

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250430046

# 孔隙压力与地震作用对富含水合物海底边坡 稳定性影响研究\*

徐继涛<sup>1</sup>, 朱海涛<sup>1</sup>, 蒋明镜<sup>2</sup>, 李文昊<sup>1</sup>, 张珮瑶<sup>1</sup>, 李玉莹<sup>1</sup>

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350; 2. 苏州科技大学土木工程学院,  
江苏 苏州 215011)

**摘要:** 赋存于深海浅层沉积物中的天然气水合物作为新型清洁能源载体,在相态转移过程中产生部分水和大量天然气,这一相变过程不仅弱化了水合物与土颗粒之间的胶结能力,同时产生了超孔隙压力。相较于Nixon-Grozic修正模型,通过引入气体压缩性参数和非理想气体状态方程修正后的本构模型,其超孔隙压力计算结果更符合工程实际。地震的附加作用力通过改变土体结构强度会显著影响天然气水合物赋存边坡的安全性。基于无限斜坡随机场理论,系统分析了孔隙压力变化与竖向地震作用对边坡失稳概率的正向促进效应与负向抑制效应。以中国南海第二次水合物试采矿藏为例,分别在不考虑超孔隙压力、基于Nixon-Grozic修正模型和考虑非理想气体修正模型条件下计算海底边坡的安全系数。结果表明:随着储层中水合物分解程度的加剧,在不考虑超孔隙压力的情况下,海底边坡安全系数呈现逐渐下降趋势;而采用Nixon-Grozic修正模型及其非理想气体修正模型进行模拟时,海底边坡安全系数均表现出先降后升的非单调变化特征,且前者计算结果始终低于后者。值得注意的是,当考虑水合物储层力学参数的空间变异性时,通过概率分析方法计算得出的边坡失效概率显著增大,这表明水合物分解过程会严重削弱边坡可靠性。

**关键词:** 水合物分解; 海底边坡; 稳定性; 可靠性

**中图分类号:** TE375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)06-1371-12

## Study on Influence of Pore Pressure and Seismic Action on Stability of Hydrate-rich Submarine Slopes

XU Jitao<sup>1</sup>, ZHU Haitao<sup>1</sup>, JIANG Mingjing<sup>2</sup>, LI Wenhao<sup>1</sup>, ZHANG Peiyao<sup>1</sup>, LI Yuying<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

**Abstract:** Natural gas hydrates (NGH) existing in shallow deep-sea sediments are regarded as a novel clean energy carrier. During phase transition, NGH generates a small amount of water and a large volume of natural gas, which not only weakens the cementation between hydrates and soil particles but also generates excess pore pressure. Compared with the Nixon-Grozic modified model, a constitutive model further revised by incorporating gas compressibility parameters and a non-ideal gas equation of state produces excess pore pressure predictions that better reflect engineering practice. Additional seismic forces significantly affected the safety of hydrate-bearing slopes by altering the structural strength

\* 收稿日期:2025-04-30;修回日期:2025-10-28

基金项目:国家自然科学基金项目(52378524)、天津市应用基础研究项目(22JCYBJC00640)资助

作者简介:朱海涛(1979—),男,教授,博士。主要从事深海水合物开采安全研究。E-mail:htzhu@tju.edu.cn

of the soil. Based on the infinite slope stochastic field theory, the positive promoting and negative restraining effects of pore pressure variations and vertical seismic action on slope instability probability were systematically analyzed. Using the second hydrate trial-production reservoir in the South China Sea as a case study, the safety factors of the submarine slope were calculated under three conditions: ignoring excess pore pressure, applying the Nixon-Grozic modified model, and implementing the non-ideal gas modified model. The results indicated that as hydrate dissociation in the reservoir intensified, the slope safety factor declined progressively when excess pore pressure was not considered. When the Nixon-Grozic modified model and its non-ideal gas modified model were used for simulation, the slope safety factor demonstrated a non-monotonic trend of initially decreasing and then increasing, with predictions from the Nixon-Grozic modified model consistently lower than those from the non-ideal gas modified model. Notably, when the spatial variability of the reservoir's mechanical parameters was considered, probabilistic analysis revealed a significant increase in slope failure probabilities, indicating that hydrate dissociation severely compromised slope reliability.

**Keywords:** hydrate dissociation; submarine slope; stability; reliability

## 0 引言

天然气水合物(以下简称水合物)是烃类等气体在低温和高压环境下形成的具有晶体结构的固态合成物<sup>[1]</sup>,广泛分布于各海洋大陆架边缘<sup>[2]</sup>和陆地永久冻土带<sup>[3]</sup>中。目前在中国南海的中建南盆地<sup>[4]</sup>、琼东南盆地<sup>[5]</sup>、珠江口盆地<sup>[6]</sup>和台西南盆地<sup>[7]</sup>以及青藏高原祁连山山脉<sup>[8]</sup>中均有发现。作为未来能源的代表,海洋水合物因其分布广、储量大、能量密度高和清洁环保等显著优势,已成为各国关注的焦点<sup>[9]</sup>。水合物对外部温压条件的变化极为敏感,地质构造活动、海平面下降、地层快速沉积以及海底水温上升等皆会引起稳定区域内的水合物分解<sup>[10]</sup>。水合物分解会导致储层中水合物胶结能力下降,从而显著降低地层的承载力<sup>[11]</sup>。低渗透性细颗粒储层中持续累积的超静水孔隙压力<sup>[10]</sup>,将显著降低储层有效应力与抗剪强度。这些效应加剧和扩大进而诱发井壁失稳、平台倾覆等基础设施损毁,严重威胁作业人员安全<sup>[12]</sup>。在极端情况下,可能触发海底边坡滑塌地质灾害,甚至引发海啸。水合物分解后形成的甲烷等气体逃离储层后会恶化海水环境,释放到空气中会引发比二氧化碳更严重的温室效应<sup>[13]</sup>。

海底滑坡带与含水合物储层在时间和空间上动态相关<sup>[14]</sup>。我国首次南海天然气水合物钻探调查所获样本证实,自然环境的变化会驱动水合物分解<sup>[15]</sup>。已发生的多起海底滑坡事件经分析确认与储层中水合物分解有关,例如:挪威的 Storegga 滑坡<sup>[16]</sup>,美国的 Cape Fear 滑坡<sup>[17]</sup>、Blake Ridge 崩

塌<sup>[18]</sup>,墨西哥湾滑坡<sup>[19]</sup>以及中国南海珠江口盆地的白云凹陷滑坡<sup>[20]</sup>和台西南盆地的 Fangliao 滑坡<sup>[21]</sup>等,亟待展开针对水合物自然分解导致的储层力学性能劣化及超静水孔隙压特征相关研究工作。目前国内外学者对于水合物分解会降低边坡稳定性甚至引发海底滑坡达成了共识,构建了 CFD-DEM 模型<sup>[22]</sup>和温度-压力-化学耦合模型<sup>[23]</sup>分析含水合物边坡及其上覆土层的稳定性。

