

含天然气水合物沉积介质力学本构关系及数值模拟研究现状*

张峰^{1,2}, 刘丽华^{1†}, 吴能友^{3,4}, 卢静生¹, 吴起^{1,2}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 中国科学院天然气水合物重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 青岛海洋地质研究所, 国土资源部天然气水合物重点实验室, 山东 青岛 266071;
4. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 天然气水合物是一种储量巨大的潜在能源, 主要蕴藏在海域或陆地冻土带的多孔介质中。研究含天然气水合物沉积介质的力学性质是评价含水合物沉积介质稳定性以及水合物开采安全的基础。本文系统总结了含水合物沉积介质力学本构模型和力学数值模拟研究现状, 指出邓肯-张模型和临界状态模型的适用范围及局限性, 认为建立参数物理意义明确且能相对全面地描述含水合物沉积介质力学性质的力学本构方程还有很多挑战。针对含水合物沉积介质力学性质研究, 开展多物理场耦合数值模拟研究是主要的研究手段。目前, TOUGH+HYDRATE 和 FLAC3D 的耦合以及颗粒流 (PFC) 应用较多, 考虑水合物在地层的实际分解过程, 应该对沉积介质力学性质在水合物连续分解过程中的变化规律及与其他物理场的耦合作用进行深入研究。

关键词: 天然气水合物; 力学性质; 本构模型; 数值模拟

中图分类号: TK01; TE1; P736

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2017.06.005

Status of Constitutive Relationship and Numerical Simulation of Gas Hydrate Deposited Medium

ZHANG Feng^{1,2}, LIU Li-hua¹, WU Neng-you^{3,4}, LU Jing-sheng¹, WU Qi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Shandong Qingdao 266071, China;
4. Laboratory of Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Sciences and Technology, Shandong Qingdao 266071, China)

Abstract: Natural gas hydrates occur worldwide and have been a hot topic due to its energy and geohazard potential. Gas hydrates-bearing sediments (HBS) are natural soils that contain natural gas hydrate. The mechanical response of HBS is crucial for predicting the stability of sub-marine sediments and the gas production from natural gas hydrate reservoir. In this paper, the mechanical constitutive models and the numerical simulations of HBS are summarized. The Duncan-Chang models are simple but cannot describe the strain softening stage, the critical state models are complex. Currently, the numerical simulations of HBS require a simple and accurate model. The multi-phases coupling numerical simulation can study the influence of various parameters on the mechanical properties of the gas hydrate bearing sediments. The changes in the mechanical properties of sedimentary media during decomposition process need to be studied in depth.

Key words: natural gas hydrate; mechanical properties; mechanical constitutive model; numerical simulation

0 前言

天然气水合物 (简称水合物) 是一种由小分子气体 (主要是甲烷) 和水在低温高压条件下形成的

非化学计量的固态物质^[1]。标准状态下, 1 m³ 甲烷水合物可以释放出约 164 m³ 甲烷。天然气水合物主要分布于海底沉积介质和陆地冻土带中, 是一种储量巨大的潜在能源和重要的环境影响因素^[2]。含天

* 收稿日期: 2017-08-15

修订日期: 2017-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41376076); 广东省基金自由申请项目 (2015A030313718); 中国石油-中科院科技合作项目 (2015-4813)

† 通信作者: 刘丽华, E-mail: liulh@ms.giec.ac.cn

然气水合物沉积介质是赋存天然气水合物的多孔介质, 相比于一般的岩土, 水合物的含量(饱和度)和分布特征对沉积介质力学性质影响较大。目前, 水合物相关的系列研究引起了学术界、工业界的高度关注。

自然条件下, 外界环境的改变(海平面升降、火山、地震等)可能诱发海域水合物分解, 导致含水合物沉积层失稳, 造成地层滑塌、下沉, 甚至诱发海啸等地质灾害^[3]。而在水合物开采过程中, 常规的热激发、降压等开采方法以及钻井过程中的钻井液入侵等都可能改变水合物沉积层的力学性质, 造成水合物沉积介质的变形甚至失稳, 处置不当可能会引发生产事故^[4]。因此, 对水合物沉积介质的力学性质和力学行为进行研究具有重要意义。

