利用这些平台测试了含水合物的沉积物在不同水合物含量下的应力-应变关系等力学性质; 蒋明镜等^[19] (2014) 将水合物与周围沉积物骨架的接触视为离散情况, 采用离散元方法探讨了深海能源土在温度和水压影响下的力学特性; 杨期君等^[20] (2014) 依据修正剑桥模型和弹塑性损伤模型探讨了含水合物沉积物的统计本构特征; 国外 JUNG 等^[21] (2012) 探讨了水合物的粘聚性和抗张强度, 并利用离散元法模拟了含水合物沉积物的应力-应变演化关系; UCHIDA 等^[22] (2012) 分析了含甲烷水合物土在连续介质假设下的临界力学状态。以上的研究结果为认识各种不同聚集模式下的含水合物沉积物力学性质提供了重要参考。

水合物分解会直接改变当地地层的产状。MIENERT 等^[23] (2005) 认为挪威外海的 STOREGGA 海底滑坡就是原地的甲烷水合物分解所致, 为此, 进行含水合物地层工程处理时需要了解该类问题。宁伏龙等^[24] (2013) 开展了钻井液侵入海洋含水合物地层的一维数值模拟研究; 关进安等^[25] (2013) 模拟了二维高压环境下流体非饱和和渗流对含水合物沉积物土力学性质的演化; HANDWERGER 等^[26] (2014) 从沉积层孔隙过压角度分析了水合物分解造成的地层失稳问题。相应的模拟软件 (TOUGH-FLAC) 也已经被开发并用于数值模拟水合物沉积层力学参数演化, 这些理论和方法极大促进了对自然状态的含水合物沉积层工程地质性质的认识。

所有这些从微观孔隙尺度到有限体积的中观尺度再到实地原位宏观尺度上对含水合物沉积物的力学性质等研究, 逐渐揭示了这种新型多孔介质沉积物的一些工程地质特点, 并提出了相应的工程问题解决方法。但仍存在一些问题: 首先, 对含水合物沉积物的力学本构理论目前还没有统一的观点, 一般是利用摩尔-库伦强度理论描画莫尔圆进行抗剪强度探讨, 而对相关的屈服与破坏准则尚处于构建阶段; 其次, 沉积物内由于水合物饱和度的差异, 在不同的温度和压力环境下会表现出黏弹塑性特征; 再次, 多孔沉积介质里聚集的水合物在相平

衡状态和非相平衡状态下的力学特性有较大差异,进一步影响到宏观上的储层性质。因此,需对我国南海神狐区域的海底水合物沉积体系的工程地质/力学性质开展进一步的具体调查研究工作,然而这方面的研究还相当有限。LU等^[27](2014)年初步讨论了南海北部区域海底沉积物含水合物细砂在20 MPa围压下的力学强度变化;石要红等^[28](2015)测试了一般围压下(2.5 MPa~8 MPa)南海水合物区海底粉质黏土/四氢呋喃水合物胶结物在水合物分解前后的应力应变曲线和抗剪强度特性。本文基于南海神狐区域水合物实际赋存情况,通过三轴力学实验平台进一步测试了在相应的压力(9 MPa~15 MPa)和温度(2~5℃)条件下,一定含量(~50%)的含甲烷水合物沉积细砂的力学表现,得出了该区域含水合物沉积物的强度及变形性质,以期为该区域的水合物经济和安全开采提供工程地质及力学方面的有益参考。

1 研究区域概况

南海北部神狐海域位于珠江口盆地、神狐暗沙东南和尖峰盆地附近,海底构造属于珠江盆地珠二坳陷白云凹陷,同时具有被动大陆边缘和主动大陆边缘的特点,该区域海底地形较平坦,水深以1350 m为界可分为南北两部分,深部流体活动异常活跃,底部断层极为发育,相应的褶皱构造又使得地层更易捕获上升的含气流体(图1a)。研究表明,神狐区经历过多次地壳运动和多阶构造演化,自中新世以来,区域构造活动趋于稳定,而受东沙运动的影响,构造沉降速率表现为异常高值的特征,晚中新世后期进入海相构造沉降阶段,底辟运动产生的气体渗漏作用十分强烈,大规模地震反射模糊区(带)的出现,表明区内曾经发生过强烈泄压作用,这些都表明该区域拥有良好的水合物成藏地质地形条件^[2]。

