

水合物沉积物的力学本构模型 及参数离散元计算*

周 博, 王宏乾, 王 辉, 薛世峰

(中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 为有效描述水合物沉积物在不同水合物饱和度与围压情况下的力学行为,该文基于广义 Hooke(胡克)定律建立了水合物沉积物的应力-应变关系方程和弹性模量弱化方程;基于三轴压缩试验确定了水合物沉积物的软化系数和软化指数,基于颗粒流程序(PFC^{3D})开发了水合物沉积物初始弹性模量的离散元算法(DEM)。利用建立的应力-应变关系方程、弹性模量弱化方程和初始弹性模量 DEM,数值模拟了水合物沉积物在6种不同水合物饱和度与围压情况下的力学行为。数值模拟结果与三轴压缩试验结果的对比表明,建立的应力-应变关系方程、弹性模量弱化方程和初始弹性模量 DEM,能有效预测水合物沉积物的力学行为,可为水合物井筒设计与安全开采提供理论基础和计算方法。

关键词: 水合物沉积物; 力学本构模型; 水合物饱和度; 围压; 离散元法

中图分类号: TU411

文献标志码: A

DOI: 10.21656/1000-0887.390284

引 言

天然气水合物是水和天然气在高压、低温条件下形成的固态化合物,通常以水合物沉积物的形式稳定存在于深海沉积物区和陆域永冻带^[1]。水合物分布广、储量大、热值高、污染小,被称为21世纪潜在新能源^[2]。海域水合物储层比传统油气储层具有更复杂的力学特性,直接采用传统油气开采技术开采水合物,容易引起海底滑坡、钻井井壁失稳、海上钻井平台基础不均匀沉降等安全问题^[3]。研究水合物沉积物的力学特性,建立预测其在复杂载荷条件下的力学行为的本构模型,可为水合物钻井设计与安全开采提供重要的力学基础。

水合物的特殊赋存条件致使不易钻取水合物储层的原样试件,目前主要通过人工合成试样,试验研究水合物沉积物的力学特性。于锋等^[4]和 Song 等^[5]对水合物人工试样进行了三轴压缩试验,研究了屈服应变、屈服强度等力学特性随围压和温度的变化情况。Li 等^[6]针对陆域永冻带水合物沉积物,试验研究了不同开采技术下水合物开采过程中水合物沉积物的力学行为。鲁晓兵等^[7]制备了海域水合物沉积物人工试样,通过三轴压缩试验研究了水合物沉积物的

* 收稿日期: 2018-11-12; 修订日期: 2018-11-21

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0307604)

作者简介: 周博(1972—),男,教授,博士,博士生导师(通讯作者。E-mail: zhoubo@upc.edu.cn);

王宏乾(1993—),男,硕士生;

王辉(1995—),男,硕士生;

薛世峰(1963—),男,教授,博士生导师。

变形和破坏等力学特性,利用分段函数描述了应力-应变曲线,Zhu 等^[8]通过动态三轴压缩试验研究了水合物沉积物在地震载荷作用下的动力学特性。

建立描述水合物沉积物力学行为的理论模型,是研究水合物钻井结构力学特性和保障安全开采的重要前提.Zhang 等^[9]提出了一种水合物沉积物弹性模量的计算模型,并通过三轴压缩试验和 CT 观测验证了计算模型的有效性.Yu 等^[10-11]提出了修正 Duncan-Chang 本构模型,描述了水合物沉积物在不同温度、围压及加载率情况下的力学特性.Song 等^[12-13]基于 Mohr-Coulomb 和 Duncan-Chang 准则建立了考虑水合物分解的力学本构模型,描述了水合物分解对水合物沉积物力学特性的影响.吴二林等^[14]基于连续介质损伤理论,假设了水合物沉积物损伤变量的演化规律,建立了水合物沉积物的弹性损伤本构模型.杨期君等^[15]基于修正 Cambridge(剑桥)模型和弹性损伤模型,描述了沉积物骨架及水合物胶结的应力-应变关系,假定水合物胶结作用的损伤演化规律,建立了水合物沉积物的弹塑性损伤本构模型.刘乐乐等^[16]提出了水合物沉积物等效弹性模量计算公式,改进了水合物沉积物的力学本构模型,描述了内聚力和摩擦角与围压和水合物饱和度间的关系.李彦龙等^[17-18]和颜荣涛等^[19]假设水合物沉积物强度服从 Drucker-Prager 准则和 Weibull 分布,建立了有效描述水合物沉积物力学行为的损伤本构模型,考虑了水合物赋存形式对水合物沉积物本构行为的影响.上述理论模型主要借鉴岩土材料损伤理论,描述水合物沉积物在不同水合物饱和度和围压情况下的力学行为,若要精确预测水合物沉积物的力学行为,需要引入较多的材料参数,这使其在研究水合物钻井结构力学特性等方面的应用存在限制。

