

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230511003

海底沉积层内CO₂水合物长期储存的地质风险评估*

陈礼睿, 李孙伟

(清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: 新一代南海可燃冰开采、固碳和地质修复三联技术采用CO₂水合物置换开采法,将CO₂注入开采完后的天然气水合物储层,并在低温高压条件下以水合物形态进行长期地质封存。此方法既可实现能源开采,又能有效缓解温室效应,但目前对于海底沉积层内CO₂水合物长期储存的海底边坡稳定性问题研究较少。基于流固耦合方法和强度折减法,模拟得到海底边坡在不同位置、不同时期的应力、应变、位移变化情况,分析边坡在水合物全分解过程中的稳定性。依据南海可燃冰储藏区域的地形条件和土体参数,设计不同真实环境下的工况,探究各项参数的改变对边坡安全系数的影响。研究表明,将CO₂水合物分解度控制在安全范围内,即可施行长期海底碳封存。在水合物分解程度到一定程度后,斜坡的塑性应变值开始急剧增加,并逐渐形成了向上连通的塑性贯通区,此刻斜坡开始发生破坏。地形条件对斜坡稳定性的改变大于土体参数,影响程度排序为斜坡坡角>水合物层厚度>水合物层埋深,摩擦角>黏聚力>弹性模量,其中关键因素为坡角和摩擦角。

关键词: CO₂水合物; 海底地质碳封存; 边坡长期稳定性; 流固耦合; 地形条件; 土体参数

中图分类号: P736; X701 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1234-12

Geological Risk Assessment of Long-term Storage of Carbon Dioxide Hydrates in Seafloor Sedimentary Layers

CHEN Lirui, LI Sunwei

(Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The latest generation technique of natural gas hydrate extraction, carbon sequestration, and geological remediation in the South China Sea involves the CO₂ replacement mining method. This method injects CO₂ into the extracted natural gas hydrate reservoir, enabling long-term geological storage in the form of hydrates under low temperature and high pressure conditions. This method can not only realize energy extraction but also effectively mitigate the greenhouse emissions. However, there has been limited research on the stability of seafloor slopes for long-term storage of CO₂ hydrates in the sedimentary layers of the seafloor. Using the fluid-structure coupling method and strength reduction method as the basis, the stress, strain and displacement changes of the seafloor slope are simulat-

* 收稿日期:2023-05-11;修回日期:2023-08-07

基金项目:深圳市科创委基金(WDZC20200819174646001)资助

作者简介:陈礼睿(1999—),男,硕士研究生。主要从事海底水合物方式长期固碳的地质风险研究。

E-mail:clr21@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者:李孙伟(1982—),男,副教授,博导,博士。主要从事台风致灾性,海上风能开发,天然气水合物开发和二氧化碳长期固化地质风险研究。E-mail:li.sunwei@sz.tsinghua.edu.cn

ed at various locations and during different periods. The analysis focuses on the stability of the slope during the complete decomposition of hydrates. Based on the topographic conditions and soil parameters, and considering the area for natural gas hydrate storage in the South China Sea, the operational conditions in various real environments were designed. The study aimed to explore the impact of changing different parameters on the safety factor. The results indicate that long-term seafloor carbon capture and storage can be achieved by managing the degree of CO₂ hydrate decomposition within a safe range. Once the degree of hydrate decomposition reaches a certain level, plastic deformation begins to increase sharply, gradually forming a connected zone of plastic penetration extending upward, signaling the onset of slope failure. Changes in topographic conditions had a greater impact on slope stability compared to soil parameters, with the degree of influence ranked as follows: slope angle > hydrate layer thickness > hydrate layer burial depth, friction angle > cohesion > elastic modulus, among which the key factors were slope angle and friction angle. The results can provide a technical reference for the long-term geological storage of seabed sediments of CO₂ hydrates.

Keywords: CO₂ hydrate; seafloor geological carbon sequestration; long-term slope stability; fluid-structure coupling; topographic conditions; soil parameters

0 引言

工业革命以来的全球气候变暖与CO₂存在密切联系^[1-2],CO₂捕集利用与封存技术是缓解气候变暖的有效方法之一^[3],其中海洋地质封存具有广阔前景^[4]。我国南海海域天然气水合物储量丰富,可采用CO₂水合物置换开采法,将CO₂注入开采完后的天然气水合物储层,并在低温高压条件下以水合物形态进行长期地质封存^[5]。利用CO₂水合物稳定性高于天然气水合物的原理^[6],既可有效开采天然气水合物,又可进行大规模碳封存^[7]。在不同的水热梯度和地热梯度下,CO₂水合物在不同的埋深处稳定存在的温度压力条件也有所不同^[8],如图1所示。

CO₂水合物置换开采及长期封存是一个复杂的温度-渗流-力-化学多场耦合问题^[9],由于其重要的工程应用价值,引发了众多学者的研究。Y.Yao等^[10]从化学层面探究了CO₂水合物置换开采天然气水合物的合理性,M.Niu等^[11]结合海域水合物储层真实条件,验证了置换的动力学以及热力学可行性,Y.Teng等^[12]通过数值模拟方法验证了CO₂水合物在海底沉积物层封存的长期可行性(图2)。

天然气水合物的开发可能引起海底边坡失稳。对于三维边坡的稳定性分析,主要方法包括极限平衡法、强度折减法、数值模拟法^[13-14]。海底边坡属于饱和土,由于水的存在,使得边坡下滑力增加,抗滑力降低,从而安全系数降低^[15]。CO₂水合物埋藏在

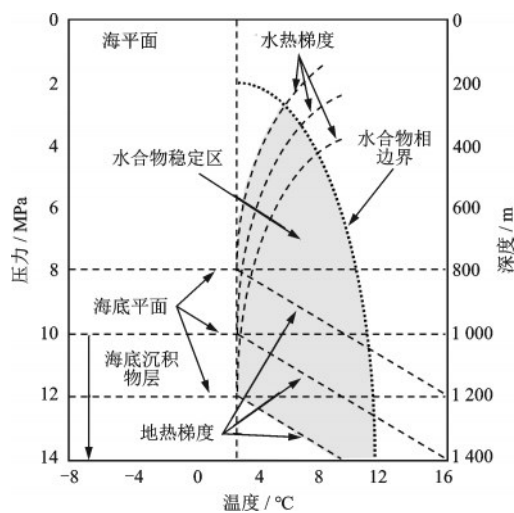


图1 CO₂水合物在不同埋深下的热力学状况

Fig.1 Thermodynamic properties of CO₂ hydrates at different burial depths

海底,受到海平面升降、地震、地热梯度变化、人类活动等干扰时,会发生温度和压力的变化,从而引发一定规模分解并造成海底滑坡和桩基础的破坏^[16-17],进而引发系列地质灾害^[18-19]。

