

郑靖甲, 徐秀刚, 孙燕峰, 等. 垂直多井动态开采水合物边坡稳定性分析[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(6): 75-84.

ZHENG Jingjia, XU Xiugang, SUN Yanfeng, et al. Stability of hydrate slope in vertical multi-well dynamic mining[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(6): 75-84.

垂直多井动态开采水合物边坡稳定性分析

郑靖甲¹, 徐秀刚^{1,2*}, 孙燕峰¹, 姜瑞景³, 薛明³

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100;

3 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司, 北京 102206)

摘要:天然气水合物是一种赋存在海底沉积物孔隙中的清洁能源, 含量巨大, 具有很好的开发前景和研究价值。垂直井作为开采水合物的一种主要方式, 在开采过程中, 会改变天然气水合物沉积层的环境条件, 随着开采井释放出大量的气体和水, 在地层中形成超压, 过高的孔隙压力会降低沉积物的胶结强度, 破坏沉积层的稳定性, 诱发海底滑坡。借助 Flac3D 软件建立高精度的海底斜坡模型, 基于有限差分法对垂直多井动态开采水合物过程中的边坡稳定性进行了数值模拟, 模拟了不同开采方案条件下采用多井开采, 水合物分解量、开采井压变化等不同影响因素产生的地层力学响应和位移变化, 基于安全系数法对水合物开采引起的边坡稳定性进行了初步分析。结果表明: 多井开采条件下, 随着水合物分解程度的不断增大, 海底斜坡稳定性逐渐降低, 当水合物分解程度达到 80% 时, 安全系数会降低到 1.0 以下, 边坡会失稳; 随着井压的不断降低, 海底斜坡稳定性同样逐渐降低, 当开采井压降低到 4 Mpa 以下时, 安全系数会降低到 1.05 以下, 边坡变为欠稳定状态, 存在发生海底滑坡的风险。

关键词:水合物动态开采; 安全系数; 水合物分解量; 开采井压; 边坡稳定性

中图分类号: P736; P744.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.059

0 引言

海底斜坡稳定性的研究可以最早追溯到 19 世纪末, MOORE^[1] 在印度洋东北部海沟的侧壁上发现了特大滑坡, 其中海底沉积物受到斜坡陡化的影响。PRIOR 和 COLEMAN^[2] 总结了造成海底边坡失稳的主要因素, 包括自身重力作用、卸荷作用、地震、火山爆发及天然气水合物的分解作用等。

收稿日期: 2022-03-02

资助项目: 直属院所基础科学研究和战略储备技术研究基金“水合物开发甲烷逸散环境影响与诱发典型地质灾害风险评价技术研究”(2019D-5008); 科技部国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目(2021YFE0108800); 海洋石油勘探国家工程实验室开放基金课题(CCL2020RCPS0419RQN)

作者简介: 郑靖甲(1999-), 男, 在读硕士, 主要从事海洋地球物理勘探方面的研究工作。E-mail: zhengjingjia@stu.ouc.edu.cn

* 通讯作者: 徐秀刚(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事多次波压制与成像、共聚焦成像、波动方程偏移成像等方面的研究工作。E-mail: xxg@ouc.edu.cn

MILNE^[3] 详细记录了 17 世纪初至 19 世纪后期由火山爆发、地震等自然灾害引起的 300 多起海底斜坡失稳事件。1969 年卡米尔飓风所诱发的密西西比河水下三角洲海底滑坡造成了巨大的经济损失, 引起了极大的反响, 美国地质调查局联合相关单位对这次海底滑坡进行了深入的研究, 这标志着对于海底斜坡稳定性的研究越来越深入, 范围越来越精确, 从笼统的大范围海洋区域转向了指定海域的典型海底滑坡。2007 年中国地质调查局在南海北部神狐海域成功钻获了高纯度的可燃冰实物样品, 通过在实验室对样品进行的大量精确实验获得了可靠的水合物力学参数, 如密度、弹性模量、内聚力、内摩擦角等, 为界内学者的研究工作提供了坚实的数据保障和参考, 是水合物开发研究历程上的历史性突破。

海底斜坡稳定性分析方法主要是极限平衡法, 极限平衡法通常与有限元法相结合来分析边坡稳定性, 将有限元法求得的边坡应力分布和抗剪强度运用在极限平衡法中^[4], 当边坡体内部应力分布和

抗剪强度发生改变时,边坡体内会存在一个达到极限平衡的滑动面,此时边坡处于临界失稳状态,处于极限平衡状态的边坡满足摩尔-库仑强度准则,再利用强度折减法就可以算出边坡的安全系数,基于安全系数评价边坡的稳定性^[5-6]。