本文基于广义 Hooke 定律,建立了复杂应力状态下水合物沉积物的力学本构模型(应力-应变关系方程和弹性模量弱化方程);基于颗粒流软件(PFC^{3D}),开发了水合物沉积物初始弹性模量的 DEM.数值计算结果和试验结果的对比表明,建立的力学本构模型能有效预测不同水合物饱和度与围压情况下水合物沉积物的力学行为.由于建立的力学本构模型参数少、物理意义明确,因此便于在研究水合物钻井结构力学特性等方面的实际应用,可为保障水合物安全开采提供理论基础和计算方法。

1 力学本构模型

1.1 应力-应变关系方程

根据弹性理论,各向同性线弹性材料的应力-应变关系表述为

$$\sigma_{ij} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{ij}, \quad (1)$$

其中, σ_{ij} 和 ε_{ij} 分别为应力张量和应变张量, E 和 ν 分别为弹性模量和 Poisson(泊松)比,

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (2)$$

为 Kronecker delta 符号。

水合物沉积物三轴压缩试验^[20-21]表明,水合物沉积物的应力-应变关系具有明显的非线性和应变软化特性.为解释水合物沉积物的力学性质,可以将其理解为由岩土颗粒和水合物构成的两相复合材料,沉积物中的水合物对岩土颗粒具有胶结作用,随着应变的增加此胶结作用逐渐减弱甚至破坏,在宏观上就表现为应变软化特性.为有效描述水合物沉积物的非线性和应变软化特性,将其弹性模量描述为应力状态和应变状态的函数,即

$$E = E(\lambda_\sigma, \lambda_\varepsilon), \quad (3)$$

其中, λ_σ 和 λ_ε 分别为应力状态参数和应变状态参数. 将式(3)代入式(1), 得到水合物沉积物的本构方程:

$$\sigma_{ij} = \frac{E(\lambda_\sigma, \lambda_\varepsilon)\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + \frac{E(\lambda_\sigma, \lambda_\varepsilon)}{1+\nu} \varepsilon_{ij}. \quad (4)$$

在主应力空间或主应变空间, 水合物沉积物的本构方程(4)可表示为

$$\sigma_1 = \frac{E(\lambda_\sigma, \lambda_\varepsilon)}{1+\nu} \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \theta + \varepsilon_1 \right), \quad (5a)$$

$$\sigma_2 = \frac{E(\lambda_\sigma, \lambda_\varepsilon)}{1+\nu} \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \theta + \varepsilon_2 \right), \quad (5b)$$

$$\sigma_3 = \frac{E(\lambda_\sigma, \lambda_\varepsilon)}{1+\nu} \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \theta + \varepsilon_3 \right), \quad (5c)$$

其中

$$\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (6)$$

为水合物沉积物的体积应变.

合理确定水合物沉积物弹性模量的演化规律, 是正确描述水合物沉积物应力-应变关系的关键. 下文将基于水合物沉积物的三轴压缩试验曲线, 推导描述水合物沉积物弹性模量随应力状态和应变状态变化规律的弹性模量演化方程.

1.2 弹性模量弱化方程

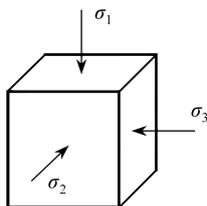


图1 三轴压缩试验的应力状态

Fig. 1 The stress state of the triaxial compression test

图1为三轴压缩试验的应力状态微元体, 其中 σ_1 为轴向应力、 σ_2 和 σ_3 为侧向应力, 根据主应力空间水合物沉积物的应力-应变关系式(5), 可得到

$$\Delta\sigma = E(\lambda_\sigma, \lambda_\varepsilon) \varepsilon_1 - (1-2\nu)\sigma_0, \quad (7)$$

其中

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \quad (8)$$

称为平均围压,

$$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_0 \quad (9)$$

称为偏应力. 设 $\Delta\sigma = 0$ 时 $\varepsilon_1 = \varepsilon_0$, 则根据式(7)可得

$$\varepsilon_0 = \frac{1-2\nu}{E(\lambda_\sigma, \lambda_\varepsilon)} \sigma_0. \quad (10)$$

