

南海天然气水合物开采海底沉降预测

公彬¹, 蒋宇静¹, 王刚^{1,2,3}, 黄娜¹

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590;

2. 常州市建筑科学研究院股份有限公司, 江苏 常州 213000;

3. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘要:利用有限差分软件FLAC^{3D},模拟了温度-应力-流体三相耦合条件下不同开采方法时海底的沉降,比较了延长加热时间和提高开采温度时海底沉降范围。分析得出,距离开采井一定范围内的区域是开采引起沉降的主要区域,由于天然气水合物分解对天然气水合物层强度降低的影响很小,导致天然气水合物层强度降低的主要原因是与生产有关的排水所致;同时,神狐海域天然气水合物开采中,延长加热时间对沉降的影响比提高开采温度产生的影响明显,即延长加热时间的影响范围要比提高开采温度时的影响范围大。

关键词:天然气水合物;神狐海域;海底沉降;温度-应力-流体模型

中图分类号:TE375

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)05-0061-08

Prediction of Seabed Settlement Caused by Natural Gas Hydrate Exploitation in South China Sea

Gong Bin¹, Jiang Yujing¹, Wang Gang^{1,2,3}, Huang Na¹

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Changzhou Institute of Building Science Co., Ltd, Changzhou, Jiangsu 213000, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: By using the finite difference software FLAC^{3D}, the seabed consolidation settlement behavior with different mining methods is simulated under the condition of thermal-stress-fluid three-phase coupling. The ranges of seabed settlement when the heating time was prolonged and the exploitation temperature was increased were compared. The results of the analysis show that the main area of settlement induced by mining is in a certain range of the mining well and the decrease of NGH layer strength, slightly influenced by NGH decomposition, is mainly caused by production-related drainage. The results also show that in the NGH mining in Shenhu area prolonging heating time has a more obvious influence on the settlement than increasing temperature, namely the influenced area of prolonging heating time is larger than that of improving exploitation temperature.

Key words: natural gas hydrate (NGH); Shenhu area; seabed settlement; thermal-stress-fluid model

收稿日期:2015-04-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51279097,51379117,51479108);山东省博士后创新项目专项项目(139484);山东科技大学研究生科技创新基金项目(YC150303)

作者简介:公彬(1988—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要从事天然气水合物及采矿工程研究。

E-mail: sdkdgongbin@163.com

蒋宇静(1962—),男,江苏靖江人,教授,博士,主要从事天然气水合物力学特性方面的研究工作。

E-mail: jiang@civil.nagasaki-u.ac.jp

天然气水合物(natural gas hydrate,NGH),是一种笼形包合物,是由水和天然气在高压和低温条件下形成的类冰的、非化学计量的、笼形结晶化合物。至少有两种或两种以上的笼子,气体分子填充在这些笼子里,其组成及笼占有率都是可变的^[1-3]。在这种冰状的晶体中作为“客”气体分子的碳氢气体充填在水分子结晶格架的空穴中,两者在低温和一定压力下通过范德华作用力稳定地结合在一起^[4-6]。

国内外常见的 NGH 开采技术主要包括:热开采法、注化学剂开采法、减压开采法以及上述几种开采方式相结合的联合开采方法。注入化学剂法开采天然气水合物可能带来环境污染问题^[7]。相对于注热开采和注化学剂开采来说,减压开采在经济性和环境影响方面具有很大优势,特别是当水合物层与自由气层共同存在时能够取得良好的开采效果^[8]。从沉积层中开采 NGH 会使沉积层强度降低,可能导致海底地层的沉降及开采井的破坏^[9]。为了保证 NGH 的安全开采,有必要研究 NGH 储层的力学和变形特性。

南海北部海底地质灾害因素主要有滑坡、浅层气、断层、陡坎、底辟、活动沙波、地震、埋藏古河道、不规则基岩面、凹凸地、浅槽、峡谷、非移动沙波和埋藏谷^[10],其中海底滑坡是当前国际变形研究领域的最新方向之一,由于其分布特点和形成机制与陆地有很大差异,并且调查难度较大,所需投入资金巨大,研究进展一直十分缓慢。Lee 等^[11]在一项由美国地质调查局资助的项目中应用海底变形的探测数据以及取样实验测试数据,基于 GIS (geographic information system)技术对海底浅层变形进行了区域分析。

