

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S2.091

不同开采方法下深海能源土离散元模拟

蒋明镜^{1,2}, 付 昌^{1,2}, 贺 洁^{1,2}, 申志福^{1,2}, 朱方园^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;
3. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 天然气水合物以胶结及孔隙填充等形式存在于深海能源土中, 开采时因其分解会劣化地层力学特性进而引发海底事故, 使得人们对能源土开采过程进行中力学特性的变化愈发重视。在前期室内试验的基础上, 将一个温度-水压-力学二维微观胶结模型引入离散元商业软件 PFC2D 中, 通过对排气、排水性较好的土体进行升温及降压法开采进行数值模拟, 并将模拟结果与相同条件下的室内试验结果对比, 验证了该胶结模型的适用性。进一步分析了颗粒接触分布与颗粒平均纯转动率 (averaged pure rotation rate, APR) 在水合物分解时的变化情况。升温分解过程中随温度升高, 颗粒总接触分布各向异性程度增大; 胶结接触逐渐减少并始终保持主方向为水平方向, 无胶结接触增多并始终保持主方向为竖直方向; APR 值逐渐增大且正负值分布逐渐趋于集中。降压分解过程中随反(水)压降低, 颗粒总接触由各向同性分布逐渐发展为主方向为竖直方向各向异性, APR 值较小且分布均匀; 恢复反压后, 试样进一步破坏, 颗粒总接触各向异性更加明显, APR 值增大且正负值呈集中分布。

关 键 词: 能源土 (MHBS); 水合物; 温度; 反(水)压; 宏微观力学特性

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 增 2-0639-09

Distinct element simulations of exploitation of methane hydrate bearing sediments with different methods

JIANG Ming-jing^{1,2}, FU Chang^{1,2}, HE Jie^{1,2}, SHEN Zhi-fu^{1,2}, ZHU Fang-yuan^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. State key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Methane hydrate bearing sediments (MHBS) are usually found undersea, which is generally categorized into different types, i.e. bond, pore-filling and so on. The mechanical properties of MHBS will be deteriorated as methane hydrate (MH) dissociates and many marine accidents will be caused; thus a lot of attention has been attracted in investigating MHBS properties changes during exploitation. A newly proposed 2D temperature-water pressure-mechanical bond model is implemented into PFC2D, the commercial software of the distinct element method (DEM), to simulate the dissociation of MH by thermal recovery and depressurization using soil in good exhaust and drainage conditions. By comparison with laboratory test results, it is validated that the newly proposed model is applicable to simulate the mechanical behavior of MHBS. At the same time, the micromechanical properties are also analyzed. With temperature increasing during thermal exploitation, the anisotropic degree of total contact distribution increases; the amount of bond contact, whose principal direction is horizontal all the time, decreases and the amount of unbonded contact, whose principal direction is vertical all the time, increases; the value of averaged pure rotation rate (APR) and its concentration degree increases all the time. With back (water) pressure decreasing during exploitation by depressurization, the total contact distribution changes from isotropic to anisotropic with a vertical principal direction, and the value of APR is small and uniformly distributed. After the recovery of back water pressure, the sample is damaged further, and the anisotropic degree of total contact distribution increases. Besides, the value of APR increases and the concentration degree of positive and negative value increases.

Keywords: methane hydrate bearing sediment (MHBS); methane hydrate; temperature; back water pressure; macro and micromechanical property

收稿日期: 2014-05-08

基金项目: 国家杰出青年基金 (No.51025932); 长江学者创新团队 (No.1029); 教育部博士点基金 (No.20100072110048)。

第一作者简介: 蒋明镜, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 国家杰出青年基金获得者, 主要从事天然结构性黏土、砂土、非饱和土、太空土和深海能源土宏观微观试验、本构模型和数值分析研究以及土体渐进破坏分析及相关教学工作。E-mail: mingjing.jiang@tongji.edu.cn

1 引言

天然气水合物（俗称“可燃冰”）是一种由天然气与水在特殊条件下形成的笼形冰状晶体。据统计，全球约 99% 以上的天然气水合物均稳定存在于海底低温高压环境中，并与砂土混合形成水合物沉积物，该沉积物俗称为深海能源土。已探明全球天然气水合物中含碳量为现有石油、煤炭及天然气含碳总和的 2 倍，且由于其燃烧产物为 CO_2 ，被公认为是一种储量巨大的新型清洁能源。在能源危机以及环境问题日益严峻的今天，如何安全有效的开采深海能源土已成为世界各国关注的焦点。

现阶段能源土开采方法主要有升温法和降压法，通过改变水合物所处温压环境（升温及降压）使其分解达到开采目的。在这一过程中常常会引发海底滑坡、地基沉陷以及管道等生命线工程失稳破坏^[1-3]，产生巨大危害。为探究产生危害的原因，Yuan 等^[4]、Murray 等^[5]以及 Winters 等^[6]首先对能源土中水合物的存在形式进行了研究，结果表明水合物主要以孔隙填充，胶结及承力骨架等形式赋存于砂土颗粒之间，因其较为特殊的存在形式，在分解过程中对能源土力学特性有明显影响，而胶结型水合物对能源土力学特性的影响最为显著。

当前对能源土分解过程中力学特性的研究主要采用室内试验及数值模拟两种手段进行。在室内试验中，由于海底原状样赋存条件苛刻，使得取土技术要求极高，且运输过程中极易引发扰动^[7-8]，因此，基于原状样的室内分解试验研究较少。在以 Ebinuma 等^[9]与 Masui 等^[10]为代表提出人工样制备方法后，国内外基于能源土人工样水合物分解室内试验得以广泛开展。Lee 等^[11]对不同水合物饱和度人工砂样进行无侧向变形室内试验，研究了水合物分解对轴向变形特性的影响，结果表明土体在分解过程中体积发生收缩，且收缩量与初始以及临界状态孔隙比相关。同时，已有研究表明^[12-13]水合物的力学特性受温度与压力共同影响，而 Lee 等^[11]由于设备原因不能同时对温度与水压进行控制，难以对实际开采过程进行模拟。为克服这一缺陷，Hyodo 等^[14]通过改良试验仪器，使温度与水压能够同时人为控制，并在此基础上开展了能源土升温及降压分解过程中土体变形与破坏特性研究，结果表明能源土强度峰值随反压增大、温度降低而增大；试样体积随水合物分解发生收缩。这些室内试验对于改进天然气开采方法或者加深理论研究均存在较大价值，Hyodo 等^[14]的室内试验结果也被用做本文的对

