

分解条件下水合物重塑沉积物力学特性试验进展

戴少军（中海油田服务股份有限公司（物探事业部工程勘察作业公司），天津 300450）

摘要：掌握含天然气水合物沉积层力学特性，对于储层稳定性评价以及筛选合适的开发方案有着重要意义。但受限于对含水合物沉积层的认识不够以及设备原因，目前关于储层的力学特性调查还是不够，在有些方面甚至是存在争议的。这篇文章以土工试验的视角全面回顾整理了现有的分解条件下天然气水合物沉积层力学特性试验，讨论了水合物的存在对沉积层力学性质和微观变形影响机理，以求建立宏观试验现象和微观变形机理的联系，为揭示和预测水合物开发对储层和周围沉积层的影响提供理论支撑和保证。

关键词：天然气水合物；三轴试验；力学特性

Abstract: It is of great significance to grasp the mechanical properties of gas hydrate bearing sediments for reservoir stability evaluation and selection of appropriate development schemes. Based on soil test perspective, this paper comprehensive review to sort out the existing decomposition under the conditions of natural gas hydrate sediment mechanics characteristic test, discuss the existence of gas hydrates on the mechanical properties and microscopic sedimentary deformation influence mechanism, in order to establish a macroscopic phenomena and microcosmic deformation mechanism, to reveal and predict hydrate development the influence of sediment around the reservoir and to provide theoretical support and guarantee.

Key words: natural gas hydrate; Triaxial test; Mechanical properties

0 前言

随着全世界对环境问题的日益关注^[1]，世界各国能源消费格局正发生改变^[2]，美国、中国等能源大国都在逐步将煤炭替换为天然气以及其他新兴的可再生能源。根据 BP 在 2017 年 6 月发布的世界能源统计年鉴：近十年，天然气消费正以年均 2.3% 的增速迅速上涨，2016 年欧洲天然气消费增幅甚至达到了 7.1%，天然气作为一种优质的清洁能源被全球市场所看好。

伴随水平井技术以及水力压裂技术的突破，页岩气的成功商业化开采正在逐步改变世界能源格局、地缘政治甚至全球经济秩序，美国的页岩气革命彻底颠覆了“非常规油气资源仅仅是对常规化石能源的补充”这一传统认识。

而作为非常规油气资源中的另一重要成员，天然气水合物广泛分布于海底和永久冻土层，如图 1。据估计，其中蕴含的天然气共计 $1\sim 150\times 10^{15}\text{m}^3$ ，相当于目前已探明的煤、石油以及常规天然气碳当量总和的两倍，是全球所有常规天然气总量的 10 倍以上。

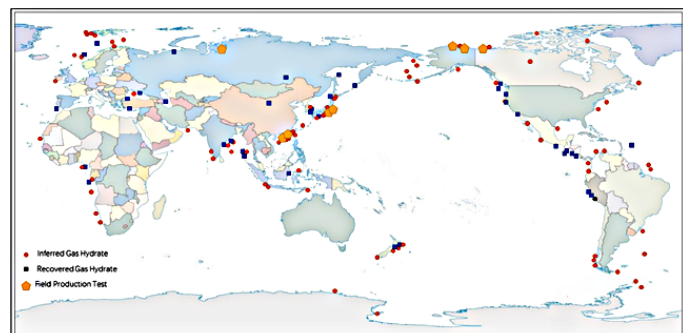


图 1 全球水合物勘探开发图

不同于常规的石油、天然气等资源，天然气水合物的开发原理是在局部水合物矿藏内破坏水合物的相平衡，使水合物分解，从而释放并提取其中的天然气或在动力学和热力学上实现自发气体置换，目前的主要开发方法有：降压法，热激法，注抑制剂法、气体置换法以及多种方法联合开采，截至目前，全世界总共有 4 个国家进行了短暂的试采。

除了作为潜在能源，一些基于水合物的新技术也被开发出来：如基于水合物的气体储运，污水重金属处理以及二氧化碳捕集封存等。

通常，气体水合物以胶结或者骨架支撑的形式存在于储层中 $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$ ，但由于它是一种亚稳态物质，温度的升高和压力的降低都极易造成水合物分解。气体水合物在地层中的分解是一个极其复杂的流固耦合过程，其中存在许多不确定的因素：

