

文章编号：1000-4882(2006)S-0179-04

# 水合物开采后的地层稳定性

矫滨田，鲁晓兵

(中国科学院力学研究所，北京 100080)

## 摘要

对水合物开采引起的地层变形和稳定性进行了初步分析。给出了设沿水平方向按一定间距保留原状土体不予开采而作为竖向支撑情况的结果。研究发现，最大沉陷发生于开采区中央，最大水平位移发生于上覆地层与含水合物地层交界面处。最大应力发生于开采区，即保留的土体中。因此保留一定含水合物土体不开采，可以有效减小地层沉陷和滑动可能性。

关 键 词：水合物；开采；地层稳定性。

## 1 前 言

随着油气可开采量的逐渐减少和消耗量的逐渐增加，水合物开采的迫切性日益明显。因此人们越来越重视这方面的勘探和开采。但为了开采的安全、防止水合物分解气体大量逸散到大气中增加温室效应和海洋环境灾害，需要弄清水合物分解及外载荷引起的基础不稳定性、地层不稳定性条件和失效模式等，以便采取相应的对策。

在我国南海的勘探表明，水合物一般存在于300m~3500m水深海底，赋存气水合物沉积物含砂率35%~70%，含砂率太大或含砂率太小，都不利于水合物形成<sup>[1]</sup>。在东沙群岛附近有埋深300m~650m，厚250m，延伸15km稳定水合物带。

水合物分解后，海底失稳的形式主要有：引起地基中孔压增加而液化，进而滑动失稳；地基强度降低，出现均匀或局部化压实而沉陷或剪切局部化而渐进破坏。这些失稳可导致海底滑坡或海床面的大的沉陷。同时在平台或地基受动载作用时，若发生水合物分解，失稳更容易发生。砂和砂岩的孔隙率越小，其中水合物的分解温度越低，粘土中的分解温度更低，孔隙大小对分解温度的影响较土颗粒表面结构和矿物的影响大<sup>[3]</sup>。据文献记载<sup>[4]</sup>，挪威大陆架边缘发生的最大的海底滑坡，滑走了2500~3200km<sup>3</sup>的沉积物（分三次）。分析表明其原因是当时水温增加，使水合物分解所致。正在监测中的US mid-Atlantic coast滑坡<sup>[5]</sup>，可能正在滑动起始阶段，如果海底水温上升，水合物将迅速分解，将导致大面积滑坡，引起海啸。Briaud等人<sup>[6]</sup>的研究表明，当油气从海底岩土层中通过导管送到海洋平台上时，由于油及导管温度高，可使周围水合物融化分解，增加地基危险度。计算结果显示，15年内位于海床下50m处1m直径管导致的水合物融化前锋将到达20m，40年时到达30m处。导管直径越大，传得越快；若考虑潜热影响，融化前锋传播得将慢一些。

水合物开采面临着多方面的力学问题：①水合物分解、收集、输出中的渗流，渗流边界是变化的，流体、水合物生成气等组分是变化的，这导致一个疑问：分解速度在什么条件下是可控的？②水合物输出到地面后，原地层在什么条件下是稳定的？如果发生破坏，什么条件下发生液化破坏？什么条件下发生渐进失稳的滑坡破坏？什么条件下发生不可忽略的压实？采集平台在外载下的稳定性如何保证？等等。本文将针对水合物开采引起的地层变形和稳定性进行初步分析。

## 2 数值模拟模型

在本节中，将采用有限元数值模拟方法对水合物开采引起的地层变形和稳定性进行分析。在建立的模型中，土体分上下两层，上层为覆盖土层，下层为采油土层。一种情况为设沿水平方向按一定间距保留原状土体不予开采，作为竖向支撑，如图 1 所示，保留的土体与开采土体宽度比取 1:3、1:4、1:5、1:6、1:7、1:8、1:9，此处仅取其中 1:3、1:6、1:9 为例进行分析；另一种情况为设沿深度方向保留一定厚度的地层不开采（由于篇幅限制，这种情况的结果未列于本文中）。通过这几种情况的分析，考察水合物开采方式与地层变形和稳定性。