比数据。然而，现阶段室内试验虽然可以模拟开采过程，但亦存在诸多不足，如人工样制备较为困难，试验周期较长，且试样可重复性差；对于微观破坏发展机制这一能源土开采研究的重要组成部分不能很好地揭示，难以建立宏微观力学特性间的联系，这些不足决定了能源土开采研究需借助数值模拟手段。

离散元方法（DEM）立足于颗粒间基本接触力学关系，可方便地观察微观结构及其演变过程，有助于揭示能源土开采过程中复杂的微观机制。此外，试样具有重复性好、成本低等优点，弥补了室内试验的缺陷，为当前研究提供了新的视角，鉴于这些优点，本文采用离散元方法进行分析。蒋明镜等^[15]基于宏微观土力学提出了离散元方法的研究思路，通过将铝棒试验测得的强度破坏规律推导出了水合物胶结强度破坏准则，并在此基础上提出了一个简单的胶结模型^[16]，并于近期通过引入水合物赋存温压点至温压相平衡线的无量纲距离参数 L ，提出了一个较完善的温度-水压-力学二维胶结模型^[17]。本文将胶结模型引入离散元商业软件 PFC2D 进行双轴试验，未考虑相态变化的多物理场耦合条件下通过控制排气性较好土体中的有效应力，重点研究了升温及降压引起的胶结强度降低进而产生的能源土力学特性的变化。并且通过与 Hyodo 等^[14]的具有良好排水、排气条件的室内升温及降压分解三轴试验进行对比，验证该胶结模型的适用性并对分解过程中土体微观变化进行分析，为能源土开采提供借鉴。

2 离散元模拟过程及初始试验条件

将蒋明镜等^[17]提出的考虑温度-水压-力学特性综合影响的能源土二维微观胶结模型引入 PFC2D 软件中，通过对试样进行单元双轴压缩试验研究能源土分解过程中宏微观力学特性。

试样制备分为 3 个步骤：首先，采用分层欠压法^[18]生成颗粒间无胶结作用的均匀砂样，并保持有效围压为 $\sigma' = 0.2 \text{ MPa}$ （反（水）压为 10 MPa ）不变，直至试样平衡。试样尺寸为 $1600 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ ，颗粒总数为 6000 个，粒径范围为 $6.0 \sim 9.0 \text{ mm}$ ，平均粒径 $d_{50} = 7.6 \text{ mm}$ ，不均匀系数 $C_u = d_{60}/d_{10} = 1.3$ ，颗粒参数见表 1。其次，对满足水合物生成要求的颗粒之间施加胶结至水合物饱和度为 50%（即水合物体积占孔隙总体积的 50%），依据试样所处温度 $T = 278 \text{ K}$ ，有效围压 $\sigma' = 0.2 \text{ MPa}$ 及反压 $\sigma_w = 10 \text{ MPa}$ 赋以胶结参数^[17]，以模拟在相应温压条件下胶结接触力学特性，平衡试样至稳定。最后，通过增加试

样外部水压将有效围压由 0.2 MPa 逐渐升高至目标值 5 MPa (反压 $\sigma_w = 10$ MPa 不变), 施加初始偏应力。净砂样及未分解能源土试样应力-应变关系如图 1 所示。图中, 试样 *a*、*b*、*c* 所施加的偏应力分别为 0、3.8、6.8 MPa, 对应于初始偏应力为 0、初始偏应力小于净砂样破坏偏应力及初始偏应力大于净砂样破坏偏应力 3 种工况, 3 种试样初始轴向应变分别为 0%、2%、5%; *A*、*B*、*C* 为下文分析试样 *c* 不同时刻微观变化的特征点。

表 1 无胶结离散元试样模型参数
Table 1 Parameters of unbonded DEM sample

参数	量值
试样尺寸/(mm×mm)	1 600×800
颗粒总数/个	6 000
初始平面孔隙比	0.25
颗粒密度/(kg/m ³)	2 600
颗粒法相接触刚度/(10 ¹⁰ N/m)	1.5
颗粒切向接触刚度/(10 ¹⁰ N/m)	1.0
颗粒间摩擦系数	1.0
颗粒与边界摩擦系数	0.0
颗粒与边界接触刚度/(10 ¹⁰ N/m)	1.5
颗粒抗转动系数	0.5

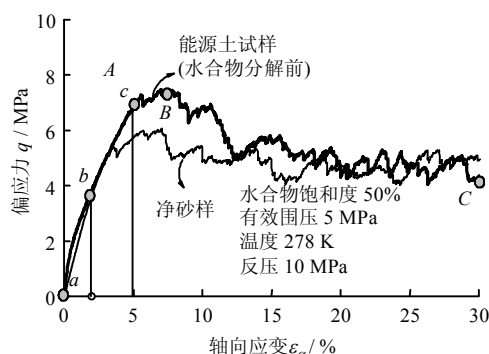


图 1 净砂样及未分解能源土试样应力-应变关系
Fig.1 Relationships between stress and strain of pure sand and methane hydrate bearing sediment

将离散元模拟双轴试验结果与 Hyodo 等^[14]进行的室内试验对比, 验证被引入胶结模型模拟水合物分解的可行性。Hyodo 等^[14]室内试验中的围压稳定系统在模拟时通过边界墙体对试样施加应力伺服实现, 模拟过程中不同试样所对应的工况及温压变化情况均与室内试验相同。图 2 为室内试验及离散元模拟过程中初始温压及分解过程中温压变化路径。图中, 虚线表示温压相平衡线。水合物的相态变化在力学上体现为胶结接触模型的强度、刚度随温压条件的变化。当水合物赋存环境处于温压相平衡线左上方时, 水合物稳定存在; 当水合物赋存环境达到温压相平衡线时水合物强度和刚度均为 0, 即发生分解。值得注意的是自然界中水合物分解因