刘锋^[7]以南海北部陆坡实际地震勘探资料和钻井取样资料为基础,建立了高精度海底斜坡模型,通过极限平衡法分析了海底斜坡的稳定性,通过有限差分法进行水合物分解引起海底滑坡的模拟实验,进行海底斜坡的灾害分析和不稳定性评价。杨晓芸^[8]在考虑水合物赋存地层的特性和水合物分解特点的基础上,建立了水合物分解的孔隙压力变化模型,根据极限平衡原理利用孔隙压力变化模型修正了无限边坡方程,并以 Storegga 滑坡、波弗特海滑坡典型滑坡为例进行了模拟分析。秦志亮^[9]对南海北部陆坡块体搬运沉积体系进行了研究,分析了其分布范围和形成原因,根据采样得到的二维地震资料,用数值模拟的方法建立了海底地质模型,模拟了不同分解情况下的安全因子,讨论了水深、坡角及水合物带厚度对海底斜坡稳定性的影响。张亮和栾锡武^[10]根据南海北部陆坡浅地层资料和单道地震记录,采用二维极限平衡法进行了静态情况下和拟静态情况下的边坡稳定性分析,分别研究了斜坡内在因素边坡角度等和外在触发机制地震对边坡稳定性系数的影响。马云^[11]对南海神狐海域典型海底滑坡的触发机制进行了数值模拟研究,认为随着水合物分解程度的不断增大,沉积层的强度会不断降低,在水合物层首先出现塑性区,降低了海底斜坡的稳定性。周念圻^[12]以南海神狐海域为研究区,以该区实际地层的物理、孔隙水、岩石学特征,矿物组成等进行分析,运用 TOUGH+HYDRATE 软件对整个分解过程进行数值模拟,明确了水合物开发过程甲烷逸散对周边海洋环境的影响。唐常锐等^[13]结合南海北部海底陆坡的实际地震资料,基于强度折减法讨论分析了初始水合物分解量、水合物分解总量等因素引起的水合物储层变化的力学响应,实现了水合物分解对海底边坡稳定性影响的分析。CHEN 等^[14]采用概率分析方法对海底滑坡因水合物开采而失效的概率进行评估。利用提出的最大超孔隙压力模型评价水合物开采引起的超孔隙压力,然后采用无限大边坡稳定性分析和 Monte Carlo 模拟评估考虑产生的超孔隙压力的边坡破坏概率。

从国内外研究现状可以看到,应用极限平衡法

对于坡角、水深、水合物层厚度等对边坡稳定性的影响研究较多,而关于动态开采水合物过程中,受到不同动态开采因素作用下的边坡稳定性研究相对较少。因此,本文在前人研究基础上,运用极限平衡法进行了多井开采条件下,水合物分解程度、开采井压等不同动态开采因素作用下的数值模拟,运用强度折减法计算出边坡在临界破坏状态下的力学响应和位移变化,并基于安全系数进行了边坡稳定性的评价,实现了动态开采条件下,对于海底地层稳定性的初步定量评价。

1 方法原理

1.1 海底斜坡模型建立

以南海神狐海域实际地质资料为约束,建立用于本文边坡稳定性分析的等效模型图 1,模型底部地层初始温度为 17°,水合物层初始温度 12.5°,上覆层初始温度 11°。模型水平长度 2 500 m,总厚度 1 200 m,网格平均步长 10 m,水合物层网格进行加密处理。设置上部水深 1 000 m,水合物层深 200 m,厚度 50 m,边坡角度 15°,井深 240 m。模型从上往下依次为黏土层、沉积层、水合物层赋存于沉积层中,砂岩层。限制边坡左右边界在 x 方向的位移和速度均为 0,限制边坡下边界在各个方向的位移和速度均为 0,构建一个只存在初始应力场但没有初始位移的模型。

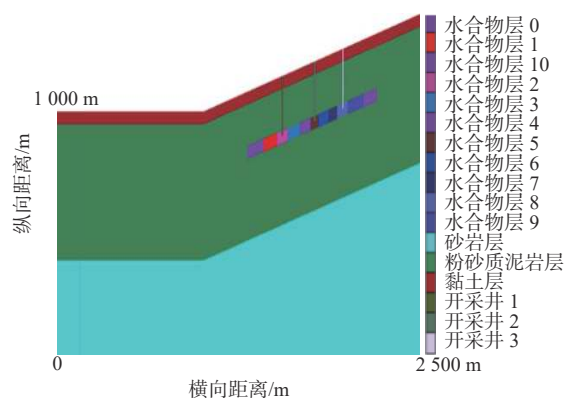


图 1 海底斜坡模型示意图

Fig.1 Schematic model of a submarine slope

1.2 卸荷因素

施加在海底滑坡面上的力主要有 3 个,上覆海水的静水压力,滑坡自身重力和水合物引起的孔隙压力,其中,静水压力取决于水深,因为初始海底处

于平衡状态, 所以静水压力不会对地层产生形变。自身重力取决于滑坡各个部分的密度和体积, 孔隙压力取决于水合物的分解程度。当水合物分解程度逐渐增大时, 孔隙压力会越来越大, 分担的上覆压力也变大, 因此有效应力会减小。

天然气水合物分解引起了体积变化及相应超孔隙的增加, 假设在标准压力和温度条件下, 1 m^3 的水合物分解产生 164.6 m^3 的甲烷和 0.87 m^3 水, 假定水相不可压缩, 假定气相的压缩遵循玻义耳定律, 在不排水的情况下, 有效应力的变化等于孔隙压力的变化^[15]。

$$\Delta\sigma' = -\Delta\mu = M \left[n(1-S) \left(0.13 - 164.6 \frac{T_2}{298.15} \frac{1}{P_2} \right) \right] \quad (1)$$

式中: T_2 为天然气水合物平衡时的温度, K;

P_2 为天然气水合物平衡时的压力, atm;

$\Delta\sigma'$ 为有效应力变化;

n 为孔隙度;

S 为饱和度;

$\Delta\mu$ 为孔隙压力变化。

M 为沉积物的压缩模量, 与压缩系数 α_v 有关。

$$M = \frac{1+e}{\alpha_v} \quad (2)$$

式中, e 是空隙率。由于水合物分解导致有效应力降低, 因此膨胀指数比压缩指数更加适用, 由膨胀指数 C_s 的定义得到:

$$C_s = \frac{\Delta e}{0.434 \ln \left(1 + \frac{\Delta\sigma'}{\sigma'} \right)} \quad (3)$$