目前天然气水合物开采分解过程中的海底边坡稳定性问题已有一些研究,B.Song等^[20-21]建立了模拟天然气水合物开采的多相耦合模型,实现了水合物分解过程中边坡失稳的数值模拟。Y.Song等^[22]预测了淤质沉积物中天然气水合物热分解后的力学响应。K.P.Lijith等^[23]从各项力学指标间的关系揭示了天然气水合物储层分解过程中的地质力学机理。但

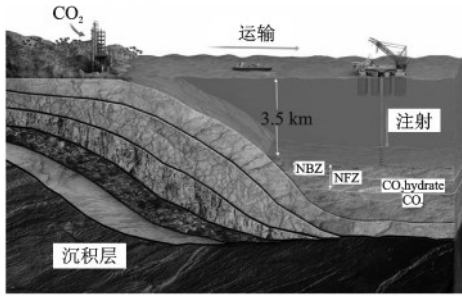


图2 深海沉积物层水合物形式封存CO₂示意图^[12]

Fig.2 Schematic diagram of CO₂ sequestration in the form of hydrates in deep-sea sediment layers^[12]

由于天然气水合物置换开采法现处于试验阶段,置换填充完成后CO₂水合物长期存储的海底边坡稳定性问题较少开展相关研究。已有研究多基于开采过程中的温度场、渗流场、化学场耦合分析,但以CO₂水合物长期存储为背景的地质力学分析相关研究还较少。此外,天然气水合物藏在南海区域分布面积较广,不同地块地形、土体参数存在变化,缺乏不同影响因素下的对比分析。为解决上述问题,本文基于强度折减法探究不同参数下的含天然气水合物土壤边坡安全系数,并采用渗流-应力耦合场模拟CO₂水合物长期储存下的海底边坡稳定性。

1 模拟理论与方法

1.1 强度折减法

强度折减法最早由O.C.Zienkiewicz等^[24]提出,基本原理为随着土体各项材料参数的不断折减,最终会使得边坡达到临界失稳状态,而临界状态下的折减系数即为边坡的安全系数。本文使用有限元软件ABAQUS模拟含CO₂水合物层土体的密度、弹性模量、泊松比、摩擦角、黏聚力折减,相应计算公式为:

$$\begin{cases} d_m = \frac{d}{F_r}, & E_m = \frac{E}{F_r}, & \nu_m = \frac{\nu}{F_r} \\ c_m = \frac{c}{F_r}, & \varphi_m = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{F_r}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $d_m, E_m, \nu_m, c_m, \varphi_m$ 分别为材料起始参数在除以强度折减系数 F_r 后的密度、弹性模量、泊松比、摩擦角、黏聚力,当边坡发生失稳破坏时对应的 F_r 即为计算得到的安全系数。

1.2 边坡破坏准则

现有研究中主要采用的边坡破坏准则有3种:

形成连续的塑性贯通区、坡顶处水平位移出现明显下降拐点、数值模拟程序运行过程中出现计算结果不收敛^[25-26]。从数值模拟角度看,在材料参数逐渐降低过程中,最先在边坡底部出现塑性区域,然后逐渐向上发展并形成连通的塑性贯通区,随后坡顶水平位移明显突变,最后出现运行中断的现象。根据现实情况,最先发生塑性区贯通的瞬间,斜坡还未发生破坏,而计算不收敛时斜坡已发生完全破坏,其对应安全系数偏大。因此本文选择边坡破坏准则的依据为坡顶位移明显变化的起始点,取其对应的安全系数作为计算结果最符合实际情况。

1.3 流固耦合渗流模型

海底斜坡由于水的存在,土体固体和流体之间产生复杂耦合,土体在流体荷载作用下产生位移或形变,固体的位移或形变又会影响流场的大小及分布,进而再次改变系统的平衡状态。本文在模型建立过程中引入各项材料的渗透系数、孔隙比、孔隙水压力、饱和度等参数,并采用流体渗透-应力耦合分析步,来模拟真实情境下的CO₂水合物分解过程中海底斜坡的受力和形变。流固耦合渗流模型的数学方程如下^[27]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{G}{(1-2\nu)} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial x} + G \nabla^2 W_x + \varphi \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\ \frac{G}{(1-2\nu)} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial y} + G \nabla^2 W_y + \varphi \frac{\partial p}{\partial y} &= 0 \\ \frac{G}{(1-2\nu)} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial z} + G \nabla^2 W_z + \varphi \frac{\partial p}{\partial z} + f_z &= 0 \\ -\nabla \cdot \left(\frac{k}{\mu} (\nabla p - \rho_f g \nabla D) \right) + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \\ \left(\frac{1-\varphi}{K_s} + \frac{\varphi}{K_f} \right) \frac{\partial p}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, K_s 为多孔介质骨架固体颗粒的体积弹性压缩模量; K_f 为孔隙流体的体积弹性压缩模量; W_i 为位移场分布; p 为渗流场分布; φ 为孔隙度; k 为渗透率; G 为剪切弹性模量; ε_v 为体应变。

以上提到的模型核心方程在ABAQUS中的实现方法如图3所示。

2 实际工程案例

2.1 模型对比验证

为验证实际地形条件下模型的可靠性,将不同

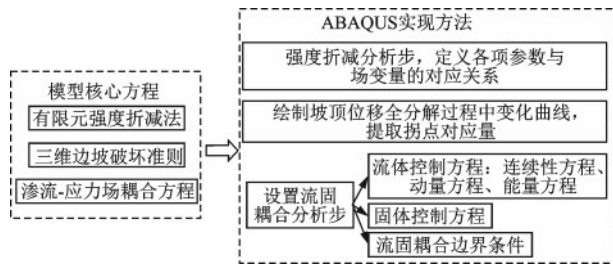


图3 模型核心方程实现流程
Fig.3 Flow chart of core model equation

计算方法下得到的边坡安全系数进行对比分析。在ABAQUS中建立如图4所示的简化均质土坡模型,底边长20 m,顶部宽8 m,右侧高度为13 m,土坡坡角 45° ,均质土体容重为 20 kN/m^3 ,摩擦角 20° ,黏聚力 12.38 kPa 。采用强度折减法,将坡顶位移明显变化的起始点作为边坡破坏准则,计算得到简化边坡模型的安全系数为0.990。