由于原位测量和保压取芯成本昂贵且技术难度大, 目前, 主要对人工合成的水合物沉积介质试样进行室内试验^[5]。只有少量文献报道了原位水合物沉积介质的力学性质^[6]。在大量试验研究的基础上, 研究人员通过修正经典的岩土力学模型, 提出了数个适用于含水合物沉积介质的力学本构模型, 包括邓肯-张模型、临界状态模型等^[7], 进而利用这些本构模型对水合物沉积介质的力学性质和力学行为开展了数值模拟研究。如 KIMOTO 等^[8]建立了一个包含临界状态模型的多场耦合模型对含水合物沉积介质的力学性质进行了数值模拟研究。

在文献调研的基础上, 本文总结了含水合物沉积介质力学试验研究取得的共识, 对水合物沉积介质的力学本构模型和数值模拟研究进行了分析并对下一步研究提出了建议。

1 含水合物沉积介质力学性质试验研究

含水合物沉积介质的应力-应变关系及其影响因素是研究含水合物沉积介质力学性质的基础。为此, 根据水合物高压低温的赋存特点, 科研人员对岩土力学的研究手段进行了改进, 深入研究了含水合物沉积介质的力学性质。YUN 等^[9]利用四氢呋喃合成水合物沉积介质, 调查了水合物饱和度对沉积介质强度的影响。MIYAZAK 等^[5]测量了含水合物沉积介质强度、刚度、割线泊松比受水合物饱和度和围压的影响。JUNG 等^[10]研究了不同客体分子水合物的胶结性和拉伸强度。PRIEST 等^[11]通过共振柱试验测试了含水合物沉积介质在小应变条件下的力学

性质。HYODO 等^[12]研究了水合物开采过程中水合物分解对沉积介质的力学性质的影响。虽然试验条件存在差异, 但力学性质的实验研究仍取得了系列共识: (1) 含水合物沉积介质的剪切强度随水合物饱和度增大而增大, 水合物的分解将导致沉积介质力学强度降低; (2) 含水合物沉积介质强度和试验条件相关, 如围压、加载速率、初始孔隙率等。

2 含水合物沉积介质力学模型

含水合物沉积介质的力学模型是以应力-应变关系为研究对象, 结合大量的试验数据, 在适当简化的前提下建立的, 能够描述沉积介质基本力学特性的数学表达方程(组)。与经典的岩土力学本构模型相比较, 用于含水合物沉积介质的力学模型还比较少。其中, 部分模型采用了摩尔-库伦强度理论。在各种模型中, 邓肯-张模型和临界状态模型是应用较多、较具有代表性的模型。

2.1 摩尔-库伦强度理论

根据库伦强度理论, 材料抗剪强度的表达式为:

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + c \quad (1)$$

式中: τ_f 为抗剪强度, MPa; σ 为总应力, MPa; φ 为内摩擦角, °; c 为粘聚力, MPa。根据材料的应力状态, 可以得到材料的摩尔应力圆, 把摩尔应力圆与库伦强度线相切的应力状态作为材料的破坏准则, 即摩尔-库伦破坏准则。后文中的部分模型都利用了摩尔-库伦破坏准则。

KLAR 等^[13]将含水合物沉积介质的刚度, 粘聚力和剪胀角看作水合物饱和度(S_h)的函数, 利用摩尔-库伦破坏准则, 建立了含水合物沉积介质的弹塑性力学模型。

应力-应变关系:

$$\sigma' = D_{hs}^e (\varepsilon - \varepsilon^p) + D_{hs}^e D_{hs}^{e-1} (\sigma' - \sigma_0') \quad (2)$$