土体材料参数是根据文献 [1] 中的数据整理得来。根据这些参数，用商用软件 ABAQUS 软件进行数值模拟，土体本构采用 Drucker-Prager 模型。在建立的模型中，土体表面为自由面，其他面为法向固定。覆盖层与含水合物的地层间无相对位移。

水合物上覆盖层的参数为： $E = 1 \times 10^6 \text{ Pa}$ ,  $C = 10 \text{ kN}$ ,  $\varphi = 20^\circ$ ,  $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ ;

水合物开采前的地层参数为： $E = 1.86 \times 10^8 \text{ Pa}$ ,  $C = 0$ ,  $\varphi = 39.4^\circ$ ,  $\rho = 2.15 \text{ kg/m}^3$ ;

水合物开采后的地层参数为： $E = 1.86 \times 10^7 \text{ Pa}$ ,  $C = 0$ ,  $\varphi = 34.3^\circ$ ,  $\rho = 2.11 \text{ kg/m}^3$ 。

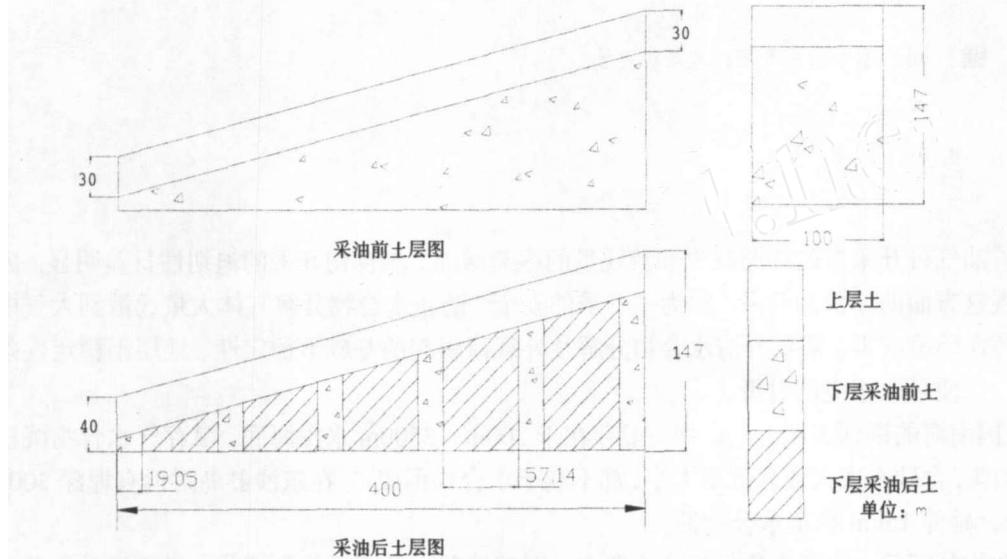


图 1 水合物开采地基模型示意图

### 3. 计算结果及讨论

计算结果见图 2~8。

从计算结果看出，当采用单井开采时，随着开采量的增加，中间位置地层的沉陷大，两边的地层沉陷小。当采用多井开采时，随宽度比增加，最大沉陷增加。上部土体向坡下方滑动比较大，底部基本没变化。因此保留一定含水合物土体不开采，可有效减小地层沉陷和滑动可能性。

图 2、3 给出了不同宽度比时的地层的 Misses 应力分布，可以看出，保留的土体中应力大，这是因为该处的土体强度高；宽度比越小，即保留的土体支撑越多，地层中的应力越小。

图 4、5 给出了两种不同宽度比时的地层沉陷值。结果表明，开采区的沉陷较保留地层的沉陷明显大，随宽度比增加，即保留地层数减少，最大沉陷增加。

图 6、7 给出了不同开采宽度比时地层的水平位移分布。结果表明，保留土体向中间开采区发生水平位移，这是因为开采区的地层强度较保留区的低，随宽度比增加，即保留地层数减少，最大水平位移增加。

图 8 给出了地层不同深度处的水平位移。可以看出，沿深度方向，最大位移发生在上覆层与含水合物层的交界面处，这是因为该处为薄弱面，交界处也容易发生应力集中；随宽度比增加，即保留地层数减少，水平位移增加，因为地层的平均强度随保留地层数减少而减小。