吸热而降低周围温度, 减缓周围水合物的分解。而本文为方便实施, 假设温压环境达水合物相平衡线时, 分解瞬间完成。

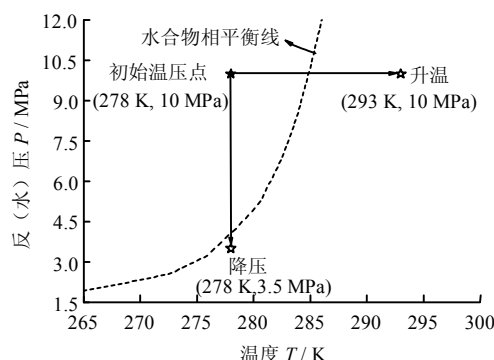


图 2 试样起始温压及变化路径
Fig.2 Initial temperature and water pressure and their changing paths

3 升温分解

3.1 升温分解离散元模拟过程

离散元模拟能源土试样升温分解的过程是在水合物所处反(水)压 $\sigma_w = 10$ MPa 及有效围压 $\sigma' = 5$ MPa 不变时, 根据温压-时间关系持续更新模型在不同时刻下的温度输入值, 模型^[17]将自行求解各温度下所对应的水合物胶结参数并更新接触间力学响应。图 3 为 Hyodo 等^[14]室内试验过程中温度随时间变化关系。离散元模拟为方便实施将温度-时间关系简化为

$$T = \begin{cases} 10t + 278, & (t \leq 1) \\ 5t + 283, & (1 < t \leq 2) \\ 293 & (2 < t \leq 4) \end{cases} \quad (1)$$

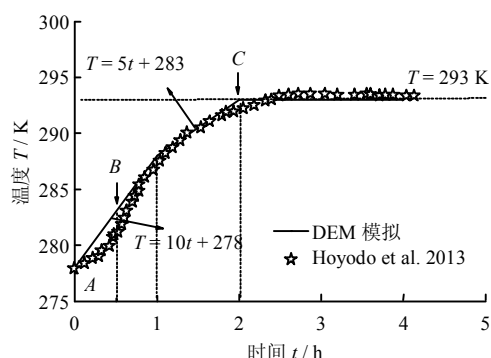


图 3 室内试验^[14]与离散元中温度随时间变化关系
Fig.3 Change of temperature with time in laboratory test^[14] and DEM simulations

3.2 升温分解宏观力学特性结果对比分析

图 4 为离散元模拟能源土试样升温分解过程中应力-应变关系曲线, 图 5 为室内试验^[14]测得的能

源土试样升温分解过程中应力-应变关系曲线。两种试验结果验证了本文引入的二维微观胶结模型能够较好地描述升温分解过程中的力学特性：(1) 当试样初始偏应力小于净砂样最大偏应力时，升温分解时试样轴向应变逐渐增加，并最终趋于稳定；(2) 当试样初始偏应力大于净砂样的最大偏应力时，升温分解时试样所能承受的偏应力数值逐渐减小，轴向应变迅速发展，并最终发生破坏；(3) 无论试样的初始应力状态如何，在分解的过程中试样体积相比于未分解试样均发生收缩，但略大于净砂样在相同轴向应变下的体积。图 5(b) 中的两条直线为室内试验测得不同水合物饱和度 (0% 及 50%) 能源土试样强度破坏包线，曲线则为饱和度为 50% 的试样在升温分解过程中的应力-应变曲线。图 4 中除净砂样及水合物饱和度为 50% 的未分解能源土试样对应的双轴试验应力-应变曲线外，其余 3 条曲线均为饱和度为 50% 的试样在偏应力不变时升温分解过程中应力-应变发展曲线。虽然净砂样与未分解能源土应力-应变关系曲线不同，但图 4(b) 与图 5(b) 所描述的应力-应变发展过程是一致的。

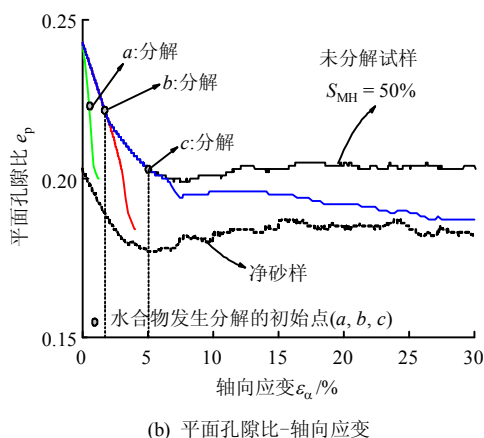
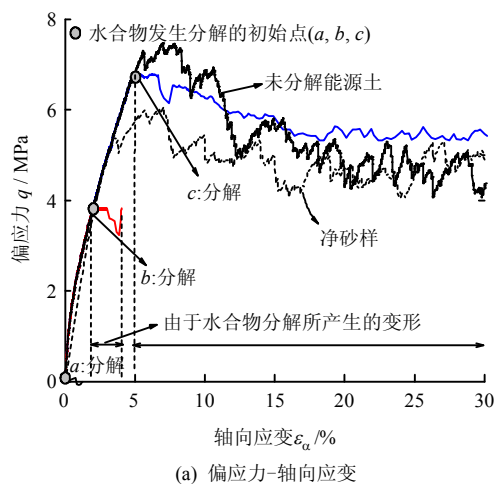


图 4 离散元升温分解试验应力-应变关系

Fig.4 Relationships between of stress and strain during MH dissociation caused by thermal recovery in DEM simulation

