

# 水合物开采储层出砂数值模拟研究进展

宁伏龙<sup>1,2\*</sup>, 窦晓峰<sup>1,2</sup>, 孙嘉鑫<sup>1,2</sup>, 刘志超<sup>1,2</sup>, 李彦龙<sup>1,3</sup>, 李晓东<sup>1,2</sup>, 赵颖杰<sup>1,2</sup>, 刘昌岭<sup>3</sup>, 陆红锋<sup>4</sup>, 于彦江<sup>1,4</sup>, 李芷<sup>1,2</sup>, 罗强<sup>1,2</sup>, 曹鑫鑫<sup>1,2</sup>

1 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074

2 科技部地球深部钻探与深地资源开发国际联合研究中心, 武汉 430074

3 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

4 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510075

\* 通信作者, nflzx@cug.edu.cn

收稿日期: 2019-12-30

青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金(QNLM2016ORP0203)、国家重点基础研究发展计划 2017YFC0307600、2018YFE0126400)、中国地质调查局项目(DD20190232, DD20160216, DD20189320, DD20189330, DD20160221, DD20190231)、国家自然科学基金(51274177)和国家特支计划青年拔尖人才项目联合资助

**摘要** 出砂是水合物安全、高效、长期、可控开采面临的主要风险之一,也是制约水合物产业化发展的瓶颈难题之一。通过数值模拟手段对水合物开采过程中井眼出砂的发生、发展及防控效果进行研究是揭示开采过程中储层出砂机理并厘清出砂规律的经济有效手段,对科学设计防砂控泥完井方式、推进水合物产业化进程具有重要作用。据此,本文系统梳理了水合物开采储层出砂数值模拟研究现状。首先简要分析了水合物开采出砂多场耦合作用机理,然后以出砂判断准则为切入点分析了连续介质理论在水合物出砂数值研究中的应用,接着扩展到基于离散介质理论的出砂行为机理分析和规律预测,总结了离散单元法构建水合物出砂模型的核心要素,包括水合物赋存模式、水合物分解效应和流固耦合作用。最后讨论了当前数值模拟研究存在的主要问题,对今后水合物开采储层出砂数值模拟研究提出了相应的建议。

**关键词** 水合物; 数值模拟; 多场耦合; 出砂准则; 离散单元法

## Progress in numerical simulation of sand production from hydrate reservoirs

NING Fulong<sup>1,2</sup>, DOU Xiaofeng<sup>1,2</sup>, SUN Jiabin<sup>1,2</sup>, LIU Zhichao<sup>1,2</sup>, LI Yanlong<sup>1,3</sup>, LI Xiaodong<sup>1,2</sup>, ZHAO Yingjie<sup>1,2</sup>, LIU Changling<sup>3</sup>, LU Hongfeng<sup>4</sup>, YU Yanjiang<sup>1,4</sup>, LI Zhi<sup>1,2</sup>, LUO Qiang<sup>1,2</sup>, CAO Xinxin<sup>1,2</sup>

1 Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2 National Center for International Research on Deep Earth Drilling and Resource Development, Wuhan 430074, China

3 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China

4 Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510075, China

**Abstract** Sand production is one of the critical issues that threaten safe, efficient, controllable and long-term gas production from hydrate reservoirs. Numerical simulation of the occurrence, development and control of sand production from hydrate

引用格式: 宁伏龙, 窦晓峰, 孙嘉鑫, 刘志超, 李彦龙, 李晓东, 赵颖杰, 刘昌岭, 陆红锋, 于彦江, 李芷, 罗强, 曹鑫鑫. 水合物开采储层出砂数值模拟研究进展. 石油科学通报, 2020, 02: 182-203

NING Fulong, DOU Xiaofeng, SUN Jiabin, LIU Zhichao, LI Yanlong, LI Xiaodong, ZHAO Yingjie, LIU Changling, LU Hongfeng, YU Yanjiang, LI Zhi, LUO Qiang, CAO Xinxin. Progress in numerical simulation of sand production from hydrate reservoirs. Petroleum Science Bulletin, 2020, 02: 182-203. 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.02.018

reservoirs is considered to be an effective and economic method to reveal the sand production mechanism and clarify the sand production behaviors. It is of great significance for the scientific design of completion modes for sand control and the promotion of hydrate industrialization. Therefore, this paper systematically summarizes the research status of numerical simulation of the sand production from hydrate reservoirs. We first briefly discuss the multi-field coupling mechanism of sand production from hydrate reservoirs. Then we analyze the numerical study of sand production based on the continuum theory for sand production criteria. Furthermore, we introduce the sand production mechanism and the prediction of sand production behavior based on the discrete medium theory. We summarize the key factors of sand production models established by the discrete element method (DEM), including hydrate pore habits, hydrate dissociation and fluid-solid coupling. Finally, the shortcomings of the current study are discussed, and some suggestions are provided for more accurate models of sand production from hydrate reservoirs in the future.

**Keywords** gas hydrate numerical; simulation; multi-field coupling; sand production criteria; DEM

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.02.018

## 0 前言

天然气水合物是由水分子形成的氢键网络(笼状结构)包裹客体天然气分子在高压低温环境下形成的似冰状结晶化合物<sup>[1-2]</sup>。自然界最常见的天然气水合物客体分子为甲烷,因此也常被称为甲烷水合物。天然气水合物由于其资源储量大、分布广泛、清洁低碳等优点<sup>[3-4]</sup>,被公认为是潜在的替代能源<sup>[5-6]</sup>,其中90%以上都分布在海洋区域<sup>[7]</sup>。因此,海域水合物是资源开发的重点。我国南海也蕴藏有丰富的水合物资源,经过近20年的不懈努力,我国在南海北部陆坡圈定了11个水合物成矿远景区、19个成矿区带、25个有利区块、24个钻探目标区,取得了一系列重大找矿成果,极大丰富了我国的能源储备<sup>[8-9]</sup>。尤其是2017年在南海神狐海域成功实施了首次水合物试采<sup>[10]</sup>,令世界瞩目。从5月10日成功产气点火,至7月9日第一口试采井顺利关井,总产气量达 $30.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,连续试采时间世界第一<sup>[11-12]</sup>。同年,国务院正式批准将天然气水合物列为我国第173个矿种<sup>[13]</sup>。2020年3月,我国海域天然气水合物第二轮试采又迎来历史性突破,总产气量高达 $86.14 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,日均产气量为 $2.87 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,实现了“探索性试采”向“试验性试采”的重大跨越<sup>[4]</sup>。试采成功为推动水合物的产业化发展迈出了关键一步。然而要想实现产业化生产(如产气量 $>40\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ ,生产10年以上),则必须解决制约水合物安全高效可控开采的瓶颈难题。

由于海域水合物储层通常埋深浅,固结程度弱,钻采过程中容易发生井壁失稳、固井失效、出砂、海底沉降、滑坡等一系列工程与地质问题<sup>[7, 14-15]</sup>。其中开采导致的泥砂产出已成为水合物产业化亟需突破的瓶颈之一。所谓出砂就是指储层开采过程中,固体颗粒主要是砂颗粒从储层骨架脱离并随气、水流体运移至井筒内产出的现象。2007年加拿大Mallik水合物试

开采井、2012年美国阿拉斯加CO<sub>2</sub>置换开采甲烷水合物试验井以及2013和2017年日本南海海槽水合物试采井都出现了严重的出砂问题<sup>[16]</sup>,极大地影响了产气效率,甚至导致试采不得不提前终止。尽管我国南海粉砂质水合物储层第一次试采出砂量少,但防砂后的出水不足也导致降压效果受到影响进而制约了产能提升。产生上述生产状况的原因,归根结底还是水合物储层出砂机理与规律未全面厘清与掌握,从而导致防砂方法不科学,防砂技术不过关。只有揭示了出砂机理并系统掌握水合物储层出砂规律,才能优化设计防砂方案,形成科学合理的完井生产制度,最终实现水合物安全高效可控开采。

由于水合物开采现场试验成本高、风险大,室内实验和数值模拟成为水合物开采出砂机理、规律预测及其控制的主要研究手段。其中,数值模拟可为室内实验研究和现场试采提供重要理论依据与技术支撑,具有提高实验效率、节约时间和材料成本等优点,因此成为水合物出砂预测和控制优化设计的首选方法。目前,数值模拟方法已经在水合物开采产能预测方面得到了广泛运用,比如目标靶区产能评价<sup>[17-22]</sup>、不同开采方法或不同井型的产能对比<sup>[23-29]</sup>以及储层增产改造下的产能分析等<sup>[30-32]</sup>。然而,针对水合物储层出砂问题的数值模拟研究公开发表的文献相对较少,相关研究还处于初期探索阶段,急需梳理出后续需要解决的关键问题。

因此,本文在简要介绍水合物开采储层出砂行为特征的基础上,从连续介质和离散介质两个方面系统总结了水合物开采储层出砂数值模拟研究现状,并对今后水合物出砂数值模拟分析与预测研究提出了几点建议,旨在提高出砂数值模拟准确性和适用性,进而为后续水合物防砂和生产制度优化设计奠定良好的技术基础。

## 1 水合物储层开采出砂行为分析

基于井筒的水合物开采过程实际上是井周储层中固态水合物分解成气态天然气和液态水并伴随泥砂等固体产出的过程。因此,与传统油气资源开发不同的是,水合物开采储层出砂问题涉及水合物相态变化<sup>[14]</sup>,是一个复杂的热一流一固一化多场耦合过程<sup>[33]</sup>,具有多尺度、强耦合的时空演化特征,导致对储层特别是井周储层响应行为,如出砂预测和控制变得异常困难,成为水合物安全高效开采的瓶颈之一,也是其中的难点和堵点所在,亟待突破。

图1描述了水合物开采以及储层出砂过程中的温度—渗流—应力—化学多场耦合作用关系。以降采为例,降压开采过程中,通过在井底抽汲地层流体使得储层孔隙压力降低,根据有效应力原理,受降压影响区域储层的有效应力增大,从而导致该区域一定范围内的应力场改变(过程1、6);反之,应力场的改变会影响沉积物骨架变形,进而对储层孔隙度和渗透率以及毛细管压力产生影响,最终影响地层流体迁移(过程6);当储层孔隙压力低于水合物相平衡压力时,水合物分解,固态水合物转变为液态水和气态甲烷(过程3、7);水合物分解释放的大量气体会导致孔隙压力的急剧增高,进而影响应力场(过程1);水合物作为储层一部分,其分解将导致储层孔隙或裂隙空间增大并提高储层渗透率,利于压力传递,促进水合物的进一步分解,极大增加了水合物储层破坏出砂的可能性(过程3、7);随着水气产出,孔隙压力降低将

导致有效应力增加,从而挤压沉积物骨架颗粒,进而降低孔隙度,部分抵消由于水合物分解而提高的地层渗透率,从而使水气运移阻力增大,反过来阻碍水气运移产出(过程1、6);水合物分解是一个吸热反应,使得分解区温度降低,分解区温度降低反过来又会抑制水合物的分解,甚至引起局部水合物二次形成(过程4);水合物分解会导致储层强度降低,当有效应力或流体作用力超过储层强度将导致储层破坏,从而引起出砂,进而导致应力松弛<sup>[35]</sup>(过程9);开采初期,井眼温度与储层原始温度并不一致,二者的温度差导致井周区域温度场的改变。此外水合物相变和多相渗流传热同样会引起温度场的变化(过程4、8、10),而温度场的改变又会产生两方面的影响:(1)改变流体的密度、黏度,影响流体的迁移(过程8、10);(2)作为一种温度荷载(热应力)直接改变储层的应力状态(过程5)。

上述水合物开采储层出砂多场耦合机理复杂,非线性强,难以在数学上获得解析解。因而,基于连续介质和离散单元法(简称离散元)的数值求解方法成为分析多场耦合作用下水合物储层出砂机理、规律及其控制的有效手段。

## 2 基于连续介质理论的出砂数值模拟

连续介质理论将含水合物岩土体视为连续介质材料,基于常规多场耦合理论建立出砂分析模型,所求解方程组包括水、气、水合物三相质量守恒方程、能量守恒方程、力学平衡方程、动量守恒方程及一些辅助方程如力学本构方程、渗透率控制方程、水合物聚

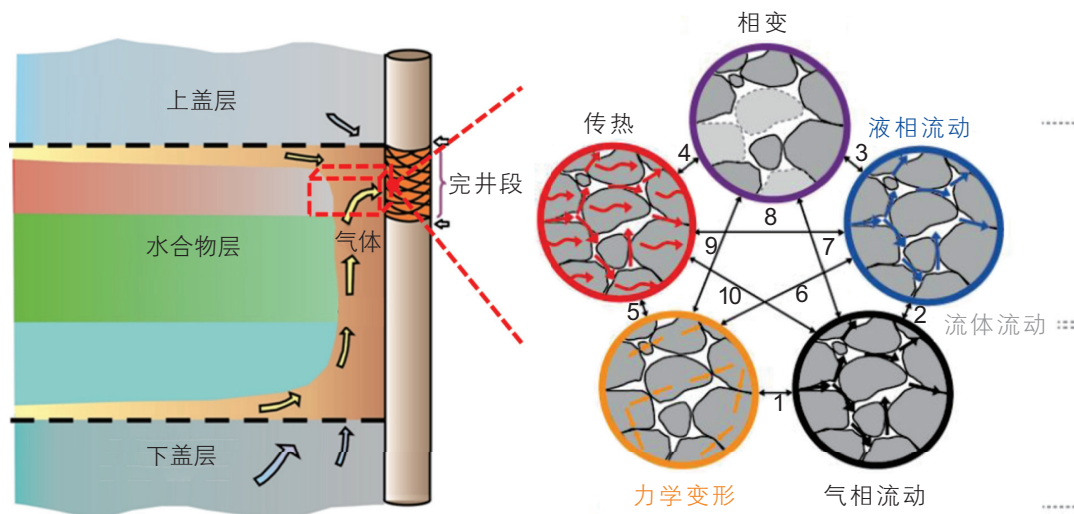


图1 温度—渗流—应力—化学多场耦合作用示意图(改自Sun<sup>[18]</sup>和Fuentes<sup>[34]</sup>)

Fig. 1 Schematic diagram of thermal-hydraulic-mechanical-chemical multi-field coupling (modified from Sun<sup>[18]</sup> and Fuentes<sup>[34]</sup>)



散动力学方程、水合物相平衡条件、饱和度和孔隙度方程等，最后根据初始和边界条件量化求解并利用出砂准则进行出砂判断。可以说，水合物开采出砂研究是多场耦合模型应用的经典案例之一，其中，出砂准则是出砂模拟的关键性控制条件。

### 2.1 摩尔—库伦强度准则

摩尔—库伦(Mohr-Coulomb)本构模型采用张拉剪切组合破坏准则，亦称摩尔—库伦强度准则(见式(1))。对于水合物而言，当水合物开采井周储层所受的拉应力或剪应力超过储层固有的抗拉或抗剪强度时，储层就会发生张拉破坏或剪切破坏，视为出砂。