式中: σ' 为有效应力, MPa; σ_0' 原位有效应力, MPa; ε 为应变; ε^p 为塑性应变; D_{hs}^e 为水合物沉积介质的弹性刚度, MPa; D_{hs}^e 是水合物饱和度(S_h)的函数。

塑性应变表达式:

$$\varepsilon^p = \lambda \delta g / \partial \sigma' \quad (3)$$

式中, λ 为缩放系数, 保证应力点落在屈服面上。

基于摩尔-库伦破坏准则的屈服函数和势函数分别为：

$$f = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi - 2c\sqrt{N_\phi} \quad (4)$$

$$g = \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi \quad (5)$$

式中， σ_1 和 σ_3 分别为最大、最小主应力，MPa； C 为粘聚力，MPa，是水合物饱和度 (S_h) 的函数； N_ϕ 为内摩擦角 ϕ ($^\circ$) 的函数； N_ψ 为剪胀角 ψ ($^\circ$) 函数。

弹性力学模型可以描述水合物沉积介质的应变硬化过程，但是无法准确描述应变软化过程并且无法体现水合物胶结性。此外，以库伦-摩尔强度理论为基础的邓肯-张模型，以其形式简单，参数物理意义明确而得到了广泛的应用。

2.2 邓肯-张模型

DUNCAN 等^[14]根据岩石的应力-应变的双曲线关系特征，结合实验数据，假定在常规三轴压缩实验中，轴向应变与侧向应变间也存在双曲关系，采用摩尔-库伦强度准则，建立了非线性弹性本构模型，也称为邓肯-张模型。该模型是经典的岩土力学模型，因其形式简单在岩土工程领域应用较为广泛。

应力-应变关系：

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b \cdot \varepsilon_1} \quad (6)$$

切线弹性模量 E_t ：

$$E_t = \left(1 - R_f \frac{q}{q_f}\right)^2 \cdot E_i \quad (7)$$

切线泊松比 ν_t ：

$$\nu_t = \frac{\nu_i}{(1 - D\varepsilon_1)^2} \quad (8)$$

式中， q 为偏差应力，MPa； q_f 为破坏强度，MPa； σ_1 和 σ_3 分别为最大、最小主应力，MPa； ε_1 为轴向应变， E_i 为初始弹性模量，MPa； ν_i 为初始泊松比； E_t 为切线弹性模量，MPa； ν_t 为切线泊松比， R_f 为破坏比。

MIYAZAKI 等^[15]将水合物饱和度 (S_h) 和有效围压 (σ_3') 引入邓肯-张模型，给出了含水合物沉积介质的初始弹性模量、切线弹性模量、侧向应变和切线泊松比的表达式：

$$E_i = 1 + \gamma \cdot S_h^\delta \quad (9)$$

$$E_t = \left(1 - R_f \frac{q}{q_f}\right)^2 \cdot E_i \quad (10)$$

$$q_f = \frac{2 \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} c_0 + \alpha S_h^\beta + \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3' \quad (11)$$

$$\nu_i = \nu_{i1} - m \log(\sigma_3' / Pa) \quad (12)$$

$$\varepsilon_1 = -(l \cdot \varepsilon_1^2 + \varepsilon_1) \cdot \nu_i \quad (13)$$

$$\nu_t = (2 \cdot l \cdot \varepsilon_1 + 1) \cdot \nu_i \quad (14)$$

式中， ε_1 为侧向应变， α 、 β 、 γ 、 δ 、 l 为试验拟合系数， ν_{i1} 、 m 为材料参数。

YU 等^[16]通过试验研究，将水合物沉积介质应力-应变关系分为快速破坏阶段和完全破坏阶段，并认为这两个阶段都受温度的影响，将温度引入邓肯-张模型。

$$q = \frac{\varepsilon_1}{\frac{1}{(1 - R_f)E_{i1} + R_f E_{i2}} + \frac{\varepsilon_1}{(1 - R_f)q_{ult1} + R_f q_{ult2}}} \quad (15)$$