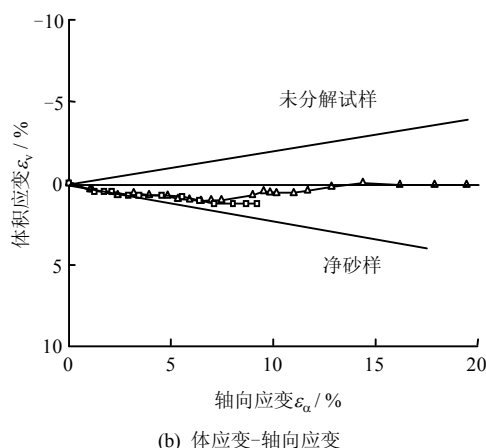
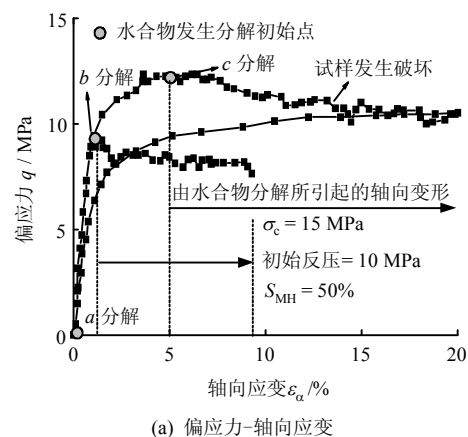


图 5 室内升温分解试验应力-应变关系^[14]

Fig.5 Relationships between stress and strain during MH dissociation caused by thermal recovery in laboratory test^[14]

3.3 升温分解过程中微观力学特性分析

为便于描述升温分解时微观变量演化过程，本文选取试样 *c* 的 3 个特征点 *A* ($t=0$ h)、*B* ($t=0.5$ h) 和 *C* ($t=2$ h) 描述，3 点分别对应于初始状态、升温分解进行中及水合物已完全分解 3 个状态。

(1) 接触分布玫瑰图

每 10° 一份将圆周空间分成 36 份，统计每份中的接触数目在总接触数目中所占比例即可得到接触分布玫瑰图。图 6 为试样 *c* 在升温分解过程中 3 个不同时间特征点的总接触、胶结接触和无胶结接触分布玫瑰图。从图可以看出，在水合物升温后不同时刻，总接触呈现主方向为竖直方向的各向异性；胶结接触主方向均为水平方向，而无胶结接触的主方向均为竖直向。随着水合物赋存温度升高，胶结逐渐发生破坏。由于新增的无胶结接触主要为水平向分布，因此无胶结接触组构逐渐向各向同性靠近。

升温分解开始时 ($t=0$ h)，总接触表现轻微各向异性，即总的竖向接触略多于总的水平接触。这是由于偏应力的施加导致部分水合物胶结发生破坏，土体在竖向压力作用下被压缩 (轴向应变为 5%，

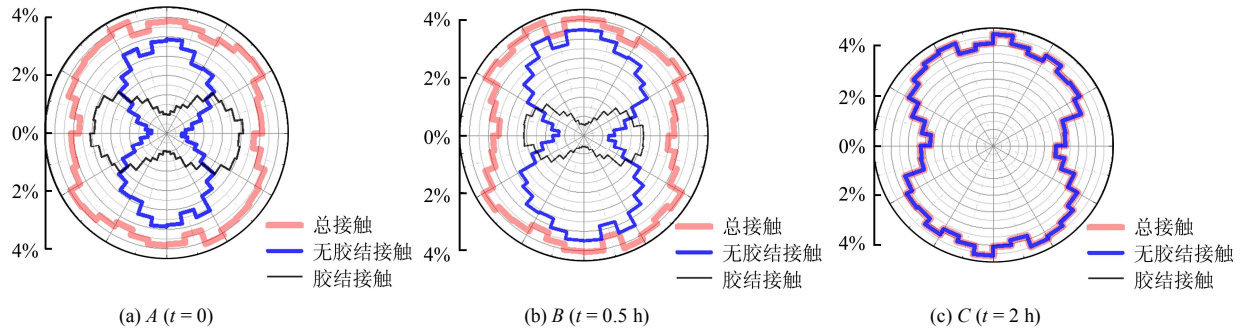


图 6 试样 *c* 升温分解不同时刻接触分布玫瑰图
Fig.6 Contact distribution of sample *c* at different time

见图 1)，颗粒竖向接触增加，导致总接触分布呈现轻微各向异性；竖向胶结接触数明显小于水平向胶结接触数，这是由于初始偏应力的施加使得竖向胶结接触间传递的法向力大于水平向胶结接触所传递的法向力，在胶结接触围压（反压 $\sigma_w = 10 \text{ MPa}$ ）不变的情况下竖向胶结会先于水平向胶结发生破坏，试样在竖向会进一步被压缩。胶结的这种方向性破坏导致胶结接触的主方向为水平方向，无胶结接触的主方向为竖直方向。升温过程中（ $t = 0.5 \text{ h}$ ，此时温压状态仍在相平衡线左侧稳定区而未分解），由于温度升高导致胶结物强度降低（由微观接触模型^[17]确定），在偏应力及围压不变时竖向与水平向胶结接触因不能承受原有压力而被破坏，胶结接触数目减少，使得土体在竖向进一步被压缩，颗粒被挤密，竖向无胶结接触增多。由于竖向胶结与水平方向胶结强度变化相同，强度降低不会引起胶结接触主方向的变化。总接触分布在总体上仍然表现为主方向为竖直方向的轻微各向异性；因此，升温分解过程可看做胶结物强度降低并在偏应力作用下破坏，胶结接触不断向无胶结接触转化的动态过程。在此过程中，试样内部颗粒排列分布不断调整位置并伴随着颗粒的明显转动（见后文对平均纯转动速率 *APR* 分析）以抵抗外部荷载。由于整体结构的弱化，试样能够承受的偏应力逐渐减小，依靠胶结骨架维持的大孔隙结构逐渐消失，体积随之发生明显收缩（见图 4(b)和图 5(b)）。当试样 *c* 所处试验条件位于温压相平衡线右下方时（ $t = 2 \text{ h}$ ），胶结物完全分解，水合物胶结试样完全转变为净砂样，此时由于偏应力大于相同围压下净砂样破坏偏应力，试验发生受压破坏，轴向应变不断增大。试样内部颗粒重新排列分布更加剧烈，颗粒不断调整位置并伴随着颗粒的明显转动（见后文 *APR* 分析），所有接触均转化为无胶结的摩擦型接触并呈现主方向为竖直方向的明显各向异性。