将 $\varepsilon_a = \varepsilon_1 - \varepsilon_0$ 定义为轴向应变, 则根据式(7)和式(10)可以得到

$$\Delta\sigma = E(\lambda_\sigma, \lambda_\varepsilon) \varepsilon_a. \quad (11)$$

三轴压缩试验结果^[20-21]表明, 水合物沉积物的偏应力和轴向应变间的关系和围压有关,

为此将水合物沉积物的应力状态参数和应变状态参数分别取为

$$\lambda_{\sigma} = \sigma_3 \quad (12)$$

和

$$\lambda_{\varepsilon} = \varepsilon_a. \quad (13)$$

因此式(11)可改写为

$$\Delta\sigma = E(\sigma_3, \varepsilon_a) \varepsilon_a. \quad (14)$$

在围压恒定时,将弹性模量设为轴向应变的指数函数,即

$$E(\sigma_3, \varepsilon_a) = E_0 \exp[-A(\varepsilon_a)^n], \quad (15)$$

其中, E_0 为水合物沉积物的初始弹性模量, A 和 n 为待定参数, 分别称为软化系数和软化指数.

将式(15)代入式(14), 得到

$$\Delta\sigma = E_0 \varepsilon_a \exp[-A(\varepsilon_a)^n]. \quad (16)$$

根据式(16)可以得到

$$\frac{d\Delta\sigma}{d\varepsilon_a} = E_0 [1 - An(\varepsilon_a)^{n-1}] \exp[-A(\varepsilon_a)^n]. \quad (17)$$

将水合物沉积物三轴压缩试验得到的 $\Delta\sigma$ - ε_a 曲线最高点对应的 $\Delta\sigma$ 和 ε_a 分别称为峰值应力(记为 $\Delta\sigma_p$) 和峰值应变(记为 ε_p). 根据函数极值条件可知, 在 $\Delta\sigma$ - ε_a 曲线最高点由式(17)表示的偏应力对轴向应变导数等于 0, 据此可以得到

$$A = \frac{1}{n} (\varepsilon_p)^{-n}. \quad (18)$$

将式(18)代入式(15), 得到

$$E(\sigma_3, \varepsilon_a) = E_0 \exp\left[-\frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_p}\right)^n\right]. \quad (19)$$

为确定软化指数 n , 将式(19)代入式(14), 得到

$$\Delta\sigma = E_0 \varepsilon_a \exp\left[-\frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_p}\right)^n\right]. \quad (20)$$

将 $\Delta\sigma = \Delta\sigma_p$ 和 $\varepsilon_a = \varepsilon_p$ 代入式(20), 得到

$$\Delta\sigma_p = E_0 \varepsilon_p \exp\left(-\frac{1}{n}\right). \quad (21)$$

根据式(21)可以求得

$$n = \left[\ln\left(\frac{E_0 \varepsilon_p}{\Delta\sigma_p}\right) \right]^{-1}. \quad (22)$$

式(19)和式(22)一起构成了描述水合物沉积物的弹性模量弱化方程, 即

$$\begin{cases} E(\sigma_3, \varepsilon_a) = E_0 \exp\left[-\frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_p}\right)^n\right], \\ n = \left[\ln\left(\frac{E_0 \varepsilon_p}{\Delta\sigma_p}\right) \right]^{-1}, \end{cases} \quad (23)$$

其中, 峰值应力 $\Delta\sigma_p$ 和峰值应变 ε_p 均和围压及水合物饱和度相关.

应力-应变关系方程式(5)和弹性模量弱化方程式(23), 构成了可描述水合物沉积物非线性和应变软化特性的力学本构模型. 该本构模型中的初始弹性模量 E_0 是决定其力学行为的重要因素, 可以通过三轴压缩试验测定. 但由于水合物沉积物的原样试样不易获得和保存, 因此

很难通过三轴压缩试验测定其初始弹性模量。水合物沉积物是岩土颗粒和水合物颗粒混合而成,细观结构复杂,因此很难在理论上确定其初始弹性模量,数值模拟方法是确定它们的理想选择,下文将介绍一种计算水合物沉积物初始弹性模量的 DEM。

2 材料参数 DEM

水合物沉积物是水合物和岩土颗粒在低温、高压下形成的混合散体材料,其力学行为属于典型的非连续问题,DEM 是计算其初始弹性模量的理想选择。可利用 DEM 软件 PFC^{3D} 建立水合物沉积物的 DEM 模型,对其进行真三轴压缩的数值模拟,得到水合物沉积物在不同水合物饱和度和围压情况下的初始弹性模量。