为对强度折减法得到的边坡安全系数进行验证,

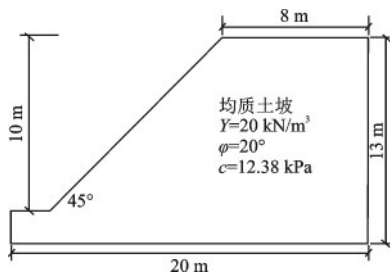


图4 简化均质土坡模型
Fig.4 Simplified homogeneous slope model diagram

表2 南海北部可燃冰储层地质参数

Table 2 Table of geological parameters of combustible ice reservoirs in the northern South China Sea

天然气水合物藏整体尺寸	上覆水深/m	水合物层厚度/m	水合物层埋深/m	斜坡坡角/($^\circ$)	文献来源
—	1 100~1 600	0~100	100~400	3	参文[28]
成藏延伸长度 1 500~2 500m	—	18~34	153~225	—	参文[29]
—	1 000~1 700	5~60	95~230	—	参文[30]
水平延伸长度 1 200~2 800m	1 000~1 300	8~55	120~180	4~10	参文[31]
—	700~900	10~50	160~220	—	参文[32]
—	900~1 500	10~80	100~200	—	参文[33]

2.3 模型建立

基于表2的真实地质数据,建立长2 600 m、宽2 000 m、坡底高600 m的含 CO_2 水合物层海底斜坡三维模型(图5),斜坡两侧平缓区域长度均为500 m,倾斜区域坡角为 5° ,水平距离为1 600 m, CO_2 水合物填充层与斜坡表面倾斜程度相同,厚度为30 m,中心与坡顶距离为150 m,四层不同土体在

证,将本文所采用的建模方法与各类边坡安全系数计算方法得到的结果进行对比,见表1。

结果表明,五种常用的边坡稳定性计算方法与ABAQUS强度折减法的误差在3%以内,Janbu法与基准值的误差也在5%以内,证明基于此方法数值模拟得到的数据结果是可靠的。

表1 不同计算方法下的边坡安全系数

Table 1 Slope safety factor under different calculation methods

方法	边坡安全系数	误差/%
ABAQUS强度折减法	0.990	0
Morgenstern-Price法	1.004	1.4
Spencer法	1.006	1.6
Bishop法	1.007	1.7
Lowe-Karafiath法	1.020	3.0
Janbu法	0.955	-3.5
Ordinary法	0.961	-2.9

2.2 工程实际地形

为对 CO_2 水合物置换开采后的海底地质真实情况进行数值模拟,本文基于南海北部天然气水合物成藏系统进行大量文献调研,将南海北部天然气水合物藏整体尺寸范围、水合物层厚度、埋深、上覆海水深度、海底斜坡坡角汇总于表2。

坡顶的厚度分别为50、440、100、150 m,斜坡右侧顶面处的海水深度为1 250 m。

现有研究表明, CO_2 置换开采天然气水合物的最大置换率为75%^[34],因此模型中水合物层参数取值为最大置换率下 CO_2 水合物沉积层和 CH_4 水合物沉积层的加权平均值。依据已有关于海底沉积物层天然气水合物分解及 CO_2 水合物力学性质的研究,选取海底斜坡含 CO_2 水合物层的密度、弹性模

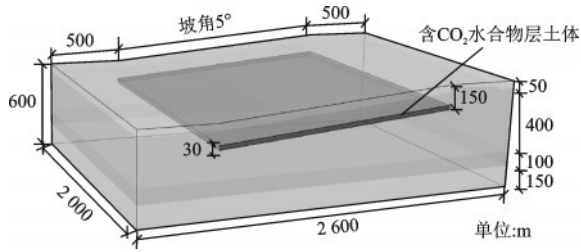


图5 含CO₂水合物层海底斜坡模型示意

Fig.5 Schematic diagram of the seafloor slope model of the CO₂-containing hydrate layer

量、泊松比、摩擦角、黏聚力见表3^[35-38]。含水合物的

沉积物土体各项参数随水合物分解而呈现近似指数衰减^[39],因此假设含CO₂水合物层土体的各项物理力学参数随分解程度变化见表4。

表4中y为参数值,x为分解程度(取值为0~1)。海底斜坡与陆地边坡的最大区别在于水的存在,因此需要在模型中准确进行一系列与水相关的设置,赋予材料渗透属性。增加soil流固耦合分析步,不考虑蠕变,引入饱和度、孔隙比、孔隙水压等场变量。初始孔隙比设为1,后续进行迭代计算,同时加上孔隙水压力,改变网格单元类型为孔隙流体/应力。

表3 海底斜坡含CO₂水合物层模型各土层物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of each soil layer in the CO₂-containing hydrate layer model of seabed slope

土层	密度/(10 ³ kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	渗透系数/(m·s ⁻¹)
上层土	1.82	240	0.31	10	280	10 ⁻⁷
含CO ₂ 水合物层	2.00	400	0.30	14	1 160	10 ⁻⁷
中上层土	1.85	270	0.32	12	320	10 ⁻⁷
中下层土	1.91	300	0.33	13	380	10 ⁻⁷
下层土	1.97	340	0.34	15	450	10 ⁻⁷

表4 含CO₂水合物层土体参数随分解程度变化

Table 4 Table of changes in soil parameters of CO₂-containing hydrate layer with decomposition degree

参数	起始值	最终值	随分解程度变化函数
密度	2 000 kg/m ³	1 200 kg/m ³	$y=0.8x^2-1.6x+2.0$
弹性模量	400 MPa	50 MPa	$y=350\,000x^2-700\,000x+400\,000$
泊松比	0.30	0.20	$y=0.1x^2-0.2x+0.3$
摩擦角	14°	3°	$y=11x^2-22x+14$
黏聚力	1 160 kPa	60 kPa	$y=1\,100x^2-2\,200x+1\,160$

在强度折减分析步,修改关键字Keywords可实现表4各项参数的动态变更和迭代计算,设置折减幅度为0.01,CO₂水合物每分解1%即进行一次运算,经过100次迭代计算,可基本描绘出斜坡各项计算指标随CO₂水合物分解的连续变化曲线。

2.4 模型结果分析

图6为CO₂水合物分解过程中的竖向位移云图,整个斜坡位移较大的部分位于CO₂水合物层上方至坡顶面,且位移值从坡底至坡角处逐渐增大,其余部分的土体位移值相对较小。其中坡顶附近与其余水合物上方土体位移差值明显,两侧及底部