因此得到压缩系数 α_v :

$$\alpha_v = \frac{\Delta e}{\Delta\sigma'} = \frac{0.434 C_s \ln \left(1 + \frac{\Delta\sigma'}{\sigma'} \right)}{\Delta\sigma'} \quad (4)$$

得到压缩模量 M :

$$M = \frac{(1+e)\Delta\sigma'}{0.434 C_s \ln \left(1 + \frac{\Delta\sigma'}{\sigma'} \right)} \quad (5)$$

为了求出 C_s , 引入压缩因子 C_c , 通过 Wroth 对给定的塑性指数 PI 和比重 G_s 建立的相关关系, 压缩指数 C_c 可近似为:

$$C_c = \frac{PI \times G_s}{200} \quad (6)$$

从而得到膨胀指数 C_s :

$$C_s = (0.002PI + 0.14) \left(\frac{PI \times G_s}{200} \right) \quad (7)$$

1.3 边坡失稳准则

目前通常用来评价边坡稳定性, 判断边坡是否达到临界破坏点的标准有 3 种: ①边坡是否形成了连续的塑性贯通区; ②查看检测点位移是否发生了突变, 一般是查看边坡顶点和坡脚等拐点是否发生了明显位移; ③使用求解过程中计算因不收敛而终止作为失稳判断依据^[16]。前两者判断标准缺乏定量标准, 会带来主观误差, 因此本文选择第 3 种方式, 以计算终止作为边坡失稳的评价标准, 基于计算终止时的安全系数来进行边坡稳定性评价。边坡稳定性安全系数从数值上讲是抗滑力和下滑力的比值, 当安全系数为 1 时, 边坡抗滑力等于下滑力, 此时的边坡处于临滑极限状态。采用这种方法进行安全风险判别, 可以更加精确的评估出工区面临的灾害风险。本文按照《滑坡防治工程勘察规范 (DZ/T 0218-2006)》, 建立滑坡稳定性安全系数与滑坡稳定状态对应关系如表 1 所示。

1.4 强度折减法原理

强度折减法将边坡岩土体的抗剪强度参数(内聚力、内摩擦角和抗拉强度)逐渐减小, 直至达到破坏状态^[17]。安全系数是临界破坏时岩土体的实际抗剪强度与折减后的抗剪强度之比, 适用于边坡发生破坏的模型。本文研究的海底斜坡采用摩尔-库仑强度准则, 影响边坡稳定性的强度参数是内聚力和內摩擦角, 边坡初始状态下的内聚力和內摩擦角除以折减系数 K , 通过增加系数 K 的值, 并将边坡失稳临界条件下的折减系数作为边坡稳定性的安全系数。采用的公式如下^[18]。

$$F_s = \frac{K}{K^{cr}} = K = \frac{C^0}{C^{cr}} = \frac{\tan \phi^0}{\tan \phi^{cr}} \quad (8)$$

式中: F_s 为原始边坡的安全系数;

C^0 为边坡初始内聚力;

ϕ^0 初始內摩擦角;

表 1 稳定性系数与滑坡稳定状态对应关系

Table 1 Corresponding relationship between stability coefficient and stable state of landslide

滑坡安全系数	$F_s < 1.00$	$1.00 \leq F_s < 1.05$	$1.05 \leq F_s < 1.15$	$F_s \geq 1.15$
滑坡稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

K 为折减系数;

c^{cr} 为边坡实际内聚力;

ϕ^{cr} 为边坡实际内摩擦角。

内聚力是在同种物质内部相邻各部分之间的相互吸引力,这种相互吸引力是同种物质分子之间存在分子力的表现。内摩擦角在力学上可以理解为块体在斜面上的临界自稳角,在这个角度内,块体是稳定的;大于这个角度,块体就会产生滑动。

$$c' = c/K$$

$$\phi' = \arctan(\tan \phi / K) \quad (9)$$

式中: c' 、 ϕ' 分别为维持平衡所需要的或土体实际发挥的内聚力和内摩擦角

2 数值模拟计算

2.1 水合物分解量对边坡稳定性的影响

首先研究水合物分解量对海底斜坡稳定性的影响。边坡模型水深为1000 m,水合物埋深220 m,边坡角度15°,为了模拟实际生产中的开采过程,设置3口垂直井开采,分别位于横向1535、1755和1945 m位置处,井距为200 m。假设水合物分解速率比开采速率快,因此分解产生的游离气不能被及时开采出去,会在储层形成超压状态,根据水合物未分解、分解初期、分解中期及分解后期等不同分解阶段,共设计了7种分解方案(表2),以此来分析开采过程中水合物不同分解量对于海底斜坡稳定性的影响。

表2 设计的水合物分解模拟方案

方案序号	详细描述
方案1	含水合物但水合物未分解;
方案2	2、5、8区分解15%,其他区域未分解;
方案3	2、5、8区分解30%,1、3、4、6、7、9区分解15%,0、10区域未分解;
方案4	2、5、8区分解50%,1、3、4、6、7、9区分解30%,0、10区域分解15%;
方案5	2、5、8区分解60%,1、3、4、6、7、9区分解50%,0、10区域分解30%;
方案6	2、5、8区分解80%,1、3、4、6、7、9区分解60%,0、10区域分解50%;
方案7	2、5、8区分解100%,1、3、4、6、7、9区分解80%,0、10区域分解60%;

