

# 胶结型深海能源土升温降压联合分解离散元分析

蒋明镜<sup>1, 2, 3</sup>, 付 昌<sup>1, 2, 3</sup>, 贺 洁<sup>1, 2, 3</sup>, 朱方园<sup>1, 4</sup>

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 4. 西澳大利亚大学 海洋基础系统中心, 澳大利亚 珀斯 WA6009)

**摘要:** 将一个新近提出的考虑温度-水压-力学综合影响的二维微观胶结模型引入离散元商业软件 PFC2D 中生成水合物胶结型能源土, 通过在双轴试验过程中同时改变温度与反(水)压, 在良好排水、排气的条件下模拟了被认为有较好开发前景的升温降压联合开采法, 为探索可燃冰开采新方法提供参考。试验结果表明, 偏应力小于净砂样破坏偏应力时, 开采完成后土体未发生破坏; 偏应力大于净砂样破坏偏应力时, 开采完成后土体内会产生若干条未充分发展的剪切带; 此外, 对分解四个不同阶段的微观变量, 如接触分布、平均纯转动速率及准静态速度场, 进行了较为详细地分析。

**关键词:** 能源土; 升温-降压联合分解; 宏微观力学特性

**中图分类号:** TU43

**文献标志码:** A

## Distinct Element Method Simulation of Bonded-type Methane Hydrate Bearing Sediments Exploitation by Thermal Recovery-depressurization Combined Method

JIANG Mingjing<sup>1, 2, 3</sup>, FU Chang<sup>1, 2, 3</sup>, HE Jie<sup>1, 2, 3</sup>, ZHU Fangyuan<sup>1, 4</sup>

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai, China; 3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Centre for Offshore Foundation Systems, University of Western Australia, Perth WA6009, Australia)

**Abstract:** A newly proposed 2D bond model, which took the coupled effects of temperature-hydraulic-mechanical into consideration, was implemented into the distinct element method (DEM) software Particle Flow Code (PFC2D) to generate methane hydrate bearing sediment (MHBS) that only the bond type methane hydrate (MH) existed. MHBS samples in this simulation were in good drainage and exhaust

condition. Then a series of biaxial compression tests were conducted. Results show that when the deviator stress is smaller than the peak deviator stress of pure sand sample, the sample won't be damaged after dissociation; when the deviator stress is larger than the peak deviator stress of pure sand sample, the MHBS sample will be damaged and several undeveloped shear bands occur. In addition, several micro variables such as contact distribution, averaged pure rotation rate (APR) and quasi-static velocity field, were analyzed in four dissociation phases.

**Key words:** methane hydrate bearing sediments; thermal recovery-depressurization combined method; macro- and micro-mechanical property

天然气与水在特殊情况下会形成一种白色冰状晶体, 因其遇火可以发生燃烧被人们称为“可燃冰”。已探明自然界中 99% 的可燃冰均稳定存在于低温高压的深海环境中, 并与砂土混合形成水合物沉积物, 该沉积物即为深海能源土。

据调查显示, 深海能源土中可燃冰含碳量为现有煤、石油及天然气含碳量总和的 2 倍<sup>[1]</sup>, 且因其燃烧产物为二氧化碳, 被公认为一种储量巨大的新型能源。为缓解当今日益严峻的能源危机, 许多国家如美国、日本等, 已将如何大规模开采可燃冰列入国家长远发展计划。然而由于天然气的开采会引发海底滑坡、地基沉陷、管道等生命线工程的失稳破坏<sup>[2-3]</sup>, 造成巨大的经济损失, 使得人们不断探求可燃冰开采新工艺。

当前可燃冰开采方法主要包括化学及物理方法。对于化学开采方法如添加化学试剂法, 由于能源土中化学试剂渗透性低, 不能充分扩散<sup>[4]</sup>, 使得开采过程产气缓慢; 并且化学试剂价格高昂, 一般亦不适

收稿日期: 2014-10-10

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51025931)

第一作者: 蒋明镜(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土结构性黏土、砂土、太空土、深海能源土、非饱和土的宏、微观之试验、本构模型和数值分析方面的研究以及土体逐渐破坏分析。E-mail: mingjingjiang@tongji.edu.cn