现有技术手段尚无法完整表征所有边坡失稳模式,仅依靠安全系数单一指标评估海底边坡风险存在显著局限性。由于储层力学参数固有的空间变异性,相同的安全系数可能会有不同的失效概率。相较于以安全系数为主导的确定性分析方法,基于储层参数随机性的不确定性分析能更准确表征边坡真实状态。当前可靠性分析技术虽在陆地岩质边坡与土质边坡安全评价中应用普遍,但对海底边坡特别是赋存分解水合物的特殊地质体的研究仍显不足,现有成果多集中于表层土体风险量化评估。例如:B.Zhu等<sup>[24]</sup>结合基于高斯过程回归的响应面法分析中国南海北部某典型大陆坡的安全可靠性;R.Rafael-Ochoa等<sup>[25]</sup>结合一阶可靠度、蒙特卡洛和贝叶斯更新方法分析了地质条件下边坡的可靠性。然而传统可靠性评估方法只是将海洋土层力学参数视为随机变量,未能考虑土体结构的变异性特征。因此,本文基于水合物分解诱发含水合物边坡抗剪强度衰减及有效应力下降的力学机制,结合地震荷载耦合作用,分析海底边坡稳定性,并将内聚力与内摩擦角参数作为空间随机变量,采用蒙特卡洛方法分析水合物在不同分解程度

下海底边坡可靠性的演化规律。

## 1 水合物分解对矿藏储层孔压和力学特征的影响

### 1.1 海洋水合物赋存条件

南海水合物矿藏储层以粉土及黏质粉土为主,矿物组分呈现显著空间分异特征,其中黏土矿物组合以伊利石为主<sup>[26-27]</sup>。黏土矿物亲水性特征与细粒沉积物中广泛发育的亚微米级孔隙结构耦合作用,导致相同盐度条件下基于水基体系与基于沉积层体积的水合物相边界方程存在显著偏差<sup>[28]</sup>。基于中国南海神狐海域海底温度、地温梯度、静水压力及水合物稳定区基底深度等原位环境参数,选择由 G.R.Dickens 等<sup>[29]</sup>提出的基于天然海水体系实验数据拟合的水合物稳定相边界公式。相同压力下,海水水合物平衡温度比纯水水合物的平衡温度低大约 1.1 °C<sup>[29]</sup>。后来,Z.F.Wan 等<sup>[30]</sup>和 Y.M.Wang 等<sup>[31]</sup>在计算南海水合物厚度时也使用了此公式:

$$\frac{1}{T_e} = 3.79 \times 10^{-3} - 2.83 \times 10^{-4} \lg(1000P_e) \quad (1)$$

尽管部分研究指出土体颗粒间孔隙毛细力阻碍了水合物的形成,但学界普遍将水合物赋存深度静水压力视为水合物形成与生长的外部压力:

$$u_h = u_0 + \rho_w g(Z + H) \times 10^{-3} \quad (2)$$

相应的总应力、有效应力为:

$$p = u_0 + (\rho_w gZ + \rho_{\text{sat}} gH) \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$p' = p - u_h \quad (4)$$

储层的温度是影响储层中水合物稳定的主要因素,常用的储层温度计算公式为:

$$T = T_s + G \cdot H \quad (5)$$

式中, $T_e$ 是平衡温度(K); $P_e$ 是平衡压力(kPa); $u_h$ 是静水压力(kPa); $u_0$ 是大气压力(kPa); $\rho_w$ 是海水密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $g$ 是重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ ); $Z$ 是水深(m); $H$ 是水合物储层埋深(m); $p$ 是含水合物储层的总压力(kPa); $p'$ 是含水合物储层的有效压力(kPa); $\rho_{\text{sat}}$ 是储层的饱和密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $T$ 是储层温度(°C); $T_s$ 是海底地温(°C); $G$ 是地温梯度(°C/(100 m))。

### 1.2 非理想气体的 Nixon-Grozic 修正模型

假定含水合物储层的土体颗粒骨架、孔隙水以及水合物分解产生的水不可压缩,在不考虑气体扩

散条件下,M.F.Nixon 发展了基于 J.L.H.Grozic 提出的水合物分解引起流体体积变化与储层应力变化的超孔压理论,建立了储层中水合物分解后形成的超孔隙压力模型——Nixon-Grozic 模型(以下简称 N-G 模型)<sup>[32-33]</sup>。该模型基于理想气体状态方程建立温度-压力-体积耦合关系,没有考虑水合物分解产物(液态水与游离气)的渗透性问题,尚未建立水合物分解所释放的天然气在分解生成水中溶解相态平衡的量化表征方法。因此,胡伟等<sup>[34]</sup>和李天赐等<sup>[35]</sup>分别针对储层水合物渗透特性和天然气溶解性两个关键维度对 N-G 模型进行了修正。相比于储层渗透性变化引起高压水和气体扩散体积的改变量,分解生成水溶解天然气的量很小。本文主要基于胡伟等<sup>[34]</sup>建立的储层渗透性对水合物分解后超孔隙压力的影响模型展开研究。相比于传统的 N-G 模型,胡伟等<sup>[34]</sup>修正的 N-G 模型(以下简称 N-G 修正模型)着重在包裹型水合物分解产气增压过程中引入了自由水渗透修正系数  $a_i$  和气体渗透修正系数  $b_i$ 。

$$-\Delta u_i = M_i \cdot [n \cdot \Delta S_{hi} \cdot (1 - 0.87a_i - 164.6b_i \cdot (\frac{T_e}{298.15\text{K}}) (\frac{101.325\text{kPa}}{P_e}))] \quad i \geq 1 \quad (6)$$

式中,侧限压缩系数  $M_i$  为:

$$\begin{cases} M_1 = \frac{(1+e) \cdot p'}{0.434C_s} \\ M_i = \frac{-(1+e) \cdot \Delta u_i}{0.434C_s \ln(1 - \frac{\Delta u_i}{p'})} \quad i \geq 2 \end{cases} \quad (7)$$

式中,膨胀指数  $C_s$  的公式为:

$$C_s = \frac{PI \cdot G_s}{200} (0.002PI + 0.14) \quad (8)$$

第  $i$  步的有效应力  $p'_i$  的公式为:

$$p'_i = p' - \sum \Delta u_i \quad (9)$$

式中, $\Delta u_i$ 是孔隙压力变化量(kPa); $n$ 是储层孔隙度; $e$ 是储层孔隙比; $\Delta S_{hi}$ 是水合物饱和度分解变化量; $PI$ 是土体的塑性指数。

假设含水合物储层的绝对渗透率符合 Kozeny-Carman 的包裹型沉积物颗粒模型<sup>[36]</sup>(式(10)),气、液两相相对渗透率满足 Van Genuchten-Mualem 模型<sup>[37]</sup>(式(11)),那么相应的气、液体两相在分解过程的渗透量则可以表示为式(12):

$$K_a = K_0 (1 - (S_h - \sum S_{hi}))^{q+1} \quad (10)$$

$$\begin{cases} K_{rw} = K_a \cdot \left( \frac{S_w - S_{rw}}{1 - S_{rw}} \right)^{0.5} \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{S_w - S_{rw}}{1 - S_{rw}} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \right\}^2 \\ K_{rg} = K_a \cdot \left[ 1 - \left( \frac{S_w - S_{rw}}{1 - S_{rw}} \right)^{0.5} \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{S_w - S_{rw}}{1 - S_{rw}} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^{2m} \end{cases} \quad (11)$$

$$Q_w \text{ (or } Q_g) = \frac{K_{rw} \text{ (or } K_{rg}) \sum \Delta u_i \cdot t}{\mu_w \text{ (or } \mu_g)} \quad (12)$$