目前较为成熟的水合物储层数值模型和相应的模拟软件有MH21-HYDRES<sup>[36]</sup>、STOMP-HYD<sup>[37]</sup>、CMG-STARs<sup>[21, 38]</sup>、UMSICHT HyRes<sup>[39]</sup>和TOUGH+HYDRATE<sup>[40]</sup>，它们在水合物相变和流体运移方面均有很好的适用性。在此基础上，耦合力学响应分析模块开发了温度—渗流—力学—相变四场耦合的水合物开采综合响应模型，如TOUGH+HYDRATE+FLAC3D<sup>[41]</sup>和TOUGH+HYDRATE+Biot<sup>[42]</sup>，对应的数值模拟结果更贴近工程背景。如孙嘉鑫等人<sup>[43]</sup>借鉴Moridis<sup>[40]</sup>、Rutqvist<sup>[41]</sup>等研究工作，构建了TOUGH+HYDRATE+FLAC3D耦合模型并采用摩尔—库伦理想弹塑性本构模型及对应强度准则(式(1))对南海神狐海域W19 站位水合物藏钻采过程中的力学响应特性进行了分析，并对出砂风险进行了初步评估。模拟结果表明：在储层尺度和短期模拟条件下，采用逐步降压开采方案，储层有效主应力演化路径始终不会超过峰值强度曲线，见图2，即南海神狐海域W19 站位出现地层屈服破坏出砂的可能性不大。

$$\begin{cases} f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\theta + 2c\sqrt{N_\theta} & \text{剪切破坏} \\ f^t = \sigma^t - \sigma_3 & \text{张拉破坏} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中： $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 分别为最大和最小主应力，单位MPa； $N_\theta$ 为内摩擦角 $\theta$ 的函数， $N_\theta=(1+\sin\theta)/(1-\sin\theta)$ ； $\sigma_{\max}=c/\tan\theta$ ； $c$ 为黏聚力是水合物饱和度 $S_H$ (下标H表示水合物)的函数，单位MPa， $c(S_H)=c(S_H=0)+(1-\sin\theta)/(2\cos\theta)\alpha S_H^\beta$ ，其中 $c(S_H=0)$ 是地层中无水合物时的黏聚力， $\alpha$ 和 $\beta$ 分别是甲烷水合物的恒定材料参数， $\alpha$ 控制强度增加的数值，无量纲， $\beta$ 是水合物饱和度的增加程度，无量纲； $\sigma^t$ 为抗拉强度，单位MPa，材料抗拉强度不超过 $\sigma_{\max}$ 。

同样，Jin等人<sup>[42]</sup>通过构建TOUGH+HYDRATE+Biot耦合模型对南海神狐海域SH2 站位水合物藏在水平井钻采过程中的力学响应特性进行了分析，发现储层有效主应力路径与Zhang等<sup>[44]</sup>提出的Mohr-Coulomb强度曲线非常靠近(图3)，理论上开采过程中存在出砂风险。Zhang等<sup>[44]</sup>提出的强度准则是根据粉质黏土三轴测试数据建立的，与我国南海泥质

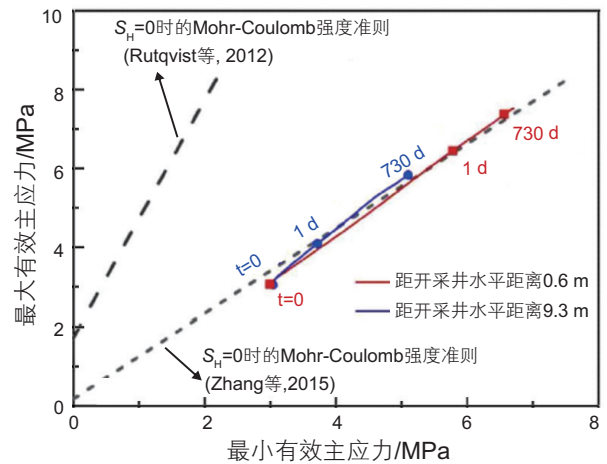


图3 降压开采过程中，距开采井水平距离为0.6 m和9.3 m处对应的有效主应力路径演化情况<sup>[42]</sup>

Fig. 3 Evolution of effective principal stress path at the position of 0.6 m and 9.3 m horizontally away from well during the depressurization<sup>[42]</sup>

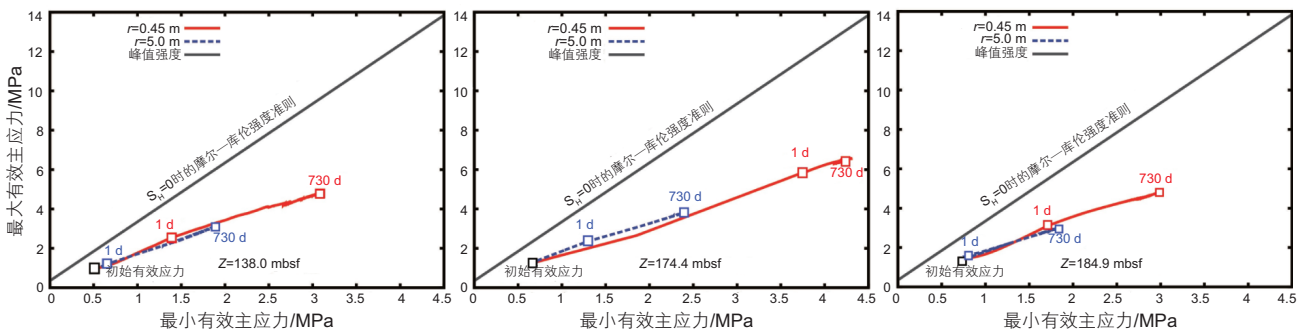


图2 降压开采过程中，井周3处不同深度对应的有效主应力路径演化情况(mbsf—meter below seafloor)<sup>[43]</sup>

Fig. 2 Evolution of effective principal stress path corresponding to different depths of the well during the depressurization (mbsf—meter below seafloor)<sup>[43]</sup>

粉砂储层物性相近。但是有效主应力路径与Rutqvist等<sup>[41]</sup>采用的根据日本南海海槽砂质储层性质建立的Mohr-Coulomb强度准则曲线则相去甚远(图3)。可见,储层屈服判断以及出砂风险评估与沉积物物性息息相关。

## 2.2 侵蚀准则

基于侵蚀力学发展而来的侵蚀准则在常规砂岩油藏开采出砂模拟研究方面应用较为普遍<sup>[45]</sup>。基于侵蚀准则建立的出砂模型一般假设地层砂在流体的动力作用下发生侵蚀,固体砂转变为流化砂进而运移产出,砂粒运移过程中可能出现沉积和再次举升,如图4所示。

针对水合物储层,Uchida<sup>[46]</sup>等在Papamichos与Malmanger所建出砂模型的基础上考虑水合物影响,首次提出了适用于水合物地层的砂脱离数学模型(式(2)):

$$dm_{ssi} = -m_{ssi}\omega_2 M^{dte} \times \left[ \frac{s_w}{s_w + s_g} H\left(\frac{i_w}{i_w^{cri}} - 1\right) + \frac{s_g}{s_w + s_g} H\left(\frac{i_g}{i_g^{cri}} - 1\right) \right] dt \quad (2)$$

式(2)中, $m_{ssi}$ (下标ssi表示固体砂状态)是固体砂的单位体积质量,单位 $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\omega_2$ 是砂脱离速度的控制参数,单位 $\text{h}^{-1}$ ;  $M^{dte}$ (上标dte表示脱离)是砂脱离势能,无量纲;  $s_w$ 、 $s_g$ 分别是水、气流体的饱和度,无量纲;  $i_w$ 、 $i_g$ 分别是水、气流体的水力梯度,无量纲,  $i_w^{cri}$ 和  $i_g^{cri}$ 分别是水、气引起砂脱离的临界水力梯度,无量纲;  $H(x)$ 是单位阶跃函数(即当 $x \leq 0$ 时,  $H(x)=0$ ; 当 $x > 0$ 时,  $H(x)=1$ ),该方程大括号内第一部分代表了水砂混合物中砂粒质量比例,第二部分代表了气砂混合物中砂粒质量比例。

水合物储层砂脱离模型(式(2))的亮点在于:

(1)使用临界水力梯度表征出砂驱动力进行砂脱离判断,并将临界水力梯度与水合物饱和度相关联,假设临界水力梯度随水合物饱和度的增大而指数上升。关系式(以水相为例)如下:

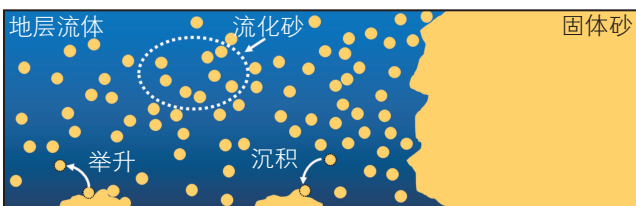


图4 地层侵蚀出砂示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sand production by erosion

$$i_w^{cri} = \frac{i_w^{cri0}}{(1-S_H)^{\omega_3}} \quad (3)$$

式(3)中,  $i_w^{cri0}$  是没有水合物影响的临界水力梯度,无量纲;  $\omega_3$  是与水合物相关的临界水力梯度增长因子,无量纲;  $S_H$  是水合物饱和度,无量纲。

(2)引入脱砂势能概念,并假设砂脱离势能与剪切变形呈线性相关,关系式如下:

$$M^{dte} = \int (dM^{dte+} + dM^{dte-}) = \int \left( \omega_4 d\varepsilon_d + \frac{dm_{ssi}}{m_{ssi0}} \right) = (\omega_4)_d \varepsilon_d + \ln \left( \frac{m_{ssi}}{m_{ssi0}} \right) + M_0^{dte} \quad (4)$$

式(4)中,  $dM^{dte+}$  是砂脱离势能增量,无量纲;  $dM^{dte-}$  是砂脱离势能减小量,无量纲;  $\omega_4$  是与剪切变形相关的脱砂势能增量因子,无量纲;  $d\varepsilon_d$  是偏应变增量,无量纲;  $m_{ssi0}$  是初始的原位砂质量(下标ssi0表示初始固体砂状态),单位 $\text{g}$ ;  $M_0^{dte}$  是初始的砂脱离势能,取值0。此外,该模型还考虑了出砂过程中砂颗粒运动状态的转变,包括砂脱离运移后的沉降和再次举升。模拟结果表明(图5(a)),控制降压速率能够有效降低开采出砂量。模型的不足之处在于假设的临界水力梯度随水合物饱和度的增大而指数上升可能不完全适用于分解时水合物饱和度降低过程,同时模型还引入了6个未经数学推导和实验支撑的参数<sup>[35]</sup>。最近,Uchida等人<sup>[47]</sup>将出砂模型中引入的6个参数对出砂量的相对影响进行了评价,结果表明出砂量主要由 $\omega_3$ 和 $\omega_4$ 主导。此外,Uchida等人<sup>[48]</sup>还对均质和泥砂互层两种类型的含水合物沉积物出砂情况进行了模拟,发现与均质情况相比,存在泥砂互层时,泥砂界面处的剪切变形以及水力梯度均较大,相应的出砂量也较大且出砂持续时间更久(图5(b))。

Akaki和Kimoto<sup>[49]</sup>基于多相混合物理论,建立了一个预测水合物分解过程中包括侵蚀出砂在内的化学-热-力多场耦合行为的数值模型。该模型将水相和固相间的相互作用力作为侵蚀出砂驱动力(式(5)和(6)),并考虑到侵蚀行为受颗粒粒径控制,建立了颗粒粒径与起蚀条件以及侵蚀质量转化速率间的本构关系。针对甲烷水合物的降压开采模拟结果表明,侵蚀出砂情况下的产气量比不考虑侵蚀出砂情况下的产气量更大,这是因为侵蚀出砂会增大储层渗透率,有利于压力传递。侵蚀出砂还会促进土体骨架应力和体积应变的增长。此外,模拟结果也很好地展现了颗粒粒径对出砂的影响。

$$\tilde{P}^{w(SH)} = \tilde{P}^{ws} + \tilde{P}^{wh} = \frac{(n^w)^2 \rho^w g}{k^w} (v^w - v^{SH}) = \frac{n^w \rho^w g}{k^w} W^w \quad (5)$$

$$R \stackrel{def}{=} \tilde{P}^{w(SH)} \cdot n_{flow} = \frac{n^w \rho^w g}{k^w} W^w \quad (6)$$

$$\frac{W^w}{\|W^w\|} = \frac{n^w \rho^w g}{k^w} \|W^w\| \geq R_{cr} = R_{cr0} h(S)$$

式(5)和(6)中： $\tilde{P}^{w(SH)}$ 是水相与固相间的作用力，单位kN； $\tilde{P}^{ws}$ 是水相与砂相间的作用力，单位kN； $\tilde{P}^{wh}$ 是水相与水合物相间的作用力，单位kN； $n^w$ 是水相体积分数，无量纲； $k^w$ 是水相渗透率系数，单位m/s； $v^w$ 是水相速度矢量，单位m/s； $v^{SH}$ 是固相

速度矢量，单位m/s； $W^w$ 是水相和固相间的相对速度， $W^w = N^w (V^w - V^{SH})$ ，单位m/s； $R$ 是侵蚀驱动力，单位kN/m<sup>3</sup>； $n_{flow}$ 是水流方向单位矢量，无量纲； $R_{cr}$ 是临界侵蚀驱动力，当 $R > R_{cr}$ 时，发生侵蚀，单位kN/m<sup>3</sup>； $R_{cr0}$ 是参考临界驱动力，单位kN/m<sup>3</sup>； $h(S)$ 是表征抗侵蚀能力的函数，与应力水平、储层土体结构性性质以及水合物饱和度等因素相关，需要根据实验数据确定，无量纲。

Yu等<sup>[38]</sup>借助CMG-STARs软件建立了泥质粉砂水合物储层开采过程中泥砂—水合物—气—水多相流动数值模型，其中泥砂侵蚀脱离速率与临界水流速相关(式(7))。之后对不同防砂设计方案下的产能与出砂

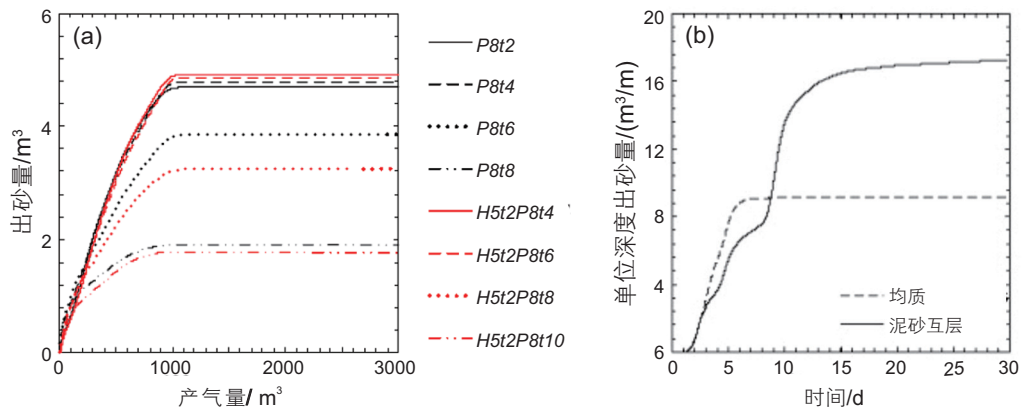


图5 (a)不同降压速率下的出砂量和产气量对比( $P8t2$ 表示2 d内降压8 MPa，降压速率为4 MPa/d； $H5t2P8t4$ 表示井内注热升温5 K并在第2~4 d内降压8 MPa，降压速率为4 MPa/d； $P8t4$ 、 $P8t6$ 、 $P8t8$ 、 $H5t2P8t6$ 、 $H5t2P8t8$ 、 $H5t2P8t10$ 同理。)<sup>[46]</sup> (b)均质和泥砂互层型水合物沉积物在30 d内的单位深度出砂量对比<sup>[48]</sup>