于水合物大规模开采<sup>[5]</sup>.与化学开采方法相比,物理开采方法<sup>[6-7]</sup>因具有产气率高,成本低廉等特点而备受关注,主要包括升温法与降压法等.其开采原理均是通过改变水合物所处温压环境,使其达到水合物温压相平衡线进而发生分解,待天然气与土体分离后再进行收集.其中,升温法是通过向能源土注入蒸汽、热水等方式实现,虽然该法产气率较高,但开采过程中热量损失较多,使得该法不适合大规模开采<sup>[8-9]</sup>;而降压法因其不需要连续且较为昂贵的热激而被认为是未来有可能大规模开采水合物的一种有效方法,然而该法因开采过程中孔隙会被堵塞使得产气终止或产气较慢<sup>[10-11]</sup>而一直被人们所诟病.综合以上两种方法的优缺点,有学者认为<sup>[11]</sup>将加热法与降压法相结合是一种较具前景的开采方法,即升温降压联合分解法.

升温降压联合分解法即以升温法使水合物分解,以降压法进行收集.当前对该方法的研究主要有室内试验及数值模拟.李淑霞等<sup>[12]</sup>通过自制的天然气水合物开采模拟实验系统模拟了注热降压开采全过程,并对产气规律及能量效率进行了检验,结果表明注热与降压法相结合可获得更大的能量效率.而该试验对于开采过程中土体强度及破坏规律未做过多研究,且开采过程中土体的微观变化不能清晰获得.而在数值模拟方面,胡立堂等<sup>[13]</sup>通过 pT+H 软件及二维多相流数值模型对水合物分解过程中产气量、产气率及产水量进行了研究,结果表明:注热降压法开采效果较单一的升温法有较大改善;BAI Yuhu 与 LI Qingping<sup>[11]</sup>通过建立注热降压法联合开采数学物理模型,分析了压力、温度及各相饱和度时空变化规律及水合物藏产气、产水速度变化规律,结果表明注热降压法具有稳产气速度高,时间长的优点.上述数值模拟对于能源土开采具有一定的指导意义,但是不能很好地反映能源土分解过程中宏观力学变化特性,对于岩土力学领域所关心的强度及变形问题未能进行分析,因此需寻求合适的方法进行相关探索研究.

此外, Yuan 等<sup>[14]</sup>, Murray 等<sup>[15]</sup>以及 Winters 等<sup>[16]</sup>通过对能源土中水合物的存在形式进行研究表明: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,因此,本文在对能源土进行研究时仅以胶结型水合物为研究对象.

离散元方法最初由 Cundall 与 Strack<sup>[17]</sup>等人提出,该法立足于颗粒间接触力学关系,不仅可模拟土体不同受力条件下的宏观力学响应,在反映土体微观变化方面亦有独特优势.基于此方法,在未考虑相态变化的多物理场耦合条件下,率先提出了一个考虑温度-水压-力学综合影响的二维微观胶结模型<sup>[18]</sup>,并将该模型通过 C++ 语言编译成离散元软件 Particle Flow Code 2D(PFC2D)预设外接接口认可的动态链接库文件(.dll 文件),在计算需要时可随时调用.以此方法将该模型引入 PFC2D 进行模拟,通过将模拟结果与 Hyodo 等<sup>[19]</sup>的室内试验结果对比,验证该模型在模拟能源土升温及降压开采过程的可行性<sup>[20]</sup>.在对模型进行验证时,首先需要明确的是二维情况下离散元模拟结果仅仅是定性上与室内三轴试验结果对比.在离散元模拟时试样尺寸的选取需满足单元样的要求,即力学特性不随尺寸变化而变化.离散元模拟中尺寸为 800mm×1600mm 的单元样试样与室内三轴试验所中尺寸为 30mm(直径)×60mm 与 50mm(直径)×100mm 的试样均满足单元样要求,在定性的反映力学特性时无差别.室内试验考虑到试样需要充分排水而选取较小的加载速率(0.1%/min),此时试样处于准静态.而离散元模拟时认为水及气体随时排出,同时考虑计算效率,选取加载速率为 1%/min,试样同样处于准静态.本文将此胶结模型引入商业软件 PFC2D 并进行双轴试验,在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,重点研究升温降压联合分解引起的胶结强度降低时能源土力学特性的变化,为开采提供借鉴.