首先，在复杂地质环境条件下，水合物通常分解不均，这会造成井内围岩的有效应力降低，同时产生井壁应力集中现象，气水渗流的孔道和沉积层发生变形；

其次，由于水合物分解导致的储层含水率上升会破坏颗粒间胶结结构，分解出的气水会裹挟大量的细的沉积层颗粒如泥和砂流入井底，致使沉积层渗透率下降影响生产，并有可能导致井口失稳等井控问题；

最后，随着开采的进行，水合物分解区域不断扩张，可能会导致地层的固结破坏以及剪切破坏，最终导致海底地层变形、平台倾斜下沉以及气候变化等工程地质灾害。

在进行商业化开采前，充分掌握水合物储层变形失稳规律和机理，进行全面而系统的沉积层力学特性分析

对于评价甲烷水合物藏的稳定性和筛选评价开采方法尤为重要。通过在实验室内模拟多孔介质中天然气水合物的生成与分解,研究人员试图揭示降压法、热激法以及二氧化碳置换法,对储层的损伤影响同时评价各个方法的可行性,以此为天然气水合物的安全开发提供理论保障。在本文中,关于水合物开发中沉积层力学特性的变化试验被从土工试验的视角系统的整理和介绍。

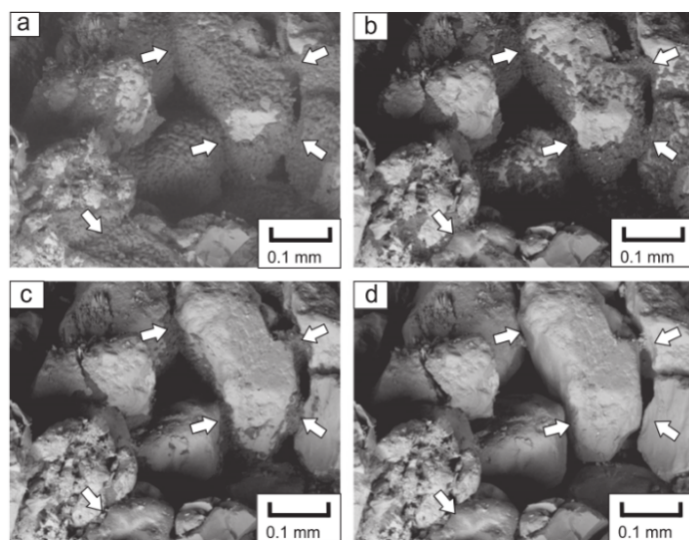
1 降压法开采过程水合物重塑沉积物力学特性

降压法抽提海底含甲烷水合物沉积层中天然气,被广泛认为是最切实可行的水合物开发方法。

Yoneda 等作者,通过平面剪切试验发现,由降压法导致的压缩变形会随着初始剪切应变的增大而增大;在水压回复阶段,破坏模式和之前在压缩试验中得到的结果一致。

Hyodo 等作者调查水合物降压分解时发现,孔压的降低会增大有效应力,产生额外的轴向应变,但是只有在外部荷载大于沉积层强度时,注水回压才会导致处于亚稳态区(不含水合物沉积层强度<施加的初始偏应力<天然气水合物沉积层强度)的试样坍塌。

Hyodo 对含水合物试样进行电镜扫描,发现随着分解过程的进行,水合物都是先从颗粒表面脱落,最后再在砂岩颗粒接触处脱落,认为对于高饱和度的试样,在剪切过程中,水合物更容易从砂粒表面脱落,然后填充在砂粒孔隙中,最终导致残余强度的上升和体积膨胀。



(a) MH saturation 50%;(b)&;

(c)during MH dissociation;and;(d) MH satration of 0%

图2 水合物分解电镜扫描图(加参考文献)

Hyodo 等作者,通过 PIV 方法发现降压过程(10MPa 降到 3MPa, 0.5MPa/min)中并没有明显的局部变形,反而回压过程(3MPa 降到 10MPa, 0.5MPa/min)产生了变形。Song 等^[3]在使用高岭土通过混合制样法研究水合物降压分解对冻土带沉积层影响发现:分解后的含甲烷水合物沉积