我国对海底变形的研究起步比较晚。20 世纪 80 年代初,随着海洋石油的大规模勘探开发和高分辨率地球物理调查技术和设备的引进,才正式开展海洋地质和海洋地质灾害的调查研究工作。冯文科等^[12]在南海珠江口盆地油气开发区,开展了约 $7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的 1:200 000 海洋工程地质调查。吴时国等^[13]经过对 Storegga 滑坡的演化和触发机理进行详细研究,指出在众多海底滑坡触发机制中,有两个因素起决定作用:地震作用和天然气水合物的分解。

本文以南海神狐海域为研究对象,构建温度-应力-流体的耦合分析模型,模拟减压法和热激法开采 NGH。通过此模型,可以预测海底变形及其特点,评估 NGH 生产中由于压力和温度变化带来的影响。

1 模型的建立

1.1 模型简化

以南海神狐海域为研究对象,构建了温度-应力-流体的耦合分析模型,模拟减压法和热激法开采 NGH,模型忽略水合物分解产生的天然气和水的流动及分解过程中储层内热交换的影响,做出以下简化:

- 1)海底沉积层各层是各向同性线弹性孔隙材料;
- 2)建立局部热平衡,并假设两相之间没有热交换;
- 3)不考虑生成的天然气流动;
- 4)能量交换只发生在固液两相之间,忽略固气和气液之间的能量交换;
- 5)在沉积颗粒和水有热量交换的微小区域内认为温度相同;
- 6)忽略 NGH 生成和分解过程中热量的释放和吸收。

考虑到天然气水合物相变潜热,建立地层的温度控制方程

$$\rho c_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T. \quad (1)$$

其中: ρ 为沉积层的密度, kg/m^3 ; c_{eff} 为等效热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; λ 为沉积层的导热系数。

$$c_{\text{eff}} = c + \epsilon L / (T_L - T_S), T_S < T_L. \quad (2)$$

其中: ϵ 为天然气水合物的质量分数; L 为天然气水合物的相变潜热, J/kg ; T_S 为天然气水合物开始分解的温度, K ; T_L 为天然气水合物刚好分解完全的温度, K ; $c = (n-1)c_s + n(s_h c_h + s_w c_w)$; s_h 、 s_w 分别为天然气水合物和水的饱和度。

采用比奥固结理论求解渗流场:

$$-\nabla^2 u - \frac{\lambda' + G'}{G'} \frac{\partial \epsilon_V}{\partial x} + \frac{1}{G'} \frac{\partial P}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

$$-\nabla^2 v - \frac{\lambda' + G'}{G'} \frac{\partial \epsilon_v}{\partial y} + \frac{1}{G'} \frac{\partial P}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

$$-\nabla^2 w - \frac{\lambda' + G'}{G'} \frac{\partial \epsilon_v}{\partial z} + \frac{1}{G'} \frac{\partial P}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

其中： σ 为有效应力，Pa； P 为孔隙水压力，Pa； $\lambda' = \frac{v'E'}{(1+v')(1-2v')}$ ， $G' = \frac{E'}{2(1+v')}$ ， $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 。

由于单元体内水量的变化率等于土体体积的变化率，根据达西定律得补充方程

$$\frac{k}{\gamma_w} \nabla^2 u = -\frac{\partial \epsilon_v}{\partial t}. \quad (6)$$

本文在描述沉积层的变形时，天然气水合物层假设为理想的弹塑性材料，屈服前土体的应力应变关系为线弹性，另外考虑到温度场对应力场的影响，应力应变应满足如下关系：

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{E} [(1+\nu)\sigma_{ij} - \nu\sigma_{kk}\delta_{ij}] + \delta_{ij}\alpha \cdot \Delta T. \quad (7)$$

其中： ϵ_{ij} 为应变张量，MPa； σ_{ij} 为应力张量，Pa； δ_{ij} 为克罗内克儿 Delta； E 为弹性模量，Pa， ν 为泊松比； α 为线热膨胀系数， K^{-1} ； ΔT 为底层温度改变量。

在塑性阶段应力状态，满足 Mohr-Coulomb 屈服面方程

$$F = R_{mc}q - p \tan \varphi - c = 0. \quad (8)$$

其中： $R_{mc}(\Theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \varphi} \sin(\Theta + \frac{\pi}{3}) + \frac{1}{3} \cos(\Theta + \frac{\pi}{3}) \tan \varphi$ ； $\cos(3\Theta) = (\frac{r}{q})^3$ ； $p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ ； $q =$