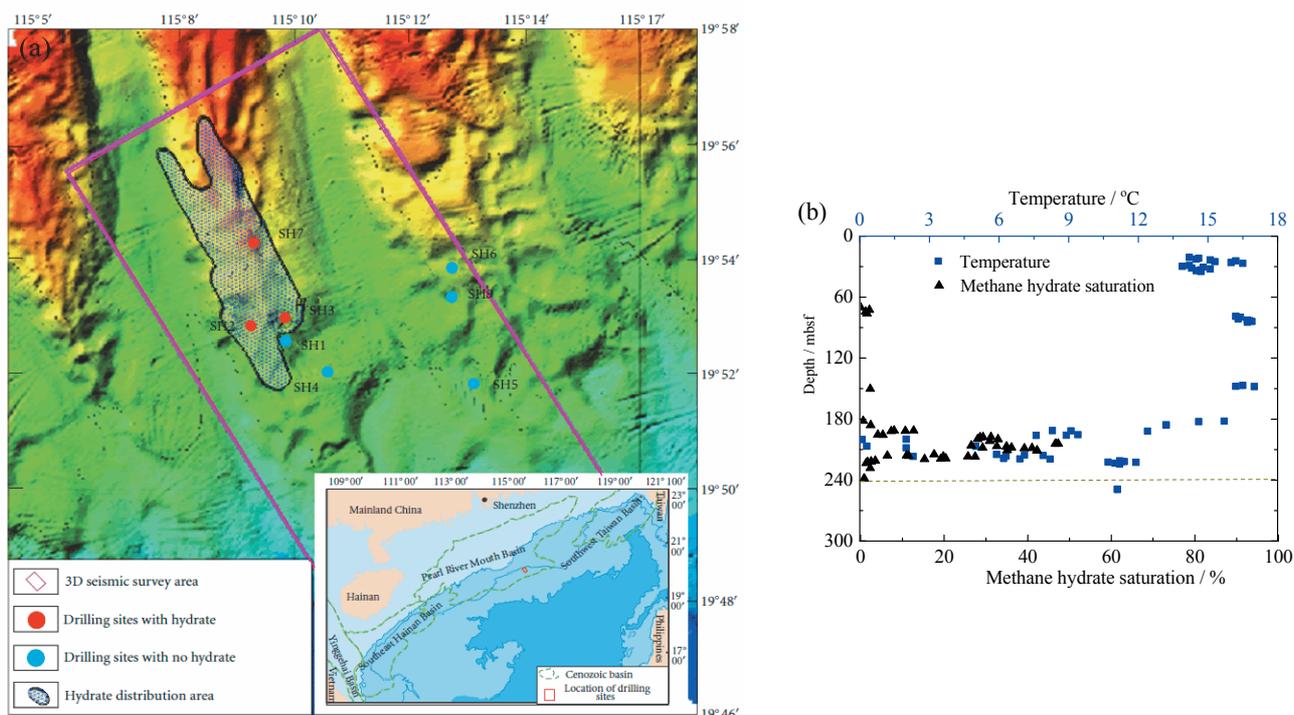


图1 GMGS1次南海神狐区域水合物钻探及探明分布简概^[2]: (a) 区域简图; (b) SH2 站位岩心温度及计算水合物饱和度

Fig. 1 The sketch map showing these drilling sites of GMGS1 and the confirmed gas hydrate distribution in Shenhu area, northern South China Sea (a); the core temperature data and hydrate content at site2 (b)

2007年4月-6月中国地质调查局在该区域开展GMGS1实地钻进调查,发现了高丰度的海底含水合物沉积储层,如SH2站位,其海底深度为1238 m,海底平均温度为3.4℃,海底下150~240 mbsf段为水合物赋存聚集区域,最高水合物含量可达约48%