式中,  $Q_w$  是水的渗透量 ( $\text{m}^3$ );  $Q_g$  是气体渗透量 ( $\text{m}^3$ );  $t$  是分解 (渗流) 时间 (s);  $\mu_w$  是水的动力粘度 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ );  $\mu_g$  是气体的动力粘度 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ );  $K_0$  是储层的固有渗透率 ( $\text{m}^2$ );  $q$  是水合物饱和度指数;  $K_a$  是含水合物储层的绝对渗透率;  $S_i$  是储层水合物的初始饱和度;  $K_{rw}$  是储层中水的相对渗透率 ( $\text{m}^2$ );  $K_{rg}$  是储层中气体的相对渗透率 ( $\text{m}^2$ );  $S_w$  是储层中水相饱和度;  $S_{rw}$  是储层残余水的饱和度;  $m$  取 0.46。

由于水和气体动力粘度受温度的影响, 相应的动力粘度变化规律<sup>[38-39]</sup>为:

$$\mu_w = \frac{\mu_{w0}}{1 + 0.03368(T_e - T_0) + 0.000221(T_e - T_0)^2} \quad (13)$$

$$\mu_g = \mu_{g0} \cdot \left( \frac{T_e}{288.15} \right)^{1.5} \cdot \frac{288.15 + C}{T_e + C} \quad (14)$$

式中,  $\mu_{w0}$  是水的标准动力粘度 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ );  $T_0$  是水的标准温度 (K);  $\mu_{g0}$  是温度 288.15 K 时气体动力粘度 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ );  $C$  是与气体种类相关的常数。

根据公式 (10)~(14), 计算得到修正系数  $a_i$  和  $b_i$  公式为:

$$a = \frac{0.87n \cdot \Delta S_{hi} - Q_w}{0.87n \cdot \Delta S_{hi}}, \quad \frac{\Delta S_{hi} - 1}{0.87\Delta S_{hi}} \leq a \leq 1 \quad (15)$$

$$b = \frac{164.6n \cdot \Delta S_{hi} - Q_g}{164.6n \cdot \Delta S_{hi}}, \quad 0 \leq b \leq 1 \quad (16)$$

但是, 由于含水合物储层的外界压力与标准压力 (101.325 kPa) 相差较大, 理想气体方程 (如: Boyle 定律) 无法再准确表达储层气体状态变化。需要考虑非理想气体压缩性对孔隙气体体积变化的影响<sup>[40-41]</sup>。储层水合物分解生成的气体主要是甲烷, 针对这种非极性气体, 可以使用 RK 方程计算气体的压缩系数  $z$ <sup>[40]</sup>。

$$z^3 - z^2 + (A - B - B^2)z - AB = 0 \quad (17)$$

其中, 相关系数  $A$  和  $B$  计算公式为:

$$\begin{aligned} A &= \frac{aP}{R^2 T^{2.5}} = 0.42748 \frac{P_e \cdot T_c^{2.5}}{P_c \cdot T_e^{2.5}} \\ B &= \frac{bP}{RT} = 0.08664 \frac{P_e \cdot T_c}{P_c \cdot T_e} \end{aligned} \quad (18)$$

式中,  $T_c$  是临界温度 (K);  $P_c$  是临界压力 (kPa)。在标准状态下 ( $P_1 = 101.325 \text{ kPa}$ ,  $T_1 = 298.15 \text{ K}$ ), 计算得到甲烷气体的标准压缩系数  $z$  为 0.998 151。

因此, 在 N-G 修正模型 (式 (6)) 基础上可以得到非理想气体孔隙高压修正模型 (以下简称非理想气体 N-G 修正模型) 方程:

$$-\Delta u_i = M_i \cdot [n \cdot \Delta S_{hi} \cdot (1 - 0.87a_i - 164.6b_i \cdot \left( \frac{T_e}{298.15 \text{ K}} \right) \left( \frac{101.325 \text{ kPa}}{P_e} \right) \left( \frac{z_e}{0.998151} \right)] \quad (19)$$

目前已知神狐试采矿藏海域分布 17 条南北走向的现代峡谷, 峡谷之间的沉积峡谷高度大约几百米。该海域水深介于 1 000~1 500 m, 存在蠕动、垮塌、滑移等地质灾害的潜在威胁。第一次<sup>[42]</sup>和第二次试采<sup>[2,43]</sup>的前期调查发现, 此海域水合物矿藏具有典型垂向分层结构, 自上而下依次为水合物层、水合物-天然气-水混合层及气体饱和层<sup>[44]</sup>。对比两次试采矿藏的物理参数 (表 1), 其埋深、矿藏厚度、土体颗粒孔隙特征和渗透性呈现高度相似。

表 1 两次试采水合物矿藏物理特性

Table 1 Physical properties of hydrate reservoirs for two trial productions

试验类别	参考钻孔	水深/m
第一次试采	SHSC-4	1 266
第二次试采	GMGS6-SH02	1 225
埋深/m	孔隙充填特性	平均孔隙度/%
201~236	NGH+水	35
207.8~253.4	NGH+水	37.3
水合物饱和度/%	平均水合物饱和度/%	平均渗透率/mD
0~54.5	34	2.9
0~46	31	2.38

以第二次试采导向孔 GMGS6-SH02 为例 (表 2), 基于不同 N-G 气压模型对比分析水合物分解在储层中诱发的超孔隙压力差异性。由图 1 可知, 不考虑储层渗透性时, 水合物分解作用导致孔隙压力持续升高, 其累计值逐渐逼近储层有效应力。由于侧限系数压缩  $M_i$  受制于储层有效应力, 储层中产生的超孔隙压力不会突破有效应力的上限。神狐海域水合物储层主要为黏质粉土和粉土, 渗透率较低 (0.1~10 mD), 且随深度增加呈递减趋势。储层中的高黏土矿物因自身膨胀造成孔隙变窄甚至堵塞, 导致绝对渗透率和相对渗透率显著降低。因此, 当水合物分解量较低时, 采用考虑气体渗透率的 N-G 修正模型和非理想气体 N-G 修正模型计算的超孔

隙压力与N-G模型预测结果类似。水合物分解产生的超孔隙压力驱动生成的气-水两相流体在储层中运移,理想气体与非理想气体N-G修正模型相较于N-G模型的累积超孔隙压力差异逐渐增大。气-水相对渗透率随含水饱和度动态变化,气体相对渗透率随含水饱和度增加而递减,水的相对渗透率则呈反向变化趋势。水合物持续分解导致储层原有的水渗流排出,引发累积超孔隙压力衰减。相较于N-G修正模型,非理想气体N-G修正模型因考虑了气体压缩性,其超孔隙压力累积速率较缓,峰值压力较低且衰减进程较快。

表2 神狐海域水合物矿藏的相关参数  
Table 2 Parameters related to hydrate reservoirs in Shenhu area

水深 $Z$	埋深 $H$	大气压力 $P_0$
1 225m	255m	101.325 kPa
海水密度 $\rho_w$	重力加速度 $g$	海底地温 $T_s$
1 024 kg/m <sup>3</sup>	9.81 m/s <sup>2</sup>	4.879 °C
地温梯度 $G$	土体比重 $G_s$	储层孔隙度 $n$
4.365 °C	2.7	0.373
储层孔隙比 $e$	塑性指数 $PI$	水合物初始饱和度 $S_h$
0.594 9	25	31%
单次迭代量 $\Delta S_{hi}$	分解时间 $t$	储层饱和密度 $\rho_{sat}$
0.5%	1 800 s	2 027 kg/m <sup>3</sup>
储层固有渗透率 $K_0$	临界温度 $T_c$	临界压力 $P_c$
2.38 mD	190.6 K	4 600 kPa
水合物饱和度指数 $q$	储层残余水的饱和度 $S_{rw}$	水的标准动力粘度 $\mu_{w0}$
1.5	0.09	1.779 × 10 <sup>-3</sup> (Pa·s)
水的标准状态温度 $T_0$	288.15 K 气体动力粘度 $\mu_{g0}$	空气常数 $C$
273.15 K	1.789 4 × 10 <sup>-5</sup> (Pa·s)	110.4 K