（2）平均纯转动速率

蒋明镜等^[19]认为砂土颗粒间能量消散与滑动转动量有关，滑动转动量可分解为两部分：一部分与颗粒中心的平动相关，另一部分与颗粒转动及颗粒尺寸相关（即颗粒纯转动率），后者可通过式（2）衡量：

$$\dot{\theta}^p = \frac{1}{\bar{R}} (R_1 \dot{\theta}_1 + R_2 \dot{\theta}_2) \quad (2)$$

式中： $\dot{\theta}^p$ 为纯转动率； $\bar{R}$ 为有效粒径， $\bar{R} = 2R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ ； R_1 、 R_2 、 $\dot{\theta}_1$ 、 $\dot{\theta}_2$ 分别为两个相接触颗粒的半径及转动速度。

代表性单元内所有颗粒平均纯转动公式为

$$\omega = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\frac{1}{\bar{R}^k} (\dot{\theta}_1^k R_1^k + \dot{\theta}_2^k R_2^k) \right] \quad (3)$$

式中： ω 为平均纯转动率；上标 k 为第 k 个接触点； N 为代表性单元内接触点总数。

APR 值可用于衡量颗粒通过相对转动耗能的程度，同时表明试样内部微观结构调整的程度。图 7 为试样 *c* 在升温分解过程中平均纯转动速率（*APR*）平面分布情况。从图 7 中可以看出，随着温度升高，*APR* 数值逐渐增大，且正负值分步逐渐趋于集中。在 $t = 0$ 时刻，由于偏应力的施加导致土体被压缩（轴向应变为 5%，见图 1），一部分胶结受压破坏，土颗粒在轴向应变发生过程中发生重新排列并伴随有相应的颗粒转动，由于土体变形较小，此时 *APR* 数值相应较小且分布均匀，表明试样内部颗粒转动并不激烈；在温度升高过程中（ $t = 0.5 \text{ h}$ ），轴向应变进一步增大，颗粒被进一步压密，此时 *APR* 数值增大，表明颗粒转动等重组活动逐渐变得激烈，土骨架趋于不稳定状态。顺时针（*APR* 为负值）和逆时针（*APR* 为正值）转动均存在，且呈现区域化分布明显，表明试样内部微观变化并不均匀。从 *APR* 分布可以推测，试样内部形成了数条未充分发展的

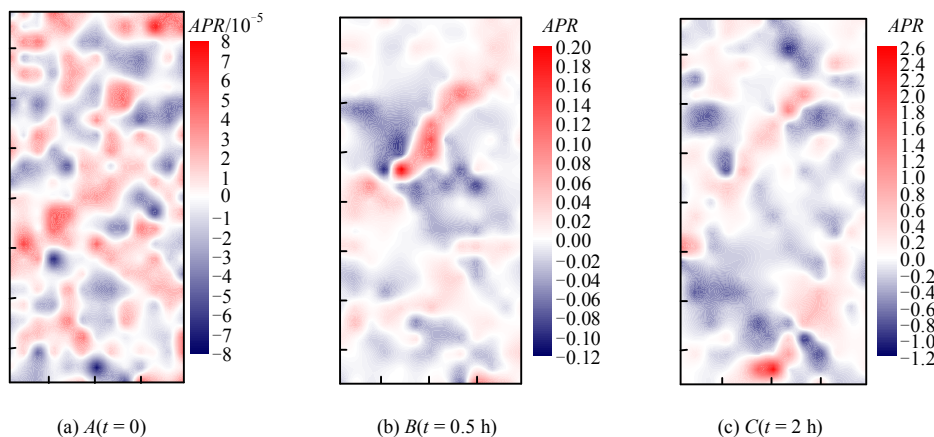


图 7 试样 *c* 升温分解不同特征点时 *APR* 空间分布图

Fig.7 *APR* distribution of sample *c* at different characteristic points during MH dissociation caused by thermal recovery

剪切带；当温度升高至水合物分解点时 ($t = 2$ h)，轴向应变较 $t = 0.5$ h 时进一步增大，此时 *APR* 数值增大更加明显，表明颗粒转动等活动变得更加激烈，土骨架处于不稳定状态。顺时针 (*APR* 为负值) 和逆时针 (*APR* 为正值) 转动均存在，且呈现区域化分布更加明显，可以推测试样内部形成的数条未充分发展的剪切带得到了进一步发展。

4 降压分解

4.1 降压分解离散元模拟过程

离散元模拟能源土试样降压分解的过程是在水合物所处温度 $T = 278$ K，围压 $\sigma = 15$ MPa 不变时，根据反(水)压-时间关系持续更新模型在不同时刻下的反(水)压输入值，模型将自行求解各反(水)压下所对应的水合物胶结参数并更新接触间力学响应(胶结模型见蒋明镜等^[17])。在降压分解试验过程中反(水)压变化对有效围压的影响，可通过边界对试样施加有效围压实现。图 8 为 Hyodo 等^[14]的室内试验及离散元模拟过程中反(水)压随时间的变化关系。离散元模拟时为方便实施将反(水)压-时间关系简化为

$$\sigma_w = \begin{cases} 10, & (t = 0) \\ 3.5, & (0 < t \leq 5) \\ 6.5t - 29, & (5 < t \leq 6) \\ 10, & (t > 6) \end{cases} \quad (4)$$

具体过程可描述为：(1) 降压过程中始终保持温度 $T = 278$ K 不变，初始反(水)压 $\sigma_w = 10$ MPa (初始有效围压 5 MPa)，对欲进行降压分解的试样施加初始偏应力 0、3.8、6.8 MPa，依次标记为试样 *a*、*b* 与 *c*；(2) 待试样稳定，保持初始偏应力 q 不变，降低反(水)压至 $\sigma_w = 3.5$ MPa (有效围压增

至 11.5 MPa)；(3) 在 $t = 5$ h 时，将反(水)压恢复至 $\sigma_w = 10$ MPa (有效围压为 5 MPa)，以模拟反(水)压恢复至初始值的情况。