Fig. 5 (a) Comparison of sand production and gas production with different depressurization rates ( $P8t2$ , the depressurization rate of 4 MPa/d, that is 8 MPa drawdown in 2 days;  $H5t2P8t4$ , well temperature raised 5 K and throughout the operation, pressure reduction 8 MPa in 2–4 days with the depressurization rate of 4 MPa/d;  $P8t4$ 、 $P8t6$ 、 $P8t8$ 、 $H5t2P8t6$ 、 $H5t2P8t8$ 、 $H5t2P8t10$  have the same meanings)<sup>[46]</sup> (b) Comparison of sand production of homogeneous and interbedded hydrate-bearing sediments over a 30 day period<sup>[48]</sup>

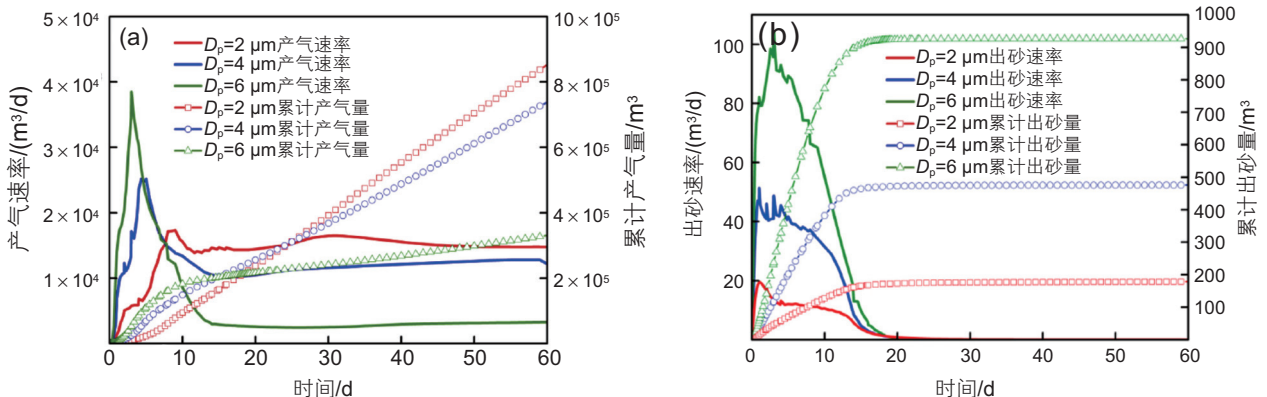


图6 (a)不同控砂标准下的产能对比和(b)出砂量对比<sup>[38]</sup>

Fig. 6 (a) Comparison of gas production and (b) sand production applying the different sand control criteria<sup>[38]</sup>



量进行了模拟评估,见图6。发现防砂设计对于水合物藏的持续性开采具有至关重要的影响,不恰当的防砂设计会导致近井壁区域地层大量出砂,进而使得黏土堵塞产气通道,降低产能。模拟获得的最优控砂标准为 $D_p=3\sim 4\ \mu\text{m}$ ( $D_p$ 表示控砂标准参数,只有尺寸小于 $D_p$ 的砂粒可以通过防砂装置流入井眼)。

$$\frac{\partial m_{\text{si}}}{\partial t} = -m_{\text{si}}\omega f(U - U_{\text{cri}}) \quad (7)$$

式(7)中: $m_{\text{si}}$ (下标si表示砂)是每个控制体积内固体的质量,单位 $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\omega$ 是泥砂脱离速度的控制参数,单位 $\text{d}^{-1}$ ;  $U$ 是水流速,单位 $\text{m}/\text{d}$ ;  $U_{\text{cri}}$ 是引起泥砂脱离的临界水流速,单位 $\text{m}/\text{d}$ 。

### 2.3 等效塑性应变准则

油气开采过程中,近井壁储层在地应力和孔隙压力的联合作用下易发生屈服破坏,这主要是因为储层应力水平超过弹性范围后,储层产生一定塑性变形所致<sup>[50]</sup>。储层达到塑性状态时仍能抵抗一定荷载,地层不出砂,只有当储层塑性应变超过极限值即临界塑性应变后,储层才会破坏<sup>[33]</sup>。

Yan等人<sup>[51]</sup>将等效塑性应变作为出砂判断准则(式(8)和(9)),并利用TOUGH+HYDRATE软件结合有限元软件ABAQUS建立二维裸眼完井模型并求解了自定义水合物开采出砂多场耦合方程组,系统模拟分析了水合物分解效应、开采压差、井底温度、储层渗透率、初始水合物饱和度以及各向异性原位应力等敏感性参数对出砂的影响规律。模拟结果表明,井眼效应导致的应力集中和水合物分解效应引起的地层强度降低是储层出砂的根本原因。

$$\varepsilon_p = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_{p1}^2 + \varepsilon_{p2}^2 + \varepsilon_{p3}^2)} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_p < 1\% & , \text{不出砂} \\ 1\% < \varepsilon_p < 3\% & , \text{可控出砂} \\ \varepsilon_p > 3\% & , \text{破坏性出砂} \end{cases} \quad (9)$$

式(8)和(9)中, $\varepsilon_p$ 是等效塑性应变,无量纲, $\varepsilon_{p1}^2$ 、 $\varepsilon_{p2}^2$ 、 $\varepsilon_{p3}^2$ 是3个方向的塑性主应变,无量纲。

上述构建的出砂数值模型在表征近井壁储层由于出砂而发生渐进破坏方面存在局限性(图7(a))。采用任意拉格朗日—欧拉自适应网格划分技术(ALE)能够有效解决这一问题。该方法能够使网格独立于材料运动,即使出砂过程中破坏或被侵蚀的储层介质被移除导致储层发生严重变形(图7(b)),出砂数值模型依旧能够通过自适应调整而保持高质量的网格<sup>[52]</sup>。随着出砂的发生,侵蚀面的边界条件也随之更新。张怀文等人<sup>[53]</sup>将侵蚀准则与等效塑性应变准则相结合(式(10))并采用ALE方法进行了水合物开采出砂模拟研究,表明水合物地层的最大等效塑性应变以及破坏出砂风险均随开采时间的增加而增大。此外还将出砂现象分为轻微出砂、暂稳定出砂、快速出砂和后稳定出砂4个阶段。

$$V = \eta(1 - \phi)C_1v_w \quad (10)$$

式(10)中, $V$ 为地层出砂速度,单位 $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ;  $\phi$ 为地层孔隙度,无量纲; $C_1$ 为流体中颗粒密度,单位 $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $v_w$ 为孔隙流体速度,单位 $\text{m}/\text{s}$ ;  $\eta$ 为地层出砂系数,无量纲,取决于地层的等效塑性应变, $\eta = \eta_1(\varepsilon_p - \varepsilon'_p)$ ,同时 $\eta_1$ 最大不超过 $\eta_2$ ;  $\varepsilon'_p$ 为地层最大可承受塑性应变,无量纲; $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 为实验系数,无量纲。

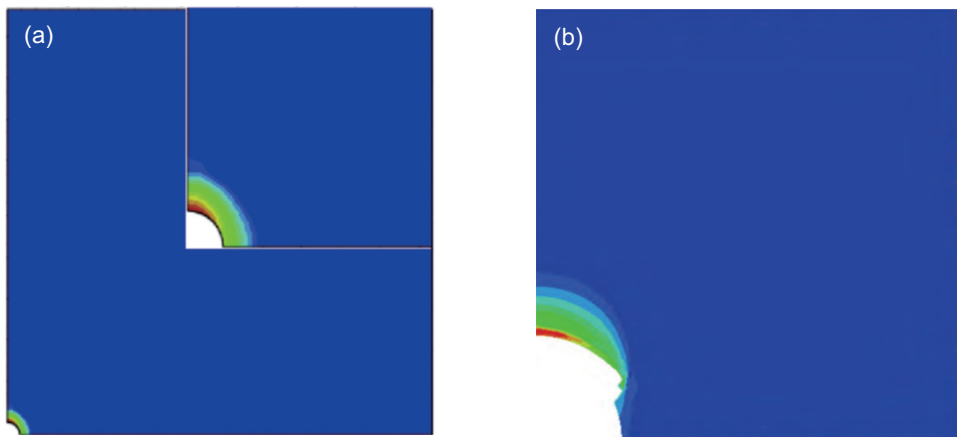


图7 (a)未采用ALE自适应网格的水合物开采出砂模型井周等效塑性应变分布情况<sup>[51]</sup>(b)采用ALE自适应网格的出砂模型井周等效塑性应变分布情况<sup>[53]</sup>

Fig. 7 (a) Distribution of equivalent plastic strain around well in sand production model of hydrate production without ALE adaptive meshing<sup>[51]</sup> (b) with ALE adaptive meshing<sup>[53]</sup>

## 2.4 力平衡准则

作用于物体的力或力矩之和等于零的状态,称为力平衡。

针对水合物储层开采出砂问题,刘浩伽等<sup>[54]</sup>考虑水合物的孔隙填充赋存模式,基于水合物分解区地层松散沉积物球型颗粒堆积假设,通过分析水合物分解前缘和分解区内部地层砂粒的受力情况(图8),并根据力矩平衡条件建立了松散沉积物中地层砂粒启动运移临界流速的计算模型,砂粒启动运移的临界条件就是力矩平衡状态被打破。关系如下:

(1) 水合物分解前缘地层砂粒启动运移条件

$$(F_h - F_c)r_s \sin \theta \geq F_g r_s \cos \theta + 2r_s F_f \quad (11)$$

砂粒启动运移临界流速

$$u_{c,f} = \frac{F_c + \frac{4}{3} \pi \Delta \rho g r_s^3 \cot \theta + \frac{2m\pi r_s^2 (\rho_m g H + \phi \rho_m g h + (1-\phi) \rho g h)}{\sin \theta}}{60000 \pi \mu \frac{1-\phi}{\phi^2} r_s} \quad (12)$$

(2) 分解区内部地层砂粒启动运移条件

$$(F_d - F_l)r_s \geq (F_g + F_c)r_s + 2F_f r_s \quad (13)$$

砂粒启动运移临界流速

$$\sqrt{u_{c,i}} = \left\{ \left[ \left( -\frac{B^3}{27A^3} + \frac{C}{2A} \right)^2 - \frac{B^6}{729A^6} \right]^{0.5} + \frac{C}{2A} - \frac{B^3}{27A^3} \right\}^{\frac{1}{3}} - \frac{B}{3A} + \frac{B^3}{9A^2 \left[ \left( \frac{C}{2A} - \frac{B^3}{27A^3} \right)^2 - \frac{B^6}{729A^6} \right]^{0.5} + \frac{C}{2A} - \frac{B^3}{27A^3}} \quad (14)$$

其中

$$A = \chi \sqrt{\rho} \sqrt{\frac{\mu}{k \phi^2 \sqrt{k/\phi}}} \quad (15)$$

$$B = \frac{\omega \pi \mu}{\phi \sqrt{k/\phi}} \quad (16)$$

$$C = \frac{4}{3} \pi \Delta \rho g + \frac{F_c}{r_s^3} + \frac{2\pi \mu_0 g H}{r_s} \quad (17)$$

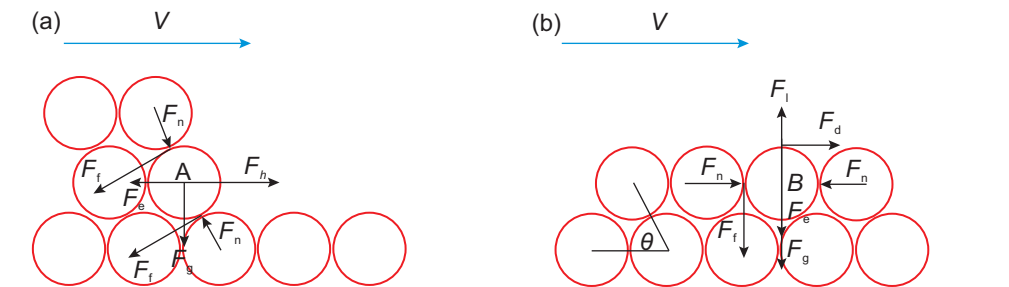


图8 分解区松散沉积物中砂粒受力示意图(a)分解前缘(b)分解区内部<sup>[54]</sup>

Fig. 8 Force diagram of sands in unconsolidated sediments of hydrate decomposed zone (a) at dissociation front (b) inside dissociation front<sup>[54]</sup>

式(11)~(17)中,  $F_g$ 为微粒的浮重,单位N;  $F_n$ 表示砂粒间的相互挤压力,是上覆地层压力沿颗粒接触面法线方向的分量,单位N;  $F_h$ 是液流渗流产生的推动力,单位N;  $F_d$ 为水流的牵引力,单位N;  $F_c$ 为内聚力,单位N;  $F_f$ 是砂粒间的摩擦力,单位N;  $F_l$ 为流体的举升力,单位N;  $r_s$ 为地层砂颗粒的半径,单位m;  $\mu$ 为流体动力黏度,单位Pa·s;  $\rho$ 为流体中地层砂微粒密度,单位kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_{液}$ 为驱替流体的密度,单位kg/m<sup>3</sup>;  $h$ 为储层埋藏深度,单位m;  $H$ 为海底之上的水深,单位m;  $\phi$ 为水合物分解区孔隙度,无量纲;  $\omega$ 为流体牵引力常数,无量纲;  $\chi$ 为举升系数,无量纲;  $k$ 为储层渗透率,单位m<sup>2</sup>。

敏感性因素分析结果表明:水合物分解前缘和分解区内部微粒的临界流速均随着粒径、排布角度、颗粒摩擦系数的增大而增大。胶结物性质、流体中的电解质类型以及浓度等参数也均对临界出砂流速产生一定的影响。

董长银等人<sup>[55]</sup>考虑水合物的胶结赋存模式,构建了水合物储层砂颗粒结构模型。该模型利用水合物强度比例系数和影响系数表征水合物分解对胶结强度的影响,并以力平衡准则作为出砂判断条件,即当砂脱离动力大于阻力时,骨架砂颗粒剥离。模拟得到了前端类蚯蚓洞与后端连续垮塌的复合出砂形态。