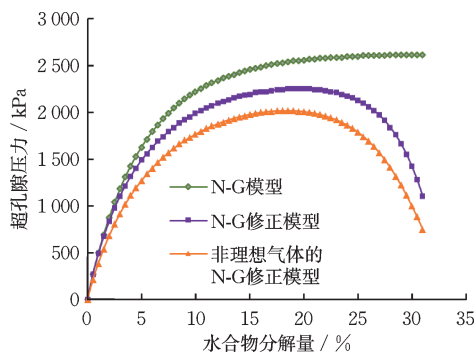


图1 神狐海域水合物分解形成的超孔隙压力

Fig.1 Excess pore pressure generated by hydrate dissociation in Shenhu area

### 1.3 水合物分解对储层动/静力学特性的影响

内聚力和内摩擦角是反映储层力学特征的关键参数,也是建立储层破裂准则和分析储层稳定性的基础。M.Hyodo等<sup>[45]</sup>经试验确定了赋存于Toyoura砂的水合物饱和度与峰值偏应力之间的指数关系。陈礼睿等<sup>[46]</sup>采用流固耦合方法模拟了水合物长期储存对海底边坡稳定性的影响。研究发现,水合物分解程度超过40%时,边坡塑性应变急剧增加并形成贯通区,最终导致失稳。地形条件中,坡角的影响最为显著(每增加2°,安全系数下降约4.3%),其次为水合物层厚度和埋深;土体参数中,摩擦角对稳定性的贡献最大。数值模拟表明,控制水合物分解程度在安全阈值内(如分解率<30%)可有效维持边坡长期稳定性。J.Yoneda等<sup>[47]</sup>总结三轴压缩试验数据指出不同饱和度条件下含水合物试样的峰值强度与内聚力具有明显相关性,而与内摩擦角无显著关联;同时建立了内聚力与饱和度之间的指数型拟合关系。但研究表明,粗颗粒储层与细颗粒储层呈现显著差异。相同水合物饱和度条件下,粗颗粒储层(砂土、卵石等)的破裂强度大于细颗粒储层(粉土、黏土等)的峰值强度。中国南海神狐海域的气体水合物主要由黏质粉土和粉质黏土组成,具有岩性单一、粒径小(平均粒径6~8 μm)、黏粒含量高的特点<sup>[44]</sup>。世界上细粒储层分布广、资源量大、开采难度高,总量约占全球水合物矿藏的90%。

随着对含水合物细粒径储层研究的深入,通过不同有效围压、饱和度、排水条件、超固结比和中值粒径条件下的三轴剪切试验发现:固结排水强度高于不排水强度<sup>[48]</sup>;不排水条件下气饱和试样的强度高于水饱和试样<sup>[49]</sup>;完全分解后储层强度低于不含水合物储层的强度<sup>[50]</sup>。值得注意的是,不同试验条件和数值计算中得到或使用的数据稍有差异<sup>[51]</sup>。

为深入分析细颗粒矿藏在动/静荷载作用下的力学特性,采用定水-过量气法制备水合物试样,遵循“先生成、后分解”原则,系统开展了水合物矿藏分解特性下的动/静三轴固结不排水剪切试验(图2)。随饱和度和围压的提升,含水合物试样的静三轴剪切峰值强度呈持续增长趋势。高饱和度与高有效围压可显著增强试样抗动荷载能力,这与静三轴剪切试验的结论和机理一致。含水合物细颗粒试样在瞬时冲击荷载下的强度大于静荷载条件下

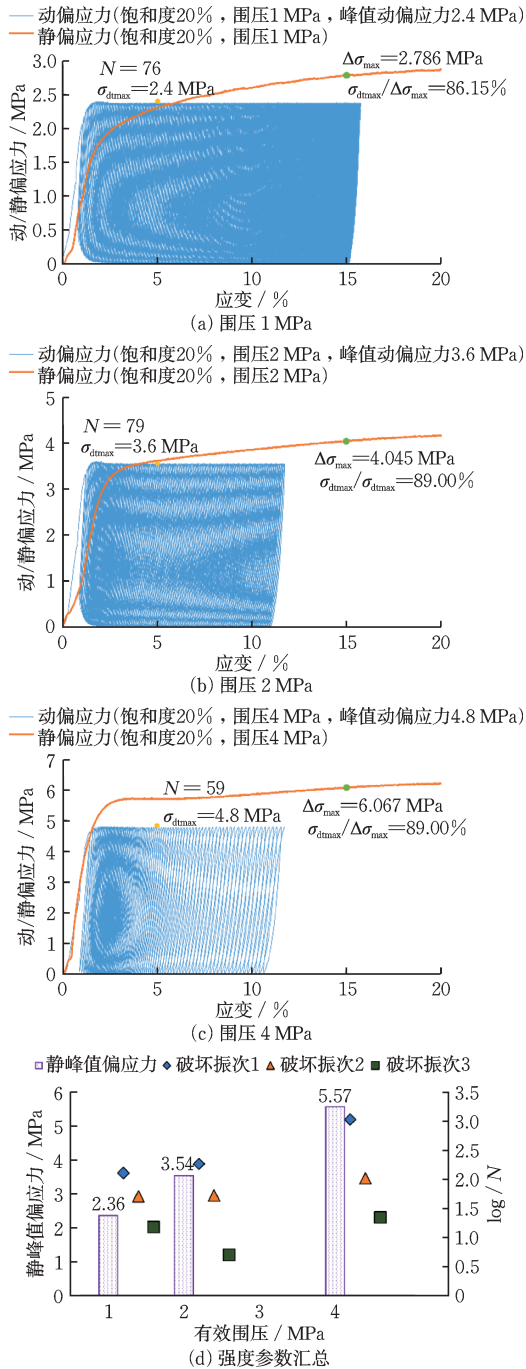


图2 水合物含量20%时(30%分解到20%)部分动/静三轴试验偏应力—应变和强度参数  
Fig.2 Deviatoric stress-strain curves and strength parameters from selected dynamic/static triaxial tests at 20% hydrate content (corresponding to dissociation from 30% to 20%)

的强度。随着等效循环次数的增加,试样抗动荷载性能逐渐减弱。

针对地震作用下土体强度演化特征的数学表征,迄今尚未建立统一的简化本构方程进行准确描

述。基于上述研究背景与理论缺口,创新性地构建了考虑地震强度和土体特征的关系式(公式20)。

$$\begin{cases} \xi_I = 1 - m \cdot k_h, & k_h \leq n \\ \xi_{II} = 1 - m \cdot k_h, & k_h > n \end{cases} \quad (20)$$

式中, $\xi_I$ 和 $\xi_{II}$ 分别是I和II区的强度折减系数; $m$ 是土体类型相关的常数; $n$ 是与水平加速度系数相关常数; $k_h$ 是地震水平加速度系数临界值。