表5展现了位移和塑性应变指标随CO₂水合物分解程度的变化情况,分解程度在0%~90%时,位移增幅持续变大,在分解到90%后,位移增幅反而出现降低,原因在于后期水合物强度降幅带来的影

响程度大于斜坡在大变形后的随强度降低而产生的位移累积。在分解程度到40%后,斜坡的最大位移和塑性应变值开始急剧增加,并逐渐形成了向上连通的塑性贯通区,说明此刻开始斜坡处于失稳状

土体在含水合物层土体强度降低后逐渐出现回弹,在分解初始阶段水合物底部土体回弹大于两侧,随着分解程度逐步加大,剩余部分回弹程度趋于一致。

图7为CO₂水合物分解过程中的塑性应变云图,当CO₂水合物分解程度较小时,塑性应变最大值位于斜坡模型右下方,随分解程度加大而逐渐被水合物层土体所取代,而靠近斜坡顶面土体的塑性应变在全分解过程中一直处于最小状态,说明含水合物土层在强度降低后被大量压缩,其上方土体发生整体性沉降。除了水合物层及上部区域,其余部分塑性应变相对较小,且和分解起始阶段的数值相近。

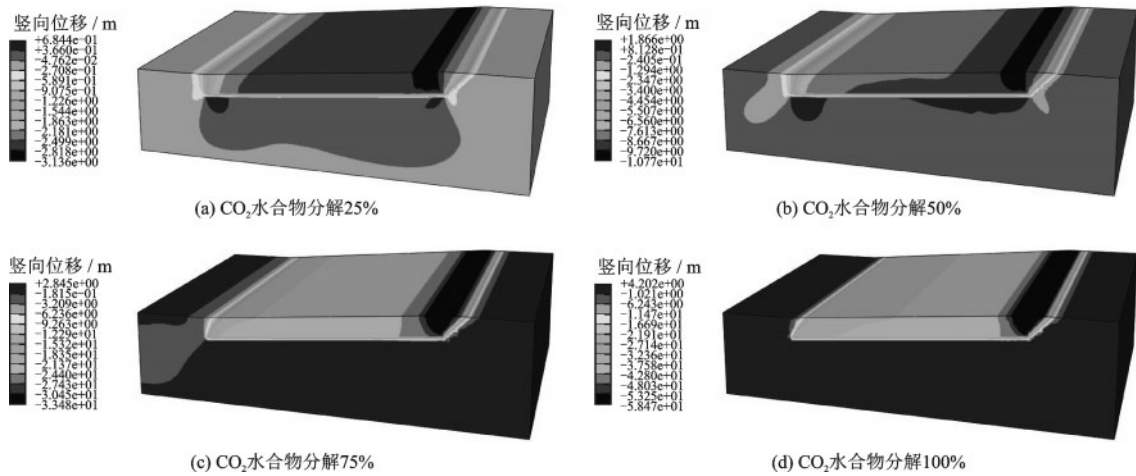


图6 不同CO₂水合物分解程度下竖向位移云图

Fig.6 Cloud of vertical displacement variables at different degrees of CO₂ hydrate decomposition

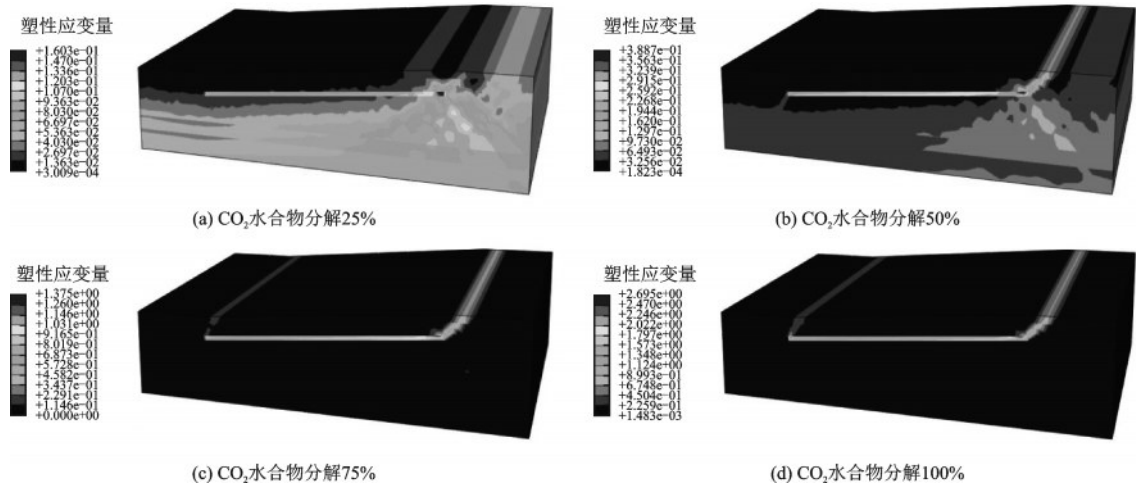


图7 不同CO₂水合物分解程度下塑性应变变量云图

Fig.7 Cloud diagram of plastic strain variables under different degrees of CO₂ hydrate decomposition

表5 不同CO₂水合物分解程度下特征参数

Table 5 Table of characteristic parameters under different degrees of decomposition of CO₂ hydrate

CO ₂ 水合物分解程度/%	最大竖向位移/m	最大水平位移/m	最大总位移/m	最大等效塑性应变	最大塑性应变量
10	1.014	0.561	1.112	10.121	0.116
20	2.314	1.375	2.578	10.203	0.142
30	4.115	2.641	4.689	10.281	0.185
40	6.740	4.702	7.908	11.184	0.258
50	10.773	8.177	13.112	18.512	0.389
60	17.072	14.921	21.690	31.172	0.634
70	27.112	26.352	35.523	57.934	1.074
80	40.331	41.922	53.841	98.971	1.717
90	52.963	56.810	71.363	142.210	2.392
100	58.471	63.314	79.002	162.121	2.695