## 3 基于离散介质理论的出砂数值模拟

连续介质模型虽然考虑了多场耦合作用,但往往忽略了泥砂产出的离散特征以及颗粒间的作用力对出砂的影响。常规砂岩油藏出砂模拟研究表明,基于离散介质理论的离散单元法建立的出砂预测模型能够不受变形量限制直观地模拟砂粒从地层骨架脱离、运移的全过程,从细观尺度揭示储层出砂机制与规律。然而,目前采用离散元模拟预测水合物储层开采出砂



的文献报道还不多。

与常规砂岩油藏出砂离散元模型相比,水合物储层出砂离散元模型必须综合考虑以下3个核心要素:一是水合物赋存模式仿真;二是水合物分解效应;三是流固耦合作用。

### 3.1 水合物赋存模式仿真

自然界中的水合物多以孔隙填充、胶结、包裹和骨架支撑4种形式赋存于海洋或大陆冻土沉积物中<sup>[56-61]</sup>,见图9。

(1)孔隙填充型:水合物在沉积物骨架颗粒边界上成核,并在孔隙空间内自由生长。但是,孔隙内水合物不会将周围骨架颗粒胶结起来。

(2)胶结型:水合物在沉积物骨架颗粒间成核生

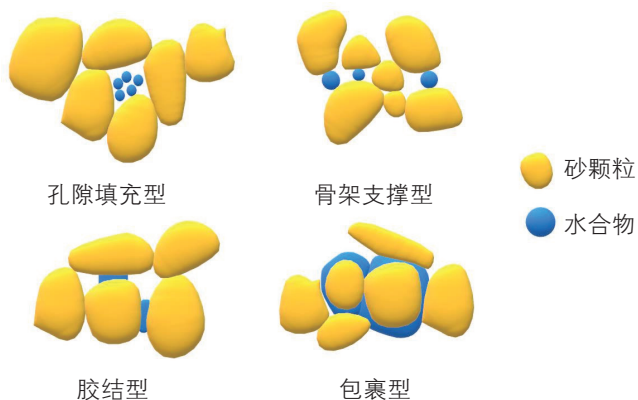


图9 水合物赋存模式

Fig. 9 Pore habits of hydrate in sediments

长,并将骨架颗粒胶结在一起。

(3)包裹型:水合物在沉积物骨架颗粒表面及弯液处成核生长,最终将骨架颗粒包裹<sup>[62]</sup>。

(4)骨架支撑型:水合物桥接邻近的颗粒,并成为承重骨架的一部分而为整体骨架提供力学稳定性。当水合物饱和度超过 $S_H = 25\% \sim 40\%$ 时,孔隙填充型水合物通常会转化为骨架支撑型水合物<sup>[63-65]</sup>。

不同的水合物赋存模式所对应的沉积物宏观物力学性质不同<sup>[57, 66]</sup>,是影响水合物储层开采出砂的重要因素之一。因此有必要根据实际储层细观结构,建立不同分布模式下的含水合物沉积物开采出砂模型,系统性地对水合物开采过程中的出砂问题进行定性和定量的描述。虽然基于离散单元法的水合物开采出砂研究很少报道,但通过离散单元法构建数值力学实验如双轴压缩实验(二维)和三轴压缩实验(三维)研究水合物对沉积物力学性质的影响取得了长足的发展,其中不同分布模式的含水合物沉积物试样离散元制备方法是水合物储层出砂模型构建的基础。

#### 3.1.1 孔隙填充型

Brugada等<sup>[65]</sup>提出了“Soil→Hydrate”和“Soil+Hydrate”两种不同的孔隙填充型含水合物沉积物数值成样方法。具体步骤如下:

(1)“Soil→Hydrate”方法,首先采用“半径膨胀法”在一定区域内生成指定粒径级配、数目和初始孔隙度 $\phi_1$ 的沉积物骨架颗粒(图10(a)),然后通过伺服机制将沉积物骨架颗粒在一定应力条件下固结压实,达到目标孔隙度 $\phi_2$ ( $\phi_2 < \phi_1$ ),接着,在上述区域内随机生

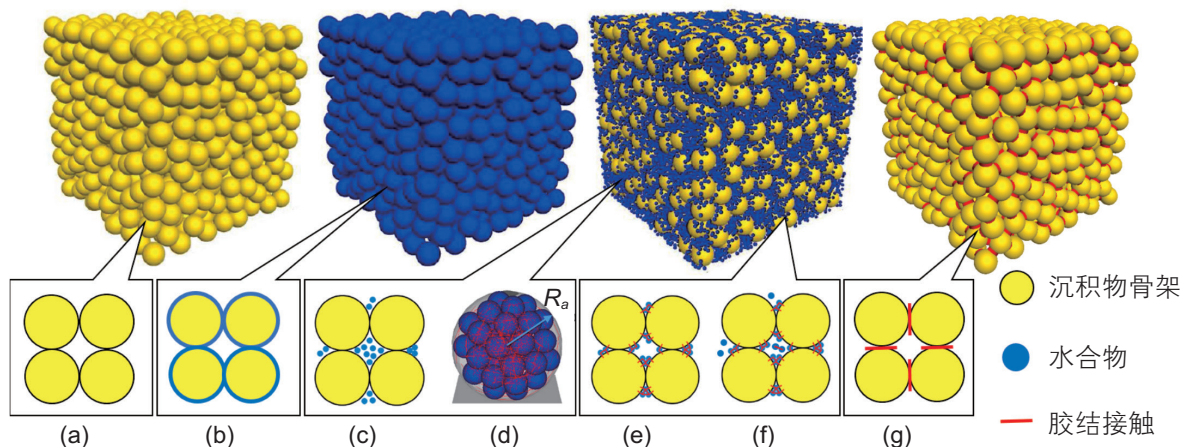


图10 不同赋存模式下的含水合物沉积物数值试样示意图(a)沉积物骨架(b)包裹型(c)孔隙填充型—水合物颗粒(d)孔隙填充型—水合物团簇(e)胶结型—水合物颗粒(f)混合型(g)胶结型—胶结接触(改自Katagiri<sup>[73]</sup>、Yu<sup>[70]</sup>、贺洁<sup>[68]</sup>)

Fig. 10 Schematic diagram of numerical samples of hydrate-bearing sediments under different pore habits (a) sediment skeleton (b) grain-coating (c) pore-filling, hydrate particle (d) pore-filling, hydrate cluster (e) cementation, hydrate particle (f) combination (g) cementation, cementing contact (modified from Katagiri<sup>[73]</sup>、Yu<sup>[70]</sup>、HeJie<sup>[68]</sup>)

成水合物颗粒(水合物颗粒粒径小于骨架颗粒粒径,一般差一个量级),并要求水合物颗粒与已有颗粒不产生重叠,如此循环,直到指定的水合物颗粒数目满足所需的水合物饱和度(图 10(c))。

(2)“Soil+Hydrate”方法的不同之处在于,在生成孔隙度 $\phi_1$ 的沉积物骨架颗粒之后,接着按“Soil→Hydrate”方法生成水合物颗粒,最后再通过伺服机制将沉积物骨架颗粒和水合物颗粒一起固结压实到目标孔隙度 $\phi_2$ 。上述两种方法均可通过改变水合物颗粒生成数目来制备不同饱和度的含水合物沉积物(图 10(c))。“Soil+Hydrate”方法对应含水合物沉积物的室内制备方法——预拌合法。

贺洁和蒋明镜<sup>[67-68]</sup>在上述方法的基础上,提出了采用水合物团簇制样的新方法。首先采用“分层欠压法<sup>[69]</sup>”在一定区域内生成指定粒径级配、数目和初始孔隙度 $\phi_1$ 的沉积物骨架颗粒。然后,在上述沉积物骨架中随机生成指定数目和粒径 $R_a$ 的圆球颗粒,接着,逐一删除圆球颗粒,并在半径为 $R_a$ 的球体范围内生成单一颗粒半径为 $r$ 的水合物小颗粒,最后通过平行胶结模型施加强胶结作用将这些水合物颗粒凝聚成为整体,形成水合物团簇,即以水合物团簇替换圆球颗粒(图 10(d))。该方法的优点是能够展现水合物自身破坏对沉积物力学性质的影响。

如前所述,当模型中水合物颗粒足够多,即水合物饱和度增大到某一特定值时,水合物小颗粒就有可能承担骨架应力,也就是说孔隙填充型水合物转化为骨架支撑型水合物。

### 3.1.2 胶结型

Yu等<sup>[70]</sup>通过胶结模型将颗粒胶结以制备胶结型含水合物沉积物。首先生成沉积物骨架颗粒,然后,在给定的饱和度下将所需水合物颗粒平均分为6组,分阶段施加6个不同方向的重力(类似的,也可以给颗粒施加不同方向的速度<sup>[71]</sup>)以实现水合物颗粒在胶结过程中的均匀分布。每一阶段水合物颗粒都会沿某一特定重力方向沉降,直至与骨架颗粒接触而停止并逐步累积。需要满足的条件是保证水合物颗粒与骨架颗粒或其他水合物颗粒至少有两次接触。一旦模型体系达到平衡状态,就通过平行胶结模型在所有的骨架颗粒与水合物颗粒接触点以及水合物与水合物颗粒接触点形成胶结(图 10(e))。

Vinod等<sup>[72]</sup>则在模型中引入了一种“虚拟水合物”方法,即将储层砂粒以颗粒形式直观地表示,而水合物则由颗粒间的“键合”来表示。待沉积物骨架颗粒生成后,指定骨架颗粒间接触模型为平行胶结模型即

可(图 10(g))。水合物饱和度的差异通过平行胶结模型中的胶结强度参数来反映。

### 3.1.3 包裹型

Katagiri等<sup>[73]</sup>在已生成的沉积物骨架颗粒上将其半径增大来制备包裹型含水合物沉积物,半径增量所形成的壳层代表水合物包裹层(图 10(b))。利用几何方法计算半径增量所形成的壳层总体积与孔隙体积的比值即为水合物饱和度。

蒋明镜等<sup>[62, 74]</sup>同样考虑将水合物简化为骨架颗粒表面的均匀包裹层,但是在数值试样中并没有将水合物层显示刻画,而是通过改进已有离散元胶结模型并施加于骨架颗粒上以等效颗粒接触处水合物的胶结作用,能够实现水合物的传递作用以及增强颗粒的抗转动能力。

### 3.1.4 混合型

杨期君和赵春风<sup>[75]</sup>提出了孔隙填充和胶结混合型的含水合物沉积物制备方法,该方法与“Soil→Hydrate”方法基本相同,差别在于后者在生成水合物颗粒时首先将骨架颗粒位置固定并缩小,然后在试样孔隙中生成指定数目的水合物小颗粒,接着将骨架颗粒直径逐渐膨胀到原有直径并取消对其的固定,将模型计算至初始平衡。最后,在骨架颗粒与水合物颗粒接触点以及水合物与水合物颗粒接触点分配平行胶结模型(图 10(f))。

周博等<sup>[76]</sup>采用了更加简化的成样方法。首先通过计算将满足饱和度要求的水合物小颗粒转化为砂粒粒径级配曲线中的一部分,然后根据初始孔隙度和粒径级配曲线同时生成试样所需的骨架大颗粒和水合物小颗粒,接着,平衡颗粒消除颗粒间重叠量,最后施加固结压力,并在模型计算平衡后在骨架颗粒之间分配线性接触模型,在骨架颗粒与水合物颗粒接触点以及水合物与水合物颗粒接触点分配平行胶结模型(图 10(f))。

当然,室内实验结果表明,不同的水合物饱和度以及水合物生成方式会产生特定赋存类型的含水合物沉积物。因此,在进行数值模拟时也应该遵循室内实验规律合理选择建模方式。

## 3.2 水合物分解效应

开采过程中,水合物分解是出砂的重要诱因之一。借鉴常规油气出砂观点,在胶结型水合物储层开采过程中,随着水合物的分解,地层的胶结物质逐渐减少,胶结性能不断下降,砂粒受到的运动学约束随之减弱<sup>[33]</sup>。因此,胶结型水合物分解可视为储层颗粒间

黏结强度的退化过程。考虑到这一点, 蒋明镜等<sup>[77-78]</sup>针对胶结型水合物储层, 建立了考虑温度—水压—力学特性综合影响的含水合物沉积物二维微观胶结模型, 见式(18)~(23)。该胶结模型能够反映温度和水压力对于水合物胶结刚度和强度的耦合影响: 当位于水合物生成区域内的温压点向相平衡曲线靠近, 即 $L$ 减小时, 水合物胶结弱化, 胶结刚度和强度随之减小; 当温压点刚好位于相平衡曲线上或脱离相平衡区域进入水合物分解区域时, 水合物则即刻分解导致胶结强度和刚度为0。

具体公式如下:

$$R_{cb} = 1 \cdot B \cdot q_{\max,c} \tag{18}$$

$$R_{tb} = 1 \cdot B \cdot q_{\max,t} \tag{19}$$

$$k_n^b = (1 \cdot B \cdot E) \cdot h \tag{20}$$

$$q_{\max,c} / p_a = \begin{cases} L(\sigma_w, T) \cdot \alpha_1 + \alpha_2, & L > 0 \\ 0, & L \leq 0 \end{cases} \tag{21}$$

$$q_{\max,t} / p_a = \begin{cases} L(\sigma_w, T) \cdot \alpha_3 + \alpha_4, & L > 0 \\ 0, & L \leq 0 \end{cases} \tag{22}$$

$$E / p_a = \begin{cases} \beta_1 L + \beta_2, & L > 0 \\ 0, & L \leq 0 \end{cases} \tag{23}$$

式(18)~(23)中:  $R_{cb}$ 是水合物胶结抗压强度, 单位

N/m;  $R_{tb}$ 是水合物胶结抗拉强度, 单位N/m;  $B$ 是水合物胶结宽度, 单位m, 与水合物饱和度存在定量关系;  $1$ 表示垂直于纸面方向的单位长度;  $q_{\max,c}$ 是水压 $\sigma_w$ 时水合物的压缩峰值偏应力, 单位MPa;  $q_{\max,t}$ 是水压 $\sigma_w$ 时水合物的拉伸峰值偏应力, 单位MPa;  $\sigma_w$ 是水压, 单位Pa;  $T$ 是温度, 单位K;  $k_n^b$ 是水合物接触法向刚度, 单位N;  $E$ 是水合物弹性模量, 单位Pa;  $h$ 是胶结水合物的平均厚度, 单位m;  $p_a$ 是一个大气压值, 取值  $1.01 \times 10^5$  Pa;  $L$ 是引入的反映水合物赋存温压点到其相平衡曲线距离的无量纲参数;  $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 分别是 $q_{\max,c}$ 随 $L$ 线性拟合关系线的斜率和纵轴截距, 无量纲;  $\alpha_3$ 和 $\alpha_4$ 分别是 $q_{\max,t}$ 随 $L$ 线性拟合关系线的斜率和纵轴截距, 无量纲;  $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 分别是 $E/p_a$ 随 $L$ 线性拟合关系线的斜率和纵轴截距, 无量纲。

