

文章编号:1001-4888(2020)02-251-08

石英砂粒径对水合物沉积物力学性质的影响^{*}

王哲^{1,2,3,4,5}, 李栋梁^{1,2,3,4}, 吴起^{1,2,3,4,6}, 卢静生^{1,2,3,4}, 梁德青^{1,2,3,4}, 吴小平⁷

(1. 中国科学院天然气水合物重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广东 广州 510640; 3. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640; 4. 中国科学院广州天然气水合物中心, 广东 广州 510640; 5. 中国科学技术大学 纳米科学技术学院, 江苏 苏州 215123; 6. 中国科学院大学, 北京 100049; 7. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘要: 利用自主研发的水合物沉积物原位合成与力学性质测试的高压低温三轴仪, 通过多级加荷的试验方法, 以不同粒径的砂粒作为沉积物骨架进行三轴压缩试验, 得到了剪切过程的应力—应变关系曲线, 以及不同粒径尺寸沉积物的强度, 还有剪切过程中的体积变化关系。结果表明: 含水合物沉积物强度随着沉积物粒径尺寸的增大而增强; 在降压剪切过程中, 所有粒径的水合物沉积物式样均有明显的剪缩现象。

关键词: 甲烷水合物; 粒径; 应力应变曲线; 三轴压缩试验

中图分类号: TU411.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-173

0 引言

天然气水合物是一种外形类似于冰的固体化合物, 它是由低分子量气体(主要是烃类分子, 如甲烷、乙烷等, 还有二氧化碳、硫化氢等小分子气体)和水分子在低温高压的条件下所构成的笼状结构的化合物^[1]。自然界中主要是由甲烷气体形成的天然气水合物为主, 而且因为其外形类似于冰, 一般又被称为“可燃冰”。甲烷水合物主要储藏在海底深水陆坡环境以及陆地永久冻土区^[2]。天然气水合物在标准状态下可释放出 164~180 m³ 的甲烷气体和 0.87 m³ 的水^[3]。据保守估计, 自然界中天然气水合物的含量为 2.1×10^{16} m³, 这几乎是地球上已知的化石能源的两倍, 被认为是 21 世纪化石能源的理想替代能源^[4]。

甲烷水合物由于其分布范围广、规模大、储能密度高, 已经引起了全球范围的关注, 中国、美国、日本、加拿大等国家都进行了广泛的关于水合物的研究^[5]。目前提出来的甲烷水合物的开采方法主要有注热法、降压法和化学试剂法^[6]。在开采过程中, 人为地打破水合物的稳定条件, 就会使水合物发生分解。而目前有研究表明水合物会胶结在沉积物之间, 这会增强海底沉积物的强度。在水合物开采过程中, 水合物会逐渐分解, 水合物对沉积物的胶结作用和充填就会减小, 会使底层的承载能力大为下降, 这样可能引发一系列的地质灾害, 如果在海底发生这种情况就会发生海啸、海底滑坡等严重灾害^[7], 因此研究水合物沉积物的力学性质就显得十分重要。

由于甲烷水合物主要分布在深海和永久冻土区, 获得原位的水合物岩芯需要保温保压取样器, 取样器成本高、技术难度大, 因此, 目前主要采用实验室人工合成的天然气水合物作为样品来研究水合物的相关性质和各种参数。

^{*} 收稿日期: 2018-07-25; 修回日期: 2018-09-17

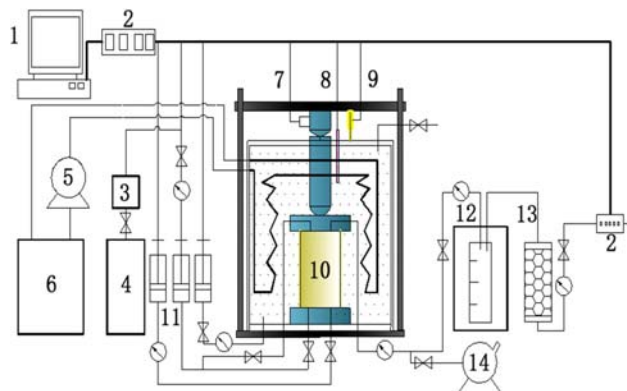
基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0307305)和国家自然科学基金(51474197, 51661165011)资助