式中， E_{i1} 和 E_{i2} 分别为快速破坏阶段和完全破坏阶段的初始弹性模量，MPa； q_{ult1} 和 q_{ult2} 分别为快速破坏阶段和完全破坏阶段的偏差应力的渐进值，MPa； R_f 为破坏比。

由于模型假设条件的限制，修正后的邓肯-张模型可以描述水合物沉积介质应力-应变关系的弹性、弹塑性阶段，但无法准确描述塑性变形阶段。所以在研究水合物沉积介质塑性变形时并不适用。

目前，水合物沉积介质邓肯-张模型不能同时研究饱和度、围压、温度等因素的影响。因此，对邓肯-张模型进行进一步修正，使其能够包含更多的影响因素是值得深入的研究方向。

2.3 临界状态模型

临界状态模型是修正经典剑桥模型得到的，即采用帽子屈服面、相适应的流动规则并以塑性体应变为硬化参数。与邓肯-张模型相比较，临界状态模型可以较为全面的描述沉积介质的力学性质。

SULTAN 等^[17]用天然粘土合成含水合物沉积介质并进行试验，将水合物饱和度引入到临界状态模型的框架中，构建了弹塑性本构模型。

水合物沉积介质剪切模量：

$$G = \frac{E_0 + S_h \cdot E}{2(1+\nu)} \quad (16)$$

水合物沉积介质泊松比为:

$$\nu = \frac{K}{1+K} \quad (17)$$

屈服函数:

$$q = \frac{\frac{2}{3} p' q_0}{p_0} \pm \left[M^2 (p' p_0 - p^2) + \frac{1}{9} \frac{q_0^2}{p_0^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

式中: E_0 和 E 分别为水饱和和沉积介质和水合物沉积介质的杨氏弹性模量, MPa; S_h 为水合物饱和度, %; ν 为水合物沉积介质泊松比; K 为测压系数; q 为偏差应力, Mpa; p' 为平均有效应力; p_0' 为最大平均有效应力; q_0 为最大偏差应力。

模型的缺点是不能给出峰值强度以及应力随应变平滑减小的强度软化行为, 且其部分参数的物理意义不甚明确。

UCHIDA 等^[7]在传统临界状态模型的基础上引入了五个模型参数, 建立了一个适用于水合物降压开采过程的甲烷水合物临界状态模型 (MHBS)。

屈服函数:

$$f = q^2 + M^2 (p' + p_{cc}') [p' - (p_{cs}' + p_{cd}' + p_{cc}')] \quad (19)$$

弹性模量:

$$G = \frac{3K'(1-2\nu)}{2(1+\nu)} + m_2 S_h^{mec} \quad (20)$$

应力-应变关系:

$$d\sigma' = D_{hs}^e d\varepsilon^e + D_h^e \chi dS_h + \frac{\partial \sigma'}{\partial T} dT \quad (21)$$

式中: q 为偏差应力, Mpa; p' 为平均有效应力, Mpa; p_{cs}' 为体积屈服应力, Mpa; p_{cc}' 和 p_{cd}' 为硬化参数, Mpa; ε^e 为弹性应变; R 为一次加载面比、 χ 为水合物分解因子; f 为屈服函数; S_h 为水合物饱和度; S_h^{mec} 为水合物力学饱和度; G 为弹性模量、 K' 为弹性体积刚度, Mpa; ν 为泊松比; T 为温度, K。

表 1 含水合物沉积介质力学模型比较

Table 1 Comparison of the models

参数	采用摩尔-库伦理论			临界状态模型	
	KLAR 等 ^[13]	邓肯-张模型		SULTAN 等 ^[17]	UCHIDA 等 ^[7]
		MIYAZAKI 等 ^[15]	YU 等 ^[16]		
刚度 / Mpa	√	√	√	√	√
强度 / Mpa	√	√	√		√
剪胀性	√	√		√	√
应变软化				√	√
体积屈服				√	√
胶结性					√