(图1b)。在2015年9月完成的GMGS3科研巡航中再次在该区域海底沉积层中钻取了水合物含量为40%~50%的岩心样品,证明该区域巨大的水合物资源潜力,表明神狐区域可作为我国当前重要的水合物经济开采靶区。近些年来,科学界和工业界对神

狐海洋水合物储层的成藏过程和开采潜力已经得到了较系统的认识，然而，对海底含水合物沉积物的工程地质/力学性质以及由于开发这种资源引起的环境和地质问题还有诸多细节问题尚未探明，这也是本工作开展的原因之一。

2 实验装置和步骤

本实验使用自建的可燃冰三轴原位力学测试平台开展含甲烷水合物沉积物的合成及原位力学性质

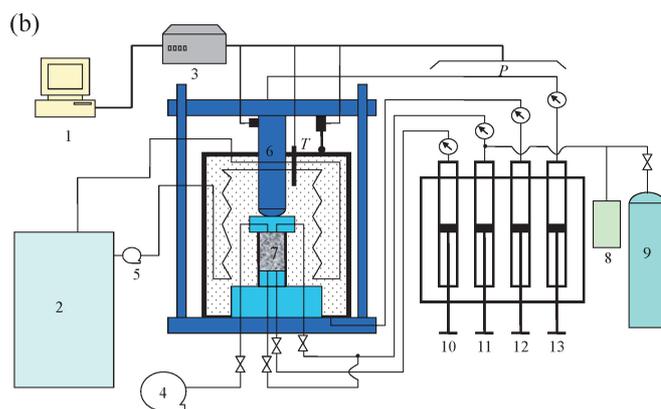


图 2 实验室自建可燃冰三轴原位力学测试平台：(a) 实拍图；(b) 实验系统示意图（1-电脑；2-恒温水浴；3-数据采集卡；4-真空泵；5-往复式循环泵；6-轴向荷载；7-试样；8-缓冲罐；9-气瓶；10-水泵；11-气泵；12-围压泵；13-油泵）

Fig. 2 The schematic diagram of the tri-axial testing equipment

实验用的沉积细砂钻采自南海神狐海底，由广州海洋地质调查局提供，实验用甲烷气由南海豪文气体有限公司提供，纯度为 99.99%。实验步骤如下。

①试压检漏。关闭压力室，保持恒定温度为 20℃，通过缓冲罐子充入 10 MPa 的氮气，稳定 12 h，用肥皂水检查各个阀门及接口。

②制备含水沉积细砂试样。本次实验采用定水量过气量方法，充分反应以确定水合物含量，用蒸馏水清洗细砂样品，用标准检验筛（60 ~ 100 目）人工筛选出所需孔目的沉积砂（粒径为 ~0.125 mm）并烘干（其粒径级配见图 3），计算所需水量和砂量，制备实验用试样。

③实验前准备。打开压力室，在底座上套入橡胶管，保持边缘水平对齐，用两个橡胶管 1/2 直径的橡胶带依次紧贴绑定底座，底层放入隔离片和滤纸，夹持模具套在橡胶管外，顶部胶皮外翻包裹夹持模具，用两个橡胶管 1/2 直径的橡胶带绑定模具中部；加沙，每加几匙，用压实器压实，直至顶部，加上顶部滤纸和隔离片，压实密封；抽

测试，见图 1。平台的技术指标为：圆柱形水合物反应釜体尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ，水合物试样岩心与土体一致，三轴室最大围压 σ_3 为 30 MPa，最大反压 σ_1 为 20 MPa，最大孔隙压力 U 为 30 MPa，最大轴向压力 F 为 250 kN，压力传感器精度误差优于 0.2%F.S，反应及三轴压力装置的温度控制范围为 $-30 \sim 50^\circ\text{C}$ 。该仪器的最大特点是将水合物反应室和三轴室一体化设计，即在釜体内生成设计的含水合物沉积物试样后即可原位进行三轴力学性质测试。