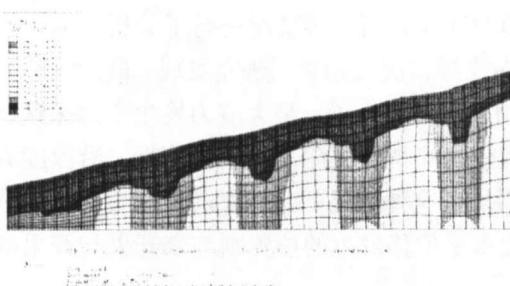


图2 宽度比为1:3时的应力分布

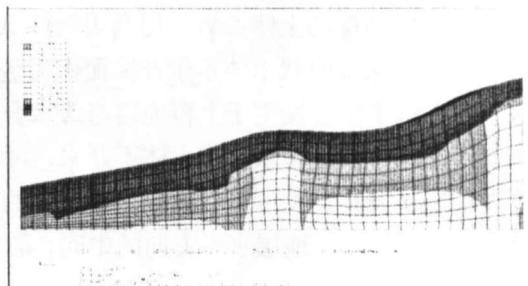


图3 宽度比1:9时的应力分布

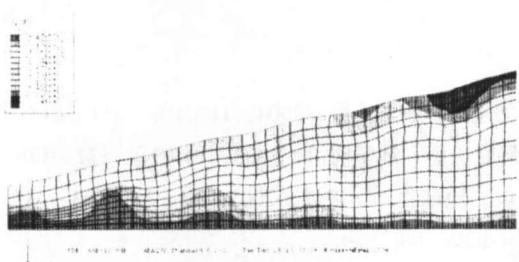


图4 宽度比1:3时的垂向位移

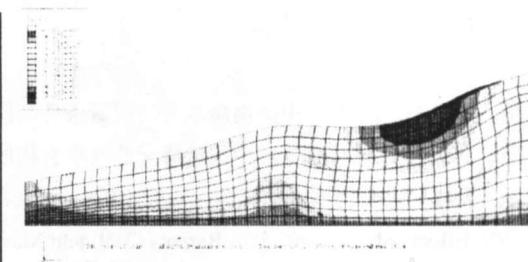


图5 宽度比1:9时的垂向位移

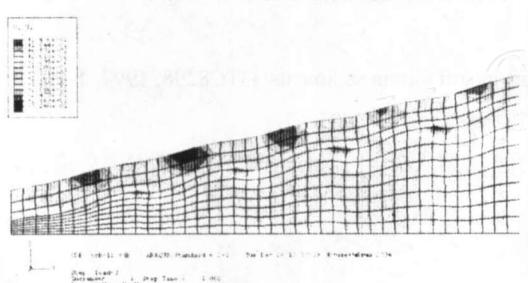


图6 宽度比1:3时的沿水平方向的位移场

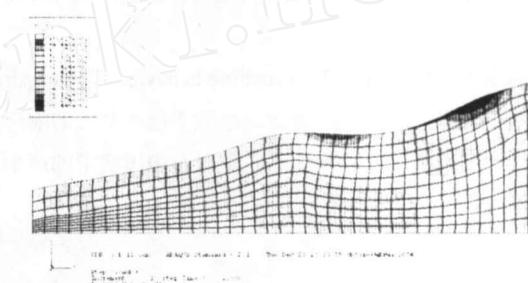


图7 宽度比1:9时的沿水平方向的位移场

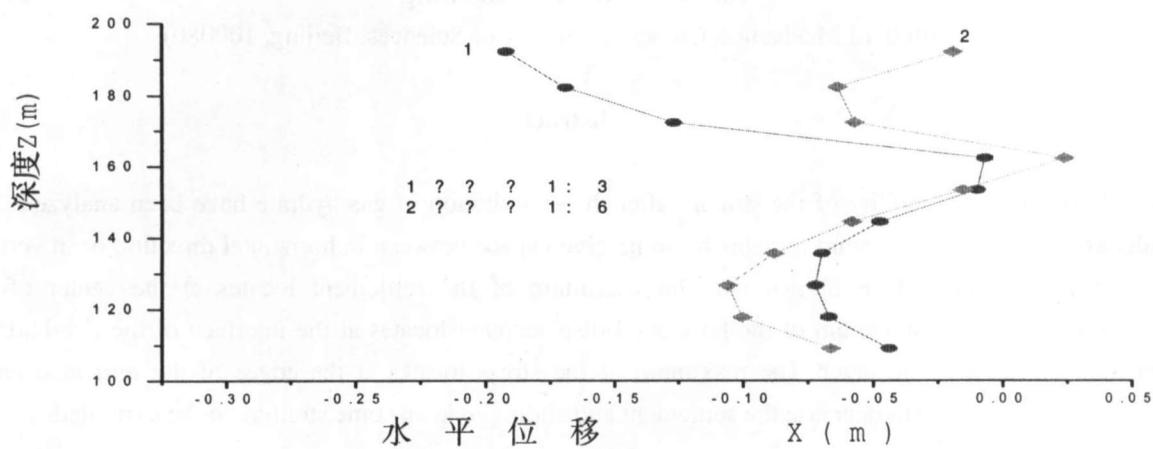


图8 不同深度的水平位移变化图 (取的坐标位置X: 195.122m、Y: 50.00m)

#### 4 结语

本文通过数值模拟, 针对水合物开采引起的地层变形和稳定性进行了初步分析。计算中采用加拿

大某处水合物地层勘探的土体参数,用商用软件ABAQUS针对二维情况进行了分析,给出了设沿水平方向按一定间距保留原状土体不予开采而作为竖向支撑情况的结果。研究发现,最大沉陷发生在开采区中央,最大水平位移发生于上覆地层与含水合物地层交界面处。最大应力发生于开采区,即保留的土体中。因此保留一定含水合物土体不开采,可有效减小地层沉陷和滑动可能性。沿深度方向保留一定厚度的地层不开采,也可以有效地防止地层的滑坡,这种情况下,不管未开采与开采部分的比例如何,最大沉陷均发生在地层水平方向的中间;最大水平位移发生的位置则与未开采与开采部分的比例有关。

## 参 考 文 献

- 1 于兴河,张志杰,苏新等.中国南海水合物成藏条件初探及分布.地学前沿,2004,11(1): 311~315.
- 2 吴必豪,张光学,祝有海等.中国近海天然气水合物的研究进展.地学前沿,2003,10(1): 177~189.
- 3 宋海斌.天然气水合物体系动态演化研究(II):海底滑坡.地球物理学进展,2003,18(3): 503~511.
- 4 Jung WY, Effects of ....Norwegian-Barents Continent Margin, JGR, 109, 2004.
- 5 Driscoll NW, Weissel JK, Goff JA. Potential for large-scale submarine slope failure and tsunami generation along the U. S. mid-Atlantic coast. Geology, 2000, 28(5): 407~410.