UCHIDA 等^[7]分别利用临界状态模型和摩尔-库伦模型对含水合物沉积介质的受力变形进行了数值模拟研究, 发现利用临界状态模型获得更大的垂向应变。这与临界状态模型能够描述应变软化有关。

除以上两个模型外, 还有学者对含水合物沉积介质临界状态模型进行了进一步的修正。SHEN 等^[18]将水合物饱和度引入临界状态线 (CSL) 方程来修正含水合物沉积介质临界状态模型。该模型能更好的描述应力-应变关系和体积应变规律。SUN 等^[19]采用耗散理论和不相适应的流动规则, 提出了基于热

力学原理的临界状态模型, 模型能够描述非椭圆形的屈服面和不同应力方向下临界状态线的斜率。

表 1 可以看出, 相比于其他模型, 临界状态模型可以较为全面的描述力学性质。但临界状态模型中有些参数物理意义不明确, 应该对模型进行进一步研究选用物理意义明确的模型参数。

2.4 其他模型

此外, 损伤理论、等效弹性模量混合率理论等也在部分含水合物沉积介质力学模型中得到了应用。吴二林等^[20]基于损伤理论, 推导出水合物饱和

度和等效弹性常数之间关系,得到损伤变量的表达式,建立了含水合物沉积介质的损伤统计本构模型。杨期君等^[21]从颗粒间的作用机制出发,采用修正剑桥模型和弹性损伤模型对沉积介质骨架和水合物胶结的应力-应变关系进行描述,建立了弹塑性损伤本构模型,模型所需参数少但参数的物理意义明确。刘乐乐等^[22]认为含水合物沉积介质由沉积介质骨架、水合物、孔隙流体组成。将沉积介质骨架和孔隙流体视为基相,将水合物视为夹杂相,使用应力串联、应变并联模型建立水合物沉积介质的等效弹性模量混合率模型。PINKERT等^[23]将体积应变和水合物饱和度直接关联,建立了剪切应变与粘聚力的关系。提出了描述水合物沉积介质应力-应变全过程的力学本构模型。

3 含水合物沉积介质力学性质数值模拟研究

含水合物沉积介质受力变形过程是一个多物理场耦合的过程,其中考虑热-渗流-力学-化学(THMC)综合作用的多场耦合数值模拟研究能够比较全面的研究含水合物沉积介质的力学性质和力学行为。广泛应用的有 TOUGH+HYDRATE 和 FLAC3D 耦合、颗粒流模型(PFC)。

3.1 TOUGH+HYDRATE 和 FLAC3D 耦合

TOUGH+HYDRATE 是应用最广泛的水合物数值模拟工具,可以模拟多相、多组分水合物系统的非等温气体释放、相态变化、流体流动和热流动等过程;FLAC3D 可以对材料的受力特性和塑性流动进行分析。二者的耦合可以对更为复杂的含水合物沉积介质力学过程进行模拟^[24]。

RUTQVIST等^[25]使用 TOUGH+HYDRATE 和 FLAC3D 模拟了直井中热液流动、降压开采、施加垂向载荷对含水合物沉积层力学性质的影响。结果表明,无论是热激法开采还是降压法开采,靠近海底的浅层沉积介质的力学稳定性最差。KIM等^[26]将沉积介质看成非线性弹性体,采用了摩尔-库伦破坏准则,研究了水合物沉积介质中流体流动和力学性质之间的相互作用。研究发现,水合物分解产生的气体会导致孔隙压力升高,但随着压力的传播,孔隙压力会逐渐降低。

3.2 颗粒流模型(PFC)