宁伏龙等<sup>[79]</sup>通过TOUGH+HYDRATE+FLAC-3D+PFC3D多软件耦合构建了基于连续—离散介质理论的水合物开采储层响应与出砂数值模型。其分析流程如图11所示。首先借鉴Rutqvist等人<sup>[41]</sup>工作, 利用劳伦斯伯克利国家实验室开发的水合物—热—流耦合开采模拟软件TOUGH+HYDRATE与ITASCA公司开发的岩土体力学稳定分析软件FLAC3D进行耦合, 建

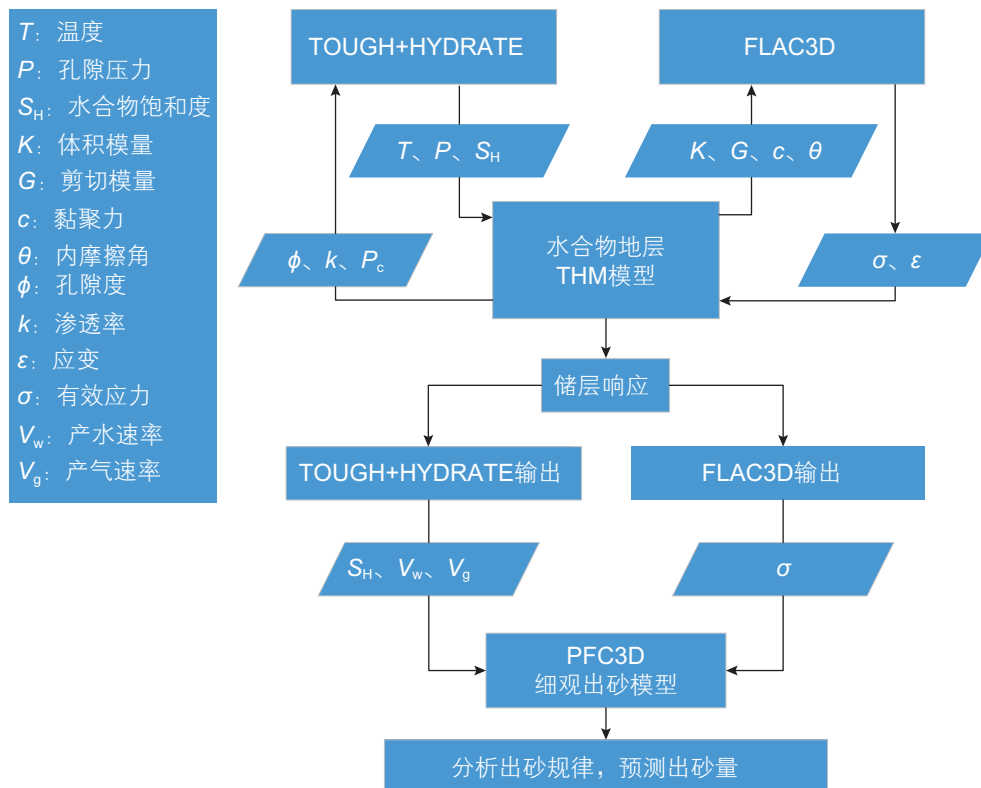


图 11 TOUGH+HYDRATE+FLAC3D+PFC3D耦合分析流程

Fig. 11 Coupling analysis progress of TOUGH+HYDRATE+FLAC3D+PFC3D



立热一流一固 (THM) 多场耦合水合物开采数值模型并进行储层响应分析。然后, 将模拟获取的应力、流速和水合物饱和度等数据作为边界和初始条件传递给离散元模拟软件 PFC3D 建立的细观出砂模型进行耦合计算, 最后分析出砂机理、规律并预测出砂量。

为反映水合物分解效应, 基于上述连续—离散介质分析模型引入了黏结腐蚀概念, 即在细观出砂模型中通过编写 FISH 子程序使平行胶结模型中的黏结强度参数 (黏结法向强度  $pb\_ten$  和黏结细观黏聚力  $pb\_coh$  随水合物饱和度降低而递减, 从而等效模拟水合物的分解过程及其对储层力学性质的影响。其假定沉积物强度随水合物饱和度下降而线性降低, 公式如下:

$$pb\_ten(S_H) = \frac{1}{S_{H0}} \cdot S_H \cdot pb\_ten(S_{H0}) \quad (24)$$

$$pb\_coh(S_H) = \frac{1}{S_{H0}} \cdot S_H \cdot pb\_coh(S_{H0}) \quad (25)$$

式 (24) 和 (25) 中:  $pb\_ten(S_H)$  是水合物分解过程中沉积物的细观黏结法向强度, 单位 MPa;  $S_{H0}$  是沉积物的初始水合物饱和度, 无量纲;  $S_H$  是分解过程中水合物饱和度, 无量纲;  $pb\_ten(S_{H0})$  是水合物分解前的沉积物细观黏结法向强度, 单位 MPa;  $pb\_coh(S_H)$  是水合物分解过程中沉积物的细观黏聚力, 单位 MPa;  $pb\_coh(S_{H0})$  是水合物分解前的沉积物细观黏聚力, 单位 MPa。

### 3.3 流固耦合作用

如前所述, 水合物开采降压分解会产生气体和水, 水气运移产生的流体作用力会影响出砂。因此, 出砂主要是水合物分解效应、地应力和流体拖曳共同作用的结果 (图 12)。有效应力挤压和渗流侵蚀会导致砂粒从地层骨架脱离并运移, 而颗粒的运动则会改变地层孔渗特性从而间接影响流体运动, 这种流固耦合作用是控制水合物储层尤其是泥质粉砂储层出砂的重要因素<sup>[80]</sup>。

目前有若干将离散单元法与流体流动模型相结合的流固耦合建模方法, 包括 DEM—流体作用力、DEM—Darcy (达西定律)、DEM—CFD (计算流体动力学)、DEM—LBM (格子玻尔兹曼方法)、DEM—SPH (光滑粒子流)、DEM—DNS (直接数值模拟) 等<sup>[81-82]</sup>。其中 DEM—LBM 和 DEM—CFD 已被广泛用于常规油气储层出砂机理及规律的研究。

Boutt 等<sup>[83]</sup>、Han 和 Cundall<sup>[84]</sup> 以及 Ghassemi 和 Pak<sup>[85]</sup> 均建立了二维 DEM—LBM 耦合数值模型进行出砂模拟研究。其中 Boutt 等定量分析了颗粒形状和摩擦系数对

于出砂的影响, 发现累计出砂量会先增长然后趋于平稳, 较高的摩擦系数会抑制初期的出砂速率, 但是稳定阶段的出砂量可能受颗粒形状影响更大。砂拱的稳定性问题一直是出砂机理研究的重点, 砂拱对于阻止地层砂粒进入井筒进而抑制出砂具有重要作用。Han 和 Cundall 以砂拱效应为研究点, 通过改变流体压力梯度值再现了射孔区域砂拱形成、坍塌和重建的整个过程。Ghassemi 和 Pak 的研究表明, 地层出砂量取决于流体速率和地应力。在给定地应力下, 当流体速率超过临界流速就会造成大量出砂, 而增大地应力能够提高临界流速。由于二维模型的几何局限性, 储层的三维特征 (比如孔隙度) 无法得到真实反映, 因此学者们致力于三维出砂数值模型的开发和应用。

Zhou 等<sup>[86]</sup> 利用 DEM—CFD 耦合三维模拟方法, 综合考虑流体压力梯度和拖曳力, 研究了流体流动侵蚀弱胶结砂岩出砂以及形成空腔的过程, 模拟结果还发现了和物理实验一致的出砂团簇现象。但是 Zhou 等建立的三维出砂模型中只考虑了径向流体流动而并未控制径向边界应力, 与实际情况略为不符。Climent 等<sup>[87]</sup> 同样建立了 DEM—CFD 耦合的三维出砂模型, 研究了远场应力与外边界孔隙压力 (即流体压力) 对出砂的影响。但是该模型只考虑近井壁出砂引起的砂岩孔隙度的变化而并未关联渗透率。Cui 等<sup>[88]</sup> 以及刘先珊和许明<sup>[89-90]</sup> 在上述 DEM—CFD 耦合模型的基础上, 运用几何学的方法, 并考虑砂岩变形和出砂引起的砂岩渗透率的改变, 研究了流固耦合作用下的出砂细观力学机

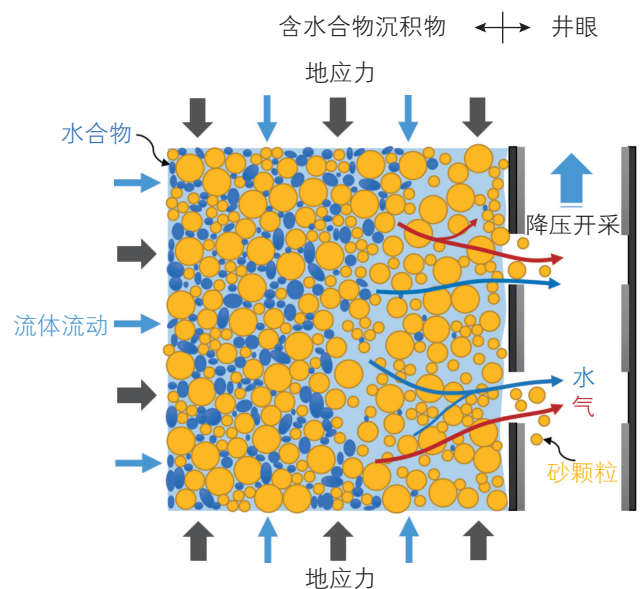


图 12 流固耦合作用下的水合物开采出砂示意图

Fig. 12 Schematic diagram of sand production during gas recovery from hydrate-bearing sediments under fluid-solid coupling

制。模拟结果均表明,流体运动对砂岩力学特性的影响不可忽略,它关系着砂岩屈服模式以及出砂量的大小。此外Cui等还详细研究了边界应力对于出砂的影响,结果表明边界应力主导出砂响应。与各向同性边界应力作用情况相比较,在不等边界应力作用下的地层出砂量更大。更多有关出砂流固耦合数值模拟研究见表1。

以上流固耦合作用研究的都是常规油气储层出砂问题,但适用于水合物储层的流固耦合离散元模型还未见报道,原因或许是含相变的流固耦合作用过于复杂,建模较为困难。考虑到气体黏度低,对砂粒的拖曳效果弱<sup>[49, 54]</sup>,后续可忽略气体作用,以简化基于PFC或者LIGGGHTS的水合物储层流固耦合离散元数值建模和计算。

## 4 讨论与建议

目前水合物开采出砂数值模拟研究尚处起步阶段,数值建模过程往往对一些因素进行假设和理想化设计,模拟结果也缺乏充分的实验和现场验证,导致数值模拟和分析的准确性和适用性还不够。如已有研究表明

在实验室模拟条件下水合物形成会排挤周围颗粒产生“胀聚”效应,但是在现场储层条件下由于孔隙流体的存在,水合物分解产生的“缩散”效应并不会让周围颗粒简单复原或者复填。因此,如何准确仿真孔隙尺度下水合物分解中和分解后骨架砂颗粒运移和相互作用是今后数值模拟需要解决的一个关键问题。未来建议在如下方面继续加大研究力度:

### (1) 三维连续介质模型构建

连续介质模型需要在井眼周围划分足够精细的网格才能较准确模拟水合物开采储层响应过程,这对三维模型的实现提出了很高的要求,巨大的网格数量必然消耗大量的计算资源和时间。因此,当前连续介质出砂模拟工作大多基于平面应变假设或轴对称假设从而构建二维模型来完成。然而,二维模拟结果的可靠性较低。随着后续数值计算能力的提升,依托测井解释数据建立能够刻画储层结构特征如地层起伏、夹层状态以及物性参数空间非均质特性的三维连续介质模型会是水合物储层出砂模拟走向精细化的必经之路。同时弱固结的水合物储层变形和出砂也容易导致模型网格产生畸变,导致不收敛发生,后续或许可以考虑物质点法等无网格方法进行水合物出砂数值模拟研究。

表1 出砂流固耦合数值模拟研究

Table 1 Summary of the numerical simulation of fluid-soild coupling in sand production

文献	流固耦合方式	软件	研究内容
Grof <sup>[91]</sup>	DEM-CFD(3D)	—	层流作用下的颗粒团簇运移
Zhou <sup>[86]</sup>	DEM-CFD(3D)	—	弱胶结砂岩的流体侵蚀出砂过程
刘先珊和许明 <sup>[89-90]</sup>	DEM-CFD(3D)	PFC3D	出砂细观力学机制
Climent <sup>[87]</sup>	DEM-CFD(3D)	PFC3D	有、无流体作用下的砂岩出砂情况对比
Wu <sup>[92]</sup>	DEM-CFD(3D)	—	不同参数条件下的滞砂测试(Sand retention test simulation)
Cui <sup>[88]</sup>	DEM-CFD(3D)	PFC3D	流体速率和边界应力对出砂的影响
Atashi <sup>[93]</sup>	DEM-CFD(3D)	PFC3D	砾石充填防砂情况下,流体性质对出砂的影响
Shaffee <sup>[94]</sup>	DEM-CFD(3D)	STAR-CCM+	考虑颗粒黏附效应的防砂筛网性能研究
Cook <sup>[95]</sup>	DEM-LBM(2D)	MIMES	流体作用下的胶结体侵蚀破坏
Ohtsuki 和 Matsuoka <sup>[96]</sup>	DEM-LBM(2D)	—	射孔区域的出砂行为
Boutt <sup>[83]</sup>	DEM-LBM(2D)	MIMES	颗粒形状和摩擦系数对于出砂的影响
Ghassemi 和 Pak <sup>[85]</sup>	DEM-LBM(2D)	—	流体速率和地应力对出砂的影响
Brumby <sup>[97]</sup>	DEM-LBM(3D)	LIGGGHTS	剪切流作用下的黏性颗粒侵蚀
Han 和 Cundall <sup>[84]</sup>	DEM-LBM(2D)	PFC2D	射孔区域砂拱的形成、坍塌与重建
Wang <sup>[98]</sup>	DEM-LBM(2D)	—	胶结砂岩的流体侵蚀出砂过程
Mondal <sup>[99-102]</sup>	DEM-流体作用力(3D)	LAMMPS、LIGGGHTS	防砂筛网性能测试及优选
Chanpura <sup>[103]</sup>	DEM-流体作用力(3D)	LIGGGHTS	不同防砂筛网的性能对比与优化
Preece <sup>[104]</sup>	DEM-Darcy(2D)	MIMES	射孔区域的出砂行为
Lezhnev <sup>[105]</sup>	DEM-Darcy(3D)	LIGGGHTS	割缝、砾石充填防砂测试



## (2) 渗透率模型修正

应用离散元模型对水合物出砂流固耦合问题进行分析时,需要对流体流动方案做进一步修正。例如,在目前的DEM-CFD模型中,渗透率通常只与颗粒受力运移产出引起的孔隙度变化相关联(参见下面的Kozeny-Carman方程,式(26))。然而,颗粒间胶结质的退化,比如胶结型水合物逐步分解,同样会影响储层孔隙网络结构,进而改变储层渗透率。也就是说,水合物降压开采过程中储层渗透率响应行为,很大程度上取决于沉积物有效应力与水合物饱和度共同控制的储层孔隙结构时空演化规律。因此,在离散元难以显式刻画水合物分解进程引起孔隙度变化的前提下,就需要对Kozeny-Carman方程进行修正,将式(26)中孔隙度 $\phi$ 与水合物饱和度相关联以进一步描述水合物储层出砂孔渗变化特征,建立综合考虑水合物分解、出砂以及地应力敏感的低渗水合物储层渗透率模型。

$$k = c \frac{d_p^2 \phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (26)$$