真空至 0.05 MPa，夹持模具剥离，将其推入压力室，扭紧螺丝，收集桶加注围压液；最后将温度降低至 15℃，围压加到 5 MPa，用 1 MPa 的甲烷进气驱替空气，从真空口排出。

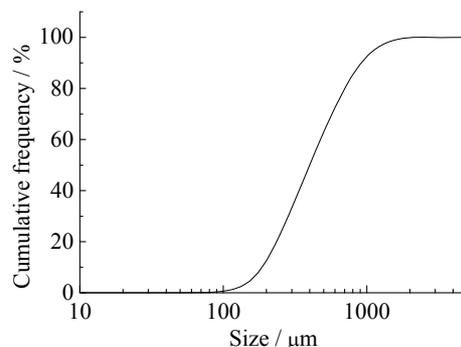


图 3 实验用沉积细砂的粒径级配

Fig. 3 The grain composition for hydrate samples in this test

④生成试样。升高围压至 15 MPa，温度为 15℃，通入 12 MPa 甲烷气，稳定后，关闭阀门，静置 48 h，再根据所设计的压力和温度调节（图 4）形成对应的试样岩心。

⑤三轴力学测试。步骤④完成后至少稳定静置 48 h, 根据土工力学操作规范开展三轴力学测试, 以 0.2%/min 的速率剪切, 待约 20% 的形变或最大压应力时停止剪切等。

整个实验设计了 2°C 和 5°C 两组温度, 孔压 9 MPa ~ 15 MPa, 每组测试围压恒定, 生成 50% 水合物含量的沉积物试样的部分热力学变化曲线如图 4 (文中温压数值为实验控制软件输入数字, 考虑到传感器器件可容许精度问题, 文中加符号 ~, 下同)。

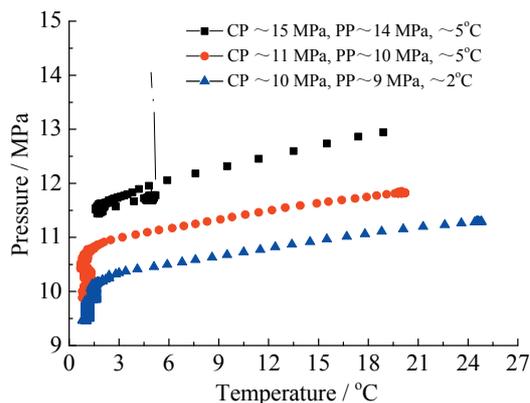


图 4 含水合物岩心试样生成实验中的部分温度-孔隙压力曲线 (CP, 围压 confining pressure; PP, 孔压 pore pressure)
Fig. 4 The part P - T curves during methane hydrate cores formed in this test

3 结果与讨论

在保持 50% 水合物含量条件下, 本次三轴实验得到的岩心试样在 ~5°C 及大、小围压下 (10 MPa 和 15 MPa) 的应力-应变连续变化情况见图 5a, 可以看出在 ~15 MPa 围压下试样的峰值出现情况, 还可看出围压越大对试样的应变影响越大; 图 5b 为在两个不同温度下测试的应力-应变峰值 (均值) 变化对比, 从图中可以看到, 这种高压环境下两个温度环境中应力变化不同, ~2°C 时其峰值强度呈现先降低后升高的趋势, 而 ~5°C 时峰值强度则先升高然后降低, 相比较而言在 ~2°C 时试样的变化比较平缓, 而在 ~5°C 时试样的变化较大。总体而言, 在低温 (~2°C) 和高围压 (~15 MPa) 条件下, 含水合物岩心试样的应变变化比高温 (~5°C) 和低围压 (~10 MPa) 条件下更大, 说明在这些情况下其强度更高。