PFC 在离散材料研究领域应用广泛^[27]。含水合物沉积介质由大量沉积颗粒通过胶结作用聚集成形,可以将其看做离散材料。

HOLTZMAN等^[28]用离散元的方法研究了水合物分解、孔压、围压对沉积介质弹性模量的影响。数值模拟结果与试验结果相符,表明 PFC 可以模拟含水合物沉积介质的力学特性。JUNG等^[29]通过 PFC 研究了水合物的分布、饱和度、孔隙度、围压等对含水合物沉积介质应力-应变关系的影响。蒋明镜等提出综合温度和压力的二维离散元模型。在此基础上,通过颗粒流模拟软件 PFC 研究了不同饱和度水合物沉积介质的力学性质和应变局部化(剪切带的形成)^[30]。随后蒋明镜等^[31]又进行了补充研究,利用颗粒流软件 PFC 模拟水合物沉积介质的三轴试验,揭示了孔隙压力与宏观力学性质之间的关系。贺洁等^[32]则通过 PFC 对孔隙填充型水合物沉积介质进行了真三轴试验的离散元模拟。分析了中主应力对力学性质的影响。除了对力学试验过程进行数值模拟研究,JIANG等^[33]利用 PFC 还对水合物物藏的热激和降压开采过程进行 THM 的三场耦合数值模拟研究,数值模拟结果与试验结果相符。

针对含水合物沉积介质,PFC 既可以对力学性质进行数值模拟研究,也可以对沉积层力学行为进行多场耦合数值模拟研究。其优势是可以从微观尺度研究含水合物沉积介质的力学性质和力学行为。但其对颗粒的数量、形状、级配以及排列方式都进行了简化,这与沉积介质中颗粒的实际存在状态差异较大。

3.3 其他数值模拟研究

由于 THMC 多场耦合研究考虑的影响因素较为全面,目前越来越多的学者进行 THMC 多场耦合数值模拟研究,但耦合方式复杂,技术并未完全成熟。不同的学者设计开发的 THMC 耦合软件,其耦合方式和计算内核存在差异。SHUBHANGI等^[34]建立了含水合物沉积介质的 THMC 多场耦合模型,并利用该模型对沉积介质中的水合物生成和分解过程中的力学性质的变化进行了数值模拟研究。发现在水合物生成和分解阶段的沉积介质的应力-应变关系是不同的。LIU等^[35]在 KIMOTO^[8]力学模型基础上,利用有限元方法,模拟了孔隙介质中水合物分解对

沉积介质的影响。研究了不同水合物储层之间的气体运移、水合物分布特征。

4 结论与建议

含水合物沉积介质力学性质是研究含水合物沉积层稳定性的基础,对于环境安全、开采安全具有重要影响。本文对水合物沉积介质力学性质、力学模型和力学数值模拟研究进行了总结。

(1) 力学模型是建立在试验数据基础上的,目前含水合物沉积介质的力学性质试验数据几乎都是由室内人工合成的样品得到的,与原位数据存在差别,未来应该改进试验手段或降低原位测量的成本,以获取准确的原位力学性质,为建立准确的力学模型提供数据基础。此外,研究中微观测量技术使用较少,影响了对微观机理的认识,应给予加强。

(2) 文献报道的含水合物沉积介质力学本构模型已有数个,但应用较多的力学本构模型有邓肯-张模型和临界状态模型。其中邓肯-张模型形式简单,可以描述沉积介质的应变硬化阶段,但无法准确描述应变软化阶段,而且修正后的邓肯-张模型考虑的影响因素较少,不能同时考虑水合物饱和度,围压,温度的影响。临界状态模型可以描述应力-应变的全过程,但形式较为复杂,且部分参数物理意义不明确。因此建立能相对全面的描述力学性质、参数物理意义明确的力学本构模型是值得深入研究的方向。

(3) 水合物沉积介质的力学数值模拟相关研究主要应用于海底边坡沉降滑塌研究、开采过程中储层变形研究等。针对同一问题,如:研究降压开采条件下地层的形变量,采用不同的力学本构模型会得到差异较大的结果,因此,谨慎选取简化条件、模型参数与研究对象相符的模型是进行数值模拟研究重要的前期工作。此外,野外的实测数据较少,模型缺乏原位数据校验也制约了数值模拟研究工作的深入。

参考文献:

[1] SLOAN E D JR. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates[J]. *Nature*, 2003, 426(6964): 353-363. DOI: 10.1038/nature02135.
 [2] WALLMANN K, PINERO E, BURWICZ E, et al. The global inventory of methane hydrate in marine sediments: A theoretical approach[J]. *Energies*, 2012, 5(7): 2449-2498. DOI: 10.3390/en5072449.