## 1 试样制备及初始条件

能源土试样制备分为三个步骤:首先采用分层欠压法<sup>[21]</sup>生成颗粒间无胶结作用的均匀砂样,并保持有效围压为  $\sigma' = 0.2$  MPa(反(水)压 10 MPa)不变直至试样平衡.试样尺寸为 1 600 mm×800 mm,颗粒总数为 6 000,粒径范围为 6.0 mm~9.0 mm,平均粒径  $d_{50} = 7.6$  mm,不均匀系数  $C_u = d_{60}/d_{10} = 1.3$ ,颗粒参数如表 1 所示.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  $T = 278$  K,有效围压  $\sigma' = 0.2$  MPa 及反(水)压  $\sigma_w = 10$  MPa 赋以胶结参数(胶结模型见文献[18]),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(水)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.同时为模拟不同工况,对试样施加三种不同偏应力:0, 3.8 以及 6.8 MPa,分别对应于初始偏应力为零、初始偏应力小于净砂样破坏偏应力以及初始偏应力大于净砂样破坏偏应力三种工况,在图 1 中分别记为点 a, b 和 c,对应的初始轴向应变分别为 0, 2% 以及 5%.待试样在初始偏应力下平衡至稳定,以  $1\% \cdot \text{min}^{-1}$  的速率使上下墙体相向移动,模拟过程始终保持试样处于准静态,直至试样破坏.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.

表 1 离散元试样模拟参数

Tab.1 Parameters of samples in DEM simulations

试样尺寸/mm	1 600×8 00
颗粒总数/个	6 000
初始平面孔隙比	0.25
颗粒密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2 600
颗粒法向刚度/( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$1.5 \times 10^{10}$
颗粒切向刚度/( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$1.0 \times 10^{10}$
颗粒间摩擦系数	1.0
颗粒与边界摩擦系数	0
颗粒与边界接触刚度/( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$1.5 \times 10^{10}$
颗粒抗转动系数	0.5

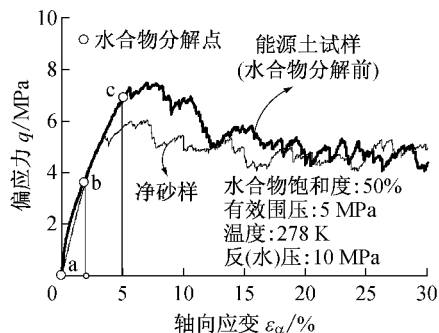


图 1 净砂样及未分解能源土试样应力-应变关系图

Fig.1 Relationships between deviator stress and axial strain of pure sand and MHBS sample before dissociation

## 2 升温降压联合分解模拟

### 2.1 升温降压联合分解的实现

离散元模拟能源土升温降压联合分解的过程是在水合物所处围压  $\sigma=15$  MPa 不变时,根据温度及反(水)压随时间的变化关系持续更新模型在不同时刻下的温度及反(水)压输入值,模型将自行求解各

温压条件下所对应的水合物胶结参数并更新接触间力学响应.为模拟实际升温降压联合开采中以升温法使水合物分解,以降压法进行收集气体,温度与反(水)压随时间的变化关系可以取为

$$T = \begin{cases} 10 \cdot t + 278, & t \leq 0.7 \text{ h} \\ 285, & t > 0.7 \text{ h} \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_w = \begin{cases} 10, & t = 0 \text{ h} \\ 6, & 0 \text{ h} < t \leq 5 \text{ h} \\ 6.5 \cdot t - 26.5, & 5 \text{ h} < t \leq 5.6 \text{ h} \\ 10, & t > 5.6 \text{ h} \end{cases} \quad (2)$$

该温度与反(水)压随时间变化的规律同 Hyodo 等<sup>[19]</sup>室内升温、降压试验中在相同文雅环境下所对应的变化相一致.

图 2 所示箭头为离散元模拟升温降压联合分解过程中温压变化路径,其中虚线表示量纲为一温压相平衡线<sup>[18]</sup>, ( $T^* = T/245$ ,  $P^* = P/1$ ) 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;当赋存环境处于温压相平衡线右下方时水合物将发生分解.具体过程可描述为:① 保持温度  $T=278$  K 及初始反(水)压  $\sigma_w=10$  MPa (初始有效围压 5 MPa) 不变,对欲进行降压分解的试样施加初始偏应力 0, 3.8 及 6.8 MPa,依次标记为试样 a, 试样 b 及试样 c;② 待试样稳定,将有效围压在  $t=0$  h 由 5 MPa 增至 9 MPa 后保持不变 (反(水)压降低至 6 MPa),温度在  $t=0 \sim 0.7$  h 逐渐由 278 K 升至 285 K,并在此之后保持  $T=285$  K,  $\sigma_w=6$  MPa 不变至  $t=5$  h.由此阶段模型参数依据式(1)和式(2)所描述的温度、反(水)压随时间的变化关系持续更新;③ 在  $t=5 \sim 5.6$  h 时,反(水)压逐渐恢复至初始值并保持不变,以模拟实际开采后反(水)压恢复的情况.