在数值模拟中,水合物沉积物 DEM 模型为边长为 1 mm 的正方体,其中岩土颗粒和水合物均用圆球模拟,为了有效反映沉积物中岩土颗粒分布情况,岩土颗粒圆球直径采用与 Toyoura 砂类似的级配比进行生成,级配曲线如图 2 所示,直径取值范围为 0.1~0.4 mm。为保证 DEM 模型的生成效率,将水合物颗粒直径取为小于岩土颗粒直径的 0.08 mm。参照文献[20]的人工水合物沉积物试样,水合物沉积物 DEM 模型的初始孔隙率取为 0.38,岩土颗粒和水合物颗粒的密度分别取为 2.65 g/cm³和 0.30 g/cm³。

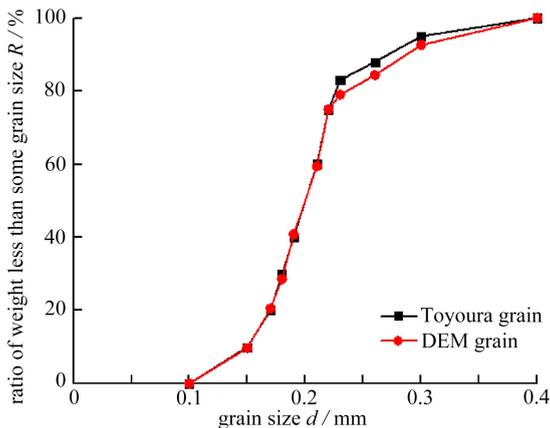


图 2 岩土颗粒的粒径级配曲线

Fig. 2 Grading curves for the soil grain sizes

表 1 水合物沉积物 DEM 模型的接触材料参数

Table 1 Contact material parameters for the DEM representative volume unit of hydrate-bearing sediments

parameter	normal stiffness $S_n / (\text{N/m})$	shear stiffness $S_s / (\text{N/m})$	normal bonding strength $S_{nb} / (\text{N/m})$	shear bonding strength $S_{sb} / (\text{N/m})$	friction coefficient f
soil particle	1.0×10^7	1.0×10^7	—	—	0.75
hydrate particle	1.8×10^7	1.8×10^7	8.3×10^6	8.3×10^6	0.50
soil-hydrate particle	1.8×10^7	1.8×10^7	8.3×10^6	8.3×10^6	0.50

生成水合物沉积物 DEM 模型的步骤包括: 1) 同时生成岩土粒和水合物颗粒。在试样生成初始阶段,通过计算将满足饱和度要求的水合物颗粒转化为级配曲线中的一部分,形成水合物沉积物级配曲线,据此同时生成符合要求的岩土颗粒和水合物颗粒。2) 平衡颗粒消除重叠量。为了保证计算的准确可靠性,在水合物和岩土颗粒生成之后,对所有颗粒进行再平衡,从而抵消颗粒在随机生成过程产生的重叠量。3) 颗粒的固结与平衡。为有效模拟水合物沉积物的真实固结状态,在生成的水合物沉积物 DEM 模型上施加 1.0 MPa 的固结压力,并使试样颗粒在固

结压力下相互接触最终平衡,4) 定义颗粒间的接触模型,岩土颗粒之间接触点赋予线性接触模型,岩土颗粒和水合物颗粒以及水合物颗粒之间的接触点赋予平行胶结模型,接触参数如表 1 所示,将用于加载轴向力的 6 个墙体均设置为刚性墙。

根据上述方法,最终生成如图 3 所示的 6 种不同饱和度的水合物沉积物 DEM 模型,其中浅色颗粒为岩土颗粒,深色颗粒为水合物颗粒。真三轴压缩的数值模拟过程如下:1) 利用 PFC^{3D}的伺服控制技术,通过控制 6 个墙体的移动速度对水合物沉积物 DEM 模型施加围压和轴向压应力,使 DEM 模型处于三向应力状态;2) 通过记录上、下墙体位移,得到轴向应变为 1%时的轴向压应力和围压的差值,通过公式

$$E_0 = \frac{\Delta\sigma}{\varepsilon_a} \Big|_{\varepsilon_a = 1\%} \tag{24}$$