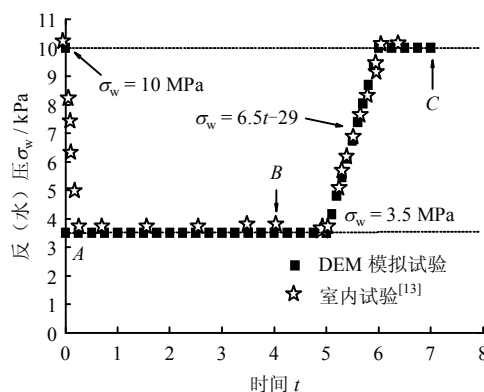


图 8 室内试验^[14]及离散元中反(水)压随时间变化
Fig.8 Change of back pressure with time in laboratory test^[14] and DEM simulation

4.2 降压试验宏观力学特性结果对比分析

图 9 为离散元模拟过程中偏应力比 (q/p') 和平面孔隙比与轴向应变之间的关系，图 10 为室内试验^[14]测得的偏应力比 (q/p') 和体积应变与轴向应变之间的关系。对比试验结果表明，本文所引入的二维微观胶结模型能够较好地模拟降压分解时力学特性的变化。由图 9、10 可知，反(水)压降低后，在偏应力及球应力作用下土体轴向应变增大，偏应力比逐渐增大，平面孔隙比逐渐减小，且随试样初始偏应力增大，偏应力比及平面孔隙比均增大。在恢复反(水)压过程中，水合物胶结已完全分解使得试样为净砂样，有效围压及竖向应力均恢复至初始值，此时由图可知，不同偏应力作用的试样其宏观力学变化规律存在较大差别：(1) 当试样初始偏应力为 0 时 (试样 *a*)，试样轴向应变迅速减小并最

终趋于某接近于净砂样在相同偏应力下的应变状态; 平面孔隙比/体应变增大并最终趋于净砂样在相同试验条件下所对应的平面孔隙比; 试样偏应力比始终位于 0 附近; (2) 当试样初始偏应力大于 0 且小于净砂样破坏偏应力时 (试样 *b*), 试样轴向应变最终稳定于净砂样在相同偏应力条件下的数值, 偏应力比及平面孔隙比/体应变迅速增大, 并最终稳定于净砂样在相同试验条件下的数值; (3) 当试样初始偏应力大于净砂样破坏偏应力时 (试样 *c*), 偏应力比首先增大至大于净砂样在相同试验条件下的某一数值, 而后逐渐向净砂样应力应变曲线靠近, 同时轴向应变持续增大直至试样发生破坏; 这一过程中, 平面孔隙比/体应变首先增大至相同试验条件时净砂样平面孔隙比附近的某一数值, 而后基本保持稳定直至破坏 (*a'*、*b'*、*c'* 表示恢复反 (水) 压起始点)。

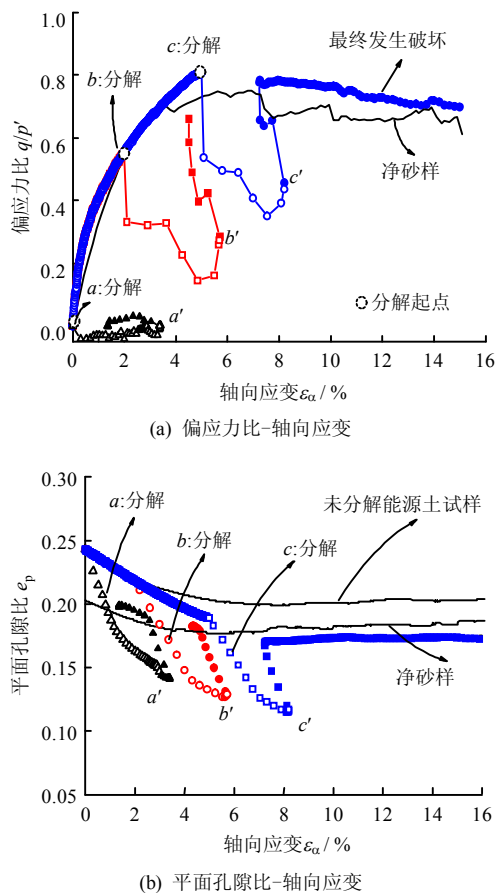


图 9 离散元模拟中试样应力-应变关系

Fig.9 Relationships between stress and strain during MH dissociation caused by depressurization in DEM simulation

4.3 降压分解过程微观力学特性分析

为便于描述降压分解时微观变量演化过程, 本文选取试样 *c* 三个特征点 *A* ($t=0$)、*B* ($t=4$ h) 和 *C* ($t=7$ h) 进行描述, 3 点分别对应于初始状态、水合物分解完全以及反 (水) 压恢复之后 3 个状态。

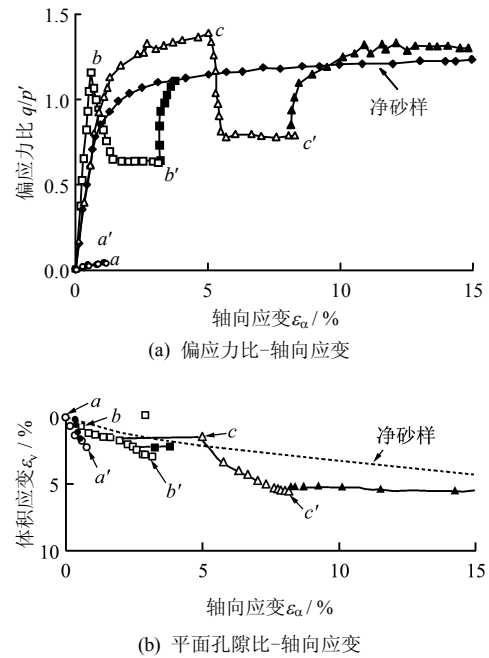


图 10 室内降压分解试验应力-应变关系^[14]

Fig.10 Relationships between stress and strain during MH dissociation caused by depressurization in laboratory test^[14]

