

Numerical Simulation Experiment on Combustible Ice-Bearing Sediment

Hongqian Wang¹, Bo Zhou^{1*}, Shifeng Xue¹, Yingsong Lin²

¹College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao Shandong

²School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao Shandong

Email: zhoubo@upc.edu.cn

Received: Jul. 18th, 2018; accepted: Aug. 2nd, 2018; published: Aug. 9th, 2018

Abstract

Numerical simulation samples of combustible ice-bearing sediment are generated by the particle flow software PFC^{3D}. Triaxial compression simulation experiments are carried out on the combustible ice-bearing sediment with various saturations of combustible ice to investigate the influences of combustible ice saturation on the mechanical behaviors of combustible ice-bearing sediment. The findings are as follows. The initial elastic modulus, peak stress and residual strength of combustible ice-bearing sediment increase upon the increased combustible ice saturation. There is strain softening phenomenon appearing in the combustible ice-bearing sediment when the material stress is above peak stress. The value of axial strain at the starting point of strain softening increases with the combustible ice saturation increasing when the value of combustible ice saturation is below 20%, while it decreases with the combustible ice saturation increasing when the value of combustible ice saturation is above 20%. There is a phenomenon of shearing shrinkage followed by a phenomenon of shear expansion in the combustible ice-bearing sediment during the process of triaxial compression loading. The phenomenon of shear expansion becomes clearer when the combustible ice saturation is increased. This work can provide the basis of mechanics and technical references for the safe mining of combustible ice.

Keywords

Combustible Ice Sediment, Saturation of Combustible Ice, Triaxial Compression Experiment, Mechanical Behaviors

可燃冰沉积物三轴压缩模拟仿真试验分析

王宏乾¹, 周博^{1*}, 薛世峰¹, 林英松²

¹中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛

²中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛

*通讯作者。

摘要

利用颗粒流软件PFC^{3D}制备了在不同可燃冰饱和度情况下可燃冰沉积物的数值仿真试样, 对不同可燃冰饱和度下的可燃冰沉积物进行了三轴压缩模拟仿真试验, 分析了可燃冰饱和度对可燃冰沉积物力学特性的影响。研究表明: 可燃冰沉积物的初始弹性模量、峰值应力和残余强度均随可燃冰饱和度的增加而增大; 在应力超过峰值应力后可燃冰沉积物出现明显的应变软化现象, 在可燃冰饱和度小于20%时, 应变软化开始时的轴向应变随饱和度增加而增大, 在可燃冰饱和度大于20%时, 应变软化开始时的轴向应变随饱和度的增加而减小; 可燃冰沉积物表现出先剪缩后剪胀的趋势, 并且剪胀现象随着可燃冰饱和度的增加而愈发明显。本文工作可为燃冰的安全开采, 提供必要的力学基础与技术参考。

关键词

可燃冰沉积物, 可燃冰饱和度, 三轴压缩试验, 力学特性

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

可燃冰学名天然气水合物, 是水和天然气在低温高压下形成的晶体状固态混合物。作为一种燃料能源, 可燃冰清洁无污染、燃烧放热量大, 1 m³可燃冰相当于 164 m³的天然气燃烧释放的热量。可燃冰能够稳定存在于深海沉积物区以及陆域永冻带, 形成可燃冰沉积物[1] [2] [3] [4]。可燃冰分布广、储量大, 可作为石油及天然气等传统能源的替代能源, 极具开采价值。可燃冰被称为 21 世纪潜在新能源, 世界各国都把可燃冰作为未来能源战略的重要内容。许多国家制定了相应的开采计划, 我国也加大了这方面的研究, 并将可燃冰正式列为我国第 173 个矿种。2017 年, 我国在南海神狐海域对可燃冰进行第一次试采, 取得了圆满成功, 实现了我国可燃冰开采的历史性突破[5]。

我国可燃冰储量巨大, 约为 800 亿吨油当量, 开采价值极大, 但在可燃冰的商业开采方面还存在诸多困难。现有研究表明, 可燃冰沉积物是以天然气水合物为粘结剂的胶结土, 可燃冰的存在对储层土壤的力学性质会产生显著的影响。开采过程中由于温度升高、压力降低易引起可燃冰分解, 导致沉积物抗剪强度的降低、孔隙压力的增加, 储层渗透性能改变, 进而诱发钻井过程中的井壁失稳、海底滑坡以及地层变形等一系列的岩土工程问题[6] [7]。因此研究可燃冰沉积物的力学行为对提高井壁稳定性以及避免开采过程中的地质灾害具有重要意义。