通讯作者: 李栋梁(1976—), 男, 博士, 研究员。主要从事天然气水合物研究。Email: ldl@ms.giec.ac.cn

水合物沉积物的力学特性主要受到水合物饱和度、围压、沉积物颗粒粒径尺寸以及沉积物类型等条件影响,国内外学者对此都有一定的研究。Winters^[8,9]等利用储层砂研究了沉积物类型、孔隙度对水合物沉积物的影响。Hyodo^[10-12]等分别采用原位合成和混合制样的方法研究了不同的沉积物、围压、温度以及水合物生成状态(气饱和生成、水饱和生成)等对水合物沉积物力学特性的影响,研究表明水合物沉积物的强度随水合物饱和度和围压的升高而增大,以及在相同的条件下气饱和水合物沉积物强度要高于水合物沉积物的强度。李洋辉^[13,14]等研究了水合物随围压变化的影响,指出在一定条件下水合物沉积物的强度随围压的升高而增加。宋永臣^[15,16]等研究了不同温度和围压对水合物沉积物的影响,认为在一定条件下,围压的增加会导致水合物强度的增加。另外,温度和剪切速率也会影响样品的剪切强度。

张旭辉等^[17]使用蒙古砂和空心砖作为四氢呋喃水合物沉积物骨架,结果表明沉积物中的水合物对基质骨架颗粒具有胶结作用,但是水合物沉积物的力学性质主要取决于基质的种类以及颗粒大小等因素。刘艳军^[18]等利用不同粒径的砂和棕刚玉作为沉积物骨架,得到的结论为不同类型的沉积物其本身硬度越高,从动态力学参数来看,沉积物表现出越强的胶结性。Miyazaki^[19,20]等利用石英砂和 Toyoura 砂作为水合物沉积物的骨架,结果表明水合物砂试样的强度和刚度随甲烷水合物饱和度的增加而增加,随有效围压的增大而增大,割线泊松比随着水合物有效围压的增大而减小,而水合物砂样的刚度主要取决于沉积物骨架砂的类型。Hyodo^[21]等进行了一系列三轴压缩试验,研究了细颗粒含量和密度对甲烷水合物沉积物剪切性能的影响,结果表明在粗砂粒中添加细砂粒会增强最大剪切强度并伴随有剪胀现象。

综上所述,国内外对水合物沉积物力学性质进行了很多研究,但是大部分的研究对象都是单一的一种沉积物例如纯砂或者纯黏土,而我国南海水合物储存砂为泥质粉砂型^[22],因此系统地研究水合物沉积物粒径对沉积物力学性质的影响就很有必要。本文利用不同粒径尺寸的砂作为沉积物骨架,通过多级加荷的三轴压缩试验并结合水合物分解过程,来研究沉积物粒径对水合物沉积物力学性质的影响。



1. 计算机;2. 数据采集系统;3. 缓冲罐;4. 甲烷气瓶;5. 水泵;6. 恒温水浴;7. 应力传感器;
8. 温度传感器;9. 位移传感器;10. 样品;11. 注射泵;12. 气液分离装置;13. 干燥剂;14. 真空泵

图 1 水合物沉积物原位合成力学测试装置图

Fig. 1 Hydrate sediment in-situ synthesis mechanical test device diagram

1 试验介绍

1.1 试验仪器

图 1 为自主研发的水合物沉积物原位合成与力学性质测试低温高压三轴仪。该仪器轴向加载压力范围为 0~250kN,加载可调速率为 0.001~6mm/min,三轴压力室(水合物合成反应器)可设置围压和孔压范围为 0~30MPa,试样尺寸为 $\Phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$,系统工作温度为 $-30 \sim 50^\circ\text{C} (\pm 0.5^\circ\text{C})$,三轴压力室的温度范围为 $-30 \sim 50^\circ\text{C} (\pm 0.5^\circ\text{C})$ 。

1.2 试验材料

试验采用不同孔径的筛网筛洗过的天然砂作为沉积物骨架。砂粒的粒径参数如表 1 所示,砂粒的颗粒级配曲线如图 2 所示。试验所采用的气体为纯甲烷气体,纯度为 99.9%。