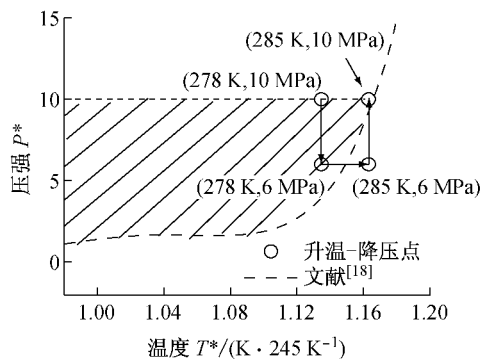


图 2 离散元模拟过程的温压变化路径

Fig.2 The changing paths of temperature and water pressure in the DEM simulation

### 2.2 升温-降压分解宏观力学特性分析

图 3 所示为离散元模拟过程中偏应力比 ( $q/p'$ )

和平面孔隙比随轴向应变变化的情况;图 4 所示为轴向应变随时间的变化情况.反(水)压在试验开始的瞬间降至 6 MPa,在 0~0.7 h 内随温度升高:①对于初始偏应力为零的试样 a,轴向应变逐渐增大至 3%附近保持稳定,偏应力比( $q/p'$ )始终在零附近波动;平面孔隙比随轴向应变增大逐渐减小,最终趋于某稳定值.②对于初始偏应力大于零的试样 b 及试样 c,轴向应变逐渐增大并最终稳定在某一数值;随水压降低,试样有效围压增加,平均有效应力  $p'$  的增大,偏应力比( $q/p'$ )开始迅速减小,后缓慢趋于稳定,最终达到应力状态  $b'$ ,  $c'$ ;平面孔隙比随轴向应变增大逐渐减小,最终趋于某稳定值.值得注意的是水合物在  $t=0.36$  h 时,温度与反(水)压分别为  $T=281.6$  K,  $\sigma_w=6$  MPa,处于温压临界状态线右下方,表明水合物已完全分解.

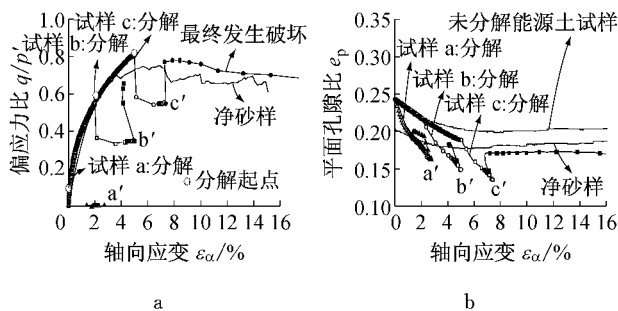


图 3 离散元模拟升温降压联合分解试验应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain relationships in the DEM simulation of MHBS dissociation caused by thermal recovery-depressurization combined method

当水合物反压逐渐恢复时,由于此时试样已为净砂样:①对于初始偏应力为零的试样 a,偏应力比仍在零附近波动,试样轴向应变由 3%减小至 1%附近的某值,并处于稳定;平面孔隙比迅速增加至近似于净砂样在相同轴向应变下的数值,并在该孔隙比下保持稳定;②对于初始偏应力大于零且小于净砂样最大偏应力的试样 b,偏应力比迅速增加直至接近净砂样在相同轴向应变下的数值,并处于稳定;平面孔隙比迅速增加至净砂样在相同轴向应变下的数值,并在该孔隙比下保持稳定;③对于初始偏应力大于净砂样最大偏应力的试样 c,偏应力比迅速增加至略大于净砂样在相同轴向应变下的数值;平面孔隙比迅速增加至略小于净砂样在相同轴向应变下的数值并几乎保持不变,轴向应变逐渐增加至发生破坏.离散元模拟升温降压联合分解法宏观力学特性与降压法<sup>[20]</sup>模拟结果相似,究其原因在于升温降压法中升温过程较短(0.7 h),使得降压过程持续时