$\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}$ ； φ 为内摩擦角， $(^\circ)$ ； Θ 为广义剪应力方位角， $(^\circ)$ ； c 为材料的黏聚力，

Pa； r 为第三偏应力不变量，Pa； $r = S_1 S_2 S_3$ ； S 为主偏应力，Pa。

为了验证本文所建立的耦合分析方法的正确性，进行加热排水固结模拟实验^[10]。利用 FLAC^{3D} 建立耦合分析模型，模型尺寸、单元划分情况如图 1 所示，尺寸为 90 mm × 180 mm × 1 mm，平均划分为 60 个网格，加载边界条件，温度和排水边界情况如图 1 所示。黏土层的初始温度设置为 22.5 °C。监测并记录 A-E 点的沉降值和温度的变化。假设在模拟过程中黏土层为弹性材料，并且不会发生二次固结。模拟所需的物理参数如表 1 所示。图 2 所示为 A 点时间和压实度理论分析和数值模拟的对比曲线。由图中可以清楚地看出，理论分析值和数值模拟值非常接近，说明本文构建的耦合分析模型是可以相信的。

1.2 南海神狐海域开采模型

神狐海域调查研究区位于南海北部陆坡中段神狐暗沙东南海域附近，即西沙海槽与东沙群岛之间海域(图 3)。本次模拟区域位于珠江口盆地珠二坳陷，该坳陷自中新世以来处于构造沉降阶段，具备良好的天然气水合物成藏地质条件。

根据 2007 年国土资源部广州地质调查局的钻探数据，对南海神狐海域 NGH 层进行模拟计算，钻探站位的分布如图 4 所示。数据显示，南海神狐海域水合物主要组成气体是甲烷，占 99.3% 以上；沉积物中水合物的饱和度为 21% 左右^[14]。南海神狐海域的天然气水合物为均匀分散的层状，厚度 10~43 m，水合物层的孔隙度为 33%~48%，地温梯度为 43~67.7 °C/km。

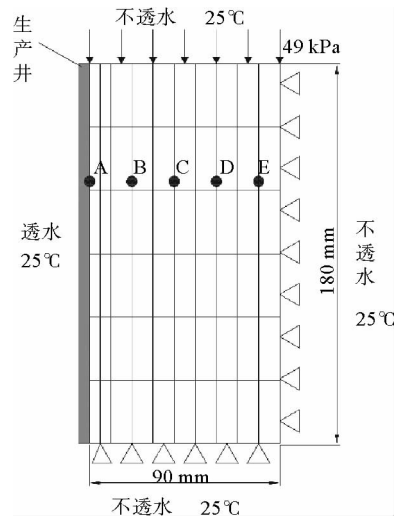


图 1 加热排水估计模拟实验模型

Fig. 1 Analytical model of axisymmetric

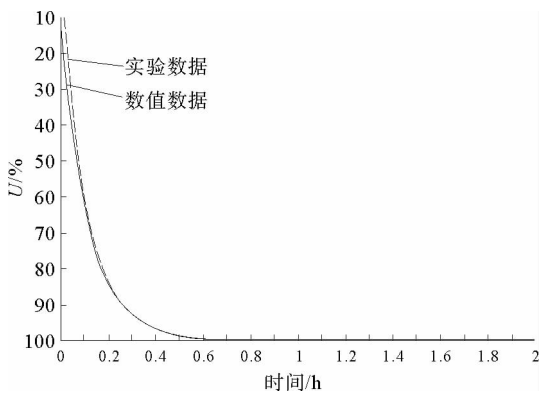


图 2 理论计算和数值计算固结度随时间变化的对比曲线

Fig. 2 The time coefficient-compactness contrast curves of theoretical values and analytical values

表 1 模型参数表

Tab. 1 Model parameters

参量	数值
体积模量/ Pa	8.85×10^5
剪切模量/ Pa	3.17×10^5
泊松比	0.34
渗透系数/ (cm/s)	1.0×10^{-7}
孔隙率/ %	0.57
水的压缩系数/ (1/ Pa)	0.5×10^{-9}
水的密度/ (kg/cm ³)	1 000
土的密度/ (kg/cm ³)	2 630
热膨胀系数/ (1/ °C)	5.0×10^{-6}
土的比热/ (J/ (kg · K))	1 412
热传导系数/ (J/ (s ² · m · °C))	1.000