表 1 砂粒参数
Tab.1 Sand parameters

编号	目数	中值粒径 (D50)/ μm	孔隙度 /%
1	40~60	377	33
2	60~100	279	34
3	100~150	166	35
4	150~200	101	33

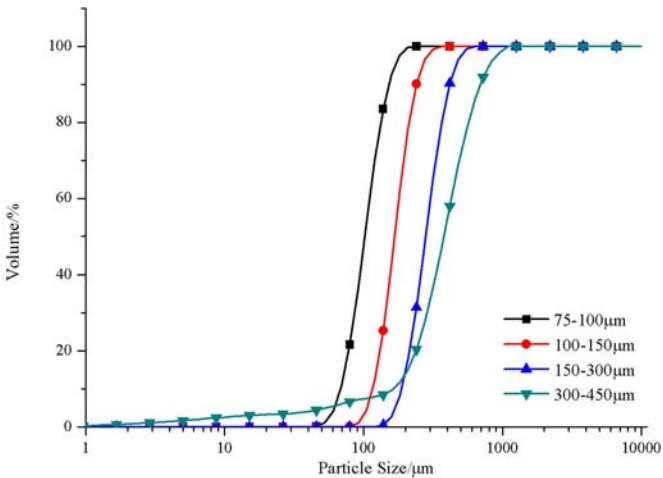


图 2 颗粒级配曲线
Fig. 2 Grain size distribution curves

1.3 试验步骤

1.3.1 样品的合成与制备

(1) 将筛好的砂粒烘干洗净,称取一定的砂粒与适量的水混合均匀,保存 24 小时,以便于去离子水能够均匀地分布在砂粒之间。整个实验装置确保无泄漏后,拆开压力室。将橡皮套和模具固定在压力室底部的凸台上,在橡皮套中从下到上依次放入透水板、金属滤网和滤纸。接着采用分层压实的方法加入一定含水量的砂样。然后依次放置滤纸、金属滤网和透水板。最后依次扎橡皮筋密封、抽真空塑型、拆除模具和封闭压力室。

(2) 通过注入围压液增加围压,同时通过压力室中样品的上下通道双向进气,使孔隙压力随围压增加到实验目标压力。在整个加压过程中,需要注意的是孔隙压力一直低于围压 1MPa 左右,例如围压为 10MPa 时,孔隙压力为 9MPa 左右。进气完成后,将压力室温度恒定在 20℃ 24 小时,使样品中的甲烷和水充分混合均匀。然后降温到 5℃ 形成水合物,48 小时后再再次降温到 2℃,待甲烷压力不再下降后维持 2℃ 48 小时,确保样品中的水完全生成水合物。

(3) 利用低温去离子水赶走样品中游离的自由气,使样品从气饱和状态变成水饱和状态,保持压力为试验要求压力,然后将温度升至剪切所需温度 6℃。

1.3.2 样品的剪切与降压分解

将剪切速率设置到 0.2mm/min,整个剪切过程分为三个阶段。第一阶段,轴线应变从 0% 到 2.2%,为原样剪切,此时水合物还未发生分解,等剪切到 2.2%之后,将轴向荷载卸载,然后通过泄压阀将孔隙压力降至 4.5MPa,6℃ 甲烷水合物的相平衡压力为 4.73MPa。此部分模拟的是水合物开采的初期阶段,在此阶段中,水合物还未发生分解。第二阶段是从 2.2%剪切到 4.7%,由于此阶段剪切时孔隙压力在相平衡压力附近,在剪切过程中水合物会发生少量的分解。在剪切前先恢复轴向荷载,再重新加载轴向荷载到 4.7%左右后进行第二阶段剪切,将轴向荷载卸载,通过泄压阀将孔隙压力降到 3MPa,并记录收集到的气体的含量 G_1 。第二阶段剪切为部分分解剪切,模拟的是开采过程中水合物部分分解的情况。当孔隙压力降到 3MPa 后,再次进行第三阶段剪切直到标准规定的 15%左右。由于孔隙压力已经降到相平衡压力以下,剪切过程中水合物会大量分解,收集到的气体量记为 G_2 。第三阶段剪切为大量分解剪切,模拟的是水合物开采过程的后期,此时水合物大量分解,剩余水合物含量很少。剪切结束后,记录整个试验过程中所收集到的气体含量 G_0 。试验参数如表 2 所示。