式(26)中: $k$ 为渗透率,单位 $\text{m}^2$ , $c$ 为常数,无量纲; $d_p$ 为颗粒的平均直径,单位 $\text{m}$ ; $\phi$ 为孔隙度,无量纲。

## (3) 准确高效的细观参数标定

有别于连续介质模型对于复杂宏观本构关系的依赖性,离散单元法着重于细观尺度研究,一组精确的细观参数是该方法准确揭示储层出砂细观机理的前提。泥砂颗粒间以及泥砂颗粒与水合物颗粒间的细观作用力是厘清水合物开采出砂行为的关键。目前,获取细观参数的方法主要有两种:直接测量法和试错法<sup>[106]</sup>。

直接测量法,顾名思义就是通过物理实验直接测得颗粒尺度材料属性,并且测量难度随颗粒尺寸的减小而增大。试错法就是借助数值力学实验进行细观参数标定。细观参数标定是离散元模拟的主要难点之一,以颗粒流软件PFC中内置的平行胶结模型为例,其相关参数多达9个<sup>[75]</sup>,一般的参数标定过程就是通过不断修改各参数值即试错,直到获得一组能够使得数值实验结果与材料宏观性质大体一致的细观参数为止<sup>[107]</sup>。在各参数无明确量化关系的情况下,删繁就简,减少不确定参数的数量是简化标定的有效手段。中国地质大学(武汉)联合广州海洋地质调查局研发了一套水合物储层颗粒间微力测试系统,见图13。可以直接测得细观颗粒尺度水合物抗拉强度和抗剪强度以及水合物分解后颗粒间的摩擦力,然后再通过试错法标定获得其余参数值,这种直接测量法结合试错法的综合方法能够更加准确高效地为离散单元法的出砂数值模拟提供细观参数。

## (4) 细粒的精细刻画表征

我国南海水合物储层主要为黏土质粉砂,中值粒径为 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ <sup>[108]</sup>。较之日本砂质储层(中值粒径约 $150\ \mu\text{m}$ <sup>[109]</sup>),我国水合物储层的细粒特点突出。并且细粒黏土常呈薄片状,其表面带负电,有双电层结构,这使得黏土颗粒间的相互作用与无黏性的砂颗粒相比要复杂的多。黏土的宏观力学性质与其微观结构密切相关,而离散单元法是研究岩土材料行为宏微观联系的重要工具<sup>[110]</sup>。此外,储层中还富含孔虫壳体颗粒,因此利用离散单元法进行泥质粉砂型水合物储层

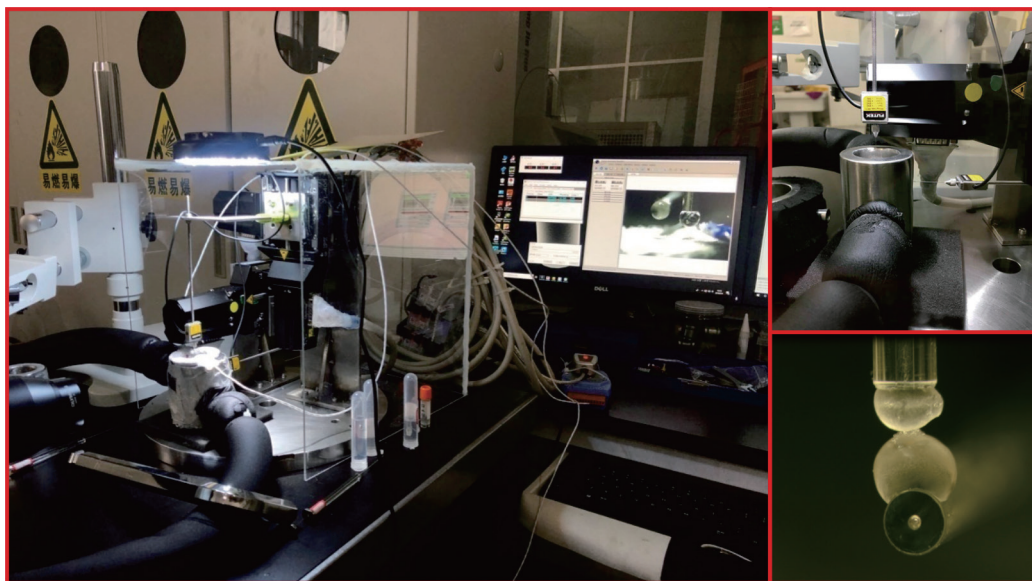


图13 水合物储层颗粒间微力测试系统

Fig. 13 Micro-force testing system between particles in hydrate reservoir



出砂模拟,不但要考虑有孔虫、黏土、水合物、砂粒的结构特征差异和细观力学参数差异,还要充分考虑有孔虫、水合物、砂粒和黏土三者间的相互接触关系。其中,黏土颗粒间的双电层斥力和范德华力能够使其在不发生机械接触的情况下就产生碰撞响应,需要发展新的接触算法来表征这一现象。宏观连续介质模拟方面,细粒的影响需要通过本构模型和强度准则进行刻画表征。目前,诸多基于Duncan-Chang本构模型<sup>[111-112]</sup>、临界状态模型<sup>[113-114]</sup>和损伤本构模型<sup>[115-122]</sup>的非线性弹性以及弹塑性含水合物沉积物本构模型被提出,张峰等<sup>[123]</sup>对此进行了综述,阐述了各模型的优缺点,然而对于最优本构模型的选择却莫衷一是。此外,2.1节中Jin等<sup>[42]</sup>研究结果也表明采用由不同储层物性参数对应建立的强度准则进行水合物藏开采出砂风险评估会得到差异较大的结果。水合物开采出砂问题归根结底是力学失稳所致,因此与研究对象相符的、能够全面反映多因素条件下含水合物沉积物物理力学性质的、经过试采现场实测数据校核优化的本构模型和强度准则亟待发展,这对于出砂问题的量化分析尤为重要。

#### (5) 考虑颗粒破碎现象

水合物储层降压开采会导致地层有效应力增大,从而可能引起有孔虫或泥砂颗粒破碎<sup>[124]</sup>,见图14。实验结果<sup>[124]</sup>也表明,水合物的存在能够阻碍砂粒的破坏,而水合物分解则会加剧砂粒破碎。砂粒破碎会使得地层收缩压实、渗透性降低,并产生更细的颗粒,从而加剧出砂<sup>[125]</sup>。Zhang等<sup>[126-128]</sup>基于断裂力学提出了一种关联颗粒破碎程度和能量的破碎本构模型,该模型可以反映可压碎颗粒集料的力学响应。连续介质模拟方面可以借鉴Zhang等的研究成果,在上述破碎本构模型的基础上再添加水合物的影响,从而发展适用于水合物储层的颗粒(包括有孔虫颗粒、砂颗粒、水合物颗粒)破碎本构模型。离散介质方面,建立颗

粒破碎模型一般有3种方法:替换法、团簇法和组合法<sup>[129-130]</sup>。替换法思路为当颗粒受力情况满足预先定义的破碎准则时,采用一组无黏结的小颗粒替换发生破碎的原始颗粒。团簇法通过黏结一定数量的较小颗粒形成团聚体,颗粒的破碎与否通过黏结强度来判断。贺洁等<sup>[68]</sup>构建水合物团簇的思想就属于团簇法。复合法则是将替换法和团簇法相结合发展起来的,初始模型为单颗粒集合,模拟过程中筛选出高应力颗粒并被团聚体所取代,而其余颗粒仍然是单颗粒。通过这种方法,可以用团聚体的破碎来精确地模拟颗粒的破碎,而团聚体的破碎是由黏结破坏决定的。该方法比替换法更准确,比团簇法更高效<sup>[129]</sup>。因此可选用组合法来描述水合物储层的颗粒破碎过程。

#### (6) 分阶段建模

根据水合物的分解状态,水合物降压开采过程中井周储层分别处于未分解、分解中、完全分解3个阶段。降压初期,开采压差不高,水合物未分解,但是存在应力变化和流体流动,此时可能仅有少量砂粒从井周脱离,不构成出砂风险。可采用离散单元法预测此时的出砂情况,重在揭示不同水合物分布模式下的储层砂粒的启动条件(临界流速和有效应力);当开采压差增大,水合物脱离相平衡条件开始分解。这一阶段多场耦合作用最为复杂,可采用连续介质和离散介质耦合方法进行研究(图15),离散介质区域用于厘清水合物在出砂机理中的角色并获得瞬时出砂量。此外,离散介质区域实时获得的储层孔隙参数可直接传递给连续介质模型,然后连续介质区域结合出砂准则预测整体出砂量;第3阶段是近井壁区域内水合物完全分解后,此时与第一阶段的区别主要是储层物性大大改变,原先被水合物占据的空间被重新分配,导致渗透率、孔隙度和力学强度(残余强度)变化很大。这一阶段的出砂行为极有可能引发井周储层掏空进而破坏开采井井身结构甚至导致开采井报废,不容忽视。发展

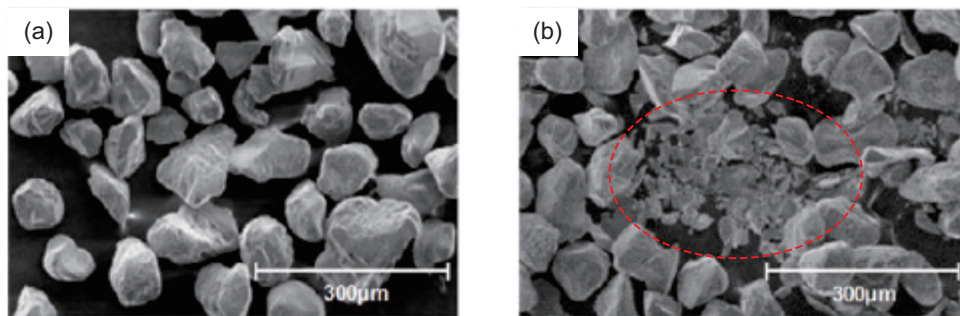


图14 砂粒在应力作用下发生破碎(a)砂粒破碎前(b)砂粒破碎后<sup>[125]</sup>

Fig. 14 Particle crushing in hydrate-bearing sands under stress (a) before sand crushing (b) after sand crushing<sup>[125]</sup>

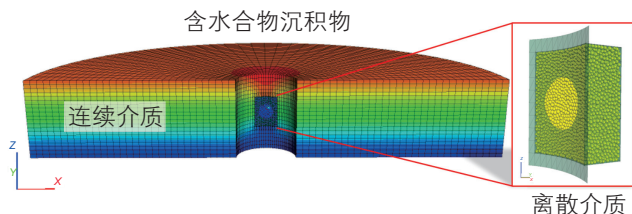


图 15 连续—离散介质耦合的水合物开采出砂数值模型示意图  
Fig. 15 Schematic diagram of numerical model of sand production during gas recovery from hydrate-bearing sediments based on the coupling of continuous and discrete medium

新的本构关系刻画这一过程并结合连续介质模拟方法进行研究的第三阶段的重点。此外，上述 3 个阶段后续研究还要重点关注出砂与防砂工艺的整体建模与分析，如基于 CT 扫描的筛网建模和基于 LIGGGHTS 的离散元挡砂模拟。

#### (7) 机器学习

水合物开采出砂是复杂的强耦合非线性问题，使得数值模型的建立以及数值求解尤为复杂且耗时。而时下蓬勃发展的机器学习方法兼具解决复杂非线性问题、擅长挖掘数据间内在规律以及快速计算等优点<sup>[131-132]</sup>，因此很适合用来解决水合物开采出砂问题。大数据是机器学习的基础，然而当前水合物实际场地试采数据较少，因此可利用已发展的水合物开采出砂数值模型进行不同参数及工况下的数值模拟以获取建模所需的训练样本并训练得到对应的初始机器学习模型，再利用少量的试采数据样本和较多的实验数据样本对初始机器学习模型进行修正。反过来，训练好的机器学习模型还能用于数值模型的优化。数据驱动的机器学习与模型驱动的数值模拟可以相互促进，相辅相成，将加快水合物出砂问题的攻克进程。

## 5 总结

出砂问题是掣肘水合物产业化进程的难题之一。要厘清水合物储层出砂规律、揭示其机理并对出砂进行防控离不开准确的出砂分析和预测数值模型。基于连续介质和离散单元法的数值模拟技术是当前出砂研究的主要手段之一。在水合物多场耦合模型研究的基础上引入 Mohr-Coulomb 强度准则、侵蚀准则、等效塑性应变准则和力平衡准则进行出砂判断，能够较系统厘清出砂规律并从工程上预测出砂量。不同于连续介质方法所遵循的宏观唯象研究思路，离散单元法从颗粒材料间内部相互作用力出发，可以捕捉每个砂粒在出砂进程中的运动和协作以及破坏机制，利于从微观尺度阐明出砂机理。但由于水合物赋存模式多样、分解效应复杂、流固耦合作用交错导致相应的离散元出砂模型鲜有，相关研究有待推进。相信随着现场试采与物理实验样本的增多以及对水合物储层出砂现象认识的深入和数值技术的进步，水合物开采储层出砂数值模拟会更加精确更加系统。建议今后从三维连续介质模型构建、渗透率模型修正、准确高效微观参数标定、细粒的精细刻画表征、考虑颗粒破碎与抗转动作用、分阶段建模以及机器学习等多个方面进一步深化当前的水合物储层出砂数值模拟研究。此外，储层出砂是储层工程地质特性与人工钻采活动共同作用的结果，出砂数值模拟研究除了关注储层本身外，还应充分结合防砂方式、生产规程等进行整体研究，实现出砂—产能—储层稳定一体化协同评价和预测，以更加科学的理论分析指导我国海域天然气水合物开采防砂控泥完井设计，推动水合物产业化进程。

## 参考文献

- [1] SLOAN E D, KOH C. Clathrate hydrate of natural gases[M]. London: CRC Press, 2008.
- [2] SLOAN E D. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates[J]. Nature. 2003, 426: 353.
- [3] SONG Y C, YANG L, ZHAO J F, et al. The status of natural gas hydrate research in China: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014, 31: 778-791.
- [4] 李守定, 李晓, 王思敬, 等. 天然气水合物原位补热降压充填开采方法[J/OL]. 工程地质学: 1-13[2020-05-19]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-061>. [LI S D, LI X, WANG S J, et al. A novel method for natural gas hydrate production: Depressurization and backfilling within-situ supplemental heat[J/OL]. Journal of Engineering Geology: 1-13[2020-05-19]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-061>.]
- [5] LI X S, XU C G, ZHANG Y, et al. Investigation into gas production from natural gas hydrate: A review[J]. Applied Energy. 2016, 172: 286-322.
- [6] CUI J L, SUN Z F, WANG X H, et al. Fundamental mechanisms and phenomena of clathrate hydrate nucleation[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2019, 27(09): 2014-2025.
- [7] 李文龙, 高德利, 杨进. 海域含天然气水合物地层钻完井面临的挑战及展望[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(06): 681-689. [LI W L,