间较长,降压所引起的宏观力学特性较明显.由于本文篇幅限制,降压分解过程中力学响应对应的图及文字说明不再重复,具体请查阅参考文献[20].比较两种方法可知,试样 a 与试样 b 在升温降压法最大轴向应变分别为 1.26%与 4.0%,而在降压分解过程中最大轴向应变分别为 2.27%与 5.0%.对于两试样结果发现,相同初始偏应力(小于净砂样破坏偏应力)的试样在升温降压法下的最大轴向应变小于降压分解的情况.

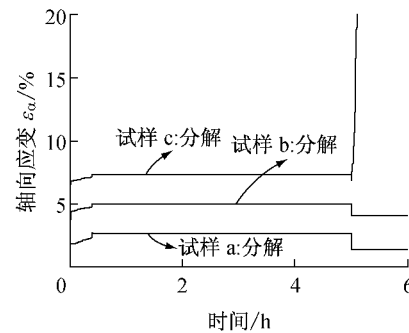


图 4 分解试验中轴向应变随时间变化关系

Fig. 4 Axial strain versus time during MHBS dissociation

### 2.3 升温降压联合分解过程微观力学特性分析

为便于描述升温-降压联合分解时微观变量的演化过程,选取试样 c 的 4 个分解特征点 A( $t=0$  h), B( $t=0.2$  h), C( $t=4$  h)和 D( $t=6$  h)进行描述,分别对应于升温降压分解试验初始状态点、温压发生变化且未达完全分解点、水合物完全分解及反压恢复四个不同状态.

#### 2.3.1 接触分布玫瑰图

每  $10^\circ$  一份将圆周空间分成 36 份,统计接触方向落在每份中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 5 所示为试样 c 在升温分解过程中四个不同时间特征点的总接触、胶结接触及无胶结接触分布玫瑰图.由图 5 可知:在反(水)压降低过程中,总接触分布略微呈主方向为竖直方向的各向异性;胶结接触主方向为水平方向直至完全分解;而无胶结接触的主方向为垂直向.水合物完全分解后,无胶结接触即总接触.待反压恢复后,总接触主方向为竖直方向各向异性分布更明显.

在升温降压联合分解的初始特征点 A( $t=0$ )处,试样处于初始应力(见图 1)及初始温压状态( $T=278$  K,  $\sigma_w=10$  MPa),此时总接触表现为轻微各向异性,即总的竖向接触略多于总的水平接触.这是由于竖向偏应力的施加导致竖向水合物胶结发生破

坏,土体在竖向压力作用下被压缩(轴向应变为 5%, 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。同时,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。在升温-降压分解特征点 B( $t=0.2$  h)处,此时水合物所处温压状态( $T=280$  K,  $\sigma_w=6$  MPa)仍处于相平衡线左上部稳定区域而未分解,由于温度升高及反(水)压降低导致胶结物强度降低(由微观接触模型<sup>[15]</sup>确定),有效围压及竖向应力增大,水合物胶结在外力作用下发生破坏,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,升温降压联合分解的升温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 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 3b)。对于特征点 C( $t=4$  h),由于此时水合物所处温压环境( $T=285$  K,  $\sigma_w=6$  MPa)处于水合物温压相平衡线右下方区域,水合物已完全分解,能源土试样完全转变为净砂样。此时,由于胶结物的消失,土体强度降低,试样 c 被进一步压缩,且在竖向应力作用下,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,但是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 3b);对于反(水)压恢复后的特征点 D( $t=6$  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。在这一过程中颗粒运动更加剧烈,颗粒不断调整位置并伴有更明显的转动(详见下文 APR 分析)。在竖向力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。