表 2 试验参数
Tab. 2 Experiment parameters

编号	中值粒径 (D50)/μm	围压/ MPa	孔隙压力/MPa			温度 /℃	饱和度/%		
			第一段	第二段	第三段		第一段	第二段	第三段
1	377	10	8	4.5	3	6	54.02	44.48	34.01
2	279	10	8	4.5	3	6	53.46	43.22	32.79
3	166	10	8	4.5	3	6	51.45	43.16	33.19
4	101	10	8	4.5	3	6	53.83	43.12	31.91

1.4 水合物饱和度的计算

利用 Ghiassian^[23] 等方法计算试样中甲烷水合物的含量。该方法假定水合物为理想状态,1m³ 的甲烷水合物分解释放 164m³ 的甲烷气体和 0.87m³ 的水。水合物饱和度(S_h)的计算公式如下:

$$S_h(\%) = \frac{V_h}{V_v} \times 100$$
 (1)

式中, S_h 为水合物饱和度; V_h 为水合物体积; V_v 为试样的孔隙体积。

试验结束后收集到的水合物分解所产生的气体量为 G₀, 第一次降压过程收集到的气体量为 G₁, 第二次降压过程收集到的气体量为 G₂, 则分段剪切第一阶段的试样水合物饱和度 S_{h1} 为:

$$S_{h1}(\%) = \frac{G_0/164}{V_v} \times 100$$
 (2)

第二阶段剪切的试样水合物饱和度 S_{h2} 为:

$$S_{h2}(\%) = \frac{(G_0 - G_1)/164}{V_v} \times 100$$
 (3)

第三阶段剪切的试样水合物饱和度 S_{h3} 为:

$$S_{h3}(\%) = \frac{(G_0 - G_1 - G_2)/164}{V_v} \times 100$$
 (4)

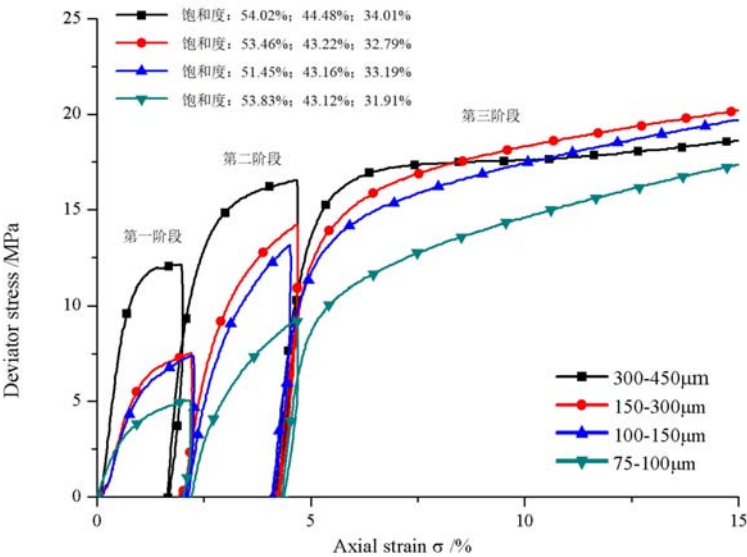


图 3 不同粒径尺寸的应力—应变关系曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of different particle sizes