基于含水合物试样的动/静三轴试验结果,设定6.5、7、7.5、8级地震对应的水平峰值加速度系数分别为0.05、0.1、0.15、0.2,则地震动荷载诱发的强度系数演化规律如图3所示。试验数据除少量离散点分布于强度折减包络函数外侧外,整体呈现折减系数与水平加速度系数的显著相关性。受地震影响距离、土体类型等因素影响,地震引起的水平峰值加速度非固定值。当相同震级地震作用下的加速度值增大时,更多应力比数据点将收敛于包络函数界定范围。上述规律验证了含水合物土层地震作用下强度折减关系式是可靠的。

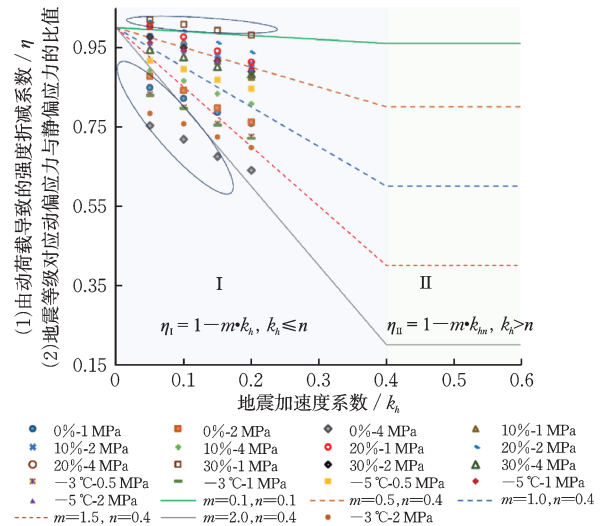


图3 海洋水合物土层受地震作用后强度折减规律特征  
Fig.3 Strength degradation characteristics of marine hydrate-bearing soil layer under seismic loading

#### 1.4 竖向地震对边坡安全性的影响

受复杂海底环境与远洋位置的影响,竖向地震动数据的获取难度与评估精度显著受限,进而导致海底边坡中竖向地震作用易被低估。统计数据显示,海洋与陆地环境中垂直地震加速度与水平地震加速度的平均比值分别为0.223和0.429,最大值约可达2。美国石油协会(API)也呼吁将竖向地震作

用取为水平地震作用的50%。

如果水平地震力向外,竖向地震力向上,如图4左所示,边坡安全系数表达式为:

$$FS = \frac{\xi \cdot (c_1 + \cos^2 \alpha \cdot G' \cdot \tan \varphi_1 - u) - 0.5 \sin 2\alpha \cdot k_h \cdot G \cdot \tan \varphi_1 + R_1 - R_2}{0.5 \sin 2\alpha \cdot G' + \cos^2 \alpha \cdot k_h \cdot G} \quad (21)$$

$$R_1 = 0.5 \sin 2\alpha \cdot k_v \cdot G \quad (22)$$

$$R_2 = \cos^2 \alpha \cdot k_v \cdot G \cdot \tan \varphi_1 \quad (23)$$

式中, $k_h$ 是竖向地震系数; $R_1$ 和 $R_2$ 分别是竖向地震在平行和垂直边坡方向的分量。

如果水平地震向外,竖向地震向下,如图4(b)所示,边坡安全系数表达式为:

$$FS = \frac{\xi \cdot (c_1 + \cos^2 \alpha \cdot G' \cdot \tan \varphi_1 - u) - 0.5 \sin 2\alpha \cdot k_h \cdot G \cdot \tan \varphi_1 + R_2}{0.5 \sin 2\alpha \cdot G' + \cos^2 \alpha \cdot k_h \cdot G + R_1} \quad (24)$$

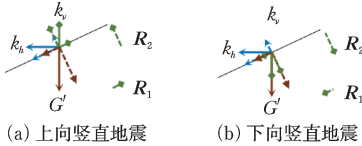


图4 上向竖直地震和下向竖直地震受力示意

Fig.4 Schematic diagram of force components under upward and downward vertical earthquakes

## 2 一维边坡安全性分析

基于现有海洋勘查结果,南海北部海域滑坡呈现如下典型特征:边坡坡度较缓,破坏深度远小于边坡长度,滑移面与边坡面基本保持平衡。上述特征满足无限斜坡模型在海底边坡模型分析的适用条件。无限斜坡模型不仅物理意义明确,工程实证研究亦验证了其在海底滑坡分析中的合理性。通过融合随机场理论构建无限斜坡随机场模型,采用蒙特卡洛方法计算边坡失效概率。

上向竖直地震的平行分量 $R_1$ 增加了斜面的抗滑力,垂直分量 $R_2$ 减小了斜面的有效重度。综合计算后,上向竖直地震会提升边坡失稳风险。随着竖向地震系数增大,边坡破坏概率进一步增大(图5、6中实线部分)。由于地震作用时间短,其动力效应对抗滑力衰减影响可忽略,故有学者考虑垂直分量 $R_2$ 对边坡安全性的影响。当剔除 $R_2$ 分量后,上向竖直地震提升了边坡的安全性,且随竖向地震系数增大,边坡安全系数呈正向增长(图5、6中虚线部分)。

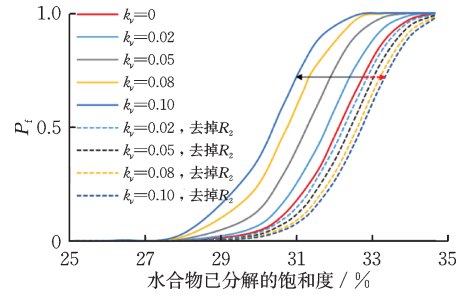


图5 分解过程中上向地震加速度系数 $k_v$ 对 $P_j$ 的作用规律  
Fig.5 Effect of upward seismic acceleration coefficient  $k_v$  on  $P_j$  during dissociation

注: $S_h=35\%$ ,  $\alpha=2^\circ$ ,  $k_h=0.1$ ,  $m=1.0$ ,  $r_{cp}=-0.5$ ,  $r_{cy}=0.3$ ,  $r_{cz}=0.1$ ,  $Cov_c=0.15$ ,  $Cov_\varphi=0.2$ ,  $Cov_\gamma=0.1$ ,  $3Cov_\xi=0.05$ ,  $k_c=0.4$ ,  $k_\varphi=0.1$ ,  $k_\gamma=0.02$ ,  $l=1.5\text{ m}$ ,  $z_m=0.025$

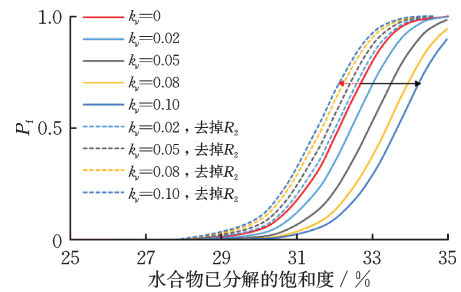


图6 分解时下向地震加速度系数 $k_v$ 对 $P_j$ 的作用规律  
Fig.6 Effect of downward seismic acceleration coefficient  $k_v$  on  $P_j$  during dissociation

注: $S_h=35\%$ ,  $\alpha=2^\circ$ ,  $k_h=0.1$ ,  $m=1.0$ ,  $r_{cp}=-0.5$ ,  $r_{cy}=0.3$ ,  $r_{cz}=0.1$ ,  $Cov_c=0.15$ ,  $Cov_\varphi=0.2$ ,  $Cov_\gamma=0.1$ ,  $3Cov_\xi=0.05$ ,  $k_c=0.4$ ,  $k_\varphi=0.1$ ,  $k_\gamma=0.02$ ,  $l=1.5\text{ m}$ ,  $z_m=0.025$