计算水合物沉积物的初始弹性模量。

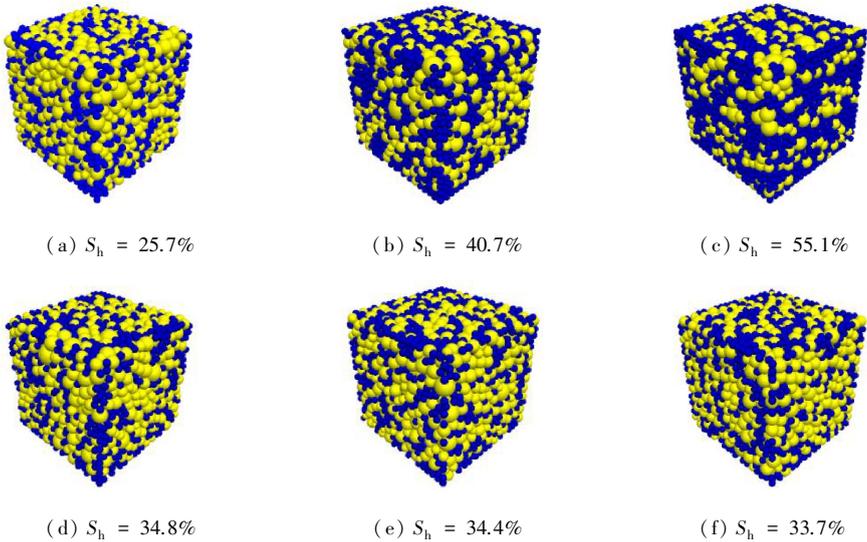


图 3 水合物沉积物的 DEM 模型

Fig. 3 DEM models for hydrate-bearing sediments

根据上述方法,计算图 3 所示不同水合物饱和度的水合物沉积物的 DEM 模型在不同围压下的初始弹性模量,计算结果如表 2 所示。

表 2 初始弹性模量的 DEM 计算结果

Table 2 Initial elastic moduli calculated with the DEM

	σ_3 /MPa	S_h /%	E_0 /GPa
fig. 3(a)	1.0	25.7	2.43
fig. 3(b)	1.0	40.7	3.82
fig. 3(c)	1.0	55.1	5.15
fig. 3(d)	1.0	34.8	2.85
fig. 3(e)	2.0	34.4	2.94
fig. 3(f)	3.0	33.7	3.32

3 数值算例分析

为验证本文建立的水合物沉积物力学本构模型,利用文献[20]中人工水合物沉积物试

样,在6种不同水合物饱和度与围压情况下的力学行为进行模拟计算,并与文献[20]中三轴压缩试验结果进行对比分析.在模拟计算中,水合物沉积物的初始弹性模量由上述DEM得到,如表1所示;水合物沉积物的峰值应力和峰值应变根据文献[20]中三轴压缩试验结果确定,如表3所示.

图4为围压等于1.0 MPa和不同水合物饱和度情况下的水合物沉积物试样的偏应力-轴向应变曲线,其中图4(a)、(b)和(c)分别为水合物饱和度等于25.7%、40.7%和55.1%情况下的偏应力-轴向应变曲线,实线为本文力学本构模型的计算结果,星号为文献[20]中的三轴压缩试验结果.对比本文力学本构模型的计算结果和文献[20]中的试验结果可知:本文建立的力学本构模型能有效预测水合物沉积物在不同水合物饱和度情况下的力学行为;本文开发的DEM能准确计算水合物沉积物在不同水合物饱和度情况下的初始弹性模量.

表3 峰值应力和峰值应变

Table 3 Peak stresses and peak strains

$S_h / \%$	25.7	40.7	55.1	34.8	34.4	33.7
σ_3 / MPa	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	3.0
$\Delta\sigma_p / \text{MPa}$	4.75	5.87	8.11	5.80	8.17	9.99
$\varepsilon_p / \%$	4.23	4.04	2.84	4.07	5.93	6.17