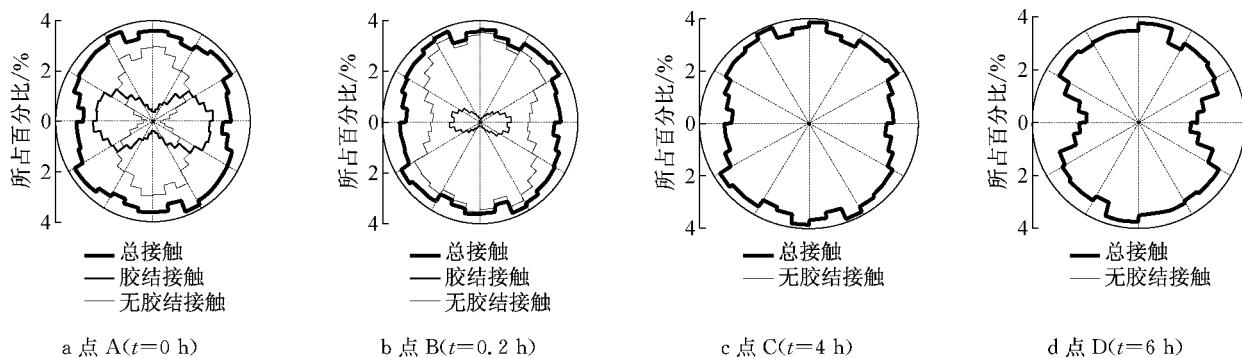


图 5 试样 c 升温降压联合分解不同时刻接触分布玫瑰图

Fig. 5 Contact distributions of sample c at different time during dissociation caused by the combined method

### 2.3.2 土颗粒运动微观分析

蒋明镜等<sup>[22]</sup>认为砂土能量消散与滑动转动量有关,而滑动转动量可分解为两部分:一部分与颗粒中心平动相关;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(3)衡量。

$$\dot{\theta}^p = \frac{1}{\bar{R}}(R_1\dot{\theta}_1 + R_2\dot{\theta}_2) \quad (3)$$

式中,  $\dot{\theta}^p$  表示纯转动率;  $\bar{R}$  为有效粒径,  $\bar{R} = 2R_1R_2/(R_1 + R_2)$ ;  $R_1, R_2$  及  $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$  分别表示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

纯转动率(APR)可按式(4)得到

$$\omega = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[ \frac{1}{R^k} (\dot{\theta}_1^k R_1^k + \dot{\theta}_2^k R_2^k) \right] \quad (4)$$

式中:  $\omega$  为平均纯转动率,上标  $k$  表示第  $k$  个接触点,  $N$  表示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。

准静态速度场中箭头表示颗粒运动方向,箭头长短与颗粒速度大小成正比,可用于表征试样不同区域颗粒运动情况。图 6 所示为试样 c 在升温降压联合分解过程中 4 个不同特征点 A, B, C 及 D 点时

的 APR 平面分布情况. 图 7 所示为试样 c 在升温降压联合分解过程中 4 个不同特征点 A, B, C 及 D 的准静态速度场平面分布情况. 由图可知, 对于特征点 A ( $t=0$  h), 由于胶结未分解, 土颗粒受胶结作用约束仍处于稳定状态, 试样在外力作用下轴向应变为 5%. 此时, 颗粒 APR 数值较小且分布均匀, 准静态速度场较稀疏 (此时试样轮廓以虚线表示), 表明颗粒没有较剧烈的运动. 随着升温降压分解的进行 ( $t=0\sim 6$  h), 胶结强度降低直至消失, 此时, 深海能源土试样内部 APR 数值不断增加且正值 (逆时针转动) 与负值 (顺时针转动) 在试样内分布较为均匀, 准

静态速度场逐渐变密, 并呈现由上下端部和左右侧墙向试样中心运动的趋势, 表明颗粒转动整体逐渐趋于激烈.

对于反压恢复后的特征点 D ( $t=6$  h), 由于此时试样所受球应力及竖向轴应力恢复至初始值, 偏应力大于净砂样破坏偏应力, 试样轴向应变将一直增大直至破坏. 在此过程中, APR 值进一步增大, 表明土颗粒在偏应力作用下的转动平动等重组活动愈发激烈; 同时 APR 正负值呈区域化分布, 可以推测土体内部产生了数条未充分发展的剪切带, 此时准静态速度场较好的呈现了剪切带将要出现的现象.