态。实际影响斜坡稳定性的为含水合物层及其上方土体,随着分解程度逐渐增大,这部分土体的位移和应变逐步增加,而应力有所降低。当水合物分

解程度大于临界值后,土体位移和应变出现上升拐点,开始急剧攀升,此时土体结构遭到严重破坏,斜坡开始发生大规模滑坡。

3 不同地形条件下的影响因素分析

3.1 工况介绍

南海天然气水合物蕴藏区域分布较广,不同地段的地形条件存在差别。为探究不同蕴藏区域下的CO₂水合物在海底长期储存的地质风险,根据前文整理的真实勘探数据资料,设计表6所示的不同CO₂水合物层厚度、埋深以及斜坡坡角方案。结合水合物在不同温度、压力变化下产生的分解程度,探究海底斜坡安全系数与这些影响因素的关系,进而对以后的生产实践提供一定的借鉴。为进行影响因素分析,重新建立相应地形条件下的海底斜坡模型并计算得到相关安全系数值。

表6 不同地形影响因素下的工况方案
Table 6 Working conditions of different terrain influencing factors

参数名称	参数取值范围	取值间隔
水合物层厚度/m	10~60	5
水合物层埋深/m	100~200	10
斜坡坡角/(°)	4~13	1

3.2 影响因素结果分析

选取CO₂水合物从分解0%的起始点到完全分解至100%过程中的11个分解节点,根据表6的每种工况方案分别建立不同水合物层厚度、埋深,以及斜坡坡角的海底斜坡模型,采用坡顶处水平位移出现明显下降拐点的边坡破坏准则,计算得到海底斜坡安全系数与不同影响因素的关系。

图8为海底斜坡模型的安全系数与分解程度、厚度的关系图。由图可见,安全系数随CO₂水合物分解程度增加、水合物层厚度增加而降低,在工况设计的变化比例下,水合物分解程度对安全系数的影响程度大于水合物层厚度。随着水合物层厚度增加,安全系数受分解程度影响的敏感性降低。在水合物层厚度相同时,安全系数的降幅在前期较快,后面随着分解程度加深而降幅变慢。以安全系数为1的安全平面作为参照,可以截取到临界安全系数时对应的分解程度和水合物厚度曲线,从而判断出不同CO₂水合物厚度工况下水合物分解程度的安全极限值。

图9为斜坡安全系数与分解程度、埋深的关系

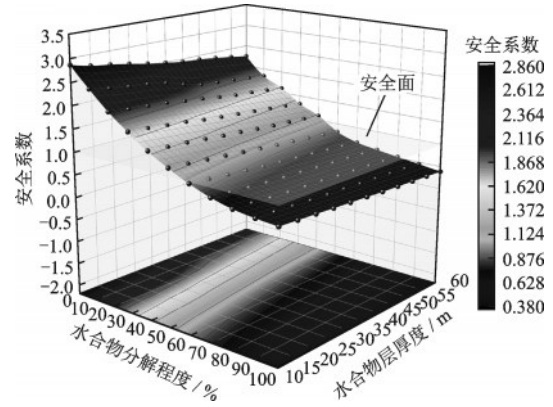


图8 海底斜坡安全系数与水合物分解程度、厚度的关系
Fig.8 Relationship between the safety factor of seabed slope and the degree and thickness of hydrate decomposition

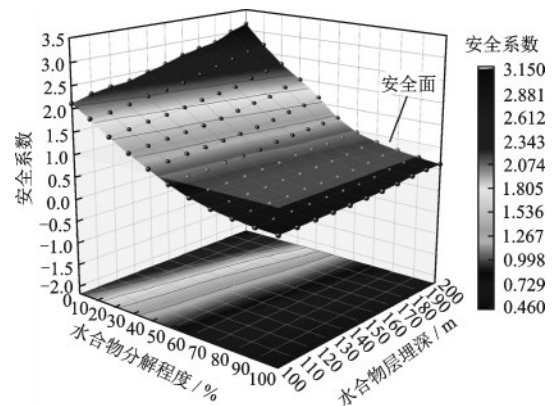


图9 海底斜坡安全系数与水合物分解程度、埋深的关系
Fig.9 Relationship between the safety factor of seabed slope and the degree of hydrate decomposition and burial depth

图。由图可见,安全系数随CO₂水合物分解程度增加、水合物层埋深变浅而降低,水合物分解程度对斜坡稳定性的影响更大。水合物层埋藏越深,分解程度始末节点安全系数的差值越大。以安全系数为1的安全平面截取变化的安全系数曲面,可以得到安全范围内的CO₂水合物埋深和水合物分解程度。

图10为斜坡安全系数与分解程度、坡角的关系图。安全系数随CO₂水合物分解程度增加、斜坡坡角增大而降低。在本文设计的工况变化比例下,虽然水合物分解程度对斜坡稳定性影响更大,但坡角的影响程度明显大于水合物层厚度和埋深。随着坡角变大,安全系数受分解程度变化影响的程度显著降低,说明坡度的变化需要引起实际工程作业中的重视。以安全系数为1的安全平面作为参照,发现极限安全状态下不同坡度对应的分解程度差异

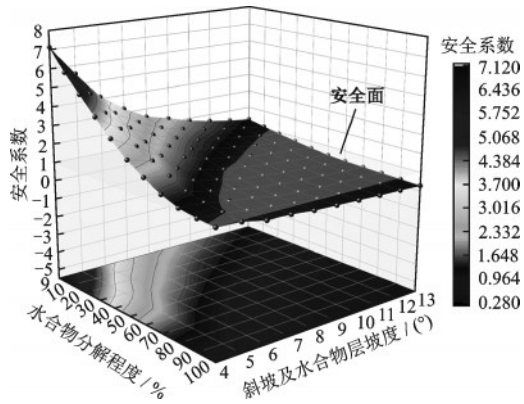


图10 海底斜坡安全系数与水合物分解程度、坡角的关系
Fig.10 Relationship diagram of seabed slope safety factor, hydrate decomposition degree, and slope angle

比较明显,坡度很小时分解程度到90%以上安全系数才会降低到1以下,斜坡较陡时分解10%左右就会发生边坡失稳。

对以上不同海底真实地质环境下的斜坡进行稳定性分析,发现大部分情况下的海底斜坡安全系数都远大于1,说明CO₂水合物置换开采法及在海底沉积物层以水合物形式进行长期地质碳封存是安全可靠的。在一定限度的温度、压力变化之下,将CO₂水合物分解度控制在安全范围内,即可施行长期海底碳封存。

表7对比分析了不同CO₂水合物分解程度下,安全系数每变化1个单位所对应的坡角、厚度、埋深变化值。分解前期的参数变化值明显小于后期,在分解程度大于20%后,厚度和埋深的变化均需要达到100 m以上才会使得海底边坡安全系数下降1个单位。虽然水合物层厚度的影响程度略大于埋深,但此时两者都对边坡稳定性的影响不大,而对应的坡角每变化2°即对斜坡稳定性产生较大影响,说明在实际情景下,要想填充完后的CO₂水合物长期稳定地储存在海底沉积物层,斜坡坡角是一个十分关