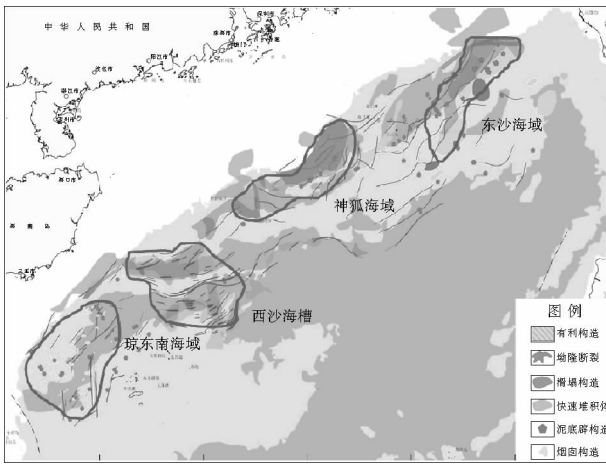


图 3 南海北部天然气水合物成藏分布图

Fig. 3 Gas hydrate reservoir distribution in North of South China Sea

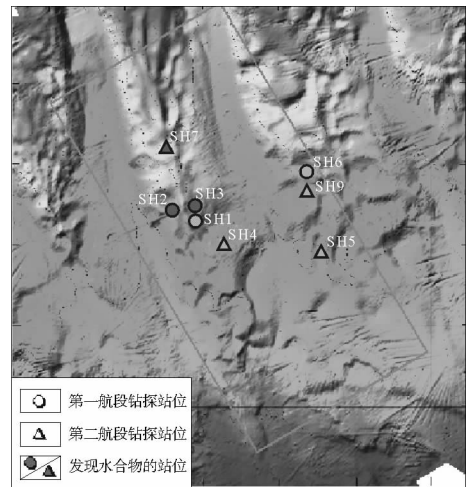


图 4 神狐海域完成的钻探站位分布图

Fig. 4 The picture of finished drilling position distribution in Shenhu area

南海神狐海域获得样品的 3 个站位海水深度分别为 1 235, 1 245, 1 108 m, 海底温度为 3.3~3.7 °C, 水合物层距离海底深度约 155~229 m, 水合物层厚度分别为 43, 10, 22 m^[15]。模拟的南海神狐海域天然气水合物模型如图 5 所示, 由于模型为轴对称图形, 故取其一半进行分析, 各部分的尺寸如图中所示, 模型高度为 300 m, 宽度为 500 m, 水合物层厚度为 10 m, 上覆岩层厚度为 200 m, 下部岩层厚度为 90 m。模型相关的地质参数和物理性质指标见表 2^[15]。NGH 沉积层的初始温度 15 °C, 压力为 15 MPa。如图 6 所示, 当压力为 12 MPa, 温度为 15 °C 时, NGH 开始分解; 同样的, 当压力为 15 MPa, 温度为 18 °C 时, NGH 开始分解。

2 海底沉降分析

引起海底沉降的因素可能是由于开采 NGH 后储层的强度降低或 NGH 开采后储层中的水被排出。为了确定开采 NGH 引起的海底沉降与 NGH 层强度降低、NGH 层排水关系, 建立了如表 3 所示的对比试验。结果表明, 由于 NGH 分解导致的 NGH 层弱化而引起的沉降很小, 主要是与生产有关的排水导致。