层的破坏形式属于弹塑性破坏,应力应变曲线呈现双曲线型,沉积层强度随着甲烷水合物的分解而下降,分解温度越高强度下降速率越大,但随着水合物的分解,分解速率会逐渐下降,强度的下降速率也逐渐降低,这可能是由于随着分解的进行,甲烷气逐渐进入孔隙空间,使有效围压增大导致沉积层强度的下降,通过摩尔库伦定律分析后发现,水合物的分解会大幅降低内聚力,不同时刻的内聚力值如下:0h 时刻 0.9767MPa, 6h 时刻 0.8435MPa, 24h 时刻 0.6149MPa, 48h 时刻 0.5366MPa,但对内摩擦角影响不大,不同时刻的内摩擦角如下:0h 时刻 14.8943°, 6h 时刻 14.5944°, 24h 时刻 14.3809°, 48h 时刻 13.9179°。同时水合物分解对沉积层初始弹性模量 E_0 影响不大,但是对正割模量 E_s 的影响较大,比如在分解 48h 后,围压 1MPa 的条件下,正割模量下降了 42.6%,在相同轴向应变下更低的正割模量意味着试样承受的应力更低,这会使含水合物沉积层变形程度加大并且会对开发的安全和生产的稳定性产生隐患^[2]。

Li 等作者,在围压为 0.5MPa、1MPa、2MPa 剪切速率 1.0%/min 的条件下,测试模拟了降压法对中国祁连山冻土区含冰的甲烷水合物藏的影响。实验发现,在围压分别为 0.5MPa、1MPa、2MPa 时,排气条件下的降压法会使沉积层强度降低 6.2%、9.8% 和 18.4%,初始弹性模量 E_0 下降 12.8%、12.1% 和 19.3%,这是由于水合物分解造成的胶结减少和承载消失以及孔压增大造成的,不排气阶段与排气阶段变化规律类似,但是不排气会导致强度以及模量下降的更多,这表明在渗透率低的区域(或排气条件差的区域),冻土区沉积层会随着开发的进行变得更加不稳定。

Choi 等作者,针对不同初始偏应力状态下的沉积层进行了三轴试验,发现当水合物沉积层处于亚稳态条件时(不含水合物沉积层强度<施加的初始偏应力<天然气水合物沉积层强度),水合物的降压分解只是压实了含水合物沉积层,含水合物沉积层并没有产生剪切破坏。但是,在水压回复阶段,沉积层试样最终产生了破坏。Choi 等认为这是由于当沉积层中没有持力体赋存形式的水合物时,沉积层不能够继续承受超过它强度的荷载。当水合物沉积层处于稳定状态时(施加的初始偏应力<不含水合物沉积层强度),沉积没有发生破坏,即使是在水合物降压分解以后和水压回复阶段,沉积层也只是发生压实。同时,在降压分解后的沉积层内,当分解气与水压回复的水接触时,在孔隙内会再次形成水合物。

2 热激法开采过程水合物重塑沉积物力学特性

Wu 等^[4]将温度从 1~4℃ 提升至 25℃,使沉积层中二氧化碳水合物分解,研究各相同性固结不排水条件下水合物分解对砂岩沉积层的影响,发现水合物的分解会

造成孔压的增大,有效应力减小,试样体积膨胀,增加可能诱发沉积层破坏的可能性。

Hyodo 等人在保持一定的剪切应力的条件下,通过注热法让试样内水合物分解,发现注热分解会产生较大的轴向位移,对于在亚稳态区固结的试样,注热分解会使试样完全崩塌;Li 等作者,在围压为 0.5MPa、1MPa、2MPa 剪切速率 1.0%/min 的条件下,通过使温度从 -5℃ 升高到 5℃ 测试了热激法对天然气水合物沉积物力学性能的影响,破坏强度会分别下降 73.7%、75.2% 和 75.0%,弹性模量会分别下降 78.2%、78.2% 和 85.3%。这是由于水合物分解会导致能承载载荷的水合物消失,同时使孔压的增加造成的。

3 二氧化碳置换法开采过程水合物重塑沉积物力学特性

目前关于二氧化碳置换法对沉积物力学性质的影响还比较初步,通常是对比二氧化碳水合物沉积物力学性质和天然气水合物沉积物力学性质实现的。Luo 等作者,通过混合制样法发现:在相同条件下,二氧化碳水合物沉积层强度要比甲烷水合物沉积层强度高 15% 左右。Li 等作者发现,在相同围压下(0.5MPa、1MPa、2MPa 下),含二氧化碳水合物沉积层的强度和初始弹性模量分别比甲烷水合物沉积物高 4.7%~10.9% 和 16.4%~37.9%。