[3] SULTAN N, COCHONAT P, FOUCHER J P, et al. Effect of gas hydrates melting on seafloor slope instability[J]. *Marine geology*, 2004, 213(1/4): 379-401. DOI: 10.1016/j.margeo.2004.10.015.
 [4] 宁伏龙. 天然气水合物地层井壁稳定性研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2005.
 [5] MIYAZAKI K, MASUI A, SAKAMOTO Y, et al. Triaxial compressive properties of artificial methane-hydrate-bearing sediment[J]. *Journal of geophysical research*, 2011, 116(B6): B06102. DOI: 10.1029/2010JB008049.
 [6] YONEDA J, MASUI A, KONNO Y, et al. Mechanical behavior of hydrate-bearing pressure-core sediments visualized under triaxial compression[J]. *Marine and petroleum geology*, 2015, 66: 451-459. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2015.02.028.
 [7] UCHIDA S, SOGA K, YAMAMOTO K. Critical state soil constitutive model for methane hydrate soil[J]. *Journal of geophysical research*, 2012, 117(B3): B03209. DOI: 10.1029/2011JB008661.
 [8] KIMOTO S, OKA F, FUSHITA T, et al. A chemo-thermo-mechanically coupled numerical simulation of the subsurface ground deformations due to methane hydrate dissociation[J]. *Computers and geotechnics*, 2007, 34(4): 216-228. DOI: 10.1016/j.compgeo.2007.02.006.
 [9] YUN T S, SANTAMARINA J C, RUPPEL C. Mechanical properties of sand, silt, and clay containing tetrahydrofuran hydrate[J]. *Journal of geophysical research*, 2007, 112(B4): B04106. DOI: 10.1029/2006JB004484.
 [10] JUNG J W, SANTAMARINA J C. Hydrate adhesive and tensile strengths[J]. *Geochemistry, geophysics, geosystems*, 2011, 12(8): Q08003. DOI: 10.1029/2010GC003495.
 [11] PRIEST J A, DRUCE M, ROBERTS J, et al. PCATS Triaxial: A new geotechnical apparatus for characterizing pressure cores from the Nankai Trough, Japan[J]. *Marine and petroleum geology*, 2015, 66: 460-470. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2014.12.005.
 [12] 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. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2013.11.015.
 [13] KLAR A, SOGA K, NG M Y A. Coupled deformation—flow analysis for methane hydrate extraction[J]. *Géotechnique*, 2010, 60(10): 765-776. DOI: 10.1680/geot.9.P.079-3799.
 [14] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 1970, 96(5): 1629-1653.
 [15] MIYAZAKI K, TENMA N, AOKI K, et al. A nonlinear elastic model for triaxial compressive properties of artificial methane-hydrate-bearing sediment samples[J]. *Energies*, 2012, 5(12): 4057-4075. DOI: 10.3390/en5104057.
 [16] YU F, SONG Y C, LIU W G, et al. Analyses of stress strain behavior and constitutive model of artificial methane hydrate[J]. *Journal of petroleum science and engineering*, 2011, 77(2): 183-188. DOI: 10.1016/j.petrol.2011.03.004.
 [17] SULTAN N, GARZIGLIA S. Geomechanical constitutive modelling of gas-hydrate-bearing sediments[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011). Edinburgh, Scotland, United Kingdom: ICGH, 2011.
 [18] SHEN J, CHIU C F, NG C W W, et al. A state-dependent critical state model for methane hydrate-bearing sand[J].

