

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2020095

深水水合物试采过程中地层沉降及井口稳定性研究

李莅临¹, 杨 进¹, 路保平², 柯 珂², 王 磊², 陈柯锦¹

(1. 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院, 北京 102249; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘 要: 在深水非成岩地层天然气水合物试采过程中, 随着试采时间增长, 大面积弱固结地层中的水合物分解后, 可能造成海底地层沉降, 损坏井口和海底管汇, 导致试采工程失败。为此, 建立了非成岩地层水合物试采过程中的海底地层沉降和井口稳定性分析模型, 分析认为水合物分解后产生的负摩阻力和下拉载荷是导致井口失稳的主要因素, 并采用有限元强度折减法模拟研究了水合物分解对地层沉降和井口稳定性的影响, 结果发现, 水合物分解后管柱周围的负摩阻力主要分布于表层导管底部向上约 1/3 的区域, 且水合物分解半径越大、水合物饱和度越高, 负摩阻力越大。自主研发了天然气水合物开采井口模拟试验装置, 进行了水合物分解对井口稳定性影响的室内模拟试验, 负摩阻力的模拟试验结果与数值模拟结果相比, 相对误差在 10% 以内, 验证了计算模型和数值模拟结果的可靠性。研究成果可为深水非成岩地层水合物试采时间控制和井口安全评估提供理论参考。

关键词: 深水; 天然气水合物; 水合物试采; 地层沉降; 井口稳定性; 模拟试验

中图分类号: TE38

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2020)05-0061-08

Research on Stratum Settlement and Wellhead Stability in Deep Water during Hydrate Production Testing

LI Lilin¹, YANG Jin¹, LU Baoping², KE Ke², WANG Lei², CHEN Kejin¹

(1. College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing, 102249, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: During hydrate production testing in deep-water non-diagenetically altered formations, subsea stratum settlement may occur after the decomposition of gas hydrate in a large area of weakly consolidated formation accompanied by an increase of production test time, resulting in wellhead and subsea manifold damage as well as the failure of the production testing project. To solve this problem, an analytical model of subsea stratum settlement and wellhead stability in non-diagenetically altered formations during hydrate production testing was established. Negative friction and drop-down load produced by hydrate decomposition were considered to be the main factors leading to wellhead instability, and the finite element strength reduction method was used to simulate the influence of hydrate decomposition on stratum settlement and wellhead stability. The results showed that the negative friction resistance around the pipe string after hydrate decomposition was mainly distributed in the area about 1/3 the length of conductor above the bottom, and the larger the hydrate decomposition radius, the higher the hydrate saturation, and the greater the negative friction resistance. The laboratory simulation test was carried out to explore the influence of hydrate decomposition on wellhead stability by means of the self-developed wellhead simulation device for gas hydrate production. The results showed that the relative error between the test result and simulation result of negative friction resistance was less than 10%, which verified the reliability of the calculation model and numerical simulation results. The research results can provide a theoretical reference for the time control and wellhead safety assessment of hydrate production test in deep water non-diagenetic formations.

Key words: deep water; gas hydrate; hydrate production test; stratum settlement; wellhead stability; simulation test

我国南海天然气水合物分布于海底泥面以下几十米至 300 m 以浅的浅部地层, 主要赋存于泥质粉砂等细粒沉积物中, 具有埋深浅、胶结性差的特点, 上覆盖层多为非成岩的海底软黏土和泥质粉砂, 地层的承载力和稳定性低^[1-5]。目前, 我国水合物试采时间最长为 60 d, 产气量为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[6], 水合物分解范围不大, 未出现海底地层沉降问题。然而, 在未来的水合物试采中, 为进一步提高水合物的产气

收稿日期: 2019-12-07; 改回日期: 2020-06-26。

作者简介: 李莅临(1989—), 男, 辽宁丹东人, 2011 年毕业于武汉理工大学船舶与海洋工程专业, 油气井工程专业博士研究生, 主要从事极地油气、天然气水合物等的低温钻井理论及关键技术研究。E-mail: lli9687@vip.sina.com。

基金项目: 国家重点研发计划项目“极地冷海钻井关键技术研究”(编号: 2016YFC0303300)、国家重大科技专项“海上复杂地层安全快速钻完井关键技术”(编号: 2016ZX05033-004-002)和北京市科技计划项目“30MPa、1500L 天然气水合物开采模拟动态监测及配套研究”(编号: Z181100005118010)联合资助。