可燃冰赋存条件为低温、高压, 采集可燃冰沉积物原状试样所需设备昂贵, 不易实现对可燃冰沉积物原样的试验研究, 难以对影响可燃冰沉积物力学性质的因素进行逐一探究, 限制了对可燃冰沉积物复杂力学行为进行系统化研究。目前研究人员主要利用实验室人工合成可燃冰沉积物试样, 试验研究可燃冰沉积物的力学性质。张旭辉[8]等人利用自制的可燃冰沉积物试验设备, 对冰沉积物以及四氢呋喃、二

氧化碳和甲烷等水合物沉积物进行了室内三轴剪切试验, 分析并比较了四种沉积物的应力 - 应变和强度特性。李令东等人[9]对直接合成和混合制样两种方法制备的可燃冰沉积物进行了三轴压缩试验, 探究了可燃冰对土体颗粒的胶结作用。刘芳[10]等人对甲烷水合物沉积物和四氢呋喃水合物沉积物进行了三轴试验, 分析了水合物饱和度与试样强度特性的关系。Hyodo [11]等人对两种制备方式不同的可燃冰沉积物展开了一系列的三轴试验, 探究了水合物沉积物力学行为。刘乐乐[12]等人利用自主研发的实验装置对可燃冰沉积物样品开展了三轴剪切试验, 并提出建立了水合物沉积物的本构关系模型。李彦龙[13]等人通过对水合物沉积物进行三轴试验, 分析了沉积物应力 - 应变曲线的基本变形规律, 首次建立了三轴剪切破坏下水合物沉积物发生应变软化与硬化的临界条件判别方法。这些研究成果进一步揭示了可燃冰沉积物的力学行为, 加深了人们对其的认知。但由于人工合成的理想性与技术限制, 室内实验难以揭示引起可燃冰沉积物复杂宏观力学特性的细观机制。可燃冰沉积物为由土颗粒和可燃冰颗粒组成的混合散体材料, 其力学行为研究属于典型的非连续问题。离散元法(Discrete Element Method, DEM)因其在计算散体材料方面的独特优势, 成为解决此类问题的有效工具。

为有效研究可燃冰饱和度对可燃冰沉积物力学特性的影响, 本文基于颗粒流软件 PFC^{3D} 对不同可燃冰饱和度下的可燃冰沉积物试样, 进行三轴压缩模拟仿真试验研究, 系统分析了可燃冰饱和度对可燃冰沉积物的初始弹性模量、峰值应力、残余强度、应变软化、剪胀效应等力学特性的影响, 为可燃冰商业化开采所涉及的井壁失稳、海底滑坡及地层变形等工程问题, 提供了力学基础和技术参考。

2. DEM 试样制备

有效反映材料细观结构的 DEM 数值试样, 是进行有效 DEM 数值模拟分析的前提与基础。本文基于颗粒流软件 PFC^{3D}, 制备可燃冰沉积物 DEM 试样。为表现可燃冰在沉积物孔隙中随机分布的特征, 模拟成样过程中同时随机生成砂粒与可燃冰两种颗粒。其中的砂粒和可燃冰颗粒均用圆球模拟, 试样初始孔隙率为 0.38。为有效反映可燃冰沉积物的细观结构, 试样中的砂粒采用与 Toyoura 砂[14]类似的颗粒级配进行生成, 其粒径分布曲线如图 1 所示, 直径范围为 0.1~0.4 mm。为提高数值模拟的计算效率, 本文将可燃冰颗粒直径取为 0.08 mm。按照上述参数制备的直径为 2 mm 和高度为 4 mm 的圆柱形可燃冰沉积物 DEM 试样如图 1(b)所示。