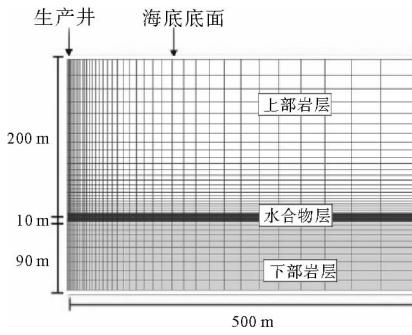


图 5 水合物开采模型示意图
Fig. 5 Analytical model

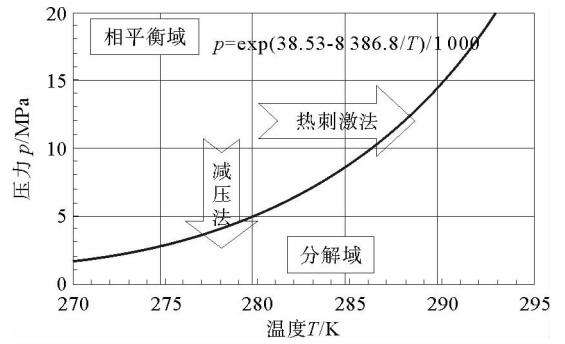


图 6 NGH 相平衡曲线
Fig. 6 Phase equilibrium relationship diagram of NGH

随着时间的推移,水合物层和海底的沉降值如图 7 和图 8 所示。NGH 层的最大沉降值在 Case 1, Case 1_1, Case 2 和 Case2_1 四种情况下的数值分别是 613.6, 590.3, 71.26, 70.81 mm。海底的最大沉降值在 Case 1, Case 1_1, Case 2 和 Case2_1 四种情况下的数值分别是 620.5, 604.7, 111.1 和 109.9 mm。

当 NGH 层的强度没有降低时,海底的沉降则是由于水合物开采导致储层内的水流失和上覆岩层自重导致的。由图 9 和图 10 可见,由于开采排水引起的 NGH 层和海底沉降在减压法和热激法中分别占的比例为 96.2%, 99.37% 和 97.5%, 98.9%。经以上分析可清楚地看出,开采引起 NGH 层强度降低对海底沉降的影响很小,而 NGH 开采引起海底沉降的主要原因是由于开采引起的排水。记录并分析沉降值与开采井距离两者间的关系,如表 3 所示分别为减压法和热激法时 Case 1, Case 1_1, Case 2 和

表 2 模型物理参数表

Tab. 2 The physical properties

参量	水合物层	岩层
变形模量 E/Pa	5.2×10^2	0.8×10^2
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1 930	2 597
渗透系数 $K/(\text{m}/\text{s})$	1.0×10^{-6}	5.2×10^{-6}
内聚力 c/MPa	1	0.3
泊松比 ν	0.4	0.4
内摩擦角 $(^\circ)$	30	30
孔隙率 n	0.4	0.4
水的压缩系数 $K_p/(1/\text{Pa})$	0.5	0.5
热导率 $C_c/(\text{J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{k}))$	1.7	2.915
比热 $C_p/(\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	1 783	1 050
初始温度 $T_0/^\circ\text{C}$	15	15

表 3 不同开采方法对比情况表

Tab. 3 Different mining methods comparison table

生产方法	条件	案例分析	降低 NGH 层强度
减压法	15 MPa → 1 MPa	Case 1	是
		Case 1_1	否
热激法	15 °C → 50 °C	Case 2	是
		Case2_1	否

Case2_1 四种情况下,随着距开采井的距离不同各点的沉降情况。分析可以看出,在距离开采井 100 m 处沉降值几乎 100% 是由于开采排水导致的。因此,认为距离开采井一定范围内是开采所引起沉降的主要区域。

3 开采温度对海底及水合物层沉降的影响

采用热激法开采 NGH,随着开采温度的升高,一方面会加快 NGH 的分解,加快产气速度;另一方面,增加温度对于 NGH 层及海底表层沉降也会起到促进作用。为了研究提高开采温度对 NGH 层和海底表层沉降数值及沉降范围的影响,本研究模拟了 50~150 °C 开采温度开采 1 000 h 时 NGH 层及海底表层沉降情况,试验情况如图 11 和图 12 所示。由图中可以看出,随着开采温度的升高,NGH 层和海底表层的沉降值不

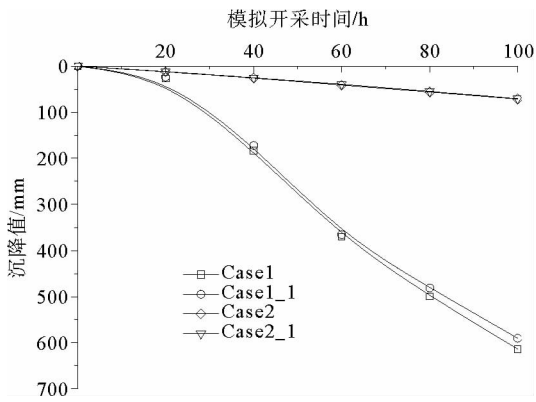


图 7 沉降值随时间的变化(NGH 层上部)