- Computers and geotechnics, 2016, 75: 1-11. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.01.013.
- [19] SUN X, GUO X X, SHAO L T, et al. A thermodynamics-based critical state constitutive model for methane hydrate bearing sediment[J]. Journal of natural gas science and engineering, 2015, 27: 1024-1034. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.09.048.
- [20] 吴二林, 韦昌富, 魏厚振, 等. 含天然气水合物沉积物损伤统计本构模型[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 60-65.
- [21] 杨期君, 赵春风. 含气水合物沉积物弹塑性损伤本构模型探讨[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 991-997.
- [22] 刘乐乐, 张旭辉, 刘昌岭, 等. 含水合物沉积物等效弹性模量混合律模型[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(S2): 425-428, 442.
- [23] PINKERT S, GROZIC J L H. Prediction of the mechanical response of hydrate-bearing sands[J]. Journal of geophysical research, 2014, 119(6): 4695-4707. DOI: 10.1002/2013JB010920.
- [24] RUTQVIST J. Status of the TOUGH-FLAC simulator and recent applications related to coupled fluid flow and crustal deformations[J]. Computers & geosciences, 2011, 37(6): 739-750. DOI: 10.1016/j.cageo.2010.08.006.
- [25] RUTQVIST J, MORIDIS G J, GROVER T, et al. Coupled multiphase fluid flow and wellbore stability analysis associated with gas production from oceanic hydrate-bearing sediments[J]. Journal of petroleum science and engineering, 2012, 92-93: 65-81. DOI: 10.1016/j.petrol.2012.06.004.
- [26] KIM J, MORIDIS G, YANG D, et al. Numerical studies on two-way coupled fluid flow and geomechanics in hydrate deposits[J]. SPE journal, 2012, 17(2): 485-501. DOI: 10.2118/141304-PA.
- [27] 姜浩. 离散元在含可燃冰土层及碎石料力学特性研究中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [28] HOLTZMAN R, SILIN D B, PATZEK T W. Micromechanics of hydrate dissociation in marine sediments by grain-scale simulations[C]//SPE Western Regional and Pacific Section AAPG Joint Meeting. Bakersfield, California, USA: SPE, 2008. DOI: 10.2118/114223-MS.
- [29] JUNG J W, SANTAMARINA J C, SOGA K. Stress-strain response of hydrate-bearing sands: Numerical study using discrete element method simulations[J]. Journal of geophysical research, 2012, 117(B4): B04202. DOI: 10.1029/2011JB009040.
- [30] JIANG M J, ZHU F Y, UTILI S. Investigation into the effect of backpressure on the mechanical behavior of methane-hydrate-bearing sediments via DEM analyses[J]. Computers and geotechnics, 2015, 69: 551-563. DOI: 10.1016/j.compgeo.2015.06.019.
- [31] 蒋明镜, 贺洁. 三维离散元单轴试验模拟甲烷水合物宏观三轴强度特性[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2692-2701.
- [32] 贺洁, 蒋明镜. 孔隙填充型能源土的宏微观力学特性真三轴试验离散元分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 3026-3034, 3040. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.10.038.
- [33] JIANG M J, FU C, CUI L, et al. DEM simulations of methane hydrate exploitation by thermal recovery and depressurization methods[J]. Computers and geotechnics, 2016, 80: 410-426. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.05.011.
- [34] GUPTA S, DEUSNER C, HAECKEL M, et al. Testing a thermo-chemo-hydro-geomechanical model for gas hydrate-bearing sediments using triaxial compression laboratory experiments[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2017, 18(9): 3419-3437. DOI: 10.1002/2017GC006901.
- [35] LIU Z, YU X. Thermo-hydro-mechanical-chemical simulation of methane hydrate dissociation in porous media[J]. Geotechnical and geological engineering, 2013, 31(6): 1681-1691. DOI: 10.1007/s10706-013-9696-5.

作者简介:

张峰(1993-),男,硕士研究生,主要从事海洋地质和天然气水合物数值模拟研究工作。

刘丽华(1968-),女,博士,副研究员,主要从事天然气水合物、环境地球化学、地球化学数值模拟和实验模拟研究工作。