键的因素。

4 海底斜坡土体参数的影响探究

4.1 水合物层上方土体材料参数分析

由前文可知,控制海底斜坡稳定性的关键在于CO₂水合物层及其上方的土体,位于水合物层下方的土体受其分解后而产生的强度降低影响不大,因此本节进行水合物层及其上方土体参数的影响探究。针对水合物层上方土体,设计弹性模量取值12 000~25 000 kPa、黏聚力为6~20 kPa、摩擦角为7°~20°,分别计算不同情境下的海底斜坡安全系数。模型的地形条件采用CO₂水合物层厚度和埋深分别为30 m、150 m,斜坡坡角为8°。

不同工况下的海底斜坡安全系数计算结果如图11所示。整体而言,土体材料参数带来的安全系数变化小于海底地形条件。水合物层上方土体的弹性模量、黏聚力、摩擦角的改变对海底斜坡稳定性影响不大,在材料参数变化范围内,斜坡安全系数变化幅度较小。在这三种土体材料参数中,对斜坡安全系数影响程度最大的为摩擦角,其次为黏聚力,最后为弹性模量。材料参数对安全系数的影响力随水合物分解程度的加深而降低,在分解达到50%后,摩擦角的改变基本不会对海底斜坡稳定性产生影响。黏聚力和弹性模量仅在分解程度为0%时的改变会对安全系数产生影响,在后续分解过程中斜坡稳定性基本不随二者的大小而改变。

4.2 含水合物层土体材料参数分析

对于含CO₂水合物层土体的材料参数,取值范围设置为弹性模量14 000~28 000 kPa,黏聚力为8~20 kPa,摩擦角为8°~20°,将水合物初始分解状态下的安全系数绘制如图12所示。斜坡安

表7 不同地形条件影响下的综合分析

Table 7 Comprehensive analysis under the influence of different terrain conditions

分解程度 / %	厚度变化 50 m 对应的安全系数变化	埋深变化 100 m 对应的安全系数变化	坡角变化 9° 对应的安全系数变化	安全系数变化为 1 对应改变值		
				坡角 / (°)	厚度 / m	埋深 / m
0	0.614	1.031	5.844	1.540	81.433	96.993
10	0.607	0.822	4.933	1.824	82.372	121.655
20	0.436	0.713	4.198	2.144	114.679	140.253
30	0.416	0.655	3.456	2.604	120.192	152.672
40	0.384	0.524	2.763	3.257	130.208	190.840
50	0.362	0.331	2.104	4.278	138.122	302.115

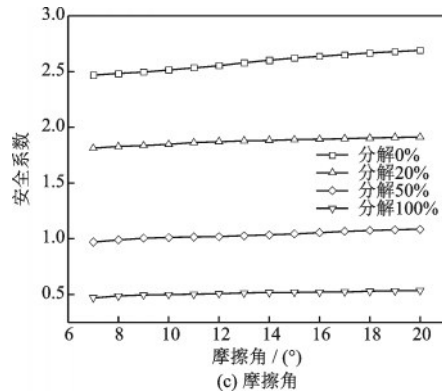
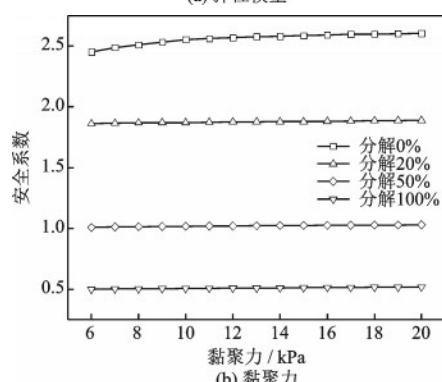
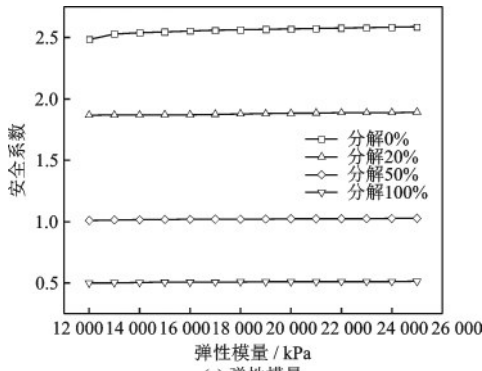


图 11 海底斜坡安全系数与不同水合物层上方土体材料参数的关系

Fig.11 Diagram of the relationship between the safety factor of the seabed slope and the parameters of soil materials above different hydrate layers

全系数随土体材料参数的增加而线性递增,弹性模量折线的增幅先快后慢。含水合物层土体材料参数变化对斜坡安全系数的影响程度大于水合物层上方土体的参数改变,其中土体摩擦角对斜坡稳定性改变极大,从8°变化到20°安全系数增加了近2个单位,因此实际工程中需要对摩擦角参数引起重视。

对比水合物层上方和含水合物层土体的材料参数改变对海底斜坡安全系数的影响,并将数据汇总于表8,发现地形条件的影响整体大于土体材料

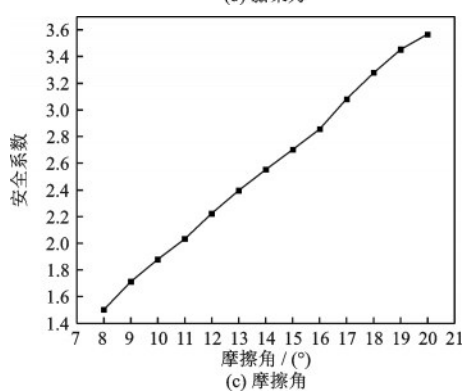
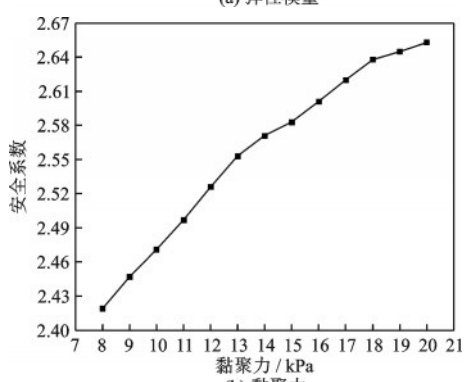
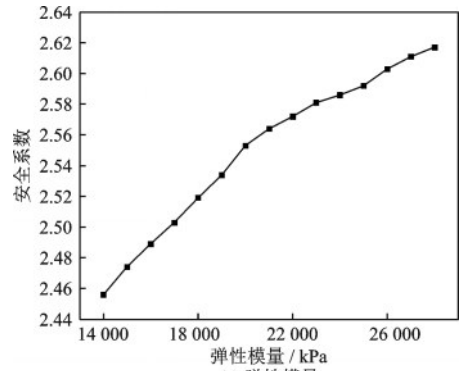