量,并随着试采时间进一步增长,水合物的分解区域向井眼周围逐渐扩大,地层中的水合物不断气化解,会大幅降低地层的承载力和稳定性,可能造成海底地层塌陷,损坏水下井口、跨接管汇等水下设备,导致试采工程失败^[7]。因此,研究深水非成岩地层水合物试采过程中的海底地层沉降和井口稳定性具有现实意义。近年来,国内外学者对深水水合物开发所带来的环境和地质风险进行了大量研究:刘峰、施加杰等人^[8-9]研究了南海天然气水合物分解对海底斜坡稳定性的影响;Ning Fulong、Li Qingchao等人^[10-11]基于多场耦合理论,分析了水合物钻井过程中井眼及周围地层的稳定性问题;朱敬宇等人^[12]分析了钻井过程中水合物地层的安全承载能力。这些研究为水合物分解导致的海底地层沉降和稳定性深入研究奠定了理论基础,但其主要关注区域性温度压力改变、钻井及测试过程中诱发的水合物分解所导致的地质风险,水合物分解的范围小、时间短,尚缺少针对我国南海深水非成岩水合物试采中大面积弱固结地层水合物分解所引起的海底地层沉降和井口失稳方面的研究。针对这一问题,建立了非成岩地层水合物试采过程中海底地层沉降和井口稳定性分析模型,模拟研究了海底地层沉降和井口失稳机理,分析了不同试采时间下,水合物分解半径对海底地层沉降和井口稳定性的影响,并通过室内水合物分解模拟试验进行了验证,为深水非成岩地层水合物试采时间控制和井口安全评估提供了理论参考。

1 海底地层沉降及井口稳定性分析模型的建立

我国和日本的水合物井均采用与常规深水油气井相似的钻井方法,并采用降压法试采^[13-16],井身结构如图1所示(图1中: F_s 为井口的下拉载荷,N)。

水合物井试采时,通过降压使井眼附近的水合物首先发生分解,同时逐渐向周围扩展而产生水合物分解区,底部水合物分解使上覆海底浅层土产生新的固结沉降,导致表层导管、水泥环和周围地层之间存在相对位移而产生负摩阻力,并沿轴向叠加而产生下拉载荷。根据桩基负摩阻力理论^[17],经过试采时间 t 后,若地层的沉降位移为 $s(z,t)$,则井口的下拉载荷为:

$$F_s = \int_0^h \frac{G_s}{r_0 \ln(r_m/r_0)} [s(z,t) - w_p(z)] dz \quad (1)$$

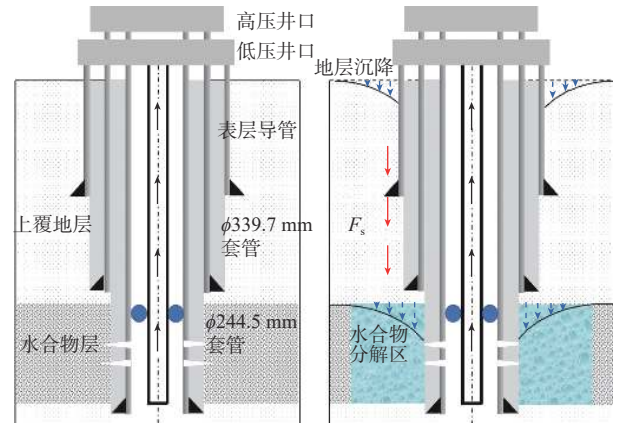


图1 水合物井井身结构及井口失稳示意

Fig. 1 Schematic diagram of the casing program and well-head instability of hydrate wells

式中: h 为技术套管下深,m; G_s 为上覆海底土的剪切模量,Pa; r_m 为水合物的分解半径,m; r_0 为表层导管半径,m; $s(z,t)$ 为地层的沉降位移,m; $w_p(z)$ 为井口的轴向位移,m。

从式(1)可以看出,井口下拉载荷的大小主要取决于以下因素:1)水合物井的井身结构及上覆海底地层的土质条件;2)水合物分解导致上覆地层的沉降位移,主要与水合物的分解情况相关,水合物储层的厚度和饱和度越大,则水合物分解半径越大,地层沉降越明显,井口的下拉载荷也越大;3)时间效应,随着试采时间不断增长,水合物分解后上覆土体的沉降位移不断变大,井口的下拉载荷也会越来越大。

当水合物分解引起的下拉载荷和井口载荷的大小超过海底土的极限承载力时,井口将失稳下沉^[18]。海底土的极限承载力主要与表层导管的侧向摩阻力、水泥环和地层的胶结力、技术套管和生产套管的端部阻力有关,因此要保证井口不下沉需满足:

$$F_s + W_L \leq p_f + p_c + p_b = \int_0^{h_1} \pi f_s(z) D_1 dz + \int_{h_1}^{h_2} \pi f_c(z) D_2 dz + \delta \int_{h_2}^{h_3} \pi f_c(z) D_3 dz + p_{b1} + p_{b2} \quad (2)$$