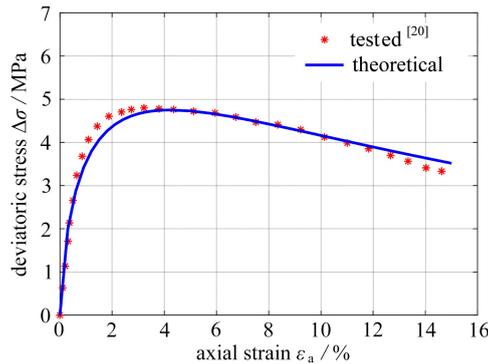
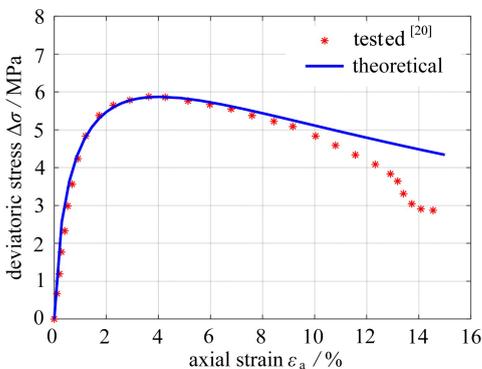
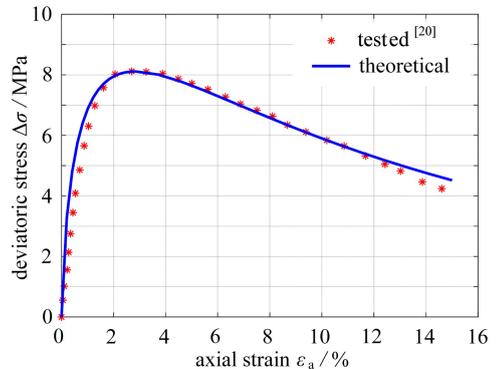
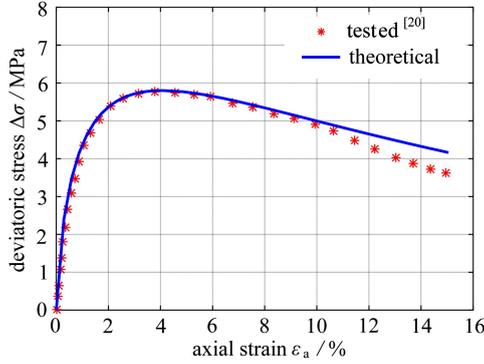
(a) $S_h = 25.7\%$, $\sigma_3 = 1.0 \text{ MPa}$ (b) $S_h = 40.7\%$, $\sigma_3 = 1.0 \text{ MPa}$ (c) $S_h = 55.1\%$, $\sigma_3 = 1.0 \text{ MPa}$

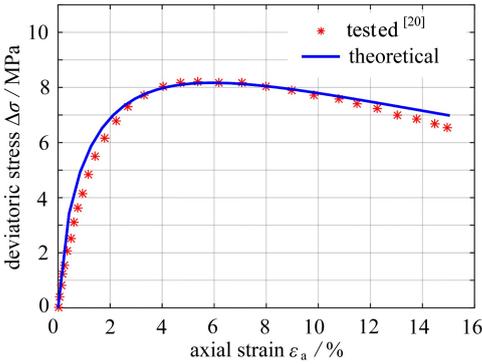
图4 不同水合物饱和度下水合物沉积物的偏应力-轴向应变曲线

Fig. 4 Deviatoric stress-axial strain curves for hydrate-bearing sediments under various saturation levels of hydrate

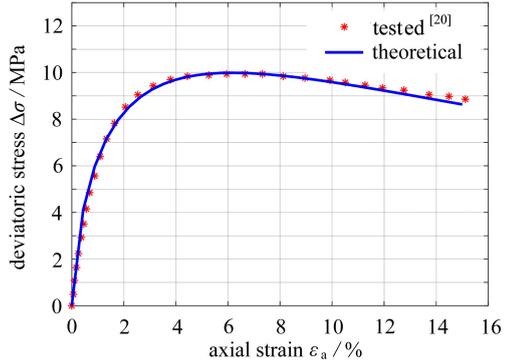
图 5 为水合物同饱和度在 33.7%~34.8% 之间和不同围压情况下的水合物沉积物试样的偏应力-轴向应变曲线,其中图 5(a)、(b)和(c)分别为围压等于 1.0,2.0,3.0 MPa 情况下的偏应力-轴向应变曲线,实线为本文力学本构模型的计算结果,星号为文献[20]中的三轴压缩试验结果.对比本文力学本构模型的计算结果和文献[20]中试验结果可知:本文建立的力学本构模型能有效预测水合物沉积物在不同围压下的力学行为;本文开发的 DEM 能准确计算水合物沉积物在不同围压下的初始弹性模量.