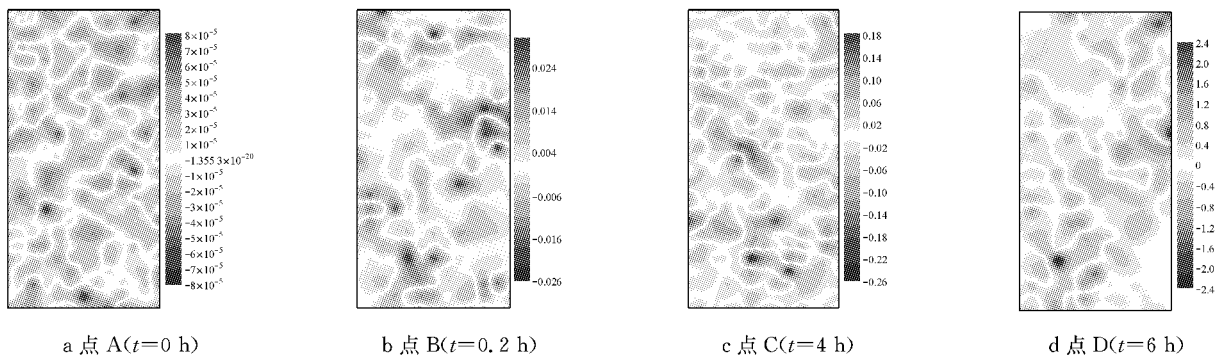


图 6 试样 c 升温-降压联合分解试验不同特征点能源土试样 APR 空间分布

Fig. 6 APR distributions of sample c at different time during dissociation caused by the combined method

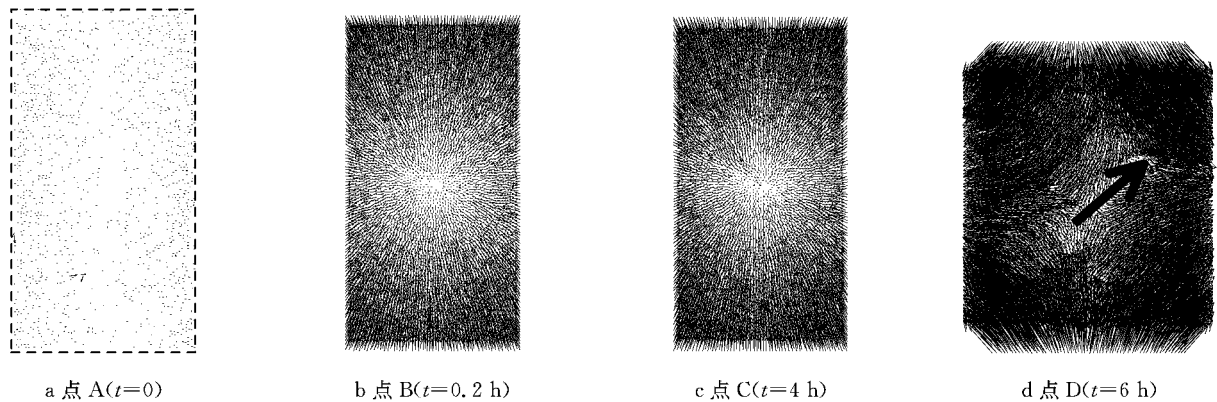


图 7 试样 c 升温-降压联合分解试验不同特征点能源土试样准静态速度场

Fig. 7 Quasi-static velocity field of sample c at different time during dissociation caused by the combined method

### 3 结论

在总结前人研究成果的基础上, 通过将蒋明镜等<sup>[18]</sup>提出的考虑温度-水压-力学综合影响的二维微观胶结模型引入到离散元商业软件 PFC2D 中, 模拟了被认为能源土开采最具有应用前景的能源土升温降压联合开采方法. 通过对试样进行双轴压缩试验, 探索了升温降压联合分解过程中能源土宏微观力学特性变化, 得出如下结论:

(1) 升温降压联合分解宏观力学特性与笔者之前提出的降压分解<sup>[20]</sup>过程中所描述的宏观力学特性较相似. 并且, 在与降压法开采相比, 升温降压联合法在开采时轴向应变更小, 开采采用此法更加安全.

(2) 土体是否发生破坏, 取决于土体所处应力状态. 模拟过程中始终保持试样偏应力不变, 待恢复反(水)压后, 当试样偏应力小于净砂样破坏偏应力时, 试样不会发生破坏. 当偏应力大于净砂样破坏偏应力时, 土体在开采完成水压恢复后发生破坏并伴随若干条未充分发展的剪切带出现.