式中: W_L 为井口载荷,N; p_f 为表层导管自上而下的侧向摩阻力,N; p_c 为水泥环与地层间的胶结力,N; p_b 为技术套管和生产套管的端部阻力,N; $f_s(z)$ 为表层导管的单位面积侧向摩阻力,Pa; $f_c(z)$ 为水泥环与地层间的胶结强度,Pa; D_1 、 D_2 和 D_3 分别为表层导管、技术套管和生产套管的外径,m; h_1 、 h_2 和 h_3 分别为表层导管、技术套管和生产套管的下深,m; δ 为变截面半径引起的承载力修正系数; p_{b1} 、 p_{b2} 分别为技术套管和生产套管的端部阻力,N。

2 地层沉降及井口稳定性数值模拟

水合物分解后地层强度会降低, 因此采用有限元强度折减法模拟水合物分解对地层沉降和井口稳定性的影响^[8-9]: 通过逐步折减水合物分解区的地层强度参数和有效应力系数, 模拟水合物的分解过程, 使上部地层产生沉降位移, 再进一步计算不同分解半径下, 表层导管、水泥环和周围地层的负摩阻力分布及下拉载荷, 具体流程如图 2 所示。

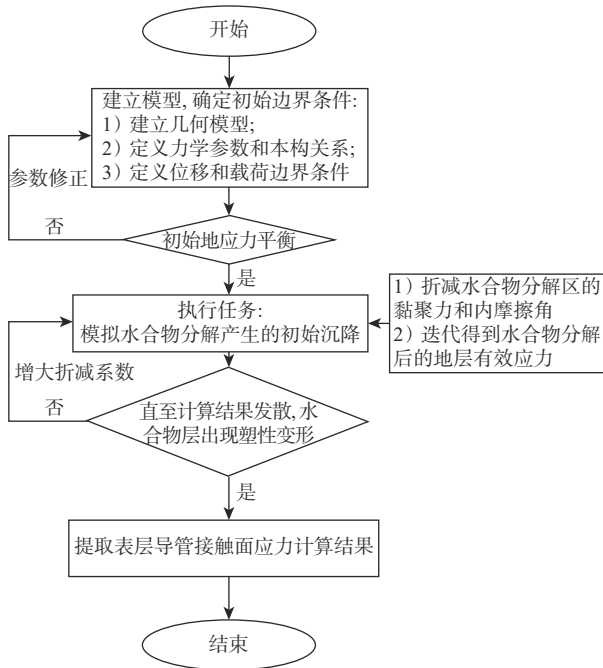


图 2 有限元强度折减法模拟水合物分解的基本流程

Fig.2 Basic simulation process of hydrate decomposition with finite element strength reduction method

2.1 模型及初始边界条件

根据水合物试采的实际工况, 建立各层套管、水泥环、上覆海底土、水合物储层的几何模型 (如图 3 所示), 分别定义其初始力学参数及本构关系: 表层导管、水泥环为线弹性体, 各层套管和水泥环之间无相对位移; 海底土和水合物稳定区服从摩尔-库伦准则。参考我国南海天然气水合物试采取样数据确定模拟参数^[18-19]: 作业水深 1 500.00 m, 水合物埋深 160.00 m、饱和度 40%、分解前的黏聚力 850 kPa、内摩擦角 32°、弹性模量 3.6 GPa、泊松比 0.45, 海底土的黏聚力 220 kPa、内摩擦角 25°、弹性模量 3 GPa、泊松比 0.35。为了更加准确地模拟表层导管、水泥环和地层间的负摩阻力及下拉载荷, 需要对表层导管、水泥环和海底土之间的接触面进行定义, 由于海底土接触面附近的剪应力和剪应变为明

显的非线性分布, 因此采用无厚度的非线性接触面单元模拟表层导管、水泥环和海底土之间的接触面, 选取各层套管、水泥环与海底土接触面的最大刚度系数、破坏比和破坏剪应力定义接触面的本构关系, 定义接触面的剪应力和相对位移关系式为^[20]:

$$\begin{cases} \tau = \frac{u}{a + bu} \\ a = \frac{1}{k_{\max}} \\ b = \frac{R_f}{\tau_f} \end{cases} \quad (3)$$

式中: τ 为剪应力, Pa; u 为切向位移, m; a, b 为经验系数; k_{\max} 为最大刚度系数; R_f 为破坏比; τ_f 为破坏剪应力, Pa。