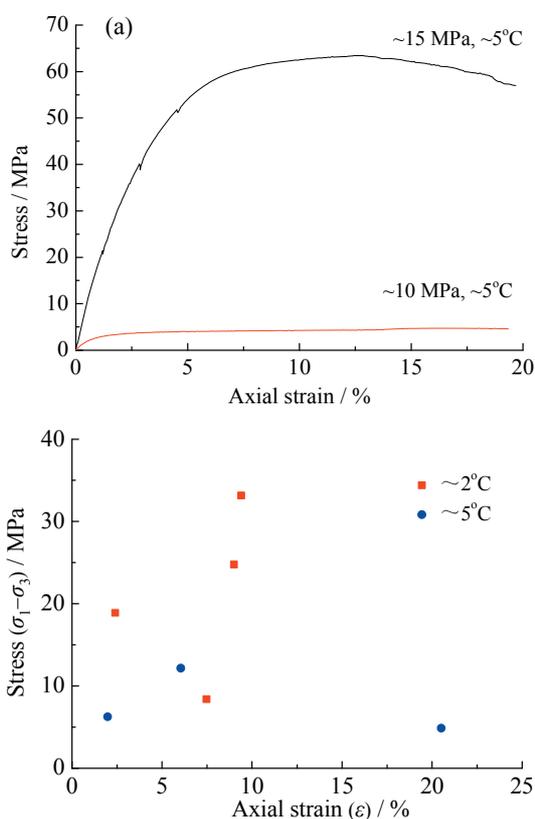


图 5 实验测试的轴向应力和轴向应变变化: (a) 5°C 时两个围压下的应力-应变连续趋势; (b) 两个不同温度下的应力-应变峰值对比关系

Fig. 5 The deviator stress-axial strain relationships according to this test

在适合南海神狐区域水合物赋存的 ~9 MPa ~ 15 MPa 压力区间, 分别在 ~2°C 和 ~5°C 下, 通过本次三轴力学测试得到的应力与围压数据见图 6。从图

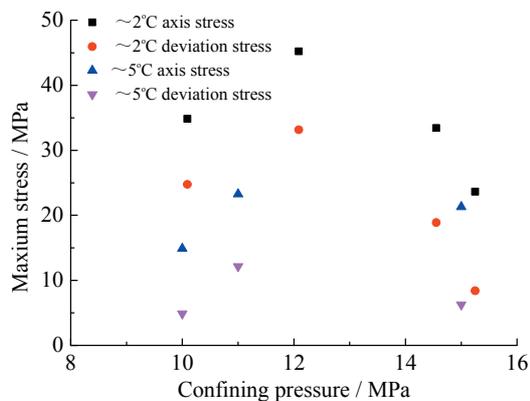


图 6 两个不同温度下最大轴向应力和最大轴差应力随围压变化的关系

Fig. 6 The relationships of maximum axis strains and maximum axis deviation stress changing with confining pressure

中可以看出，轴向应力和轴差应力与围压的关系在该温压环境下表现基本一致，在压力小于 12 MPa 时，均随围压增大而增大，在~12 MPa~14 MPa 达到其峰值，然后开始下降。相比较而言，从本次测试中可以看出，低温（~2℃）下的应力值普遍比高温（~5℃）下高，其中不同温度下对应的轴向应力差值范围为~10%~50%，而不同温度下对应的轴差应力范围则更大，为~20%~80%。

通过本次实验测试，得到了在 50%水合物含量下岩心试样的弹性模量（割线模量）与围压关系，见图 7。可以看出在两个温度下弹性模量的变化趋势与图 6 中应力随围压的变化趋势基本一致，均先升高，一般在~12 MPa~14 MPa 间出现峰值，然后随围压增大而下降。同样，在低温下（~2℃）该甲烷水合物试样的弹性模量也比在高温下（~5℃）更大，结合前面的分析，推测低温下含水合物沉积物比在高温下更可能展现出弹塑性特征。