- GAO D L, YANG J. Challenges and prospect of the drilling and completion technologies used for the natural gas hydrate reservoirs in sea areas[J]. *Oil Drilling & Production Technology*. 2019, 41(06): 681–689.]
- [8] 陈惠玲. 揭开海底可燃冰奥秘的先行者——记中国地质调查局“李四光学者”称号获得者梁金强[EB/OL]. [2019–10–15]. [http://www.cgs.gov.cn/ddzt/jqthd/zyjc/zxbd/201603/t20160309\\_295525.html](http://www.cgs.gov.cn/ddzt/jqthd/zyjc/zxbd/201603/t20160309_295525.html). [CHEN H L. The forerunner to uncover the mystery of combustible ice on the sea floor——Liang Jinqiang, Winner of the title of “Li Siguang scholar” of China Geological Survey Bureau[EB/OL]. [2019–10–15]. [http://www.cgs.gov.cn/ddzt/jqthd/zyjc/zxbd/201603/t20160309\\_295525.html](http://www.cgs.gov.cn/ddzt/jqthd/zyjc/zxbd/201603/t20160309_295525.html). ]
- [9] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2018[R]. 北京: 自然资源部: 1–9. [Ministry of natural resources of the people’s Republic of China. *China mineral resources 2018*[R]. Beijing: Ministry of natural resources of the people’s Republic of China: 1–9.]
- [10] 樊栓狮, 于驰, 郎雪梅, 等. 与海洋天然气水合物微纳米尺度赋存和开采储存技术有关的研究进展[J]. *地球科学*. 2018, 43(05): 1542–1548. [FAN S S, YU C, LANG X M, et al. Micro-nano-scale studies on occurrence and gas production and storage technology of marine gas hydrates[J]. *Earth Science*. 2018, 43(05): 1542–1548.]
- [11] 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.
- [12] 周守为, 李清平, 吕鑫, 等. 天然气水合物开发研究方向的思考与建议[J]. *中国海上油气*. 2019(04): 1–8. [ZHOU S W, LI Q P, LV X, et al. Thinking and suggestions on research direction of natural gas hydrate development[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019(04): 1–8.]
- [13] 焦思颖. 国务院批准天然气水合物成为我国第 173 个矿种. [EB/OL]. [2019–10–15]. [http://www.mnr.gov.cn/dt/kc/201711/t20171117\\_2322259.html](http://www.mnr.gov.cn/dt/kc/201711/t20171117_2322259.html). [JIAO S Y. The State Council approved natural gas hydrate as the 173th mineral in China. [EB/OL]. [2019–10–15]. [http://www.mnr.gov.cn/dt/kc/201711/t20171117\\_2322259.html](http://www.mnr.gov.cn/dt/kc/201711/t20171117_2322259.html). ]
- [14] LIU Z Q, LU Y X, CHENG J H, et al. Geomechanics involved in gas hydrate recovery[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2019. 27(9): 2099–2106.
- [15] MORIDIS G, COLLETT T S, POOLADI-DARVISH M, et al. Challenges, uncertainties, and issues facing gas production from gas-hydrate deposits[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. 2011, 14(01): 76–112.
- [16] 卢静生, 李栋梁, 何勇, 等. 天然气水合物开采过程中出砂研究现状[J]. *新能源进展*. 2017, 5(05): 394–402. [LU J S, LI D L, HE Y, et al. Research status of sand production during the gas hydrate exploitation process[J]. *Advances in New and Renewable Energy*. 2017, 5(05): 394–402.]
- [17] SUN J X, ZHANG L, NING F L, et al. Production potential and stability of hydrate-bearing sediments at the site GMGS3–W19 in the South China Sea: A preliminary feasibility study[J]. *Marine and Petroleum Geology*. 2017, 86: 447–473.
- [18] SUN J X, NING F L, LI S, et al. Numerical simulation of gas production from hydrate-bearing sediments in the Shenhu area by depressurising: The effect of burden permeability[J]. *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources*. 2015, 12: 23–33.
- [19] SUN J X, NING F L, ZHANG L, et al. Numerical simulation on gas production from hydrate reservoir at the 1st offshore test site in the eastern Nankai Trough[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*. 2016, 30: 64–76.
- [20] LI G, MORIDIS G J, ZHANG K N, et al. Evaluation of gas production potential from marine gas hydrate deposits in Shenhu Area of South China Sea[J]. *Energy & Fuels*. 2010, 24(11): 6018–6033.
- [21] NANDANWAR M S, ANDERSON B J, AJAYI T, et al. Evaluation of gas production potential from gas hydrate deposits in National Petroleum Reserve Alaska using numerical simulations[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016, 36: 760–772.
- [22] MEREY S, SINAYUC C. Investigation of gas hydrate potential of the Black Sea and modelling of gas production from a hypothetical Class 1 methane hydrate reservoir in the Black Sea conditions[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016, 29: 66–79.
- [23] LIU Y G, HOU J, ZHAO H F, et al. Numerical simulation of simultaneous exploitation of geothermal energy and natural gas hydrates by water injection into a geothermal heat exchange well[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019, 109: 467–481.
- [24] YU T, GUAN G Q, ABUDULA A, et al. Application of horizontal wells to the oceanic methane hydrate production in the Nankai Trough, Japan[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2019, 62: 113–131.
- [25] KONNO Y, MASUDA Y, AKAMINE K, et al. Sustainable gas production from methane hydrate reservoirs by the cyclic depressurization method[J]. *Energy Conversion and Management*. 2016, 108: 439–445.
- [26] RAMESH S, VEDACHALAM N, RAMESH R, et al. An approach for methane hydrates reservoir dissociation in a marine setting, Krishna Godhavari Basin, East Coast India[J]. *Marine and Petroleum Geology*. 2014, 58: 540–550.
- [27] FENG J C, LI X S, LI G, et al. Numerical investigation of hydrate dissociation performance in the South China Sea with different horizontal well configurations[J]. *Energies*. 2014, 7(8): 4813–4834.
- [28] FENG J C, LI G, LI X S, et al. Evolution of hydrate dissociation by warm brine stimulation combined depressurization in the South China Sea[J]. *Energies*. 2013, 6(10): 5402–5425.
- [29] SU Z, HUANG L, WU N Y, et al. Effect of thermal stimulation on gas production from hydrate deposits in Shenhu area of the South China Sea[J]. *Science China Earth Sciences*. 2013, 56(4): 601–610.



- [30] SUN J X, NING F L, LIU T L, et al. Gas production from a silty hydrate reservoir in the South China Sea using hydraulic fracturing: A numerical simulation[J]. *Energy Science & Engineering*. 2019, 7(4): 1106–1122.
- [31] FENG Y C, CHEN L, SUZUKI A, et al. Enhancement of gas production from methane hydrate reservoirs by the combination of hydraulic fracturing and depressurization method[J]. *Energy Conversion and Management*. 2019, 184: 194–204.
- [32] 杨林. 海底水合物储层在高压水射流作用下的破碎过程及储层改造增产研究 [D]. 吉林大学, 2018. [YANG L. Study on the breaking process of marine hydrate reservoirs subjected to high pressure water jet and the production increase of marine hydrate reservoirs reconstruction[D]. JiLin University, 2018.]
- [33] 黄国恒, 苏正, 夏枚生, 等. 天然气水合物开采井孔出砂问题研究 [J]. *海洋地质与第四纪地质*. 2017, 37(05): 174–183. [HUANG G H, SU Z, XIA M S, et al. Study on sand production in a natural gas hydrate production well[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*. 2017, 37(05): 174–183.]
- [34] DE LA FUENTE M, VAUNAT J, MARIN-MORENO H. Thermo-hydro-mechanical coupled modeling of methane hydrate-bearing sediments: Formulation and application[J]. *Energies*. 2019, 12(11): 2178.
- [35] COHEN E, KLAR A, YAMAMOTO K. Micromechanical investigation of stress relaxation in gas hydrate-bearing sediments due to sand production[J]. *Energies*. 2019, 12(11): 2131.
- [36] KURIHARA M, SATO A, OUCHI H, et al. Prediction of gas productivity from Eastern Nankai Trough Methane Hydrate Reservoirs. Offshore Technology Conference[C]. Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA: OTC, 2008.
- [37] WHITE M D, MCGRAIL B P. Numerical simulation of methane hydrate production from geologic formations via carbon dioxide injection[C]. Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA: OTC, 2008.
- [38] YU L, ZHANG L, ZHANG R, et al. Assessment of natural gas production from hydrate-bearing sediments with unconsolidated argillaceous siltstones via a controlled sandout method[J]. *Energy*. 2018, 160: 654–667.
- [39] JANICKI G, SCHI S, HENNIG T, et al. Simulation of methane recovery from gas hydrates combined with storing carbon dioxide as hydrates[J]. *Journal of Geological Research*. 2011: 15.
- [40] MORIDIS G J, REAGAN M T, KIM S J, et al. Evaluation of the gas production potential of marine hydrate deposits in the Ulleung Basin of the Korean East Sea[J]. *Spe J*. 2009, 14(04) : 759–781.
- [41] 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.
- [42] JIN G R, LEI H W, XU T F, et al. Simulated geomechanical responses to marine methane hydrate recovery using horizontal wells in the Shenhu area, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*. 2018, 92: 424–436.
- [43] 孙嘉鑫. 钻采条件下南海水合物储层响应特性模拟研究 [D]. 中国地质大学, 2018. [SUN J X. Characteristics of reservoir response to drilling and production in gas hydrate-bearing sediments in the South China Sea[D]. China University of Geosciences (Wuhan), 2018.]
- [44] ZHANG X H, LU X B, SHI Y H, et al. Study on the mechanical properties of hydrate-bearing silty clay[J]. *Marine and Petroleum Geology*. 2015, 67: 72–80.
- [45] RAHMATI H, JAFARPOUR M, AZADBAKHT S, et al. Review of sand production prediction models[J]. *Journal of Petroleum Engineering*. 2013, 1–16.
- [46] UCHIDA S, KLAR A, YAMAMOTO K. Sand production model in gas hydrate-bearing sediments[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2016, 86: 303–316.
- [47] UCHIDA S, SEOL Y, YAMAMOTO K. Variance-based determination of dominant model parameters for sand migration in homogeneous gas hydrate-bearing reservoir[J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 2019, 7(2): 360–365.
- [48] UCHIDA S, LIN J S, MYSHAKIN E M, et al. Numerical simulations of sand migration during gas production in hydrate-bearing sands interbedded with thin mud layers at site NGHP–02–16[J]. *Marine and Petroleum Geology*. 2019, 108(10): 639–647.
- [49] AKAKI T, KIMOTO S. Numerical modelling of internal erosion during hydrate dissociation based on multiphase mixture theory[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2019, 44(2): 327–350.
- [50] 练章华, 杨龙, 段永刚, 等. 塑性应变准则在油井出砂预测中的应用 [J]. *西南石油学院学报*. 2003, 25(04): 16–18. [LIAN Z H, YANG L, DUAN Y G, et al. Application of plastic strain on prediction of sand production in oil well[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*. 2003, 25(04): 16–18.]
- [51] YAN C L, LI Y, CHENG Y F, et al. Sand production evaluation during gas production from natural gas hydrates[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2018, 57: 77–88.
- [52] LI X R, FENG Y C, GRAY K E. A hydro-mechanical sand erosion model for sand production simulation[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018, 166: 208–224.
- [53] 张怀文, 冯宇思, 刘斌辉, 等. 天然气水合物地层降压开采出砂数值模拟 [J]. *科学技术与工程*. 2019(26) : 151–155. [ZHANG H W, FENG Y S, LIU B H, et al. Numerical simulation of sand production in natural gas hydrate formation by depressurization[J]. *Science*

- Technology and Engineering, 2019(26): 151–155.]
- [54] 刘浩伽, 李彦龙, 刘昌岭, 等. 水合物分解区地层砂粒启动运移临界流速计算模型[J]. 海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(05): 166–173. [LIU H J, LI Y L, LIU C L, et al. Calculation model for critical velocity of sand movement in decomposed hydrated cemented sediment[J]. Marine Geology & Quaternary Geology. 2017, 37(05): 166–173.]
- [55] 董长银, 闫切海, 李彦龙, 等. 天然气水合物储层颗粒级尺度微观出砂数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版). 2019, 43(06): 77–87. [DONG C Y, YAN Q H, LI Y L, et al. Numerical simulation of sand production based on a grain scale microcosmic model for natural gas hydrate reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum. 2019, 43(06): 77–87.]
- [56] YAMAMOTO K. Methane hydrate bearing sediments: A new subject of geomechanics[J]. 12th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, 2008.
- [57] JIANG M J, LIU J, KWOK C Y, et al. Exploring the undrained cyclic behavior of methane-hydrate-bearing sediments using CFD–DEM[J]. Comptes rendus Mécanique. 2018, 346: 815–832.
- [58] MADHUSUDHAN B N, CLAYTON CRI, PRIEST J A. The effects of hydrate on the strength and stiffness of some sands[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2019, 124(1): 65–75.
- [59] XU M, SONG E X, JIANG H, et al. DEM simulation of the undrained shear behavior of sand containing dissociated gas hydrate[J]. Granular Matter. 2016, 18(4): 79.
- [60] WAITE W F, WINTERS W J, MASON D H. Methane hydrate formation in partially water-saturated Ottawa sand[J]. American Mineralogist. 2004, 89: 1202–1207.
- [61] TOO J L, CHENG A, LINGA P. Fracturing methane hydrate in sand: A review of the current status[C]. Offshore Technology Conference Asia. Kuala Lumpur, Malaysia. OTC: 2018.
- [62] 蒋明镜, 刘俊, 申志福. 裹覆型能源土力学特性真三轴试验离散元数值分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学. 2019, 49(03): 153–164. [JIANG M J, LIU J, SHEN Z F. Investigating the mechanical behavior of grain-coating type methane hydrate bearing sediment in true triaxial compression tests by distinct element method[J]. Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49(03): 153–164.]
- [63] 李彦龙, 刘乐乐, 刘昌岭, 等. 天然气水合物开采过程中的出砂与防砂问题[J]. 海洋地质前沿. 2016, 32(07): 36–43. [LI Y L, LIU L L, LIU C L, et al. Sanding prediction and sand-control technology in hydrate exploitation: a review and discussion[J]. Marine Geology Frontiers. 2016, 32(07): 36–43.]
- [64] WAITE W F, SANTAMARINA J C, CORTES D D, et al. Physical properties of hydrate-bearing sediments[J]. Reviews of Geophysics. 2009, 47(4): 465–484.
- [65] BRUGADA J, CHENG Y P, SOGA K, et al. Discrete element modelling of geomechanical behaviour of methane hydrate soils with pore-filling hydrate distribution[J]. Granular Matter. 2010, 12(5): 517–525.
- [66] 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, 32(09): 1412–1417. [JIANG M J, XIAO Y, LIU F. Methodology for assessing seabed instability induced by exploitation of methane hydrate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2010, 32(09): 1412–1417.]
- [67] 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): 3026–3040. [HE J, JIANG M J. Macro-micro mechanical property of pore-filling type methane hydrate-bearing sediment in true triaxial tests based on distinct element analysis[J]. Rock and Soil Mechanics. 2016, 37(10): 3026–3040.]
- [68] 贺洁, 蒋明镜. 孔隙填充型深海能源土的离散元成样新方法及其宏观力学特性[J]. 同济大学学报(自然科学版). 2016, 44(05): 709–717. [HE J, JIANG M J. Three-dimensional distinct element novel sample preparing method and mechanical behavior for pore-filling type of methane hydrate-bearing soil[J]. Journal of Tongji University (Natural Science). 2016, 44(05): 709–717.]
- [69] 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): 579–597.
- [70] YU Y X, CHENG Y P, XU X M, et al. Discrete element modelling of methane hydrate soil sediments using elongated soil particles[J]. Computers and Geotechnics. 2016, 80: 397–409.
- [71] WANG Y H, LEUNG S C. A particulate-scale investigation of cemented sand behavior[J]. Canadian Geotechnical Journal. 2008, 45(1): 29–44.
- [72] VINOD J S, HYODO M, BUDDHIMAINDRANATNA, et al. Behaviour of methane hydrate bearing sand during monotonic loading: DEM simulations[C]. Indian Geotechnical Conference. IIT Madras, Chennai, India: IGC2016, 2016.
- [73] KATAGIRI J, KONNO Y, YONEDA J, et al. Pore-scale modeling of flow in particle packs containing grain-coating and pore-filling hydrates: Verification of a Kozeny–Carman-based permeability reduction model[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2017, 45: 537–551.
- [74] SHEN Z F, JIANG M J. DEM simulation of bonded granular material. Part II: Extension to grain-coating type methane hydrate bearing sand[J]. Computers and Geotechnics. 2016, 75: 225–243.
- [75] 杨期君, 赵春风. 水合物沉积物力学性质的三维离散元分析[J]. 岩土力学. 2014, 35(01): 255–262. [YANG Q J, ZHAO C F.