(a) $\sigma_3 = 1.0 \text{ MPa}$, $S_h = 34.8\%$



(b) $\sigma_3 = 2.0 \text{ MPa}$, $S_h = 34.3\%$



(c) $\sigma_3 = 3.0 \text{ MPa}$, $S_h = 33.7\%$

图 5 不同围压下水合物沉积物的偏应力-轴向应变曲线

Fig. 5 Deviatoric stress-axial strain curves for hydrate-bearing sediments under various confining pressures

4 结 论

1) 基于广义 Hooke 定律,建立了水合物沉积物的力学本构模型(应力-应变关系方程和弹性模量弱化方程),有效考虑了水合物饱和度与围压对力学行为的影响,利用三轴压缩试验确定了水合物沉积物的软化系数和软化指数.

2) 基于颗粒流软件(PFC^{3D}),开发了水合物沉积物初始弹性模量的 DEM,建立了 6 种不同水合物饱和度的水合物沉积物 DEM 模型,据此计算了水合物沉积物在 6 种不同水合物饱和度与围压情况下的初始模量.

3) 数值结果与试验结果的对比表明,开发的 DEM 能准确计算水合物沉积物在不同围压和水合物饱和度情况下的初始弹性模量,建立的力学本构模型能有效预测水合物沉积物在不

同围压和水合物饱和度情况下的力学行为。

4) 建立的水合物沉积物力学本构模型材料参数少、物理意义明确,便于工程实际应用,可为研究水合物钻井结构的力学特性、保障水合物安全开采提供理论基础和计算方法,具有理论和工程实际意义。

参考文献(References):

- [1] 思娜, 安雷, 邓辉, 等. 天然气水合物开采技术研究进展及思考[J]. 中国石油勘探, 2016, **21**(5): 52-61. (SI Na, AN Lei, DENG Hui, et al. Discussion on natural gas hydrate production technologies[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, **21**(5): 52-61. (in Chinese))
- [2] 张旭辉, 鲁晓兵, 刘乐乐. 天然气水合物开采方法研究进展[J]. 地球物理学进展, 2014, **29**(2): 858-869. (ZHANG Xuhui, LU Xiaobing, LIU Lele. Advances in natural gas hydrate recovery methods[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, **29**(2): 858-869. (in Chinese))
- [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.
- [4] 于锋, 宋永臣, 李洋辉, 等. 含冰甲烷水合物的应力与应变关系[J]. 石油学报, 2011, **32**(4): 687-692. (YU Feng, SONG Yongchen, LI Yanghui, et al. A study on stress-strain relations of methane hydrates[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, **32**(4): 687-692. (in Chinese))
- [5] SONG Y, YU F, LI Y, et al. Mechanical property of artificial methane hydrate under triaxial compression[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2010, **19**(3): 246-250.
- [6] LI Y, LIU W, ZHU Y, et al. Mechanical behaviors of permafrost-associated methane hydrate-bearing sediments under different mining methods[J]. *Applied Energy*, 2016, **162**: 1627-1632.
- [7] 鲁晓兵, 张旭辉, 石要红, 等. 黏土水合物沉积物力学特性及应力应变关系[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, **47**(10): 9-13. (LU Xiaobing, ZHANG Xuhui, SHI Yaohong, et al. Mechanical properties of hydrate-bearing silty-clay and stress-strain relation[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, **47**(10): 9-13. (in Chinese))
- [8] ZHU Y, LI Y, LIU W, et al. Dynamic strength characteristics of methane hydrate-bearing sediments under seismic load[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2015, **26**: 608-616.
- [9] ZHANG X, LIU L, ZHOU J, et al. A model for the elastic modulus of hydrate-bearing sediments[J]. *International Journal of Offshore & Polar Engineering*, 2015, **25**(4): 314-319.
- [10] YU F, SONG Y, LIU W, et al. Analyses of stress strain behavior and constitutive model of artificial methane hydrate[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2011, **77**(2): 183-188.
- [11] YU F, SONG Y, LI Y, et al. Analysis of stress-strain behavior and constitutive relation of methane hydrate-bearing sediments with various porosity[J]. *International Journal of Offshore & Polar Engineering*, 2011, **21**(4): 316-322.
- [12] SONG Y, ZHU Y, LIU W, et al. Experimental research on the mechanical properties of methane hydrate-bearing sediments during hydrate dissociation[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2014, **51**(2): 70-78.
- [13] SONG Y, ZHU Y, LIU W, et al. The effects of methane hydrate dissociation at different temperatures on the stability of porous sediments[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2016, **147**: 77-86.
- [14] 吴二林, 魏厚振, 颜荣涛, 等. 考虑损伤的含天然气水合物沉积物本构模型[J]. 岩石力学与工