图 12 海底斜坡安全系数与不同含水合物层土体材料参数的关系

Fig.12 The relationship between the safety factor of the seabed slope and the soil material parameters of different hydrate layers

参数的变化,说明实际工程中应更加关注不同蕴藏区域地形改变所带来的安全隐患。

海底斜坡稳定性对于含水合物层土体参数改变的敏感性强于水合物层上方土体,因此对斜坡土体进行加固时,含水合物层土体的优先级应在上方土体之前。含水合物层土体的摩擦角参数对安全系数的影响程度远大于其他参数,说明在CO₂水合物海底长期储存的过程中,土体摩擦角提供的强度将起到维持斜坡稳定性的关键作用。

表8 不同土体材料参数影响下的综合分析

Table 8 Comprehensive analysis under the influence of different soil material parameters

材料参数 改变区域	分解 程度/%	安全系数变化0.1对应的参数改变值		
		弹性模/kPa	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
	0	12 745	9.211	5.778
水合物层 上方土体	20	54 167	51.852	13.131
	50	76 471	63.636	11.404
	100	100 000	66.667	19.403
含水合物 层土体	0	8 695	5.128	0.581

5 结 论

采用流固耦合方法探究CO₂水合物在海底沉积物层长期储存下的边坡稳定性,基于真实地质环境和材料参数建立海底斜坡模型,得到其全分解过程中的应力、应变、位移变化情况。同时设计不同的地形条件和土体参数工况,研究其对斜坡安全系数的影响程度,得到以下主要结论:

(1)CO₂水合物分解过程中受到破坏的区域为含水合物层及上方的土体,在分解过程中,斜坡逐渐出现向上连通的塑性贯通区,说明此刻开始斜坡处于失稳状态。

(2)不同地形条件对斜坡安全系数的综合影响排序为分解程度>斜坡坡角>水合物层厚度>水合物层埋深,且坡角的影响程度远大于后两者,因此在地形条件中应着重考虑。

(3)地形条件对斜坡稳定性的改变大于土体参数,两者都随水合物分解程度的加深而改变减小,土体参数影响程度大小为摩擦角>黏聚力>弹性模量,土体摩擦角起到维持斜坡稳定性的关键作用。

(4)本文考虑了海底环境中水对于斜坡稳定性产生的影响并进行渗流-应力耦合场的分析,但水合物分解过程中往往还伴随温度场和化学场的变化,后续如果采用多物理场进行模拟,结合CO₂水合物相态方程,将能更加真实地模拟长期储存过程的系列变化。

参考文献:

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate

change 2021: the physical science basis [R]. Geneva: IPCC, 2021.

[2] Meinshausen M, Lewis J, McGlade C, et al. Realization of Paris Agreement pledges may limit warming just below 2°C[J]. Nature, 2022, 604(7905): 304-309.

[3] 蔡博峰,李琦,张贤,等.中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)——中国CCUS路径研究[R].北京:生态环境部环境规划院,中国科学院武汉岩土力学研究所,中国21世纪议程管理中心,2021.

Cai B F, Li Q, Zhang X, et al. Carbon dioxide capture, utilization and storage (ccus) annual report in china (2021) -- ccus pathway research in China [R]. Beijing: Academy of Environmental Planning, Ministry of Ecology and Environment, Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, China Agenda 21 Management Center, 2021. (in Chinese)

[4] 焦念志,刘纪化,石拓,等.实施海洋负排放践行碳中和战略[J].中国科学:地球科学,2021,51(4):632-643.

Jiao N Z, Liu J H, Shi T, et al. Deploying ocean negative carbon emissions to implement the carbon neutrality strategy [J]. Scientia Sinica Terrae, 2021, 51 (4) : 632-643. (in Chinese)

[5] Wang Y, Lang X, Fan S, et al. Review on enhanced technology of natural gas hydrate recovery by carbon dioxide replacement[J]. Energy & Fuels, 2021, 35(5) : 3659-3674.

[6] Yezdimer E M, Cummings P T, Chialvo A A. Determination of the Gibbs free energy of gas replacement in SI clathrate hydrates by molecular simulation[J]. The journal of physical chemistry A, 2002, 106(34): 7982-7987.

[7] 李楠.注二氧化碳改造天然气水合物藏相关基础研究[D].北京:中国石油大学(北京),2018.

Li N. Fundamental study on the reformation of hydrate reservoirs by CO₂ injection[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2018. (in Chinese)

[8] 雷晓,邓建强,张早校.海底沉积物层CO₂封存中水合物研究进展[J].化工进展,2012,31(6):1338-1346.

Lei X, Deng J Q, Zhang Z X. Research advancement in hydrate formation during CO₂ sub-sea sediments sequestration [J]. Chemical Industry Engineering Progress, 2012,31(6):1338-1346. (in Chinese)

[9] 于子望.多相多组分THCM耦合过程机理研究及其应用[D].长春:吉林大学,2013.

Yu Z W. Research on multiphase-multicomponent THMC coupling mechanism and its application [D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)

[10] Yao Y, Yin Z, Niu M, et al. Evaluation of 1, 3-dioxolane in promoting CO₂ hydrate kinetics and its signifi-