- Three-dimensional discrete element analysis of methanical behavior of methane hydrate-bearing sediments[J]. *Rock and Soil Mechanics*. 2014, 35(01): 255–262.]
- [76] 周博, 王宏乾, 王辉, 等. 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(04): 375–385. [ZHOU B, WANG H Q, WANG H, et al. 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(04): 375–385.]
- [77] 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(08): 1377–1386. [JIANG M J, ZHU F Y. A two-dimensional thermal-hydro-mechanical bond contact model for methane hydrate bearing soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2014, 36(08): 1377–1386.]
- [78] JIANG M J, HE J, WANG J F, et al. DEM analysis of geomechanical properties of cemented methane hydrate bearing soils at different temperatures and pressures[J]. *International Journal of Geomechanics*. 2016, 16(3): 04015087.
- [79] NING F L, SUN J X, LIU Z C. Prediction of sand production in gas recovery from the Shenhu hydrate reservoir by depressurization[C]. *Proceedings of the 9th International Conference on Gas Hydrate*. Denver, Colorado, USA: ICGH9, 2017.
- [80] LI Y L, WU N Y, NING F L, et al. A sand-production control system for gas production from clayey silt hydrate reservoirs[J]. *China Geology*. 2019, 2(2): 121–132.
- [81] CHENG K, WANG Y, YANG Q. A semi-resolved CFD-DEM model for seepage-induced fine particle migration in gap-graded soils[J]. *Computers and Geotechnics*. 2018, 100: 30–51.
- [82] HU Z, ZHANG Y D, YANG Z X. Suffusion-induced deformation and microstructural change of granular soils: a coupled CFD-DEM study[J]. *Acta Geotechnica*. 2019, 14(3): 795–814.
- [83] BOUTT D F, COOK B K, WILLIAMS J R. Coupled fluid-solid model for problems in geomechanics: Application to sand production[J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*. 2011, 35(9): 997–1018.
- [84] HAN Y H, CUNDALL P. Verification of two-dimensional LBM-DEM coupling approach and its application in modeling episodic sand production in borehole[J]. *Petroleum*. 2017, 3: 179–189.
- [85] GHASSEMI A, PAK A. Numerical simulation of sand production experiment using a coupled Lattice Boltzmann-Discrete Element Method[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015, 135: 218–231.
- [86] ZHOU Z Y, YU A B, CHOI S K. Numerical simulation of the liquid-induced erosion in a weakly bonded sand assembly[J]. *Powder Technology*. 2011, 211(2): 237–249.
- [87] CLIMENT N, ARROYO M, O’SULLIVAN C, et al. Sand production simulation coupling DEM with CFD[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2014, 18(9): 983–1008.
- [88] CUI Y F, NOURI A, CHAN D, et al. A new approach to DEM simulation of sand production[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2016, 147: 56–67.
- [89] 刘先珊, 许明. 基于三维流-固耦合模型的油井出砂微观机制研究[J]. *岩土力学*. 2013, 34(08): 2363–2370. [LIU X S, XU M. Research on micromechanism of sand production in oil well based on 3 dimensional coupled fluid-solid model[J]. *Rock and Soil Mechanics*. 2013, 34(08): 2363–2370.]
- [90] 刘先珊, 许明. 基于柱坐标系的油井出砂三维数值模型设计与研究[J]. *岩土工程学报*. 2013, 35(05): 871–878. [LIU X S, XU M. 3-dimensional numerical model for sand production in oil wellbore based on cylindrical coordinate system[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2013, 35(05): 871–878.]
- [91] GROF Z, COOK J, LAWRENCE C J, et al. The interaction between small clusters of cohesive particles and laminar flow: Coupled DEM/CFD approach[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2009, 66(1–2): 24–32.
- [92] WU B, CHOI S K, FENG Y, et al. Evaluating sand screen performance using improved sand retention test and numerical modelling[C]. *Offshore Technology Conference Asia*. Kuala Lumpur, Malaysia: OTC, 2016.
- [93] ATASHI SMS, GOSHTASBI K, BASIRAT R. Fluid properties effects on sand production using discrete element method[J]. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 2018, 52(2): 169–179.
- [94] SHAFFEE SNA, LUCKHAM P F, MATAR OK, et al. Numerical investigation of sand-screen performance in the presence of adhesive effects for enhanced sand control[J]. *SPE J*. 2019, 24(05): 2195–2208.
- [95] COOK BK, NOBLE DR, WILLIAMS JR. A direct simulation method for particle-fluid systems[J]. *Engineering Computations*. 2004, 21(2/3/4): 151–168.
- [96] OHTSUKI S, MATSUOKA T. The behavior of sand grains around the perforation channel by coupled LBM and DEM[C]. *The 42nd US Rock Mechanics Symposium*. San Francisco, California: ARMA, 2008.
- [97] BRUMBY PE, SATO T, NAGAO J, et al. Coupled LBM-DEM micro-scale simulations of cohesive particle erosion due to shear flows[J]. *Transport in Porous Media*. 2015, 109(1): 43–60.
- [98] WANG M, FENG Y T, ZHAO T T, et al. Modelling of sand production using a mesoscopic bonded particle lattice Boltzmann method[J]. *Engineering Computations*. 2019, 36(2): 691–706.



- [99] MONDAL S, SHARMA MM, CHANPURA RA, et al. Numerical simulations of screen performance in standalone screen applications for sand control[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Florence, Italy: SPE, 2010.
- [100] MONDAL S, SHARMA MM, CHANPURA RA, et al. Numerical simulations of sand-screen performance in standalone applications[J]. SPE Drilling and Completion. 2011, 26(04): 472–483.
- [101] MONDAL S, SHARMA MM, HODGE RM, et al. A new method for the design and selection of premium/woven sand screens[J]. SPE Drilling and Completion. 2012, 27(03): 407–416.
- [102] MONDAL S, WU CH, SHARMA MM, et al. Characterizing, designing, and selecting metal mesh screens for standalone screen applications[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Amsterdam, The Netherlands: SPE, 2014.
- [103] CHANPURA RA, MONDAL S, SHARMA MM, et al. Unraveling the myths associated with selecting standalone screens and a new methodology for sand-control applications[J]. SPE Drilling and Completion. 2013, 28(03): 227–236.
- [104] PREECE DS, JENSEN RP, PERKINS ED, et al. Sand production modeling using superquadric discrete elements and coupling of fluid flow and particle motion[C]. The 37th US Symposium on Rock Mechanics. Vail, Colorado: ARMA, 1999.
- [105] LEZHNEV K. Application of discrete element method for modelling sand control systems[C]. SPE Russian Petroleum Technology Conference. Moscow, Russia: SPE, 2018.
- [106] COETZEE C J. Review: Calibration of the discrete element method[J]. Powder Technology. 2017, 310: 104–142.
- [107] 石崇, 张强, 王盛年. 颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. [SHI C, ZHANG Q, WANG S N. Particle flow (pfc5.0) numerical simulation technology and its application[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2018.]
- [108] YIN Z Y, LINGA P. Methane hydrates: A future clean energy resource[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2019, 27(9): 2026–2036.
- [109] GONG B, JIANG Y J, CHEN L J. Feasibility investigation of the mechanical behavior of methane hydrate-bearing specimens using the multiple failure method[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2019, 69: 102915.
- [110] 商翔宇, 鲁巨明, 杨晨, 等. 考虑黏土特性的离散元程序开发[J]. 防灾减灾工程学报. 2016, 36(04): 657–663. [SHANG X Y, LU J M, YANG C, et al. Development of discrete element code considering the characteristic of clay[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering. 2016, 36(04): 657–663.]
- [111] 朱一铭. 天然气水合物沉积物静动力学特性研究[D]. 大连理工大学, 2016. [ZHU Y M. Study on the statics and dynamic mechanical properties of natural gas hydrate-bearing sediments[D]. Dalian University of Technology. 2016.]
- [112] 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.
- [113] UCHIDA S, SOGA K, YAMAMOTO K. Critical state soil constitutive model for methane hydrate soil[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth. 2012, 117(B3).
- [114] 孙翔, 郭晓霞, 邵龙潭, 等. 基于热力学方法的甲烷水合物沉积物本构模型[J]. 大连理工大学学报. 2017, 57(02): 111–118. [SUN X, GUO X X, SHAO L T, et al. Constitutive model of methane hydrate bearing sediment based on thermodynamic approach[J]. Journal of Dalian University of Technology. 2017, 57(02): 111–118.]
- [115] 张小玲, 夏飞, 杜修力, 等. 考虑含水合物沉积物损伤的多场耦合模型研究[J]. 岩土力学. 2019(11): 1–12. [ZHANG X L, XIA F, DU X L, et al. Study on multi-field coupling model considering damage of hydrate-bearing sediments[J]. Rock and Soil Mechanics. 2019(11): 1–12.]
- [116] 颜荣涛, 张炳晖, 杨德欢, 等. 不同温-压条件下含水合物沉积物的损伤本构关系[J]. 岩土力学. 2018, 39(12): 4421–4428. [YAN R T, ZHANG B H, YANG D H, et al. Damage constitutive model for hydrate-bearing sediment under different temperature and pore pressure conditions[J]. Rock and Soil Mechanics. 2018, 39(12): 4421–4428.]
- [117] 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(01): 10–18. [YAN R T, LIANG W Y, WEI C F, et al. A constitutive model for gas hydrate-bearing sediments considering hydrate occurring habits[J]. Rock and Soil Mechanics. 2017, 38(01): 10–18.]
- [118] 杨期君, 赵春风. 一种改进的水合物沉积物弹塑性损伤本构模型[J]. 海洋工程. 2014, 32(05): 57–62, 92. [YANG Q J, ZHAO C F. An improved constitutive model coupling elastoplasticity and damage for methane hydrate-bearing sediments[J]. The Ocean Engineering. 2014, 32(05): 57–62, 92.]
- [119] 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(04): 991–997. [YANG Q J, ZHAO C F. A constitutive model coupling elastoplasticity and damage for methane hydrate-bearing sediments[J]. Rock and Soil Mechanics. 2014, 35(04): 991–997.]
- [120] 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 Y L, LIU C L, LIU L L. Damage statistic constitutive model of hydrate-bearing sediments and the determination method of parameters[J]. Acta Petrolei Sinica. 2016, 37(10): 1273–1279.]
- [121] 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(01): 60–65. [WU E L, WEI C F,

- WEI H Z, et al. A statistical damage constitutive model of hydrate-bearing sediments[J]. *Rock and Soil Mechanics*. 2013, 34(01): 60–65.]
- [122] 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 E L, WEI H Z, YAN R T, et al. Constitutive model for gas hydrate-bearing sediments considering damage[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2012, 31(S1): 3045–3050.]
- [123] 张峰, 刘丽华, 吴能友, 等. 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[J]. *新能源进展*. 2017, 5(06): 443–449. [ZHANG F, LIU L H, WU N Y, et al. Status of constitutive relationship and numerical simulation of gas hydrate deposited medium[J]. *Advanced in New and Renewable Energy*. 2017, 5(06): 443–449.]
- [124] KIM J C, DAI S, JANG J B, et al. Compressibility and particle crushing of Krishna-Godavari Basin sediments from offshore India: Implications for gas production from deep-water gas hydrate deposits[J]. *Marine and Petroleum Geology*. 2019, 108(10): 697–704.
- [125] KIM J C, ZHANG Y D, SEOL Y, et al. Particle crushing in hydrate-bearing sands[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*. 2019: 100133.
- [126] ZHANG C, NGUYEN G D, KODIKARA J. An application of breakage mechanics for predicting energy–size reduction relationships in comminution[J]. *Powder Technology*. 2016, 287: 121–30.
- [127] ZHANG C S, JI J, YANG S Q, et al. Implicit integration of simple breakage constitutive model for crushable granular materials: A numerical test[J]. *Computers and Geotechnics*. 2017, 82: 43–53.
- [128] ZHANG C S, JI J, KODIKARA J, et al. Evaluation of the performance of a breakage model for high porosity Haubourdin chalk[J]. *Computers and Geotechnics*. 2017, 90: 113–119.
- [129] LIN J, BAUER E, WU W. A combined method to model grain crushing with DEM[J]. *Geoscience Frontiers*. 2020, 11(2): 451–459.
- [130] 徐琨, 周伟, 马刚, 等. 基于离散元法的颗粒破碎模拟研究进展[J]. *岩土工程学报*. 2018, 40(05): 880–889. [XU K, ZHOU W, MA G, et al. Review of particle breakage simulation based on DEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2018, 40(05): 880–889.]
- [131] 梁霄. 机器学习在量子物理学中的应用 [D]. 中国科学技术大学, 2019. [LIANG X. Applications of machine learning in quantum physics[D]. University of Science and Technology of China, 2019.]
- [132] 李佳. 基于机器学习的多孔介质渗透率预测研究 [D]. 浙江大学, 2019. [LI J. A machine learning-based approach for permeability prediction of porous media[D]. Zhejiang University, 2019.]

(编辑 马桂霞)