根据上节中提到的孔隙压力平衡方程,首先计算出不同分解程度下的超孔压大小,如表3所示,用于下一阶段数值模拟过程中安全系数的计算。

通过三轴试验获得了水合物剪切强度参数如

表3 不同分解程度下的孔隙压力

分解程度/%	0	25	50	75	100
超孔隙压力/MPa	0	3.0	7.25	11.45	13.0

表4所示,同样,将这些参数用于下一阶段数值模拟过程中安全系数的计算。

表4 水合物剪切强度参数表

土层信息	抗剪强度		
	内聚力(c)/kPa	内摩擦角(ϕ)/(°)	
均质水合物沉积层	21	22	
水合物不同分解程度的参数	未分解	40	35
	分解10%	35	35
	分解15%	32	35
	分解20%	30	35
	分解30%	25	25
	分解35%	22	20
	分解40%	20	19
	分解55%	18	15
	分解60%	15	13
	分解70%	10	10
	分解80%	0	10
	分解100%	0	3

借助Flac3D软件,通过强度折减法实现了7种分解方案的数值模拟,得到了各个方案计算终止时的位移云图如图2所示。

分析图2的7种不同分解方案条件下3口垂直井开采位移云图可以发现,当水合物未分解或者分解程度不超过30%时,如图2a、2b和2c所示,斜坡处没有明显位移,边坡相对比较稳定。随着天然气水合物分解程度进一步增大,如图2d、2e所示,坡顶处首先发生位移,这表明当边坡内部力学参数和剪切强度发生变化时,引起的滑动最先从坡顶处开始,然后依次往下发生滑动。通过位移云图中各处位移大小可以发现,随着水合物分解程度的继续增大,如图2f、2g所示,最大位移出现在水合物层,水合物层处的地层变形大于上覆地层,表明在地层中,变形首先从水合物层开始从下而上发生。对比各个方案的位移云图发现,随着水合物分解程度的增大,滑坡区域的位移越大,失稳程度也越大。

数值模拟获得的各个方案计算终止时塑性区分布云图如图3。

分析图3的塑性区分布云图可以发现,当水合物未分解或者分解程度非常低的时候,塑性区域首

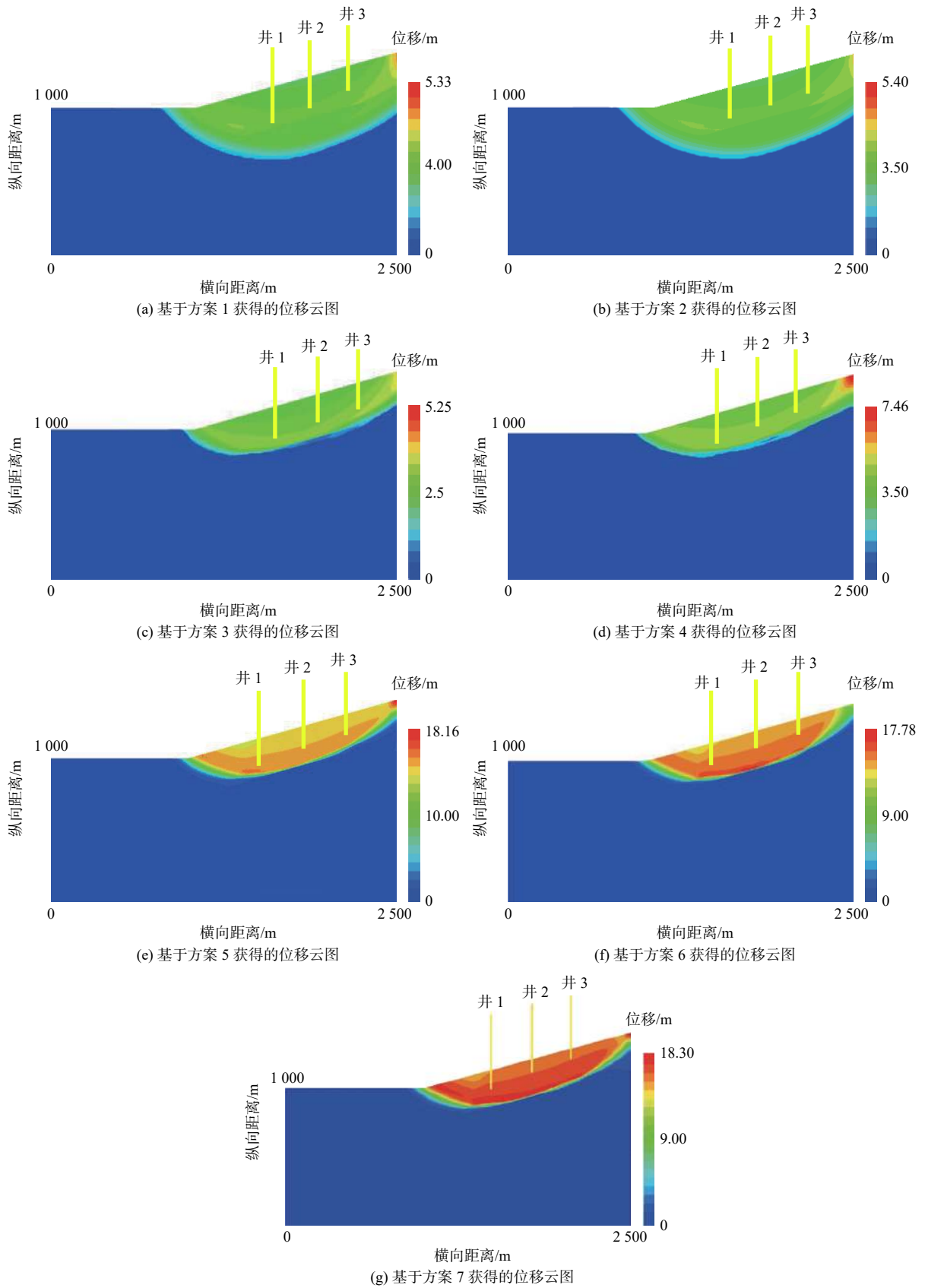


图 2 7 种不同方案 3 口垂直井开采获得的位移云图

Fig.2 Cloud images of the displacement obtained from three vertical wells in seven different schemes