- cance in hydrate-based CO₂ sequestration[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 451: 138799.
- [11] Niu M, Wu G, Yin Z, et al. Effectiveness of CO₂-N₂ injection for synergistic CH₄ recovery and CO₂ sequestration at marine gas hydrates condition[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 420: 129615.
- [12] Teng Y, Zhang D. Long-term viability of carbon sequestration in deep-sea sediments [J]. Science Advances, 2018, 4(7): eaao6588.
- [13] Duncan J M. Slope stability then and now [C]// Geo-Congress 2013. San Diego, California: Stability and Performance of Slopes and Embankments III, 2013: 2184-2203.
- [14] Chakraborty A, Goswami D. State of the art: Three dimensional (3D) slope-stability analysis[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 10(5): 493-498.
- [15] 杨文东. 降雨型滑坡特征及其稳定分析研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
Yang W D. Study on the characteristics and stability analysis of rainfall-induced landslides [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [16] 刘芳, 冯馨, 孙皓宇, 等. 水合物分解中深水基础抗拔性能模型试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(2): 359-365.
Liu F, Feng X, Sun H Y, et al. Physical model tests on uplift capacity of a deep-water foundation in hydrate-bearing sediment during hydrate dissociation[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(2): 359-365. (in Chinese)
- [17] 周丹, 邹德高, 徐斌, 等. 水合物分解对桩基础应力和变形影响的研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(6): 704-709.
Zhou D, Zou D G, Xu B, et al. Study on the influence of hydrate decomposition on stress and deformation of pile foundation[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(6): 704-709. (in Chinese)
- [18] 年廷凯, 沈月强, 郑德凤, 等. 海底滑坡链式灾害研究进展[J]. 工程地质学报, 2021, 29(6): 1657-1675.
Nian T K, Shen Y Q, Zheng D F, et al. Research advances on the chain disasters of submarine landslides [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(6): 1657-1675. (in Chinese)
- [19] 谭琳, 刘芳. 水合物开采中深海古滑坡体的再启滑机制初探[J]. 工程地质学报, 2021, 29(6): 1907-1915.
Tan L, Liu F. The reactivation mechanism of ancient ocean landslides during hydrate production: A preliminary study[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(6): 1907-1915. (in Chinese)
- [20] Song B, Cheng Y, Yan C, et al. Influences of hydrate decomposition on submarine landslide [J]. Landslides, 2019, 16(11): 2127-2150.
- [21] Song B, Cheng Y, Yan C, et al. Seafloor subsidence response and submarine slope stability evaluation in response to hydrate dissociation [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 65: 197-211.
- [22] Song Y, Luo T, Madhusudhan B N, et al. Strength behaviors of CH₄ hydrate-bearing silty sediments during thermal decomposition [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 72: 103031.
- [23] Lijith K P, Malagar B R C, Singh D N. A comprehensive review on the geomechanical properties of gas hydrate bearing sediments [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 104: 270-285.
- [24] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics [J]. Geotechnique, 1975, 25(4): 671-689.
- [25] 费康, 彭劫. ABAQUS 岩土工程实例详解 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017.
Fei K, Peng J. A detailed explanation of ABAQUS geotechnical engineering [M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2017. (in Chinese)
- [26] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381-3388.
Zheng Y R, Zhao S Y. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3381-3388. (in Chinese)
- [27] 李培超, 孔祥言, 卢德唐. 饱和多孔介质流固耦合渗流的数学模型 [J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2003, 18(4): 419-426.
Li P C, Kong X Y, Lu D T. Mathematical modeling of flow in saturated porous media on account of fluid-structure coupling effect [J]. Journal of Hydrodynamics (A), 2003, 18(4): 419-426. (in Chinese)
- [28] 梁金强, 王宏斌, 苏新, 等. 南海北部陆坡天然气水合物成藏条件及其控制因素 [J]. 天然气工业, 2014, 34(7): 128-135.
Liang J Q, Wang H B, Su X, et al. Natural gas hydrate formation conditions and the associated controlling factors in the northern slope of the South China Sea [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(7): 128-135. (in Chinese)
- [29] 吴能友, 张海敞, 杨胜雄, 等. 南海神狐海域天然气水合物成藏系统初探 [J]. 天然气工业, 2007, 27(9):

- 1-6, 125.
- Wu N Y, Zhang H Q, Yang S X, et al. Preliminary discussion on natural gas hydrate reservoir system of Shenhu area, northern slope of South China Sea[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(9):1-6, 125. (in Chinese)
- [30] 苏丕波, 梁金强, 张伟, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏系统[J]. 天然气工业, 2020, 40(8):77-89.
- Su P B, Liang J Q, Zhang W, et al. Natural gas hydrate accumulation system in the Shenhu sea area of the northern South China Sea[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(8): 77-89. (in Chinese)
- [31] 苏丕波, 梁金强, 张伟, 等. 神狐海域天然气水合物成藏系统数值模拟与试采矿体优选[J]. 地质通报, 2021, 40(增1):267-279.
- Su P B, Liang J Q, Zhang W, et al. Numerical simulation of gas hydrate migration-accumulation system and trial mining optimization of orebodies in the Shenhu area [J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40 (Sup1) : 267-279. (in Chinese)
- [32] 张光学, 梁金强, 陆敬安, 等. 南海东北部陆坡天然气水合物藏特征[J]. 天然气工业, 2014, 34(11):1-10.
- Zhang G X, Liang J Q, Lu J A, et al. Characteristics of natural gas hydrate reservoirs on the northeastern slope of the South China Sea[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(11):1-10. (in Chinese)
- [33] 杨胜雄, 梁金强, 陆敬安, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏特征及主控因素新认识[J]. 地学前缘, 2017, 24(4):1-14.
- Yang S X, Liang J Q, Lu J A, et al. New understandings on the characteristics and controlling factors of gas hydrate reservoirs in the Shenhu area on the northern slope of the South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 1-14. (in Chinese)
- [34] Wang T, Zhang L, Sun L, et al. Methane recovery and carbon dioxide storage from gas hydrates in fine marine sediments by using CH₄/CO₂ replacement[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 425: 131562.
- [35] Hyodo M, Nakata Y, Yoshimoto N, et al. Basic research on the mechanical behavior of methane hydrate-sediments mixture [J]. Soils and foundations, 2005, 45(1): 75-85.
- [36] 张旭辉, 王淑云, 李清平, 等. 天然气水合物沉积物力学性质的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10):3069-3074.
- Zhang X H, Wang S Y, Li Q P, et al. Experimental study of mechanical properties of gas hydrate deposits [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (10) : 3069-3074. (in Chinese)
- [37] Ghiassian H, Grozic J L H. Strength behavior of methane hydrate bearing sand in undrained triaxial testing [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 43: 310-319.
- [38] 朱超祁, 周蕾, 张红, 等. 南海北陆架坡表面沉积物的物理力学性质初探[J]. 工程地质学报, 2017, 25(6) : 1566-1573.
- Zhu C Q, Zhou L, Zhang H, et al. Preliminary study of physical and mechanical properties of surface sediment in Northern South China sea[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(6):1566-1573. (in Chinese)
- [39] 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.
- Liu F. A safety evaluation for submarine slope instability of the northern south China sea due to gas hydrate dissociation [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)

(本文编辑:赵霞)