(1) 接触分布玫瑰图

图 11 为试样 *c* 在降压分解过程中不同特征点总接触分布玫瑰图。从图中可以看出, 在不同分解时刻下总接触分布主方向均为竖直方向, 且随着时间发展总接触的各向异性更加明显。降压分解开始时 ($t=0$ h), 总接触分布呈轻微的各向异性, 内部微观结构的变化与升温分解 $t=0$ h 时相似; 在 $t=4$ h 时, 反 (水) 压由 10 MPa 降至 3.5 MPa, 此时由于水合物所处温压环境处于温压相平衡线右下方使得水合物完全分解, 水合物胶结试样完全转变为净砂样。同时由于反 (水) 压降低, 球应力及竖向应力增大, 偏应力仍保持不变, 此时试样 *c* 被进一步压缩, 体积减小。由于竖向力较大, 使得试样 *c* 在竖向受压缩程度较大。这一过程中竖向力完全由颗粒间的接触承担, 颗粒在竖向被挤密, 使得竖向无胶结接触增多。虽然此时试样所承受的偏应力大于初始净砂样破坏偏应力, 但由于球应力的增大提高了净砂样抗剪强度, 故试样未发生破坏。在试样被压缩过程中土颗粒不断调整位置并伴随有明显转动 (详见下文 APR 分析), 依靠骨架维持的大孔隙将会消失, 体积发生收缩 (见图 9、10); 在反 (水) 压恢复后 ($t=7$ h), 由于试样 *c* 的球应力及竖向应力均恢复至初始值, 偏应力大于相同应力状态下净砂样破坏偏应力, 此时试样将会发生破坏, 在这一过程中颗粒重新分布更加剧烈, 土颗粒不断调整位置并伴随有更加明显的转动 (详见下文 APR 分析)。

在竖向力的作用下竖向无胶结接触进一步增加, 总接触主方向为竖直方向更加明显。

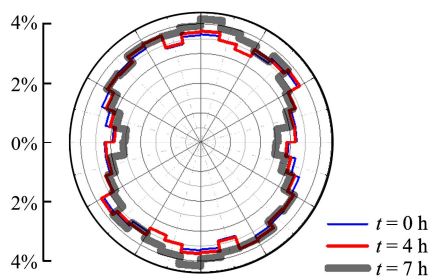


图 11 试样 c 降压分解试验不同特征点总接触分布玫瑰图
Fig.11 Total contact distribution of sample c at different characteristic points during MH dissociation caused by depressurization

(2) 颗粒平均纯转动速率

图 12 为试样 c 在降压分解不同特征点时的平均纯转动率 (APR) 空间分布情况。从图中可以看出, 在水合物未分解时 ($t=0$ h), 由于胶结未发生分解, 土颗粒受胶结作用约束, 土体骨架处于稳定状态, 试样所对应的轴向应变为 5%。此时, 颗粒 APR 数

值较小且分布均匀, 表明颗粒没有较剧烈运动, 内部微观变化与升温分解 $t=0$ 时相似; 在反 (水) 压降低至水合物分解点时 ($t=4$ h), 此时胶结物已完全分解, 试样为净砂样。由于体应力及竖向应力增大而被压缩, 轴向应变进一步增大, 虽然试样所受偏应力不变且大于有效围压 $\sigma'=5$ MPa 时净砂样破坏偏应力, 但由有效围压的增大, 保证了试样仍然未被破坏。此时, 颗粒 APR 数值增大, 表明土颗粒在偏应力作用下的转动等重组活动逐渐激烈, 土骨架趋于不稳定状态; 顺时针 (APR 为负值) 和逆时针 (APR 为正值) 转动均存在, 且呈现区域化分布, 可以推测试样内部形成了数条未充分发展的剪切带。当反 (水) 压恢复后 ($t=7$ h), 试样所受球应力及竖向所受轴应力恢复至初始值, 此时, 偏应力大于净砂样破坏偏应力, 试样轴向应变一直增大直至破坏。此时, APR 数值较 $t=4$ h 时继续增大, 表明土颗粒在偏应力作用下的转动等重组活动愈发激烈, 土骨架已处于不稳定状态; 同时土颗粒顺时针和逆时针转动呈区域化分布更加明显, 表明土体内部数条未充分发展的剪切带进一步发展。

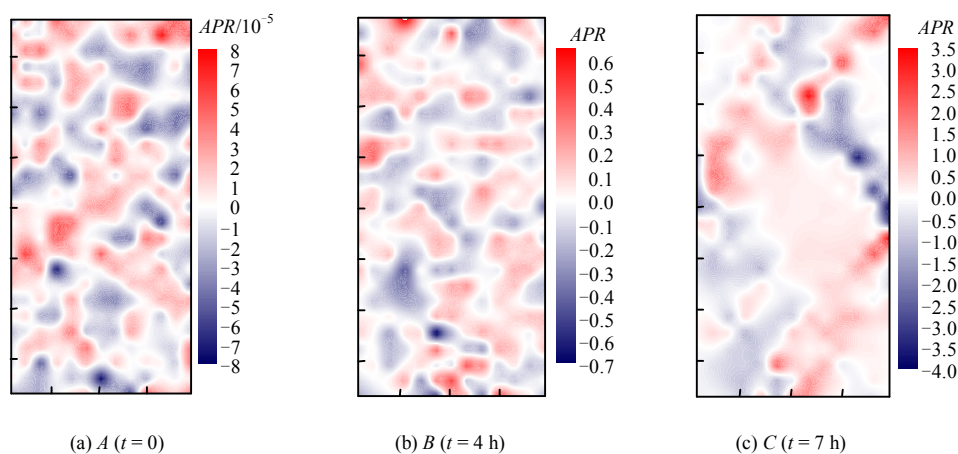


图 12 试样 c 降压分解时不同特征点试样 APR 空间分布

Fig.12 APR distribution of sample c at different characteristic points during MH dissociation caused by depressurization