- 6 Briaud JL, Chaouch A. Hydrate melting in soil around hot conductor. J Geotech. Geoenvir. Engrg. 1997, 123(7): 645~653.
- 7 Chaouch A., Briaud JL. Post melting behavior of gas hydrates in soft Ocean sediments. OTC8298, 1997, 1-11.
- 8 王义华,鲁晓兵,王淑云.等效动冰载下桶形基础的响应.中国海洋平台,2005, 1.
- 11 鲁晓兵,王淑云,王义华等.高孔隙岩石中压实带的产生与演化.第八次全国岩土力学与工程学术大会论文集,2004, 132~135.

## The Stability of Stratum after the Exploitation of Gas Hydrate

Jiao Bintian Lu Xiaobing

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

### Abstract

The deformation and stability of the stratum after the exploitation of gas hydrate have been analyzed. The results assuming that the stratum remains by some given space between in horizontal direction or in vertical direction are obtained. It is shown that the maximum of the settlement locates at the center of the exploitation area. The maximum of the horizontal displacement locates at the interface of the overlaid soil layer and the gas hydrate layer. The maximum of the stress locates at the edges of the remained areas. Therefore, it is effective to decrease the settlement and sliding to keep some stratum not be exploited.

**Key words:** gas hydrate, exploitation, Stability of the stratum.

### 作者简介

矫宾田 1980年生,助理工程师,从事岩土与结构设计与研究。

鲁晓兵 1968年生,副研究员,从事岩土力学研究。