- 程学报, 2012, **31**(S1): 3045-3050.(WU Erlin, WEI Houzhen, YAN Rongtao, et al. Constitutive model for gas hydrate-bearing sediments considering damage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(S1): 3045-3050.(in Chinese))
- [15] 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.(YANG Qijun, ZHAO Chunfeng. A constitutive model coupling elastoplasticity and damage formethane hydrate-bearing sediments[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(4): 991-997.(in Chinese))
- [16] 刘乐乐, 张旭辉, 刘昌岭, 等. 含水合物沉积物三轴剪切试验与损伤统计分析[J]. 力学学报, 2016, **48**(3): 720-729.(LIU Lele, ZHANG Xuhui, LIU Changling, et al. Triaxial shear tests and statistical analyses of damage for methane hydrate-bearing sediments[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, **48**(3): 720-729.(in Chinese))
- [17] 李彦龙, 刘昌岭, 刘乐乐, 等. 含水合物松散沉积物三轴试验及应变关系模型[J]. 天然气地球科学, 2017, **28**(3): 383-390.(LI Yanlong, LIU Changling, LIU Lele, et al. Triaxial shear test and strain analysis of unconsolidated hydrate-bearing sediments[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, **28**(3): 383-390.(in Chinese))
- [18] 李彦龙, 刘昌岭, 刘乐乐. 含水合物沉积物损伤统计本构模型及其参数确定方法[J]. 石油学报, 2016, **37**(10): 1273-1279.(LI Yanlong, LIU Changling, LIU Lele. Damage statistic constitutive model of hydrate-bearing sediments and the determination method of parameters[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, **37**(10): 1273-1279.(in Chinese))
- [19] 颜荣涛, 梁维云, 韦昌富, 等. 考虑赋存模式影响的含水合物沉积物的本构模型研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(1): 10-18.(YAN Rongtao, LIANG Weiyun, WEI Changfu, et al. A constitutive model for gas hydrate-bearing sediments considering hydrate occurring habits[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, **38**(1): 10-18.(in Chinese))
- [20] MASUI A, HANEDA H, OGATA Y, et al. Effects of methane hydrate formation on shear strength of synthetic methane hydrate sediments[C]//*International Society of Offshore and Polar Engineers Conference*. Seoul, 2005: 364-369.
- [21] LIU L, ZHANG X, LI Y, et al. A damage-softening statistical constitutive model of composite hydrate-bearing sediments[C]//*9th International Conference on Gas Hydrates*. Denver, Colorado, 2017.

A Mechanical Constitutive Model for Hydrate-Bearing Sediments and Calculation of Material Parameters With the Discrete Element Method

ZHOU Bo, WANG Hongqian, WANG Hui, XUE Shifeng

(College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, P.R.China)

Abstract: To soundly describe the mechanical behaviors of hydrate-bearing sediments in the cases of different saturation levels of hydrate and various confining pressures, the stress-strain relation equations and elastic modulus weak-form equations for hydrate-bearing sediments were developed based on the generalized Hooke's law. The softening coefficient and softening exponent of the hydrate-bearing sediments were determined according to the triaxial compression test results. A discrete element method (DEM) to calculate the initial elastic moduli of hydrate-bearing sediments was proposed based on the 3D particle flow code (PFC^{3D}). The mechanical behaviors of hydrate-bearing sediments under 6 various conditions related to saturation levels of hydrate and confining pressures, were numerically simulated with the stress-strain relation equations, elastic modulus softening equations and the DEM together. Numerical results show that, the proposed stress-strain relation equations, elastic modulus softening equations and the DEM can effectively predict the mechanical behaviors of hydrate-bearing sediments under various saturation levels of hydrate and confining pressures. The work gives a theoretical basis and a computational method for the investigations on the mechanical behaviors of hydrate boreholes and the safe exploitation of hydrate.

Key words: hydrate-bearing sediments; mechanical constitutive model; saturation level of hydrate; confining pressure; discrete element method

Foundation item: The National Key R&D Program of China (2017YFC0307604)

引用本文/Cite this paper:

周博, 王宏乾, 王辉, 薛世峰. 水合物沉积物的力学本构模型及参数离散元计算[J]. 应用数学和力学, 2019, 40(4): 375-385.

ZHOU Bo, WANG Hongqian, WANG Hui, XUE Shifeng. A mechanical constitutive model for hydrate-bearing sediments and calculation of material parameters with the discrete element method[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2019, 40(4): 375-385.