在模拟研究中, 取表层导管与海底土的接触面最大刚度系数为 100、破坏比为 0.65、破坏剪应力为 80 kPa; 水泥环与海底土接触面的最大刚度系数为 320、破坏比为 0.85、破坏剪应力为 480 kPa, 并进行初始地应力平衡。

2.2 水合物分解对地层强度及孔隙压力的影响

水合物分解对地层强度的主要影响: 1) 由于水合物分解, 土颗粒的初始骨架被破坏、含水率上升, 导致地层的胶结性和强度降低; 2) 水合物分解产生的大量气体导致地层孔隙压力快速上升、有效应力降低。因此, 在数值模拟过程中, 需要采用折减法来实现水合物分解过程中地层胶结性、强度和有效应力的变化, 通过多次迭代确定水合物分解后的地层有效应力, 逐步折减地层的黏聚力和内摩擦角, 直至水合物分解区出现大面积的塑性应变区。

水合物分解区的黏聚力和内摩擦角的逐步折减方法为:

$$\begin{cases} C' = \frac{C}{K_1} \\ \varphi' = \arctan \frac{\tan \varphi}{K_2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: C' 为水合物分解后折减的黏聚力, Pa; C 为水合物地层的黏聚力, Pa; K_1 为水合物分解后黏聚力的折减系数; φ' 为水合物分解后折减的内摩擦角, rad; φ 为水合物地层的内摩擦角, rad; K_2 为水合物分解后内摩擦角的折减系数。

水合物分解引起的地层有效应力变化利用 Grozic 模型^[10]进行计算:

$$\Delta\sigma = \frac{(1+e)\sigma}{0.434C_s} \left[\phi(1-S) \left(0.13 - 164.6 \frac{T_2}{298.15} \frac{p_0}{p_2} \right) - \left(\frac{p_1}{p_2} - 1 \right) V_{GH} \right] \quad (5)$$

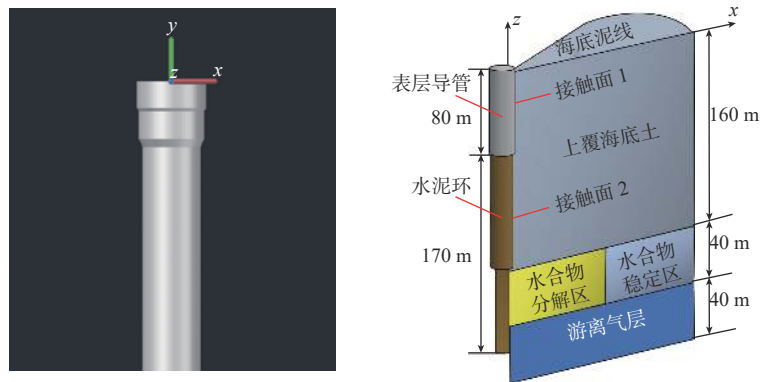


图3 表层导管及水合物地层几何模型

Fig.3 Geometric model of surface conductor and hydrate formations

式中: σ 为有效应力, Pa; C_s 为膨胀因子; ϕ 为孔隙度; S 为饱和度; p_0 为标准大气压, Pa; p_2 为水合物的平衡压力, Pa; T_2 为水合物的平衡温度, K; p_1 为水合物初始压力, Pa; V_{GH} 为水合物初始体积, m^3 (该模型假设 $1 m^3$ 的水合物分解产生 $164.6 m^3$ 的甲烷气体和 $0.83 m^3$ 的水, 沉积层中的固相和水相不可压缩, 气相压力变化符合波义尔定律)^[10]。

水合物分解对地层强度及孔隙压力的数值模拟结果显示: 水合物试采初始阶段, 分解半径不超过

5.00 m 时, 上覆地层基本保持稳定状态, 最大垂向沉降位移不超过 0.15 m, 海底表面基本无沉降; 随着水合物分解半径逐渐增大, 地层的沉降逐渐增大, 并且水合物层的厚度越大、饱和度越高, 分解后地层的最大沉降位移越大; 当水合物分解半径达到 50.00 m 时, 厚 40.00 m、饱和度 40% 的水合物层完全分解后, 上覆海底地层的最大沉降位移达 0.83 m, 井口周围海底泥面的沉降为 0.36 m。不同水合物分解半径下海底地层沉降位移云图见图 4。