Fig. 7 Settlement changes with time (the upper NGH layer)

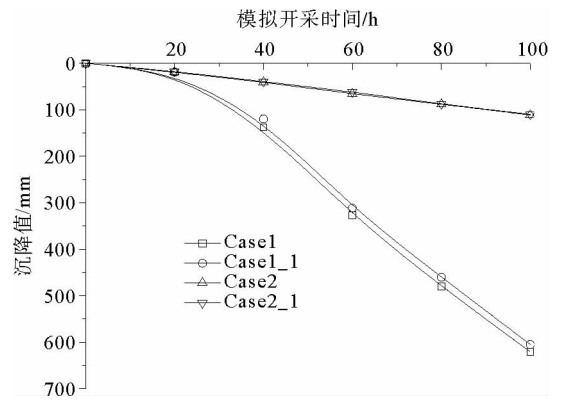


图 8 沉降值随时间的变化(海底)

Fig. 8 Settlement changes with time (the seafloor)

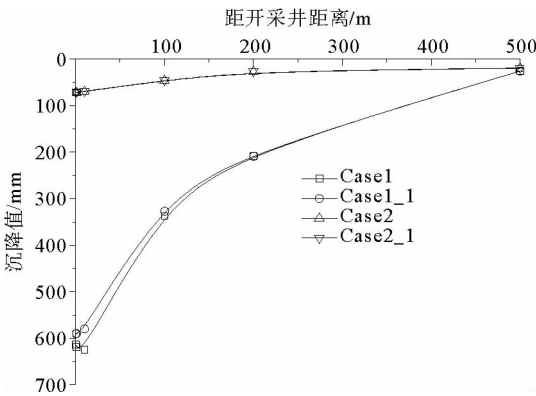


图 9 沉降值与距离开采井的关系(NGH 层上部)

Fig. 9 Relationship between the distance from the wellbore and the amount of subsidence (the upper NGH layer)

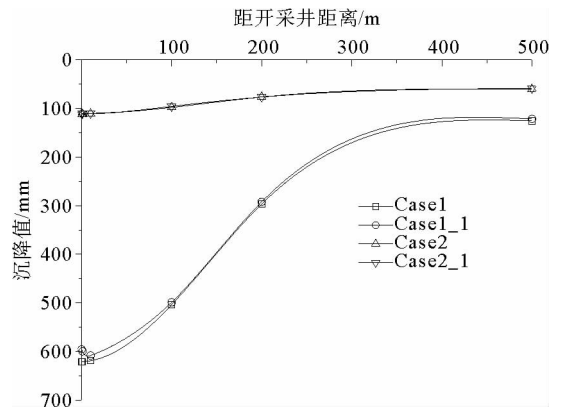


图 10 沉降值与距离开采井的关系(海底)

Fig. 10 Relationship between the distance from the wellbore and the amount of subsidence (the seafloor)

断增大,每个温度条件下两个观测层的沉降值均呈先缓慢增加后迅速增加再变缓的规律,并且随着开采温度的升高,迅速增加段的斜率有逐渐变大的趋势。进一步分析可以看出,随着开采温度的升高沉降范缓慢变大。50℃时 NGH 层的沉降范围在距离开采井 200 m 左右,海底表层沉降范围在距离开采井 210 m 左右;当温度升高到 150℃时,NGH 层的沉降范围扩大到 350 m,海底表层的沉降范围扩大到 400 m 左右,温度每升高 10℃沉降范围扩大 20~30 m。

本研究还模拟了同一开采温度下,不同加热时长对海底及水合物层沉降的影响。50℃时模拟开采温度,分别模拟开采 100 h 至 600 h。NGH 层和海底表层的沉降情况如图 13 和图 14 所示,由图中可以看出,延长模拟开采时间和提高开采温度所引起的海底地层的沉降规律具有相似性,同样呈先缓慢增加后迅速增加再变缓的规律,并且随着开采时间的延长,迅速增加段的斜率有逐渐变大的趋势。模拟开采 100 h 时,NGH 层和海底表层沉降范围分别为 100 m 和 150 m;模拟开采 600 h 时,NGH 层和海底表层沉降范围分别约为 350 m 和 400 m;开采时间每增加 100 h,沉降范围扩大 50 m 左右。针对南海北部神狐海域 NGH 赋存情况,比较提高开采温度和延长加热时间可以看出,延长加热时间引起的海底沉降范围更广,说明在维持某一开采温度条件下,延长加热时间 NGH 的开采范围要比提高开采温度的开采范围大。