2 试验结果与讨论

2.1 应力—应变关系

不同粒径尺寸的砂粒作为沉积物在围压为 10MPa 条件下所得到的应力应变曲线见图 3。图中曲

线的第一阶段(轴向应变为0%到2.2%)是在有效围压为2MPa的条件下剪切得到的。第一阶段的水合物饱和度最大,对应水合物开采过程中初期的部分,该阶段水合物开采的量比较小,水合物的饱和度较大。从第一阶段的应力—应变曲线可以看出,四个粒径尺寸的沉积物剪切应力—应变关系都主要为弹性应变向塑性应变的过程,而且可以观察到不同粒径颗粒尺寸的变化不同,随着沉积物颗粒尺寸的减小,塑性变形的程度也越来越明显。除此之外,随着水合物沉积物粒径的增大,该阶段水合物沉积物的抗剪强度也逐渐增大。第二阶段为轴向应变为2.2%到4.7%的应力—应变曲线,包括卸载轴向荷载后孔隙压力降到4.5MPa,水合物部分分解并进行第二次剪切的过程。第二阶段对应开采过程中开始降压使得有效围压大幅升高的部分,由于降压会使得水合物开始分解,所以该阶段的水合物饱和度会低于第一阶段。根据文献可知,天然气水合物沉积物会随着水合物饱和度的升高和有效围压的升高而增强^[10-12,24],从图3可以看出,第二阶段的水合物强度比第一阶段的强度高,而第二阶段的水合物饱和度较低,有效围压较高,说明第二阶段有效围压的影响要大于饱和度对沉积物强度的影响。从图中可以分析得到,第二阶段的应力—应变关系曲线也是由弹性应变转变为塑性应变,但是该部分的弹性应变程度比第一阶段曲线中弹性应变更加显著。而且这一阶段得到的结果与前面的类似,也是随着沉积物颗粒尺寸的增大,水合物沉积物的强度也随着增强。第三阶段曲线(轴向应变为4.7%到15%)是通过卸载轴向荷载,将孔隙压力降到3MPa,让水合物大量分解然后再恢复轴向荷载所得到的应力—应变曲线。这一阶段对应水合物开采后期,水合物大量分解的过程。从图中可以观察到40~60目粒径的样品开始由弹性应变转变为塑性应变,之后发生应变屈服现象,而较小的三种粒径的沉积物开始也是由弹性应变转变为塑性应变,但最后都没有发现应变屈服现象,而是发生了应变硬化。此外,从整体上看,水合物沉积物的强度随着沉积物的粒径增大而增大。

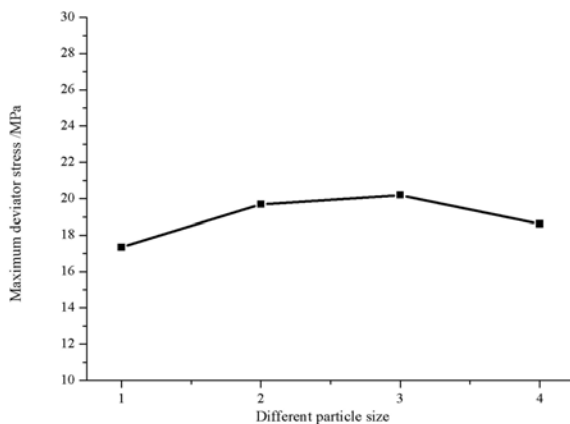
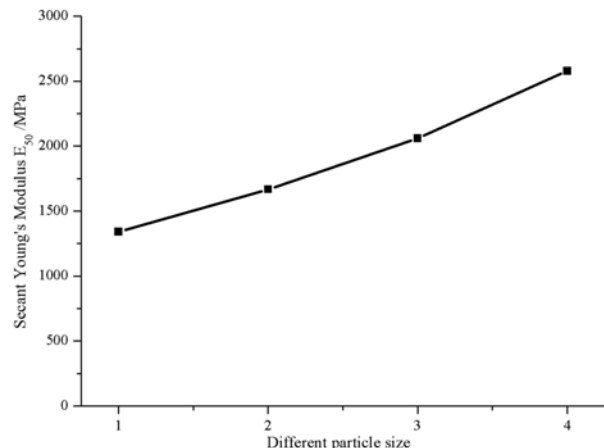


图4 不同粒径尺寸沉积物最大剪切强度

Fig. 4 Maximum deviator stress of different particle sizes

图5 不同粒径尺寸沉积物割线模量 E_{s0} Fig. 5 Secant Young's Modulus E_{s0} of different particle sizes