与上向竖直地震综合作用相反,下向竖直地震作用于边坡后,相同条件下其失效概率减小。当剔除 $R_2$ 分量后,平行斜面方向分量的力学响应与上向竖直地震的平行斜面方向分量也恰好相反。通过上向和下向竖直地震的综合对比,就边坡安全性影响程度而言, $R_2$ 较 $R_1$ 具有更显著的控制作用,其作为关键地震分量不可忽略。在竖向地震系数增大引发的失效概率变化趋势增强方面,上向和下向地震作用展现出相同的动态响应特征。

使用土层中超(负)孔隙压力值 $U_j$ 与土层的有效应力 $G'_j$ 的比值 $\nu$ 来表征土层中的孔隙压力特征:

$$\nu = \frac{U_j}{G'_j} \quad (25)$$

超孔隙压力会降低边坡的安全性,而负孔隙压力的作用正好相反。随着比值 $\nu$ 的增大,孔隙压力的作用效应会加剧这种变化趋势(图7)。因此,在降压辅助置换开采水合物过程中,气体置换阶段需严格控制 $\text{CO}_2$ 注入压力。

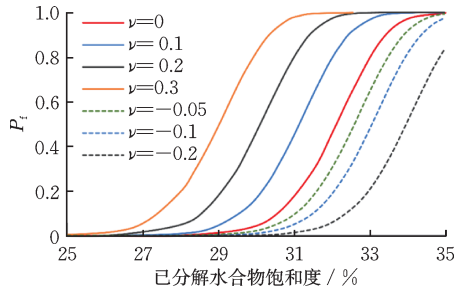


图7 分解过程中含水合物土层中的孔隙压力对  $P_i$  的作用规律

Fig.7 Effect of pore pressure in hydrate-bearing soil layer on  $P_i$  during dissociation

### 3 二维边坡安全性分析

#### 3.1 模型概况

以中国南海神狐海域第二次试采矿藏作为边坡稳定性和可靠性分析的模型<sup>[2,43]</sup>,建立的模型概况和详细尺寸如图8所示。矿藏厚度50 m,埋深205 m,投影长度600 m,模型总体长度2 000 m,最大深度600 m,边坡角 $5.8^\circ$ 。假设上覆层和下基层为各向同性材料,分别位于水合物矿藏的上方和下方。计算海底边坡稳定性时,依据水合物分解程度将水合物储层设定为各向同性材料;计算海底边坡可靠性时,将水合物储层设定为各向异性材料。

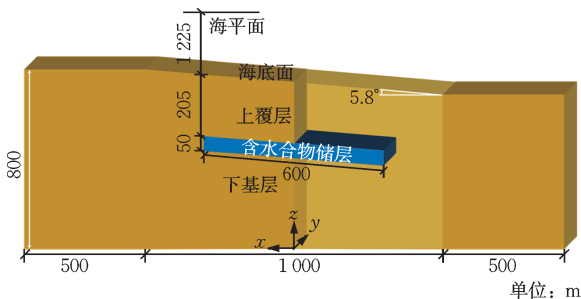


图8 海底边坡模型和边坡特征参数示意图

Fig.8 Schematic diagram of submarine slope model and slope characteristic parameters

利用1.2~1.4节水合物分解过程中产生超孔隙压力和强度参数弱化的公式,计算得到中国南海第二次试采矿藏水合物分解时压力和力学特征参量,详见表3。分解过程中,上覆层和下基层未产生超孔隙压力,内聚力和内摩擦角等力学参数也未发生变化。

表3 模型的力学参数

Table 3 Mechanical parameters of model

土体类型	上覆层	含水合物储层	
		未分解	分解10%
剩余饱和度/%	0	31	21
饱和重度/( $\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$ )	20.35	20.35	20.35
内聚力/kPa	30	175.5	94.5
内摩擦角/( $^\circ$ )	9.3	10.07	9.76
弹性模量/MPa	80	398.4	127.5
泊松比	0.36	0.32	0.33
N-G修正模型/kPa	0	0	1 987
非理想气体N-G修正模型/kPa	0	0	1 766
含水合物储层			
	分解20%	分解25%	完全分解
	11	6	0
	20.35	20.35	20.35
	50.9	37.4	25.8
	9.46	9.31	9.12
	80.4	66	45
	0.34	0.35	0.36
	2 250	2 127	1 107
	2 007	1 789	751
			下基层
			0

#### 3.2 储层中水合物分解程度对边坡稳定性的影响

采用有限元强度折减法计算海底边坡的安全系数,研究揭示,水合物分解引发的储层力学参数弱化与孔隙压力增加均会削弱海底边坡稳定性,其中内聚力及内摩擦角的衰减直接导致储层抵抗强度下降。当忽略水合物分解诱发的超孔隙压力(或模拟降压开采时),除水合物完全分解的情况下储层中力学参数小于上覆层的力学参数外,大部分情况下储层峰值强度始终大于上覆层破裂强度。因此,边坡破裂面始终存在于上覆层中(图9),导致破裂面经过水合物层后,随着分解量的增大,边坡的安全系数持续降低(图10),且下降速率逐渐减缓。

在分解过程中,超孔隙压力的持续累积降低了储层的有效重度,从而削弱了储层的抗剪强度。在滑动力保持恒定的条件下,抗剪强度的弱化将直接导致海底边坡稳定性降低。与储层中超孔隙压力的变化规律相反(图1和表3),海底边坡稳定性呈现出先下降后回升的演变特征。虽然储层力学参数的弱化同样会对边坡稳定性产生影响,但相较于力学参数的变化,超孔隙压力增大对海底边坡安全

系数的控制作用更为显著。

N-G 修正模型与非理想气体 N-G 修正模型的海底边坡安全系数变化趋势呈现相似规律。由于非理想气体 N-G 修正模型的超孔隙压力累积量较小,因此非理想气体 N-G 修正模型计算所得的海底边坡安全系数相对较大。海底边坡安全系数最小值并非出现在超孔隙压力峰值处,这是因为储层力学参数在水合物分解过程中持续弱化,与超孔隙压力值共同影响海底边坡安全系数。

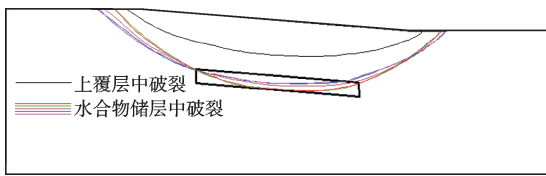


图9 塑性区贯通线在海底边坡模型中的位置

Fig.9 Position of plastic-zone penetration line in submarine slope model

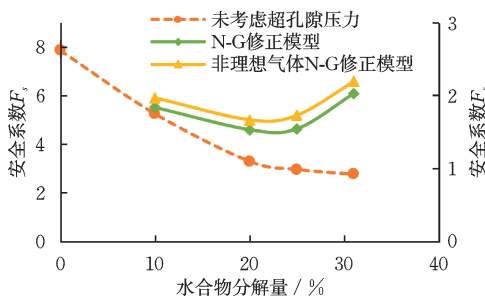


图10 因不同水合物分解量引起海底边坡安全系数的变化规律

Fig.10 Variation of submarine slope safety factors induced by different hydrate dissociation amounts