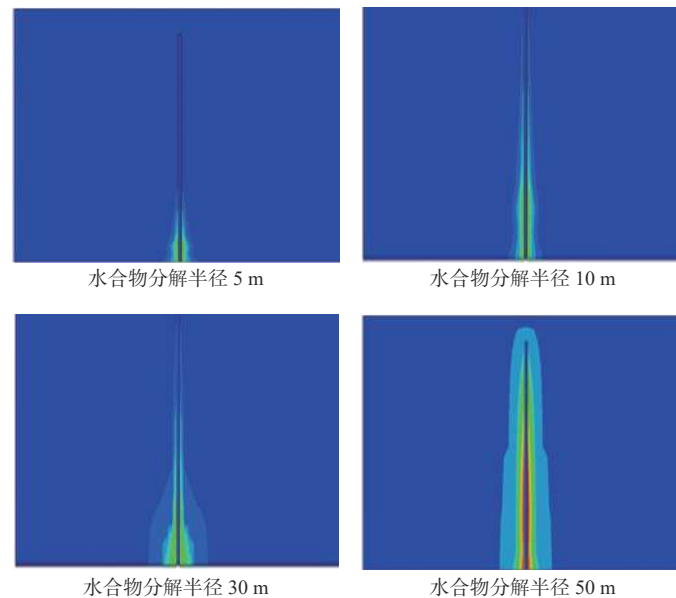


图4 不同水合物分解半径下地层沉降位移云图

Fig.4 Cloud chart of formation settlement displacement under different hydrate decomposition radii

2.3 下拉载荷及井口稳定性分析

表层导管、水泥环和海底土间的接触面应力, 即为水合物分解导致上部地层沉降所产生的摩阻力, 图 5 为厚 40.00 m、饱和度 40% 水合物层, 不同水合物分解半径下的摩阻力分布曲线。从图 5 可以

看出, 负摩阻力主要分布于管柱底部向上约 1/3 的区域, 且水合物分解半径越大, 负摩阻力的极值越大, 并且中性点分布向上移动。

将负摩阻力沿轴向叠加即为水合物分解对井口产生的下拉载荷。图 6 为不同厚度的水合物层下拉

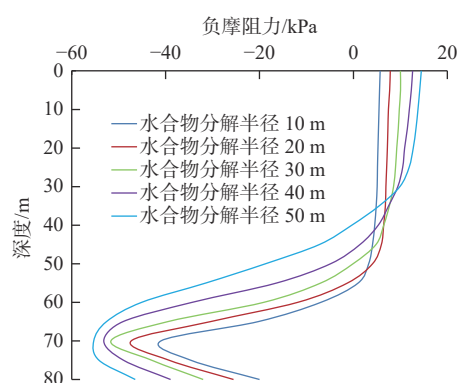


图 5 不同水合物分解半径下负摩阻力的轴向分布

Fig. 5 Axial distribution of negative friction resistance under different hydrate decomposition radii

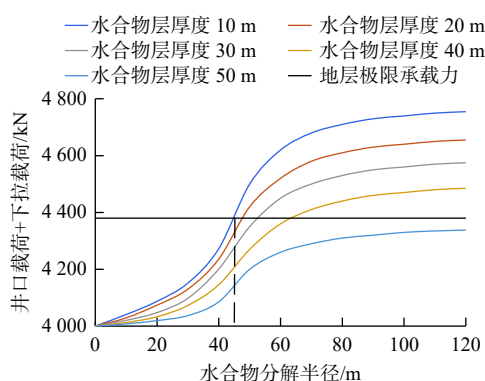


图 6 不同厚度水合物层下拉载荷与井口载荷之和

Fig. 6 Sum of drop-down load and wellhead load of hydrate stratum with different thickness

载荷与井口载荷之和同地层极限承载力的对比情况,若下拉载荷和井口载荷之和超过地层极限承载力,则井口失稳下沉。模拟结果显示:

1) 水合物层的厚度越大、试采时间越长,分解半径越大,下拉载荷越大;同时,水合物的埋深越浅,地层极限承载力越低。因此,埋深浅、厚度大的水合物层,试采时间越长,井口失稳的风险也越高。

2) 当水合物层埋深 160.00 m、厚度 40.00 m、饱和度 40%,水合物分解半径分别为 20.00 和 50.00 m 时,水合物完全分解后下拉载荷分别为 123.20 和 494.94 kN。根据地层极限承载力可以反算保持井口稳定所允许的最大水合物分解半径为 45.60 m。

3) 当水合物层厚度、饱和度一定时,分解半径增大到一定程度后,由于离井口的距离越来越远,下拉载荷增加幅度也逐渐减缓。因此,对于有井口失稳风险的水合物层,可以增加套管的下入深度,以提高地层极限承载力,从而降低井口失稳的风险。