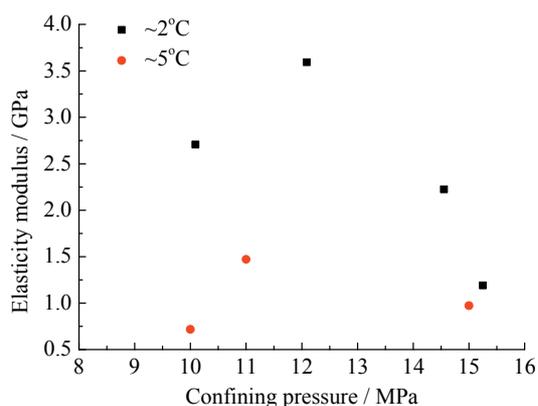


图 7 两个温度下实验测试的弹性模量随围压的变化趋势

Fig. 7 The elastic modulus changing with the confining pressures according to this test

4 结 论

开采神狐海底水合物资源必须先调研在当地热力学和地质构造等环境下含水合物沉积层的力学和工程地质性质，为此开展了在该温压环境下的含甲烷水合物沉积细砂的初步力学测试，结果表明：

(1) 在~2℃和~5℃温度条件下，沉积物试样在~9 MPa~15 MPa 的轴向应力、轴差应力、弹性模量随围压的变化趋势基本相同，在~12 MPa 以前均随围压增大而增大，在~12 MPa~14 MPa 间达到其峰值，然后开始下降；在低温（~2℃）时，试样的轴向应力、轴差应力和弹性模量比在高温（~5℃）时

更大，低温（~2℃）和高围压（~15 MPa）下含水合物岩心试样的应变变化也比高温（~5℃）和低围压下（~10 MPa）更大。

(2) ~2℃时试样的峰值强度呈现出先降低后升高的趋势，而~5℃时峰值强度则先升高后降低，相比较而言，试样在~2℃时的变化比较平缓，而在~5℃时的变化较大。

(3) 以上分析结果预示含水合物沉积物很可能在低温高压环境下会表现出更多的弹塑性力学特征。

虽然当前对神狐区域海底沉积地层的力学和工程地质性质认识已取得了一些进展，但当前的研究资料还远远不够，对这种高压下海底含甲烷水合物储层的弹-塑性性质甚至流变性特征还需要更多更详细的研究。

参考文献：

- [1] YANG S X, MING Z, LIANG J Q, et al. Preliminary results of China's third gas hydrate drilling expedition: a critical step from discovery to development in the South China Sea[J]. *Fire in the ice*, 2015, 15(2): 1-5.
- [2] WU N Y, ZHANG H Q, YANG S X, et al. Gas hydrate system of Shenhu area, northern South China Sea: geochemical results[J]. *Journal of geological research*, 2011, 2011: 370298. DOI: 10.1155/2011/370298.
- [3] 祝有海, 张永勤, 文怀军, 等. 祁连山冻土区天然气水合物及其基本特征[J]. *地球学报*, 2010, 31(1): 7-16.
- [4] 张光学, 梁金强, 陆敬安, 等. 南海东北部陆坡天然气水合物藏特征[J]. *天然气工业*, 2014, 34(11): 1-10. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2014.11.001.
- [5] COLLETT T S. The gas hydrate petroleum system[C]// *Proceedings of the 8th International Conference on Gas Hydrate(ICGH8)*, T3-154, Beijing, China, 28 July-1 August. Beijing, China, 2014.
- [6] 刘金龙, 王淑红, 颜文. 海洋天然气水合物与深水油气共生关系探讨[J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(2): 39-51. DOI: 10.11978/j.issn.1009-5470.2015.02.006.
- [7] ARCHER D E, BUFFETT B A, MCGUIRE P C. A Two-dimensional model of the passive coastal margin deep sedimentary carbon and methane cycles[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9: 2859-2878.
- [8] ARCHER D E, BUFFETT B A. A Two-dimensional model of the methane cycle in a sedimentary accretionary wedge[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(8): 3323-3336. DOI: 10.5194/bg-9-3323-2012.
- [9] SULTAN N, COCHONAT P, FOUCHER J P, et al. Effect of gas hydrates melting on seafloor slope instability[J]. *Marine geology*, 2004, 213(1/4): 379-401. DOI: 10.1016/j.margeo.2004.10.015.
- [10] 苏正, 吴能友, 张可霓. 南海北部陆坡神狐天然气水合物开发潜力[J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(6): 16-23.
- [11] DVORKIN J, NUR A, UDEN R, et al. Rock physics of a gas hydrate reservoir[J]. *The leading edge*, 2003, 22(9):