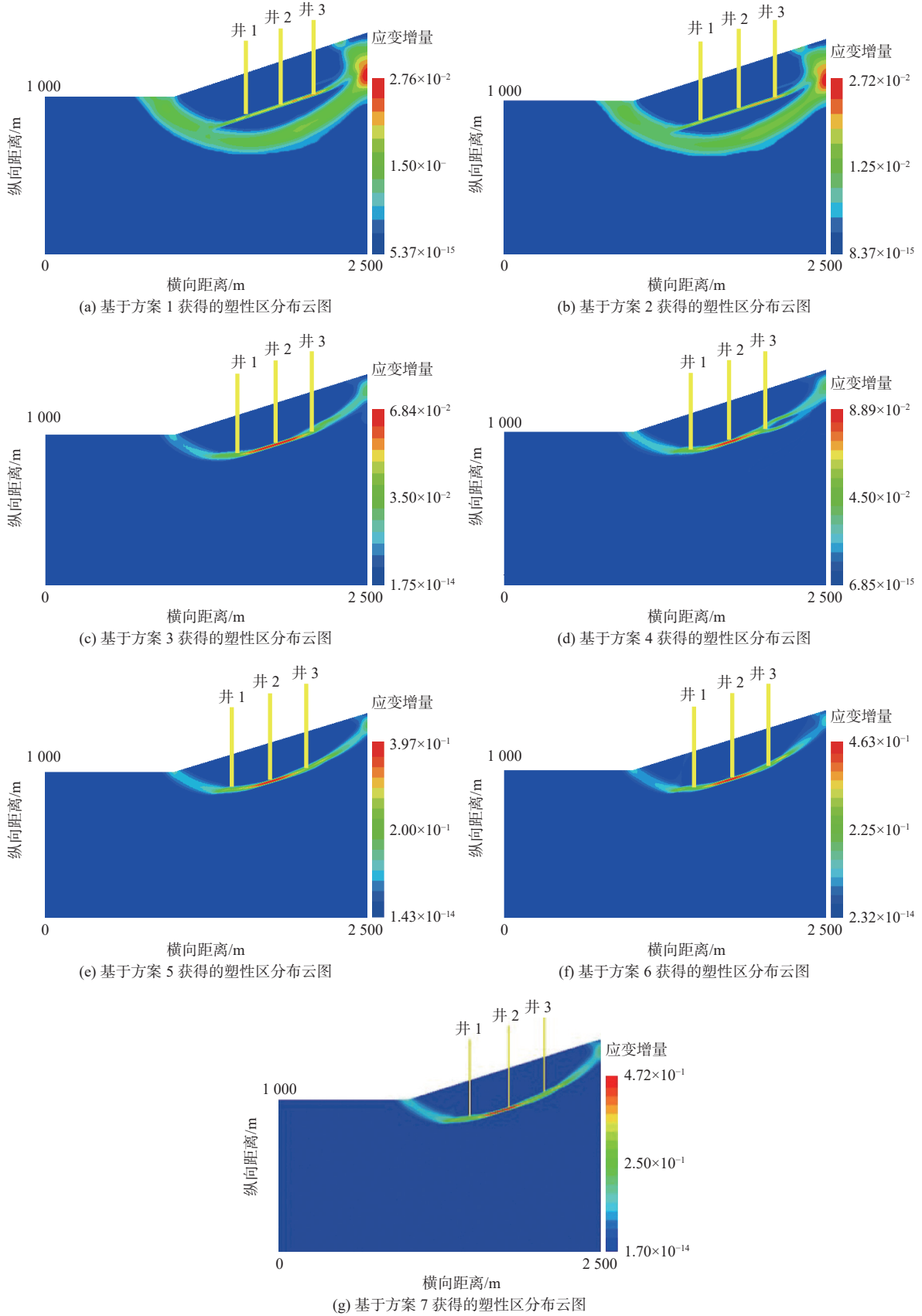


图 3 7 种不同方案 3 口垂直井开采获得的塑性区分布云图

Fig.3 Cloud images of the plastic zone distribution obtained from three vertical wells in seven different schemes

先出现在坡顶位置, 逐渐往下发展到坡脚位置, 形成塑性贯通区, 推断该塑性贯通区是由于滑坡的自重而产生的, 即使没有水合物的分解, 斜坡本身也有向下滑动的趋势, 会形成一个薄弱带。在斜坡本身的塑性贯通区之上, 可以看到一个规则的塑性区, 推断该塑性区就是水合物层的位置。当水合物分解程度达到 30% 及以上时, 如图 3c 所示, 由于水合物分解产生大量气体, 导致沉积物胶结程度降低, 抗剪强度减弱, 水合物沉积层首先发生变形, 塑性区首先出现在水合物层, 逐渐向两边发展到坡脚和坡顶, 形成一个连通的塑性贯通区。而斜坡原本的塑性贯通区会消失, 推断由于当水合物层的应变增量远远大于斜坡本身塑性区的应变增量时, 原来的薄弱带在图上就无法显示出来了。结合各个方案计算终止时得到的位移云图来分析, 水合物分解所形成的塑性贯通区就是滑动面所在的位置, 计算结果一致, 符合实际情况。对比各个方案下水合物处塑性区的应变增量数量级可以看出, 随着水合物分解程度的增加, 塑性区应变增量逐渐增大, 也就是说变形程度逐渐增大, 失稳程度也逐渐增大, 这也和上述结论相吻合, 随着水合物分解程度的增大, 滑动区域位移也越大, 2 种图件在反映边坡稳定性随水合物分解程度的变化趋势上是一致的, 即水合物分解程度越大, 边坡稳定性越低。