5 结 论

(1) 温度-水压-力学二维微观胶结模型^[17]模型能够较好地描述室内试验^[12]所反映的规律, 即模拟能源土升温及降压法开采时的力学特性变化。

(2) 分析了升温及降压法开采过程中土颗粒接触分布及 APR 随温度、反 (水) 压及偏应力变化的微观机制, 克服了以往室内试验的缺陷, 对能源土分解过程研究提供了一个更加全面的视角。

(3) 所得试验结果与室内试验结果数值上存在差异, 但定性上所描述的变化规律是一致的。

本文采用离散元法在单元试验的基础上模拟了能源土中水合物分解时的力学特性, 不仅增加了对能源土基本力学特性的认识与理解, 也为实际应用所涉及的复杂边值问题奠定了基础, 为后续研究开挖、输运等复杂边值问题提供了依据。同时, 本文模拟还存在一些缺陷, 如对水合物的相态变化未做全面考虑。水合物分解时由固体变为气体与水, 除对胶结强度及模量具有影响外, 至少还有如下两方面影响: (1) 气体的产生对反压的影响; (2) 大量气泡与土骨架相互作用的影响。对于第一方面对反压的影响, 正如文中所述可通过对有效围压进行调

节以实现, 而本文研究对象为排气性较好的砂土, 认为分解所产生的气体随时排出, 对反压无影响。而对于气泡与土骨架相互作用的研究目前仍处于起步阶段, 离散元中亦无法真实反映大量气泡与土骨架共同作用的影响。因此, 笔者认为将大量气泡与土骨架共同作用这一影响考虑进来将会更全面。本文在离散元方法基础上从一个较适用的岩土力学角度对水合物分解进行了单元试验数值模拟, 为土体骨架本构模型的发展打下基础。

参考文献

- [1] COLLETT T S. Natural gas hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk river area, North Slope, Alaska[J]. **AAPG Bulletin**, 1993, 77(5): 793—812.
- [2] RIEDEL M, SPENCE G, CHAPMAN N, et al. Seismic investigations of a vent field associated with gas hydrates, offshore Vancouver Island[J]. **Journal of Geophysical Research(Solid Earth)**, 2002, 107(B9): 5—16.
- [3] YUAN J, EDWARDS R. The assessment of marine gas hydrates through electrical remote sounding: Hydrate without a BSR[J]. **Geophysical Research Letters**, 2000, 27(16): 2397—2400.
- [4] YUAN T, SPENCE G D, HYNDMAN R D, et al. Seismic velocity studies of a gas hydrate bottom-simulating reflector on the northern Cascadia continental margin: Amplitude modeling and full waveform inversion[J]. **Journal of Geophysical Research(Solid Earth)**, 1999, 104(B1): 1179—1191.
- [5] MURRAY D R, KLEINBERG R L, SINHA B K, et al. Saturation, acoustic properties, growth habit, and state of stress of a gas hydrate reservoir from well logs[J]. **Petrophysicists**, 2006, 47(2): 129—137.
- [6] WINTERS W J, PECHER I A, WAITE W F, et al. Physical properties and rock physics models of sediment containing natural and laboratory-formed methane gas hydrate[J]. **American Mineralogist**, 2004, 89(8-9): 1221—1227.
- [7] SCHULTHEISS P, HOLLAND M, ROBERTS J, et al. Pressure core analysis: The keystone of a gas hydrate investigation[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008), Vancouver. British Columbia, Canada: [s.n.], 2008.
- [8] COLLETT T S, RIEDEL M, COCHRAN J R, et al. Indian continental margin gas hydrate prospects: results of the Indian National Gas Hydrate Program (NGHP) expedition 01[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008), Vancouver. British Columbia, Canada: [s.n.], 2008.
- [9] EBINUMA T, KAMATA Y, MINAGAWA H, et al. Mechanical properties of sandy sediment containing methane hydrate[C]//Proceedings of Fifth International Conference. Trondheim, Norway: [s.n.], 2005: 958—961.
- [10] MASUI A, HANEDA H, OGATA Y, et al. Effects of methane hydrate formation on shear strength of synthetic methane hydrate sediments[C]//Proceedings of The 15th International Offshore and Polar Engineering Conference. Seoul, Korea: [s.n.], 2005: 19—24.
- [11] LEE J, SANTAMARINA J C, RUPPEL C. Volume change associated with formation and dissociation of hydrate in sediment[J]. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**, 2010, 11(3): 1—13.
- [12] SONG Y, YU F, LI Y, et al. Mechanical property of artificial methane hydrate under triaxial compression[J]. **Journal of Natural Gas Chemistry**, 2010, 19(3): 246—250.
- [13] 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 and Engineering**, 2011, 77(2): 183—188.
- [14] HYODO M, YONEDA J, YOSHIMOTO N, et al. Mechanical and dissociation properties of methane hydrate-bearing sand in deep seabed[J]. **Soils and Foundations**, 2013, 53(2): 299—314.
- [15] 蒋明镜, 肖俞, 刘芳. 深海能源土开采对海床稳定性的影响研究思路[J]. **岩土工程学报**, 2010, 28(9): 1412—1417.
JIANG Ming-jing, XIAO Yu, LIU Fang. Methodology for assessing seabed instability induced by exploitation of methane hydrate[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 28(9): 1412—1417.
- [16] 蒋明镜, 肖俞, 朱方园. 深海能源土微观力学胶结模型及参数研究[J]. **岩土工程学报**, 2012, 34(9): 1574—1583.
JIANG Ming-jing, XIAO Yu, ZHU Fang-yuan. Study of micro-bond contact model and its parameters for the deep-sea methane hydrate bearing soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(9): 1574—1583.
- [17] 蒋明镜, 朱方园. 一个深海能源土的温度-水压-力学二维微观胶结模型[J]. **岩土工程学报**, 待刊.
JIANG Ming-jing, ZHU Fang-yuan. A two-dimensional thermal-hydro-mechanical bond contact model for methane hydrate bearing soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, in press.
- [18] JIANG M J, KONRAD J M, LEROUÉIL S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies[J]. **Computers and Geotechnics**, 2003, 30(7): 579—597.
JIANG M J, YU H S, HARRIS D. A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance[J]. **Computers and Geotechnics**, 2005, 32(5): 340—357.