### 3.3 储层中水合物分解程度对边坡可靠性的影响

在评估不同水合物分解量对边坡可靠性的影响时,采用的储层力学参数及超孔隙压力值详见表3。设定内聚力与内摩擦角为互不相关的空间随机变量,二者均服从对数正态分布,其水平空间相关长度为 50 m、竖向空间相关长度为 0.5 m、变异系数为 0.2,并采用指数型相关函数。单次工况采用拉丁超立方抽样 1 000 次进行蒙特卡洛模拟以计算失效概率。

当考虑水合物分解产生的超孔隙压力时,海底边坡可靠性与边坡稳定性的演化规律一致——先降低后增加(图 10 和图 11)。储层中水合物未分解时,海底边坡失效概率趋近于零。随着水合物分解

量增加,失效概率出现急剧增长(图 11)。随后由于储层中水和气体的扩散量增加,海底边坡的失效概率逐渐降低。在边坡失效概率上升阶段,储层强度弱化与孔隙压力累积形成耦合作用;而在下降阶段,其主要受超孔隙压力变化的影响。由于 N-G 修正模型计算的超孔隙压力值高于非理想气体 N-G 修正模型,因此采用前者计算的边坡失效概率大于后者。

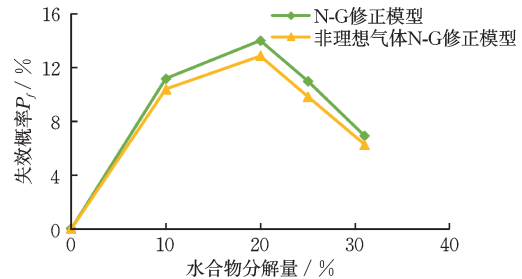


图11 因不同水合物分解量引起海底边坡失效概率的变化特征

Fig.11 Variation characteristics of submarine slope failure probability caused by different hydrate dissociation levels

## 4 结论

(1)由于考虑了气体压缩性,相较于以理想气体为前提条件,基于非理想气体假设在相同水合物分解量下计算的超孔隙压力值偏小。随着分解程度加深,两者差异呈现扩大趋势。

(2)海底边坡稳定性受储层力学特性与超孔隙压力值的协同控制。若忽略超孔隙压力影响,海底边坡稳定性将随水合物分解量增加持续衰减。采用 N-G 修正模型与非理想气体 N-G 修正模型分析超孔隙压力对安全系数的影响规律相似:从初始分解至超孔隙压力峰值阶段,安全系数持续下降;此后,随着储层内水气扩散效应增强,安全系数开始逐步回升。

(3)竖向地震作用与孔隙压力变化主导边坡受力特征演化。向上与向下的竖向地震作用对边坡安全性的影响方向相反,其积极或消极的影响性质取决于竖向地震作用在边坡斜面上的法向分量,而平行于斜面的分量影响则相对较弱。超孔隙压力与负孔隙压力分别对边坡安全性产生削弱与增强效应。

(4)相较于水合物未分解时边坡处于近绝对可

靠状态, 储层水合物分解显著提升了边坡失效概率, 导致安全性下降。由于N-G修正模型计算的超孔隙压力值较大, 因此采用该模型计算的边坡可靠度指标相对较低。

## 参考文献:

- [1] 苏正, 曹运诚, 杨睿, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏演化分析研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(5): 1764-1774.  
Su Z, Cao Y C, Yang R, et al. Analytical research on evolution of methane hydrate deposits at Shenhu Area, northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(5): 1764-1774. (in Chinese)
- [2] 叶建良, 秦绪文, 谢文卫, 等. 中国南海天然气水合物第二次试采主要进展[J]. 中国地质, 2020, 47(3): 557-568.  
Ye J L, Qin X W, Xie W W, et al. Main progress of the second gas hydrate trial production in the South China Sea[J]. Geology in China, 2020, 47(3): 557-568. (in Chinese)
- [3] Lu H L, Lorenson T D, Moudrakovski I L, et al. The characteristics of gas hydrates recovered from the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(2): 411-418.
- [4] Lu Y T, Luan X W, Lyu F L, et al. Seismic evidence and formation mechanism of gas hydrates in the Zhongjinnan Basin, Western margin of the South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 84: 274-288.
- [5] Meng M M, Liang J Q, Lu J A, et al. Quaternary deep-water sedimentary characteristics and their relationship with the gas hydrate accumulations in the Qiongdongnan Basin, Northwest South China Sea [J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2021, 177: 103628.
- [6] Su M, Yang R, Wang H, et al. Gas hydrates distribution in the Shenhu Area, northern South China Sea: Comparisons between the eight drilling sites with gas-hydrate petroleum system [J]. Geologica Acta, 2016, 14: 79-100.
- [7] Li L, Lei X H, Zhang X, et al. Gas hydrate and associated free gas in the Dongsha Area of northern South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 39(1): 92-101.
- [8] Liu C L, Meng Q G, He X L, et al. Comparison of the characteristics for natural gas hydrate recovered from marine and terrestrial areas in China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, 152: 67-74.
- [9] 赵亚鹏, 刘乐乐, 孔亮, 等. 含天然气水合物土微观力学特性研究进展 [J]. 力学学报, 2021, 53(8): 2119-2140.  
Zhao Y P, Liu L L, Kong L, et al. Advances in micro-mechanical properties of hydrate-bearing soils [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(8): 2119-2140. (in Chinese)
- [10] 鲁晓兵, 张旭辉, 王淑云. 天然气水合物开采相关的安全性研究进展[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49(3): 7-37.  
Lu X B, Zhang X H, Wang S Y. Advances on the safety related with natural gas hydrate exploitation [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2019, 49(3): 7-37. (in Chinese)
- [11] 季伟伟, 杨庆, 孔纲强, 等. 孔隙液体相态对饱和砂土力学特性影响试验[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(4): 871-877.  
Ji W W, Yang Q, Kong G Q, et al. Triaxial test on mechanical properties of saturated sand influenced by pore liquid phase state [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(4): 871-877. (in Chinese)
- [12] Sun X, Wang L, Luo H, et al. Numerical modeling for the mechanical behavior of marine gas hydrate-bearing sediments during hydrate production by depressurization [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 177: 971-982.
- [13] Dong L, Liao H L, Li Y L, et al. Analysis of the mechanical properties of the reconstituted hydrate-bearing clayey-silt samples from the South China Sea [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(6): 831.
- [14] Li X P, He S M. Progress in stability analysis of submarine slopes considering dissociation of gas hydrates [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(3): 741-747.
- [15] Sun Y B, Zhang X H, Wu S G, et al. Relation of submarine landslide to hydrate occurrences in Baiyun Depression, South China Sea [J]. Journal of Ocean University of China, 2018, 17(1): 129-138.
- [16] Bouriak S, Vanneste M, Saoutkine A. Inferred gas hydrates and clay diapirs near the Storegga Slide on the southern edge of the Vøring Plateau, offshore Norway [J]. Marine Geology, 2000, 163(1-4): 125-148.
- [17] Cashman K V, Popenoe P. Slumping and shallow faulting related to the presence of salt on the Continental