计算的不同分解方案下的安全系数曲线如图 4 所示。

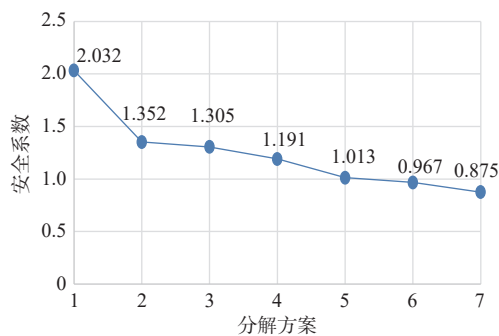


图 4 不同分解方案下的安全系数变化曲线

Fig.4 Variation curve of safety factor under different decomposition schemes

初始状态下, 水合物未分解, 边坡的安全系数是 2.032, 非常稳定, 随着水合物分解程度的不断增大, 水合物沉积层的强度逐渐降低, 抗剪能力减小, 边坡稳定性安全系数逐渐降低, 当水合物分解 60% 时, 安全系数降低到 1.05 以下, 边坡变为欠稳定状态, 当水合物分解 80% 时, 安全系数降低到

1.0 以下, 边坡变为不稳定状态。

2.2 开采井压对边坡稳定性的影响

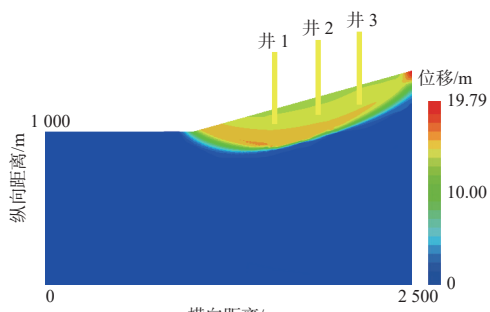
降压开采是目前水合物实际试采的一种方案。本文进一步探讨了开采井压对于动态开采过程中边坡稳定性的影响。仍采用同 2.1 一样的边坡模型和开采井进行开采, 开采井压分别设计了 2、4、6、8、10 Mpa 5 个方案, 讨论了不同方案下水合物开采到总量的 35% 时的海底边坡稳定性, 此时每口开采井下的水合物区域已完全开采, 各个方案下的位移云图如图 5 所示, 塑性区分布云图如图 6 所示。

分析图 5 的位移云图和图 6 的塑性区分布云图可以发现, 随着开采井压的逐渐增大, 滑动面的位移逐渐变小, 塑性区的应变增量也逐渐变小, 边坡越来越稳定, 推断是由于井口处压力的增大, 因此抑制了周围水合物的进一步分解, 陆坡的稳定性逐渐增强。但是随着开采井压的逐渐增大, 井口处的变形越来越明显, 开采井压为 2 Mpa(图 6a)、4 Mpa(图 6b)时, 水合物处应变增量最大的区域连在一起, 无法区分各个井口处的变形程度, 但是当开采井压增加到 6Mpa(图 6c)时, 每个井口处的应变增量逐渐明显, 当开采井压为 8 和 10 Mpa 时, 可以明显看到图 6d、6e 红色区域, 即应变增量最大的区域有 3 个, 刚好对应的是 3 个井口的位置, 推断由于井口处压力的增大, 使得井口的水合物沉积层受力变大, 和周围土体相比, 水合物层力学参数和剪切强度的变化程度都较大, 所以变形较明显。

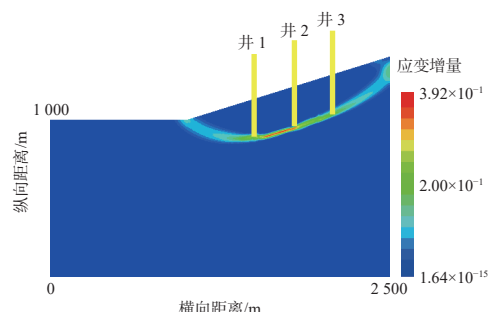
计算的不同开采井压方案下的安全系数曲线如图 7 所示。随着开采井压的逐渐降低, 边坡安全系数逐渐减小, 当开采井压降到 4 Mpa 以下时, 边坡安全系数会低于 1.05, 变为欠稳定状态, 存在着发生海底滑坡的风险, 在实际开采过程中, 由于水合物带的分解会造成沉积层的强度减弱, 此时如果开采井压过小, 则容易造成边坡失稳, 引起海底滑坡, 对钻井设施造成损害, 因此实际开采过程中开采井压建议不能低于 4 Mpa, 否则将会引起斜坡诱发潜在的海底滑坡。

3 结论

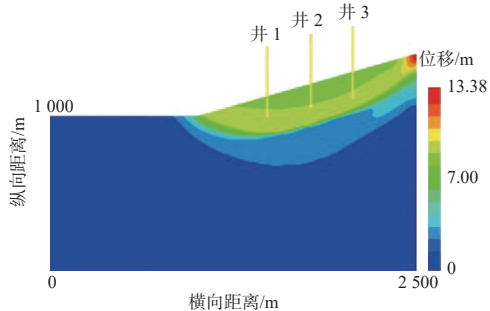
本文模拟了多井动态开采下, 水合物分解量、开采井压变化等影响因素作用下的地层力学响应和位移变化, 基于安全系数法对不同因素作用下的边坡稳定性进行了初步分析。取得如下认识:



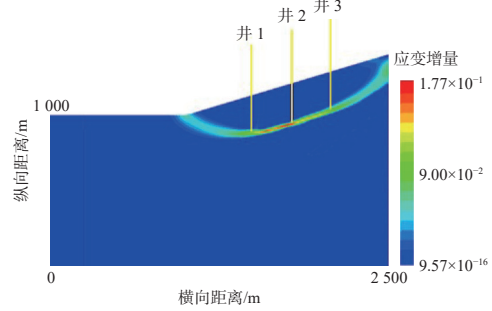
(a) 基于方案 1 获取的位移云图



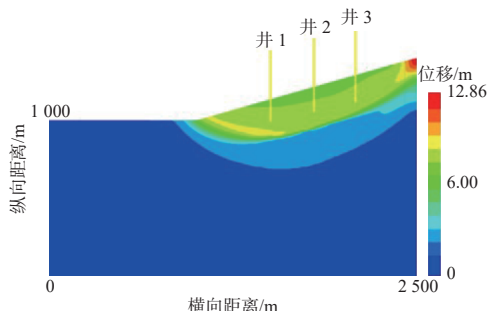
(a) 基于方案 1 获取的塑性区分布云图



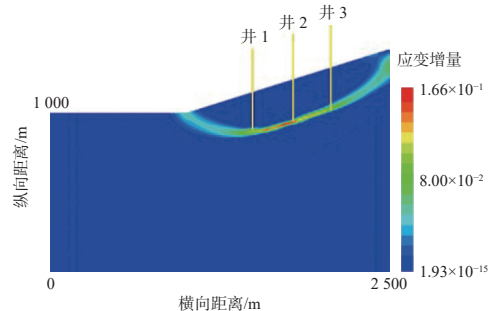
(b) 基于方案 2 获取的位移云图



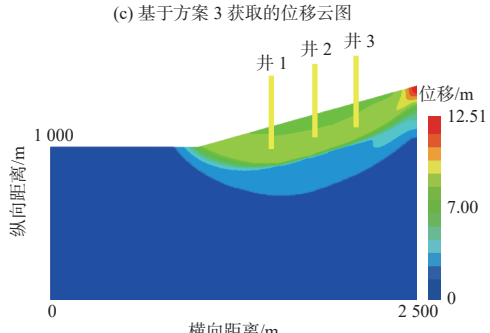
(b) 基于方案 2 获取的塑性区分布云图



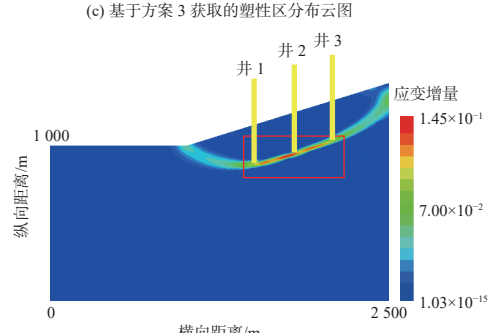
(c) 基于方案 3 获取的位移云图



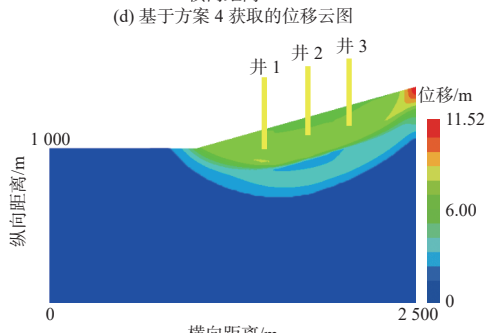
(c) 基于方案 3 获取的塑性区分布云图



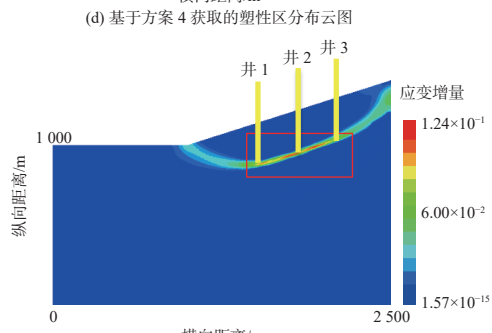
(d) 基于方案 4 获取的位移云图



(d) 基于方案 4 获取的塑性区分布云图



(e) 基于方案 5 获取的位移云图



(e) 基于方案 5 获取的塑性区分布云图

图 5 5 种不同井压方案 3 口垂直井动态采集获得的位移云图

图 6 5 种不同井压方案 3 口垂直井动态采集获得的塑性区分布云图

Fig.5 Cloud images of the displacement obtained from three vertical wells in five different well pressure schemes

Fig.6 Plastic zone distribution cloud images obtained from three vertical Wells with five different well pressure schemes