(3) 与之前研究相比,本文选用离散元方法能够清晰地在水合物分解过程中不同阶段试样内部各微观变量的变化情况与宏观力学响应相联系,为能源土研究提供了一个新的视角。

(4) 采用 PFC2D 的离散元模拟虽然不能定性的与实际室内试验进行对比,但是在对能源土力学特性变化规律却能够很好的进行定性反应。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。

### 参考文献:

- [1] Burshears M, Obried T J, Malone R D. A multi-phase, multi-dimensional, variable composition simulation of gas production from aconventional gas reservoir in contact with hydrates[C]// SPE Unconventional Gas Technology Symposium. Louisiulle: Society of Petroleum Engineers, 1986: 449-456.
- [2] Collett T S. Natural gas hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk River area, North Slope, Alaska[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(5): 793.
- [3] Riedel M, Soence 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.
- [4] Joo Y L, Byung J R, Tae S Y, *et al.* Review on the gas hydrate development and production as a new energy resource [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2011, 15(4): 689.
- [5] 张金华, 魏伟, 王红岩. 天然气水合物研究进展与开发技术概述[J]. 天然气技术, 2009, 3(2): 67.  
ZHANG Jinhua, WEI Wei, WANG Hongyan. Research on gas hydrate and its development techniques [J]. Natural Gas Technology, 2009, 3(2): 67.
- [6] 宋永臣, 阮徐可, 梁海峰, 等. 天然气水合物热开采技术研究进展[J]. 过程工程学报, 2009, 9(5): 1035.  
SONG Yongchen, RUAN Xuke, LIANG Haifen, *et al.* Research advance in thermal recovery of natural gas hydrate [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2009, 9(5): 1035.
- [7] 李淑霞, 陈月明, 杜庆军. 天然气水合物开采方法及数值模拟研究评述[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(3): 146.  
LI Shuxia, CHEN Yueming, DU Qingjun. Commentary of production method and numerical simulation of natural gas hydrates [J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science, 2006, 30(3): 146.
- [8] Kamath V. Study of heat transfer characteristics during dissociation of gas hydrate in porous media [D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 1983.
- [9] Shagapov V S, Chiglintseva A S, Syptlanov V R. Possibility of gas washout from a gas-hydrate massif by circulation of warm water [J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2009, 50(4): 628.
- [10] 张荻秋, 李治平, 陈家玮. 天然气水合物勘探开发研究新进展及发展趋势[J]. 地质科学, 2012, 47(2): 561.  
ZHANG Diqiu, LI Zhiping, CHEN Jiawei. New advancements in natural gas hydrate exploration and development [J]. Chinese Journal of Geology, 2012, 47(2): 561.
- [11] BAI Yuhu, LI Qingping. Simulation of gas production from hydrate reservoir by the combination of warm water flooding and depressurization [J]. Science China: Technological Sciences, 2010, 53(9): 2469.
- [12] 李淑霞, 陈月明, 张卫卫, 等. 多孔介质中天然气水合物注热+降压开采的实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(3): 202.  
LI Shuxia, CHEN Yueming, ZHANG Weiwei, *et al.* Experimental study of natural gas hydrate dissociation in porous media by thermal stimulation and depressurization[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(3): 202.
- [13] 胡立堂, 张可霓, 高童. 南海神狐海域天然气水合物注热降压开采数值模拟研究[J]. 现代地质, 2011, 24(4): 675.  
HU Litang, ZHANG Keni, GAO Tong. Numerical studies of gas production from gas hydrate zone using heat injection and depressurization in Shenhu area, the south China sea [J]. Geoscience, 2011, 24(4): 675.
- [14] 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.
- [15] Murray D R, Kleinberg R L, Sinha B K, M. *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.
- [16] 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.
- [17] Cundall P A, Strack O L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. Geotechnique, 1979, 29: 47.
- [18] 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, 2014, 36(8): 1377.  
JIANG Mingjing, ZHU Fangyuan. A two-dimensional thermal-hydro-mechanical bond contact model for methane hydrate bearing soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1377.
- [19] 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.
- [20] 蒋明镜, 付昌, 贺洁, 等. 不同开采方法下深海能源土离散元模拟[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 639.  
JIANG Mingjing, FU Chang, HE Jie, *et al.* DEM simulations of the exploitation of methane hydrate bearing sediments with different methods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 639.
- [21] Jiang M J, Konrad J M, Leroueil S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(7): 579.
- [22] 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.