2.2 不同粒径水合物沉积物强度关系

图4为不同粒径尺寸沉积物的最大剪切强度(对应应力—应变曲线无明显峰值的情况,取15%应变处对应的应力值为最大剪切强度),图中从左往右,沉积物粒径尺寸依次增大,样品1(40~60目,对应粒度4)的最大强度略低于粒度3的样品2和粒度2的样品3。对于较小粒度的石英砂水合物,随着粒径尺寸的增大,最大剪切强度也随之增大。其中,样品1在剪切的第三阶段发生应变屈服现象,而其他三种粒径都发生应变硬化现象,随着剪切的继续,强度都在继续上升,最后导致40~60目的水合物试样的最大强度偏低。图5为不同粒径尺寸沉积物的割线模量 E_{s0} ,割线模量 E_{s0} 反映了水合物沉积物的平均刚度特性。从图5可以看出,随着水合物沉积物颗粒尺寸的增大,割线模量也随着增大。图6为剪切的第一部分的初始弹性模量随水合物沉积物粒径尺寸的变化,由图可以看出,初始弹性模量随着水合物沉积物颗粒尺寸的增大而增大。综上所述,含水合物沉积物强度会随着沉积物颗粒尺寸的增大而增大,原

因可能是不同粒径尺寸的砂粒的内摩擦力不一样所导致的。一般情况下,粒径越大,单位体积内的颗粒数越少,沉积物强度也会越大,但是沉积物强度也会受到沉积物颗粒的形状、粒径的均匀性、相互间的咬合度、胶结度等的影响,当颗粒粒径较大时,相互间的咬合度、胶结度可能下降,导致最大强度反而有所下降。

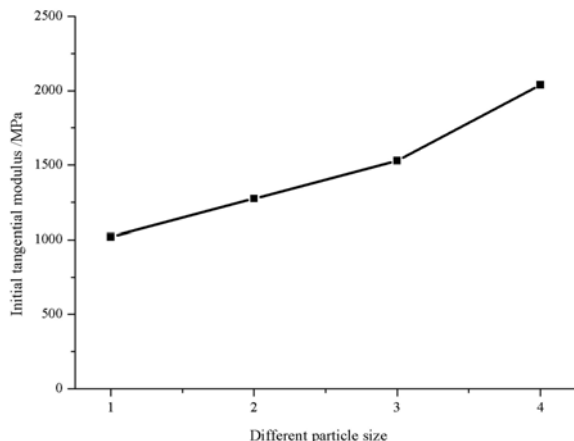


图 6 不同粒径尺寸沉积物初始弹性模量

Fig. 6 Initial tangential modulus of different particle sizes

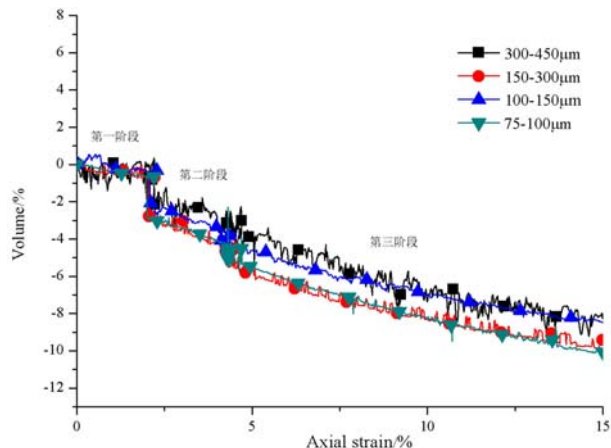


图 7 不同粒径尺寸的体积—应变关系

Fig. 7 Volume-strain curves of different particle sizes

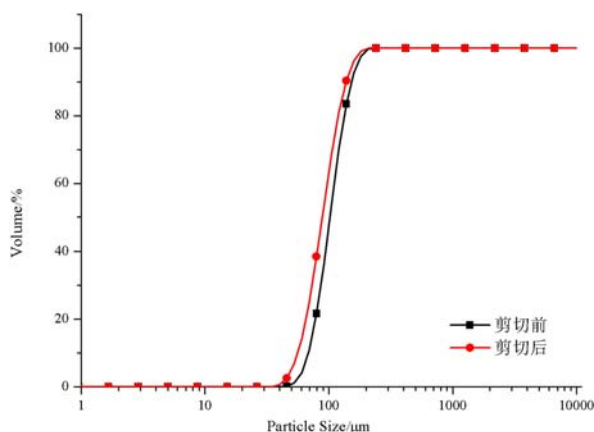


图 8 150~200 目颗粒剪切前后的级配曲线

Fig. 8 Grain size distribution curves of 150~200 mesh particle sizes before and after shear