- Slope and Rise off North Carolina[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1985, 2(3): 260-271.
- [18] Dillon W P, Danforth W W, Hutchinson D R, et al. Evidence for faulting related to dissociation of gas hydrate and release of methane off the southeastern United States[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1998, 137(1): 293-302.
- [19] Milkov A V, Sassen R, Novikova I, et al. Gas hydrates at minimum stability water depths in the gulf of Mexico: Significance to geohazard assessment[J]. *Gulf Coast Association of Geological Societies* 2000, 50: 217-224.
- [20] Wang W W, Wang D W, Wu S G, et al. Submarine landslides on the north continental slope of the South China Sea[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2018, 17(1): 83-100.
- [21] Chen S C, Tsai C H, Hsu S K, et al. Fangliao Slide - a large slope failure in the upper Kaoping Slope off southwest Taiwan[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2018, 29(1): 17-30.
- [22] Jiang M J, Sun C, Crosta G B, et al. A study of submarine steep slope failures triggered by thermal dissociation of methane hydrates using a coupled CFD-DEM approach[J]. *Engineering Geology*, 2015, 190: 1-16.
- [23] Tan L, Liu F, Crosta G, et al. A simple THC coupled model for assessing stability of a submarine infinite slope with methane hydrates[C]//*Proceedings of Geo Shanghai 2018 International Conference: Geoenvironment and Geohazard*. Singapore: Springer Singapore, 2018: 28-36.
- [24] Zhu B, Pei H F, Yang Q. Probability analysis of submarine landslides based on the response surface method: A case study from the South China Sea[J]. *Applied Ocean Research*, 2018, 78: 167-179.
- [25] Rodriguez-Ochoa R, Nadim F, Cepeda J M, et al. Hazard analysis of seismic submarine slope instability [J]. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 2015, 9(3): 128-147.
- [26] 秦绪文, 陆程, 王平康, 等. 中国南海天然气水合物开采储层水合物相变与渗流机理: 综述与展望[J]. *中国地质*, 2022, 49(3): 749-769.
- Qin X W, Lu C, Wang P K, et al. Hydrate phase transition and seepage mechanism during natural gas hydrate production tests in the South China Sea: A review and prospect [J]. *Geology in China*, 2022, 49 (3) : 749-769. (in Chinese)
- [27] Qin X W, Lu C, Wang P K, et al. Hydrate phase transition and seepage mechanism during natural gas hydrates production tests in the South China Sea: A review and prospect [J]. *China Geology*, 2022, 5 (2) : 201-217.
- [28] Geng L T, Cai J, Lu C, et al. Phase equilibria of natural gas hydrates in bulk brine and marine sediments from the South China Sea [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2021, 66(11): 4064-4074.
- [29] Dickens G R, Quinby-Hunt M S. Methane hydrate stability in seawater [J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, 21(19): 2115-2118.
- [30] Wan Z F, Xu X, Wang X Q, et al. Geothermal analysis of boreholes in the Shenhu gas hydrate drilling area, northern South China Sea: Influence of mud diapirs on hydrate occurrence [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 158: 424-432.
- [31] Wang Y M, Liu S W, Hao F F, et al. Geothermal investigation of the thickness of gas hydrate stability zone in the north continental margin of the South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(4): 72-79.
- [32] Nixon M F, Grozic J L H. A simple model for submarine slope stability analysis with gas hydrates [J]. *Norwegian Journal of Geology*, 2006, 86: 309-316.
- [33] Nixon M F, Lh Grozic J. Submarine slope failure due to gas hydrate dissociation: A preliminary quantification [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(3): 314-325.
- [34] 胡伟, 朱海涛, 蒋明镜, 等. 考虑能源土渗透性影响的水合物分解超孔压特性研究 [J]. *岩土力学*, 2021, 42 (10): 2755-2762, 2772.
- Hu W, Zhu H T, Jiang M J, et al. Characteristics of excess pore pressure of hydrate decomposition considering the effect of energy soil permeability [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(10): 2755-2762, 2772. (in Chinese)
- [35] 李天赐, 孔亮, 赵新波, 等. 考虑超孔压影响的海底能源土斜坡稳定性数值模拟和评价 [J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(5): 253-260.
- Li T C, Kong L, Zhao X B, et al. Numerical simulation and evaluation of the stability of submarine energy soil slope considering the effect of the excess pore pressure [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(5): 253-260. (in Chinese)
- [36] Kleinberg R L, Flaum C, Griffin D D, et al. Deep sea NMR: Methane hydrate growth habit in porous media and its relationship to hydraulic permeability, deposit accumulation, and submarine slope stability [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B10): 2003JB002389.
- [37] ThVan-Genuchten M. A closed-form equation for pre-

- dicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [38] 刘鹤年. 流体力学: 2006年版[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006.
- [39] Grigor'ev Y N, Ershov I V. Linear stability of supersonic Couette flow of a molecular gas under the conditions of viscous stratification and excitation of the vibrational mode[J]. Fluid Dynamics, 2017, 52(1): 9-24.
- [40] Zhang H T, Luo X Q, Bi J F, et al. Submarine slope stability analysis during natural gas hydrate dissociation [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019, 37(4): 467-476.
- [41] Xiong Z S, Zhang J H. Effect of dissociation of gas hydrate on the stability of submarine slope [C]//Volume 4: Offshore Geotechnics; Ronald W. Yeung Honoring Symposium on Offshore and Ship Hydrodynamics. July 1-6, 2012. Rio de Janeiro, Brazil; American Society of Mechanical Engineers, 2012: 95-101.
- [42] Li J F, Ye J L, Qin X W, et al. The first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea [J]. China Geology, 2018, 1(1): 5-16.
- [43] Ye J L, Qin X W, Xie W W, et al. The second natural gas hydrate production test in the South China Sea [J]. China Geology, 2020, 3(2): 197-209.
- [44] Qin X W, Lu J G, Lu H L, et al. Coexistence of natural gas hydrate, free gas and water in the gas hydrate system in the Shenhu Area, South China Sea [J]. China Geology, 2020, 3(2): 210-220.
- [45] Hyodo M, Li Y, Yoneda J, et al. A comparative analysis of the mechanical behavior of carbon dioxide and methane hydrate-bearing sediments [J]. American Mineralogist, 2014, 99(1): 178-183.
- [46] 陈礼睿, 李孙伟. 海底沉积层内 CO<sub>2</sub> 水合物长期储存的地质风险评估 [J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(6): 1234-1245.
- Chen L R, Li S W. Geological risk assessment of long-term storage of carbon dioxide hydrates in seafloor sedimentary layers [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(6): 1234-1245. (in Chinese)
- [47] Yoneda J, Masui A, Konno Y, et al. Mechanical properties of hydrate-bearing turbidite reservoir in the first gas production test site of the Eastern Nankai Trough [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 66: 471-486.
- [48] Wang L, Sun X, Shen S, et al. Undrained triaxial tests on water-saturated methane hydrate-bearing clayey-silty sediments of the South China Sea [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, 58(3): 351-366.
- [49] Zhang X H, Luo D S, Lu X B, et al. Mechanical properties of gas hydrate-bearing sediments during hydrate dissociation [J]. Acta Mechanica Sinica, 2018, 34(2): 266-274.
- [50] Hyodo M, Li Y H, Yoneda J, et al. Effects of dissociation on the shear strength and deformation behavior of methane hydrate-bearing sediments [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 51: 52-62.
- [51] Ma S Z, Li H B, Jia H B. Influence of natural gas hydrate's property weakening from dissociation on subsidence of seabed sediments: A simulation study [J]. Advances in Civil Engineering, 2022, 2022(1): 6159470.
- (本文编辑:张艺)