3 水合物分解对井口稳定性影响的模拟试验

在理论分析的基础上,自主研发了天然气水合物开采井口模拟试验装置,进行了水合物分解对井口稳定性影响的室内模拟试验,以验证数值模拟计算结果的准确性。

3.1 试验装置

天然气水合物开采井口模拟试验装置主要由水合物高压反应釜、井口模拟系统、低温水浴系统、注气供液系统、测量及数据采集系统组成,如图 7 所示。高压反应釜是一个内径 0.50 m、内部高度 1.50 m、有效容积 295 L 的桶状容器,静态承压 30 MPa,用于制备水合物并进行模拟试验;反应釜的温度由低温水浴控制,温度控制范围 $-10 \sim 30$ $^{\circ}\text{C}$,控制精度 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 。反应釜内部布置 125 个温度测点,用于测量反应釜内部的温度场分布,使用 PT100 铂电阻温度传感器,量程 $-20 \sim 100$ $^{\circ}\text{C}$;布置 3 个压力测点,用于测量反应釜内压力,压力传感器量程 $0 \sim 30$ MPa。使用高压气体流量控制计和恒压平流泵进行注气供液。

井口模拟系统由模拟管柱和井口加载装置组成。其中,模拟管柱的上部为钢管,底部为水泥管,在试验时插入反应釜内的地层中。模拟管柱顶部设置井口加载装置,可以匀速施加最大 2 000 kN 的垂向载荷来模拟井口载荷,也可以控制管柱匀速运动。模拟管柱内部可以插入内管,通过伺服电机连接升降机上下运动模拟试采管柱,总行程为 1.50 m,通过高压循环泵在环空内循环流体模拟水合物开采中的井筒流动过程,管底装有筛网防止砂土堵塞循环泵。模拟管柱顶部布置位移计测量井口的垂向位移,管壁每隔 10 cm 集成布置全断面载荷传感器、侧壁摩擦盒及应变片,桩周土内埋设孔压计和土压力盒测量水合物分解过程中的侧向负摩阻力分布、管周土体应力变化和沉降位移(如图 8 所示),所有传感器获取的数据通过数据采集系统进行收集和保存。模拟管柱尺寸及施加载荷根据相似理论基本原理,考虑边界效应影响,确定几何相似比为 36。

3.2 试验过程

水合物开采井口模拟试验包括准备阶段、分解阶段和等候阶段(如图 9 所示),其中准备阶段是在反应釜内铺设海底水合物模拟地层:先在其他反应釜内预制天然气水合物(由于原位天然气水合物样品稀少,每次试验所需的水合物用量很大,因此依

反应釜内的温度可降至 6.0~7.0 ℃。当反应釜内的压力保持一段时间不再降低时,即可认为水合物的生成过程结束,反应釜内的温度压力变化情况见表 1。在反应釜内自上而下填入海底软黏土、水合物、砂垫层并压实,然后施加井口载荷插入模拟管柱,密封反应釜并加压降温至 4 ℃、15 MPa 的海底环境。

表 1 反应釜内温度和压力的变化情况

Table 1 Variation of temperature and pressure in the reactor

测量参数	反应釜内平均 压力/MPa	反应釜内平均 温度/℃	水合物 饱和度, %
水合物生成前	9.1	18.2	
水合物生成后	7.6	6.4	32.4

2)水合物试采分解过程模拟。待反应釜内的温度和压力稳定后,使用伺服电机控制内管向下运动,并在环空内循环 80 ℃ 的高温流体 2 h,使井眼周围的水合物分解,再通过回压控制系统降低反应釜内的压力,使反应釜内的水合物完全分解,模拟水合物试采分解过程。

3)利用传感器采集数据,记录全过程模拟管柱周围的负摩阻力及地层沉降位移分布。

3.3 试验结果分析

水合物分解过程中地表沉降模拟试验结果如图 10 所示,其中 P1, P2, P3 和 P4 分别代表距离模拟管柱中心 40, 30, 20 和 10 cm 的地表位移计。从图 10 可以看出:随着水合物分解,地表沉降过程可以分为平稳下降段、加速下降段和稳定固结段。在平稳下降段,随着地层温度升高,水合物的分解半径逐渐加大,水合物分解产生的孔隙水来不及排除,因此地层沉降量也较小,地表沉降呈平缓增加的趋势。在快速下降阶段,随着水合物分解半径进一步加大,水合物的分解速率增加,分解产生的气体和水开始快速渗透,周围地层在自重及井口荷载的作用下发生快速沉降,并且水合物的饱和度越大,离井眼的距离越近,沉降速度也越快,该阶段也是现场施工中最危险的一个阶段,极易发生井口倾斜、下沉或者直接损坏地表管汇。在稳定固结阶段,水合物大量分解结束,地层的温度、压力趋于稳定,孔隙水和气体被排出,土体固结沉降完成。