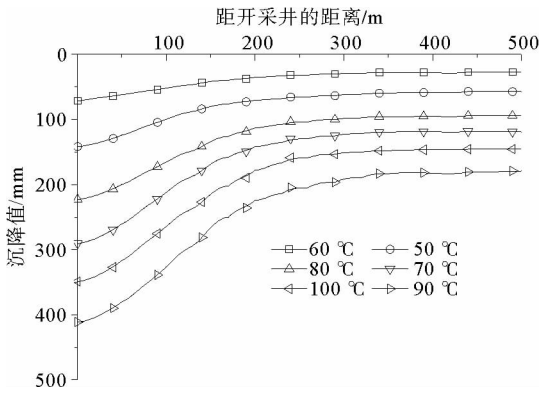


图 11 逐步提高加热温度后,NGH 层的沉降情况
Fig. 11 The settlement while gradually increasing the heating temperature (the upper NGH layer)

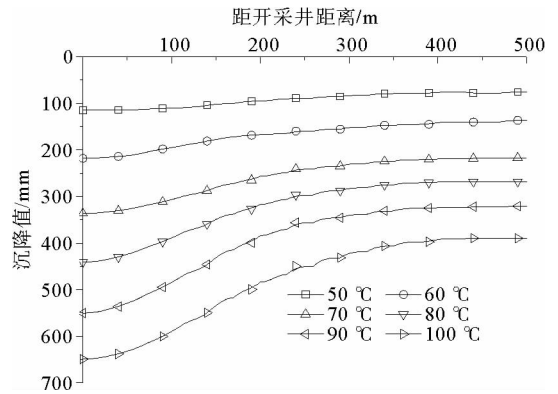


图 12 逐步提高加热温度后,海底的沉降情况
Fig. 12 The settlement while gradually increasing the heating temperature (the seabed)

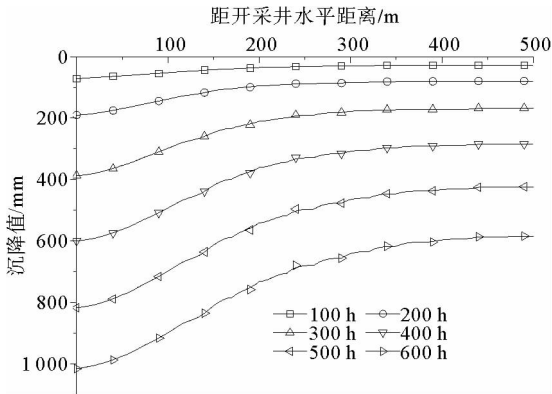


图 13 延长加热时间后,NGH 层的沉降情况
Fig. 13 The settlement after prolonged heating (the upper NGH layer)

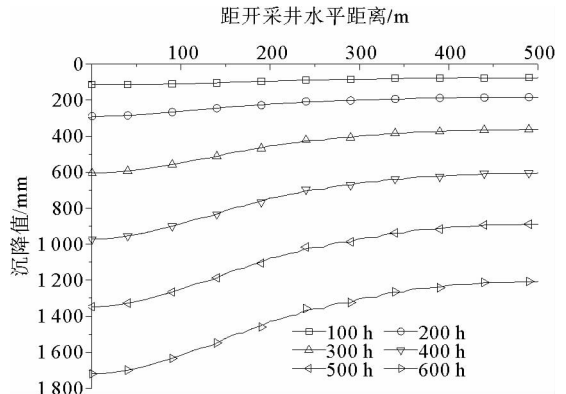


图 14 延长加热时间后,海底的沉降情况
Fig. 14 The settlement after prolonged heating (the seabed)

4 结论

在有限差分数值模拟软件 FALC^{3D}基础上,针对我国南海北部陆坡神狐海域 NGH 赋存情况,为准确预测南海北部神狐海域 NGH 开采工程中海底的沉降开展了初步研究,得出以下结论:

- 1)利用 FLAC^{3D}数值模拟软件建立模型并计算,结果显示,在距离开采井 100 m 范围内点的沉降值几乎 100%是由于开采排水导致的。所以,认为距离开采井一定范围是开采所引起沉降的主要区域。
- 2)为防止开采平台的倾斜,影响生产的正常进行,平台基础应按地表沉降规律对称布置。
- 3)神狐海域 NGH 开采中,延长加热时间对沉降的影响比提高开采温度明显,即延长加热时间的开采范围要比提高开采温度时的开采范围大。

参考文献:

[1]Tulk C A,Ratcliff C I,Ripmeester J A. Chemical and physical analysis of natural gas hydrate from the JNOC/JAPEX/GSC Mallik 2L-38 research well[J]. Geological Survey of Canada Bulletin,1999,544:251-263.
 [2]Ripmeester J A,Lu H,Moudrakovski I L,et al. Structure and composition of hydrate in sediment recovered from Mallik 5L-38,Mackenzie Delta,NWT,Canada: X-ray diffraction,Raman and Solid-state NMR spectroscopy[J]. Geological Survey of Canada Bulletin,2005,585:89-94.
 [3]Lu H,Seo Y T,Lee J W,et al. Complex gas hydrate from the Cascadia margin[J]. Nature,2007,445:303-306.

- [4]赵洪伟. 海洋天然气水合物相平衡条件模拟实验及探测技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005: 3.
- [5]Sloan E D. Clathrate hydrates of natural gases[M]. London: Taylor & Francis, 1990: 15-22.
- [6]周怀阳, 彭晓彤, 叶瑛. 天然气水合物勘探开发技术研究进展[J]. 地质与勘探, 2002, 38(1): 70-73.
Zhou Huaiyang, Peng Xiaotong, Ye Ying. Development in technology of prospecting and exploitation for gas hydrates[J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(1): 70-73.
- [7]Kerr R A. Energy gas hydrate resource; Smaller but sooner[J]. Science, 2004, 303: 946-947.
- [8]Moridis G J, Sloan E D. Gas production potential of disperse low-saturation hydrate accumulations in oceanic sediments[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(6): 1834-1849.
- [9]Kimoto S, Oka F, Fushita T, et al. A chemo-thermo-mechanically coupled numerical simulation of the subsurface ground deformations due to methane hydrate dissociation[J]. Computers and Geotechnics, 2007, 34(4): 216-28.
- [10]夏真, 郑涛. 南海北部海底地质灾害因素[J]. 热带海洋, 1999, 18(4): 91-95.
Xia Zhen, Zheng Tao. Features of submarine geological hazards in northern South China Sea[J]. Tropical Marine, 1999, 18(4): 91-95.
- [11]Locat J, Lee H J. Submarine landslides: Advances and challenges[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(1): 193-212.
- [12]冯文科, 石要红, 陈玲辉. 南海北部外陆架和上陆坡海底滑坡稳定性研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14(2): 89-94.
Feng Wenke, Shi Yaohong, Chen Linghui. Research for seafloor landslide stability on the outer continental shelf and the upper continental slope in the northern South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1994, 14(2): 89-94.
- [13]吴保祥, 雷怀彦, 段毅, 等. 沉积物体系中甲烷水合物平衡温度、压力条件实验模拟[J]. 石油勘探与开发, 2005, 31(4): 22-24.
Wu Baoxiang, Lei Huaiyan, Duan Yi, et al. Experimental simulation on equilibrium temperature and pressure of methane hydrate in sediment systems[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(4): 22-24.
- [14]刘昌岭, 业渝光, 孟庆国, 等. 南海神狐海域天然气水合物样品的基本特征[J]. 热带海洋学报, 2012(5): 1-5.
Liu Changling, Ye Yuguang, Meng Qingguo, et al. Characteristics of gas hydrate samples recovered from Shenhu Area in the South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2012(5): 1-5.
- [15]李刚, 李小森, 陈琦, 等. 南海神狐海域天然气水合物开采数值模拟[J]. 化学学报, 2010(11): 83-92.
Li Gang, Li Xiaosen, Chen Qi, et al. Numerical simulation of gas production from gas hydrate zone in Shenhu Area, South China Sea[J]. Acta Chimica Sinica, 2010(11): 83-92.

(责任编辑: 高丽华)