- 842-847. DOI: 10.1190/1.1614153.
- [12] DAI S, SANTAMARINA J C, WAITE W F, et al. Hydrate morphology: physical properties of sands with patchy hydrate saturation[J]. *Journal of geophysical research-solid earth*, 2012, 117(B11): B11205.
- [13] BEST A I, PRIEST J A, CLAYTON C R, et al. The effect of methane hydrate morphology and water saturation on seismic wave attenuation in sand under shallow sub-seafloor conditions[J]. *Earth and planetary science letters*, 2013, 368: 78-87. DOI: 10.1016/j.epsl.2013.02.033.
- [14] 胡高伟, 李承峰, 业渝光, 等. 沉积物孔隙空间天然气水合物微观分布观测[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(5): 1675-1682. DOI: 10.6038/cjg20140530.
- [15] COLLETT T S. Reservoir controls on the occurrence and production of gas hydrates in marine and arctic permafrost settings[C]//*Proceedings of the 8th International Conference on Gas Hydrate(ICGH8)*, T3-99, Beijing, China, 28 July-1 August. Beijing, China, 2014.
- [16] 蒋明镜, 肖俞, 朱方园. 深海能源土微观力学胶结模型及参数研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(9): 1574-1583.
- [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]. *岩土力学与工程学报*, 2013, 32(S2): 4115-4122.
- [18] 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.
- [19] 蒋明镜, 朱方园. 不同温压环境下深海能源土力学特性离散元分析[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(10): 1761-1769. DOI: 10.11779/CJGE201410001.
- [20] 杨期君, 赵春风. 含气水合物沉积物弹塑性损伤本构模型探讨[J]. *岩石力学*, 2014, 35(4): 991-997.
- [21] JUNG J W, SANTAMARINA J C, SOGA K. Stress-strain response of hydrate-bearing sands: numerical study using discrete element method simulations[J]. *Journal of geophysical research: solid earth*, 2012, 117(B4): B04202. DOI: 10.1029/2011JB009040.
- [22] UCHIDA S, SOGA K, YAMAMOTO K. Critical state soil constitutive model for methane hydrate soil[J]. *Journal of geophysical research-solid earth*, 2012, 117(B3): B03209. DOI: 10.1029/2011JB008661.
- [23] MIENERT J, VANNESTE S, BÜNZ K, et al. Ocean warming and gas hydrate stability on the mid-norwegian margin at the storegga slide[J]. *Marine and petroleum geology*, 2005, 22(1/2): 233-244. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2004.10.018.
- [24] 宁伏龙, 张可霓, 吴能友, 等. 钻井液侵入海洋含水合物地层的一维数值模拟研究[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(1): 204-218. DOI: 10.6038/cjg20130121.
- [25] 关进安, 梁德青, 吴能友, 等. 高压环境下流体非饱和和渗流对含水合物沉积物的影响[J]. *岩土力学*, 2013, 34(3): 639-644, 652.
- [26] HANDWERGER A L, REMPEL A W. Environmental change, hydrate dissociation, and submarine slope failure along continental margins: the role of saturation anomalies in landslide triggering[C]//*Proceedings of the 8th International Conference on Gas Hydrate(ICGH8)*, Beijing, China, 28 July-1 August. Beijing, China, 2014.
- [27] LU J S, LI D L, LIANG D Q. Discussion on The Mechanical Behavior of Gas Hydrate Sediments Based on The Drilling Cores from The South China Sea by Tri-axial Compressive Test[C]//*Proceedings of the 8th International Conference on Gas Hydrate(ICGH8)*, T1-106, Beijing, China, 28 July-1 August. Beijing, China, 2014.
- [28] 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.

作者简介:

关进安 (1980-), 工学博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事水合物基础物性 (热物性、热/动力学、力学) 及自然界水合物系统研究。