图 11 为不同水合物饱和度情况下模拟管柱周围负摩阻力分布与数值模拟计算结果的对比,可以看出,负摩阻力沿管柱轴向分布趋势基本一致,模拟试验结果与数值模拟结果的相对误差在 10% 以内,验证了计算模型和数值模拟结果的可靠性。

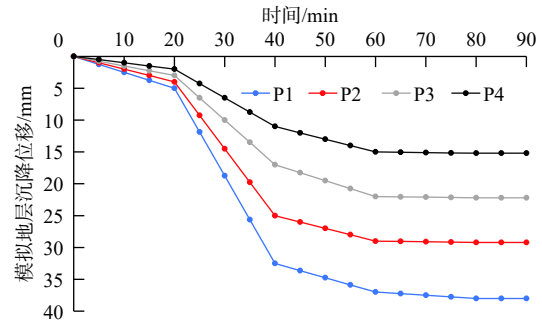


图 10 水合物分解过程中地层沉降模拟试验结果

Fig.10 Simulation test results of stratum settlement during hydrate decomposition

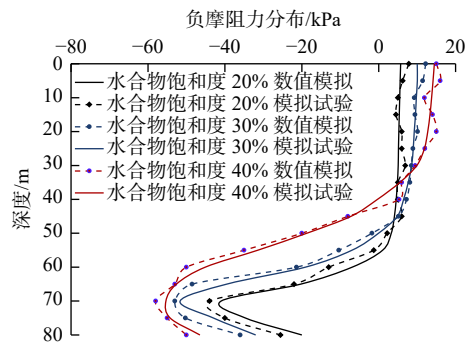


图 11 负摩阻力分布的模拟试验结果和数值计算结果

Fig.11 Simulation test results and numerical calculation results of negative friction resistance distribution

4 结论及认识

1)建立了水合物试采过程中的海底地层沉降及井口稳定性分析模型,认为水合物分解后产生的负摩阻力和下拉载荷是导致井口失稳的主要因素,水合物试采过程中的井口稳定性主要取决于试采井的井身结构、上覆海底地层的土质条件、水合物层的分解情况及时间效应。

2)水合物分解后管柱周围的负摩阻力主要分布在表层导管底部向上约 1/3 的区域,且水合物分解半径越大、饱和度越高,负摩阻力越大,中性点和极值向上移动,产生的下拉载荷也越大,根据下拉载荷及地层极限承载力可以反算水合物层试采过程中保持井口稳定所允许的最大水合物分解半径。

3)水合物试采过程中地层沉降主要分为平稳下降段、加速下降段和稳定固结段等 3 个阶段,其中加速下降段是现场作业中最危险的阶段,离井眼的距离越近、水合物饱和度越高,地层沉降速度也越快,可能直接造成井口下沉或者损坏地表管汇,因此适当增加套管的下入深度,提高地层极限承载