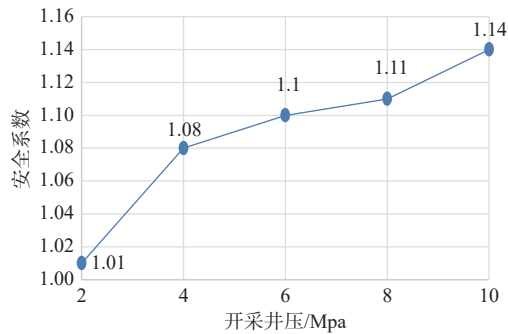


图 7 安全系数曲线

Fig.7 The safety factor curve

(1) 当海底斜坡沉积层中的水合物发生分解时, 首先在坡顶处出现位移, 逐渐向下发展形成滑动面, 最大位移出现在水合物层。随着水合物分解程度的不断增大, 滑动面的位移也越来越大, 海底斜坡稳定性安全系数逐渐降低, 当水合物分解程度达到 80% 及以上时, 安全系数会降低到 1 以下, 边坡将会失稳, 诱发海底滑坡。

(2) 不同井压开采方案可以看到, 高的开采井压对沉积层起一个压实作用, 可以有效地增强海底斜坡的稳定性, 随着开采井压的不断降低, 当降低到 4 Mpa 及以下的时候, 边坡稳定性安全系数逐渐降低, 边坡逐渐失稳。因此, 建议实际开采过程中所使用的开采井压不宜过低, 应该保持在不低于 4 Mpa。

本文对于多井垂直开采情况下的海底斜坡稳定性只进行了初步评价, 目前仅讨论了水合物分解量、开采井压等 2 种因素对于动态开采过程的影响, 未考虑不同井之间的相互作用以及其他因素的影响等。未来研究中, 将进一步考虑水平井开采以及其他因素对于开采过程的影响等, 并对致灾程度进行分析与讨论。

参考文献:

[1] MOORE D G. Submarine slides[J]. *Developments in Geotech-*

nical Engineering, 1978, 14(3): 563-604.

- [2] PRIOR D B, COLEMAN J M. Active slides and flows in under consolidated marine-sediments on the slopes of the Mississippi delta [C]//SAXOV S and NIEUWENHIUS J K. *Marine Slides and Other Mass Movements*. New York: Plenum Press, 1982. 21-49.
- [3] SAXOV S. Marine slides-Some introductory remarks[J]. *Marine Geotechnology*, 1990, 9(4): 110-114.
- [4] 胡光海. 东海陆坡海底滑坡识别及致滑因素影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [5] 史慧杰, 褚宏宪, 高小慧. 海底斜坡稳定性研究进展及分析[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(3): 42-45+59.
- [6] 朱超祁, 贾永刚, 刘晓磊, 等. 海底滑坡分类及成因机制研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(6): 153-163.
- [7] 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: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2010.
- [8] 杨晓云. 天然气水合物与海底滑坡研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010.
- [9] 秦志亮. 南海北部陆坡块体搬运沉积体系的沉积过程、分布及成因研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2012.
- [10] 张亮, 栾锡武. 南海北部陆坡稳定性定量分析[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(4): 1443-1453.
- [11] 马云. 南海北部陆坡区海底滑坡特征及触发机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [12] 周念圻. 海域天然气水合物降压开采甲烷逸散的模拟研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- [13] 唐常锐, 徐秀刚, 孙秉才, 等. 天然气水合物分解诱发海底滑坡影响因素分析及致灾风险评价[J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(5): 14-21.
- [14] CHEN Y M, ZHANG L L, LIAO C C, et al. A two-stage probabilistic approach for the risk assessment of submarine landslides induced by gas hydrate exploitation[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 99(1): 102158.
- [15] NIXON M F, GROZIC J L H. Submarine slope failure due to gas hydrate dissociation: a preliminary quantification[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(3): 314-325.
- [16] 赵华金, 杨邦成. 有限元强度折减法在海底斜坡稳定性分析中的研究现状[J]. *中国水运*, 2019, 19(5): 173-174.
- [17] 李志佳, 张顶立, 房倩, 等. 基于强度折减法的土质边坡稳定性影响因素分析[J]. *隧道建设*, 2013, 33(10): 854-859.
- [18] 费康, 彭劼. CAE分析大系: ABAQUS岩土工程实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2020.

Stability of hydrate slope in vertical multi-well dynamic mining

ZHENG Jingjia¹, XU Xiugang^{1,2*}, SUN Yanfeng¹, JIANG Ruijing³, XUE Ming³

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China;

3 China Petroleum Group Safety and Environmental Protection Technology Research Institute Co. Ltd., Beijing 102206, China)

Abstract: Natural gas hydrate is a clean energy occurring in the pores of seabed sediments. It has a large content and does not cause great harm to the environment, thus it has a good prospect and research value. Vertical wells as a main way of gas hydrates mining, the exploitation activities may alter the environmental conditions of the natural gas hydrate sediments, under which a large amount of gas and water would be released and result in overpressure in the strata, and the excessive pore pressure could reduce sediment consolidation strength, destroy the stability of the sediments, and induce submarine landslides. We established a high-precision underwater slope model with the aid of Flac3D software, and numerically simulated the slope stability in the process of vertical multi-well dynamic hydrate mining in finite difference method. The strata mechanical response and displacement changes caused by different influencing factors such as hydrate decomposition and well pressure change under different exploitation schemes were simulated. Using the safety factor method, the slope stability caused by hydrate mining was preliminarily analyzed. The results show that the stability of submarine slope decreases gradually with the increasing degree of hydrate decomposition under multi-well mining conditions. When the degree of hydrate decomposition reaches 80%, the safety factor will be lower than 1.0, and the slope will become unstable. With the decrease in well pressure, the stability of submarine slope also decreases gradually. When the well pressure drops below 4 Mpa, the safety factor will drop below 1.05, and the slope becomes less stable with a risk of submarine landslide.

Key words: hydrate dynamic mining; Safety factor; hydrate decomposition amount; mining well pressure; slope stability