Miyazaki 等作者,通过一系列的剪切排水试验发现:低饱和度下,二氧化碳水合物沉积层的强度和割线模量和甲烷水合物沉积层近似相当;高饱和度下,二氧化碳水合物沉积层的强度和割线模量要比甲烷水合物沉积层要小,二氧化碳水合物沉积层稳定性要低,Miyazaki 等在高饱和度下与前人发现的性质不同,认为可能是两方面导致的:

一方面,过冷度的影响,试验中为保证试验温度相同,致使生成甲烷水合物的过冷度为 6.4K,而生成二氧化碳水合物的过冷度为 7.1K,过冷度会影响水合物的生长,影响晶体生长驱动力,从而影响含水合物沉积层的剪切强度。

另一方面,二氧化碳和甲烷都能够结合成为 I 型水合物,但二氧化碳水合物和甲烷水合物在笼子占据方面明显不同,对于大笼子甲烷水合物和二氧化碳水合物占据的比例差不多,但是对于小笼子,甲烷水合物的占据比例更高,而在高饱和度范围内(大于 40%),甲烷水合物和二氧化碳水合物结构上的差异,可能是导致含甲烷水合物沉积层更加稳定的原因。

Hyodo 等^[5]通过试验对比了二氧化碳水合物沉积物和天然气水合物沉积物力学强度后认为:在较短的时间内和孔隙空间上处于良好分布的一个条件下,二氧化碳置换法不会改变水合物藏的力学稳定性。这也为二氧化碳置换法提供了力学稳定性上的依据。

4 结论和建议

①降压法和热激法都会降低含冰和天然气水合物的沉积层的稳定性,但是对于冻土区,在降压开采中,沉积层始终在在 0℃ 以下,分解的水会重新生成冰,填充沉积层,在一定程度上弥补了水合物分解造成的沉积层强度以及模量的损失,而热激法则会对沉积层产生较大破坏;对于海底条件,热激法会造成在亚稳态区固结的试样完全崩塌,而降压法相对安全,危险主要出现在水压回复阶段;

②相较于渗透率较高的区域,低渗区域随着降压开发的进行会变得更加不稳定;

③二氧化碳水合物沉积物力学性质与天然气水合物沉积物力学性质差异不大,为二氧化碳置换法提供了有力保证。但对未固结沉积层中快速注入大量的气体,会导致沉积层内的水合物和上覆盖层的岩土发生扰动破坏。接下来的试验研究应当在实现真正的二氧化碳置换法的前提下,考虑沉积层力学特性来确定最佳的注气速率;

④目前关于水合物分解对沉积物力学性质的试验调查普遍比较初步,只能为天然气水合物开发提供一些基本参考。为了充分调查水合物分解对天然气水合物沉积物力学性质的影响,接下来试验的重点应当放在分解条件下水合物沉积物力学实验;

⑤由于真实的天然气水合物藏有这不同的包围边界的限制,实验室岩心规模的试验可能并不能完全真实反应含天然气水合物沉积层开发时的现场强度,能够为水合物开发提供前期指导。

参考文献:

- [1] C. Figueres, H. J. Schellnhuber, J. Rockström, A. Hobley, and S. Rahmstorf, "Three years to safeguard our climate," *Nature*, vol. 546, pp. 593-595, 2017.
- [2] M. J. S. Zuberi and M. K. Patel, "Bottom-up analysis of energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in the Swiss cement industry," *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 4294-4309, 2017.
- [3] C. Consumption, R. Production, P. R. Trade, R. Production, P. Trade, and D. More, "BP Statistical Review of World Energy June 2017" no. June, 2017.
- [4] X. Ruan, X. Li, and C. Xu, "Numerical Investigation of the Production Behavior of Methane Hydrates under Depressurization Conditions Combined with Well-Wall Heating" 2017.
- [5] Z. G. Sun, R. Wang, R. Ma, K. Guo, and S. Fan, "Natural gas storage in hydrates with the presence of promoters" *Energy Convers. Manag.*, vol. 44, no. 17, pp. 2733-2742, 2003.