力,能够降低井口失稳的风险。

参考文献

References

- [1] 周守为,李清平,吕鑫,等.天然气水合物开发研究方向的思考与建议[J].中国海上油气,2019,31(4):1-8.
ZHOU Shouwei, LI Qingping, LYU Xin, et al. Thinking and suggestions on research direction of natural gas hydrate development[J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(4): 1-8.
- [2] 李文龙,高德利,杨进.海域含天然气水合物地层钻完井面临的挑战及展望[J].石油钻采工艺,2019,41(6):681-689.
LI Wenlong, GAO Deli, YANG Jin. Challenges and prospect of the drilling and completion technologies used for the natural gas hydrate reservoirs in sea areas[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(6): 681-689.
- [3] 周守为,陈伟,李清平,等.深水浅层非成岩天然气水合物固态流化试采技术研究及进展[J].中国海上油气,2017,29(4):1-8.
ZHOU Shouwei, CHEN Wei, LI Qingping, et al. Research on the solid fluidization well testing and production for shallow non-diagenetic natural gas hydrate in deep water area[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(4): 1-8.
- [4] WANG Bin, HUO Peng, LUO Tingting, et al. Analysis of the physical properties of hydrate sediments recovered from the pearl river mouth basin in the south china sea: preliminary investigation for gas hydrate exploitation[J]. Energies, 2017, 10(4): 1-16.
- [5] 宫智武,张亮,程海清,等.海底天然气水合物分解对海洋钻井安全的影响[J].石油钻探技术,2015,43(4):19-24.
GONG Zhiwu, ZHANG Liang, CHENG Haiqing, et al. The influence of subsea natural gas hydrate dissociation on the safety of offshore drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(4): 19-24.
- [6] 付亚荣.可燃冰研究现状及商业化开采瓶颈[J].石油钻采工艺,2018,40(1):68-80.
FU Yarong. Research status of combustible ice and the bottleneck of its commercial exploitation[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(1): 68-80.
- [7] 李子丰,韩杰.海底天然气水合物开采的环境安全性探讨[J].石油钻探技术,2019,47(3):127-132.
LI Zifeng, HAN Jie. Discussion of environmental safety factors in subsea natural gas hydrate exploitation[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 127-132.
- [8] 刘锋.南海北部陆坡天然气水合物分解引起的海底滑坡与环境风险评价[D].青岛:中国科学院海洋研究所,2010.
LIU Feng. A safety evaluation for submarine slope instability of the Northern South China Sea due to gas hydrate dissociation[D]. Qingdao: Institute of Oceanology of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [9] 施家杰,张巍,厉成阳,等.水合物分解诱发能源土滑坡的物质点法模拟[J].工程地质学报,2019,27(5):1164-1171.
SHI Jiajie, ZHANG Wei, LI Chengyang, et al. Simulation of energy soil landslide induced by hydrate dissociation using material point method[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 1164-1171.
- [10] NING Fulong, WU Nengyou, LI Shi, et al. Estimation of in-situ mechanical properties of gas hydrate-bearing sediments from well logging[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 542-547.
- [11] LI Qingchao, CHENG Yuanfang, ZHANG Huaiwen, et al. Simulating the effect of hydrate dissociation on wellhead stability during oil and gas development in deepwater[J]. Journal of Ocean University of China, 2018, 17: 35-45.
- [12] 朱敬宇,陈国明,刘康,等.深水水合物钻井导管下深设计与地层安全承载研究[J].石油钻采工艺,2019,41(6):690-696.
ZHU Jingyu, CHEN Guoming, LIU Kang, et al. The design on the setting depth of drilling conductor and the study on the safe bearing load of formation in deepwater hydrate exploitation[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(6): 690-696.
- [13] 沈海超,程远方,胡晓庆.天然气水合物藏降压开采近井储层稳定性数值模拟[J].石油钻探技术,2012,40(2):76-81.
SHEN Haichao, CHENG Yuanfang, HU Xiaoqing. Numerical simulation of near wellbore reservoir stability during gas hydrate production by depressurization[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(2): 76-81.
- [14] 刘昌岭,李彦龙,孙建业,等.天然气水合物试采:从实验模拟到场地实施[J].海洋地质与第四纪地质,2017,37(5):12-26.
LIU Changling, LI Yanlong, SUN Jianye, et al. Gas hydrate production test: from experimental simulation to field practice[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(5): 12-26.
- [15] 左汝强,李艺.日本南海海槽天然气水合物取样调查与成功试采[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(12):1-20.
ZUO Ruqiang, LI Yi. Japan's sampling study and successful production test for NGH in Nankai Trough[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(12): 1-20.
- [16] 张炜,邵明娟,田黔宁.日本海域天然气水合物开发技术进展[J].石油钻探技术,2017,45(5):98-102.
ZHANG Wei, SHAO Mingjuan, TIAN Qianing. Technical progress of a pilot project to produce natural gas hydrate in Japanese waters[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(5): 98-102.
- [17] 夏力农.负摩阻力桩的理论研究与工程应用[M].北京:地质出版社,2011.
XIA Linong. Theoretical research and engineering application of negative friction pile[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [18] ZHOU Bo, YANG Jin, LIU Zhengli, et al. Model and experimental study on jetting flow rate for installing surface conductor in deepwater[J]. Applied Ocean Research, 2016, 60: 155-163.
- [19] 周波,杨进,周建良,等.深水喷射扰动对表层导管承载力的影响规律[J].中国海上油气,2016,28(1):98-102.
ZHOU Bo, YANG Jin, ZHOU Jianliang, et al. Pattern of influence of disturbance caused by jetting on bearing capacity of surface conductor in deep water zones[J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(1): 98-102.
- [20] 徐春华,孙建波,徐学燕.多年冻土地区工程桩竖向承载力三维数值分析[J].施工技术,2011,40(7):50-53.
XU Chunhua, SUN Jianbo, XU Xueyan. 3D numerical analysis of vertical bearing capacity of engineering pile in permafrost regions[J]. Construction Technology, 2011, 40(7): 50-53.
- [21] 阮徐可.多孔介质中水合物开采影响因素的实验和数值模拟研究[D].大连:大连理工大学,2012.
RUAN Xuke. Experimental and numerical study of the factors on the gas production from hydrate in porous media[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.

[编辑 陈会年]