2.3 体积变形关系

图 7 为不同粒径尺寸沉积物在剪切过程中体积—应变关系曲线。如图所示,在剪切的第一阶段(剪切轴向应变为 0% 到 2.2%),四种不同粒径尺寸的沉积物在剪切过程中都没有发生明显的体积变化。这可能是在剪切过程中,样品没有被破坏,而且水合物也几乎没有分解。而轴向应变为 2.2% 到 4.7% 的第二阶段和 4.7% 到 15% 的第三阶段则发生了明显的剪缩现象,发生这种现象的原因可能是在剪切过程中,水合物沉积物颗粒被破坏从而导致颗粒发生重新排列。图 8 显示了样品 4(150~200 目)在剪切实验前后的颗粒粒径变化情况,沉积物颗粒剪切后的粒径尺寸

小于剪切前的尺寸。发生剪缩现象的另一个可能原因是,在剪切过程中,水合物发生分解,试样的孔隙度就会增大,这也会导致样品中沉积物颗粒重新排布,被剪碎的细颗粒可能会填充到水合物分解后产生的孔隙中。以上原因都会使样品体积减小,从而发生剪缩现象。从图 7 中还可以看出,在两次卸载轴向荷载的时候,水合物试样的体积都发生了明显减小的情况,原因可能是在卸载轴向荷载的时候,都有降压的过程,而这时候水合物都会大量分解,而且由于试验的围压没有改变,试验的有效围压就会增大,较高的有效围压就会将试样压缩,因此体积就会显著减小。

3 结论

(1) 在剪切过程中,水合物饱和度的降低和有效围压的增大都会影响水合物沉积物的强度,在初期,有效围压的增加对水合物沉积物的力学强度影响较大。而在随后,由于有效围压增幅较小,水合物饱和度降低的程度没有减小,水合物沉积物的力学强度并没有较大的增强。

(2) 沉积物颗粒尺寸会影响到含水合物沉积物强度,随着沉积物颗粒尺寸的增加,含水合物沉积物

强度也随之增加。

(3) 在剪切过程中, 不论粗颗粒还是细颗粒的含水合物沉积物体积都发生剪缩现象, 而且随着水合物的分解以及有效围压的增大, 剪缩现象会更加明显。

参考文献:

- [1] Sloan E D. Clathrate hydrates of natural gases(2nd)[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1998.
- [2] Jeffery B, Klauda A, Sandler S I. Global distribution of methane hydrate in ocean sediment[J]. Energy & Fuels An American Chemical Society Journal, 2005, 19(2):459—470.
- [3] Collett T S. Energy resource potential of natural gas hydrates[J]. Aapg Bulletin, 2002, 86(11):1971—1992.
- [4] Milkov A V. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there? [J]. Earth Science Reviews, 2004, 66(3):183—197.
- [5] 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(6):953—961 (ZHANG Hongtao, ZHANG Haiqi, ZHU Youhai. Present situation and progress of natural gas hydrate investigation and research in China[J]. Geology in China, 2007(6):953—961 (in Chinese))
- [6] 李栋梁, 樊栓狮. 天然气水合物资源开采方法研究[J]. 化工学报, 2003(S1):108—112 (LI Dongliang, FAN Shuanshi. Natural gas production from hydrate[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2003(S1):108—112 (in Chinese))
- [7] 彭晓彤, 周怀阳, 陈光谦, 等. 论天然气水合物与海底地质灾害、气象灾害和生物灾害的关系[J]. 自然灾害学报, 2002(4):18—22 (PENG Xiaotong, ZHOU Huaiyang, CHEN Guangqian, et al. Environmental disaster of gas hydrate: its relationship with submarine geology hazard, climate hazard and biology hazard[J]. Journal of Natural Disasters, 2002(4):18—22 (in Chinese))
- [8] 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.
- [9] Winters W, Walker M, Hunter R, et al. Physical properties of sediment from the mount elbert gas hydrate stratigraphic test well, alaska north slope[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(2):361—380.
- [10] Hyodo M, Nakata Y, Yoshimoto N, et al. Basic research on the mechanical behavior of methane hydrate-sediments mixture[J]. Journal of the Japanese Geotechnical Society Soils & Foundation, 2005, 45(1):75—85.
- [11] Hyodo M, LI Yanghui, Yoneda J, et al. Mechanical behavior of gas-saturated methane hydrate-bearing sediments [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2013, 118(10):5185—5194.
- [12] 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.
- [13] LI Yanghui, SONG Yongchen, YU Feng, et al. Effect of confining pressure on mechanical behavior of methane hydrate-bearing sediments[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5):637—640.
- [14] LI Yanghui, SONG Yongchen, LIU Weiguo, et al. Experimental research on the mechanical properties of methane hydrate-ice mixtures[J]. Energies, 2012, 5(12):181—192.
- [15] SONG Yongchen, YU Feng, LI Yanghui, et al. Mechanical property of artificial methane hydrate under triaxial compression[J]. Journal of Natural Gas Chemistry, 2010, 19(3):246—250.
- [16] SONG Yongchen, ZHU Yiming, LIU Weiguo, et al. Experimental research on the mechanical properties of methane hydrate-bearing sediments during hydrate dissociation[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 51:70—78.
- [17] 张旭辉, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 四氢呋喃水合物沉积物静动力学性质试验研究[J]. 岩土力学, 2011(S1):303—308 (ZHANG Xuhui, LU Xiaobin, WANG Shuyun, et al. Experimental study of static and dynamic properties of tetrahydrofuran hydrate-bearing sediments[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011(S1):303—308 (in Chinese))
- [18] 刘艳军, 董孟阳, 江磊磊, 等. 天然气水合物沉积物颗粒影响实验[J]. 储能科学与技术, 2017(4):789—798 (LIU Yanjun, DONG Mengyang, JIANG Leilei, et al. An experiment investigation into the effect of particle properties on natural gas hydrate sediments[J]. Energy Storage Science and Technoxlogy, 2017(4):789—798 (in Chinese))
- [19] Miyazaki K, Masui A, Sakamoto Y, et al. Triaxial compressive properties of artificial methane-hydrate-bearing

- sediment[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, Vol. 116, B06102, doi:10.1029/2010JB008049.
- [20] Miyazaki K, Tenma N, Yamaguchi T. Relationship between creep property and loading-rate dependence of strength of artificial methane-hydrate-bearing toyoura sand under triaxial compression[J]. Energies, 2017, 10(10):1466.
- [21] Hyodo M, WU Yang, Nakashima K, et al. Influence of fines content on the mechanical behavior of methane hydrate-bearing sediments[J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 2017, 122(10): 7511—7524.
- [22] 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[J]. 地学前缘, 2005 (1):234—242 (SU Xin, SONG Chengbing, FANG Nianqiao. Variation in grain size of sediments above BSR and correlation with the occurrence of gas hydrates on hydrates ridge, East Pacific[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(1):310—319 (in Chinese))
- [23] Ghiassian H, Grozic J L H. Strength behavior of methane hydrate bearing sand in undrained triaxial testing[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 43:310—319.
- [24] 孙中明, 张剑, 刘昌岭. 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 (SUN Zhongming, ZHANG Jian, LIU Changling. Determination of methane hydrate saturation in sediments and its mechanical properties[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(6):747—754 (in Chinese))

Effects of quartz sand particle sizes on mechanical properties of hydrate sediments

WANG ZHE^{1,2,3,4,5}, LI Dong-liang^{1,2,3,4}, WU QI^{1,2,3,4,6},
LU Jing-sheng^{1,2,3,4}, LIANG De-qing^{1,2,3,4}, WU Xiao-ping⁷

(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; 5. Nano Science and Technology Institute, University of Science and Technology of China, Suzhou 215123, China; 6. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 7. School of Earth & Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

Abstract: Triaxial tests are carried out by the multistage loading method on a self-developed high-pressure and low-temperature triaxial apparatus for in-situ synthesis and mechanical properties testing of hydrate sediments. Quartz sand particles with different sizes are served as sediment scaffolds. The stress-strain curves, sediment strength with different particle sizes and the volume variation relationship during the shearing process are obtained. The results show that the strength of the methane hydrate sediment increases as the particle size of the sediment increases. In the processes of depressurization and shearing, the hydrate sample will have obvious shear shrinkage regardless of the particle size of the sediment.

Keywords: methane hydrate; particle size; strain-stress curves; triaxial test