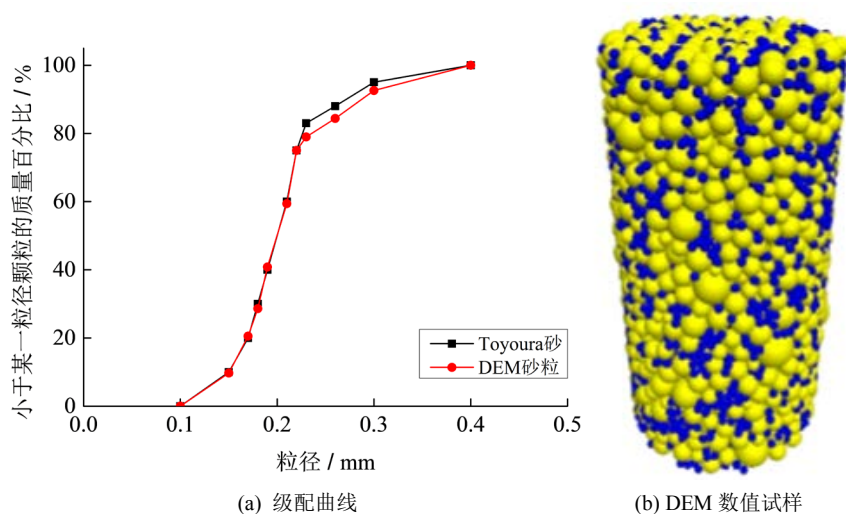


Figure 1. Grain gradation curve and DEM numerical specimen
图 1. 颗粒级配曲线和 DEM 数值试样

3. 三轴压缩试验研究

为研究可燃冰饱和度对可燃冰沉积物力学特性的影响,对不同可燃冰饱和度下的可燃冰沉积物 DEM 试样进行一系列三轴压缩模拟仿真试验。试验过程为:首先利用 PFC^{3D} 的伺服控制技术使整个试样保持恒定围压;然后通过对上、下墙体的移动对 DEM 试样加载,进行三轴压缩模拟仿真试验。

3.1. 应力 - 应变曲线

图 2 给出的是在围压 2 MPa 下可燃冰沉积物 DEM 试样的宏观应力 - 应变关系曲线。其中,横坐标为圆柱形可燃冰沉积物 DEM 试样的轴向应变,纵坐标为偏应力,即最大主应力和最小主应力的差值。图 2(a)是饱和度为 40.9%时,本文 DEM 可燃冰试样的数值试验曲线和人工合成可燃冰沉积物试样的物模试验曲线[14],可见本文 DEM 数值试验曲线和物模试验曲线基本吻合,因此本文的 DEM 数值模拟方法能有效反映可燃冰沉积物的力学性质。图 2(b)是饱和度分别为 0%、10%、20%、30%和 40.9%时,可燃冰沉积物 DEM 试样的应力 - 应变关系曲线,可见饱和度是影响可燃冰沉积物力学性质的重要因素。图 2(b)中曲线表明,在加载的初始阶段,可燃冰沉积物试样的偏应力随着轴向应变增大而近似线性增大,其初始宏观弹性模量随着饱和度增加而增大。可燃冰沉积物的残余强度亦随着饱和度的增加而增大。当偏应力达到最大值后,可燃冰试样出现应变软化现象;在饱和度小于 20%时,应变软化开始时的轴向应变随饱和度增加而增大;在饱和度大于 20%时,应变开始软化时的轴向应变随饱和度的增加而减小。综上所述可知,由于可燃冰的存在,沉积物的强度和刚度均得到提高,但是当饱和度过大时可燃冰沉积物有脆性增加、延性降低的趋势。

3.2. 试验结果分析

图 3(a)为根据本文 DEM 数值仿真试验得到的可燃冰沉积物弹性模量 E_{50} 与饱和度的关系曲线,其中弹性模量 E_{50} 是指偏应力达到峰值应力一半时的偏应力与轴向应变的比值,该值代表了可燃冰沉积物抵抗变形的能力。可以看出可燃冰沉积物弹性模量 E_{50} 随饱和度增加而提高,且弹性模量 E_{50} 和饱和度之间大致呈线性关系。上述关系和图 3(b)所示根据人工合成可燃冰试样的物模试验[14]得到的关系曲线是一致的,这表明了本文 DEM 数值模拟试验的有效性。

图 4(a)为根据本文可燃冰沉积物 DEM 试样的数值仿真试验,得到峰值强度和饱和度间的关系曲线;图 4(b)为根据文献[14]中人工合成可燃冰沉积物试样的室内试验得到的峰值强度和饱和度间的关系曲线。两条曲线均表明,可燃冰沉积物的峰值强度随着饱和度的增加而增大。但室内试验可燃冰沉积物的峰值强度和饱和度间近似为线性关系,而 DEM 数值结果具有明显的非线性关系。其主要原因包括:1) 本文模拟采用的砂粒为理想圆球体,颗粒之间的接触为点接触,而实际岩体颗粒形状不规则,颗粒之间的接触为面接触;2) 可燃冰饱和度超过一定值后,可燃冰的主要存在形式改变,可能出现可燃冰团簇,部分可燃冰团簇转化为能承受荷载的沉积物受力骨架或者成为沉积物砂粒间的胶结物质,对沉积物强度产生了一定影响。

图 5(a)给出了在围压等于 2.0 MPa 时,饱和度分别为 10%、20%和 30%的可燃冰沉积物 DEM 试样的体积应变和轴向应变的关系曲线。图中曲线表明,可燃冰沉积物 DEM 试样表现出先剪缩后剪胀的趋势,并且剪胀现象随着饱和度的增加而愈发明显,该结论和图 5(b)所示文献[14]通过人工合成可燃冰沉积物试样的三轴排水物模试验结论一致,这也说明本文的 DEM 模拟仿真试验能有效反映可燃冰沉积物的力学性质。

4. 结论

利用颗粒流软件 PFC^{3D} 对不同可燃冰饱和度下的可燃冰沉积物,进行了三轴压缩模拟仿真试验研究,

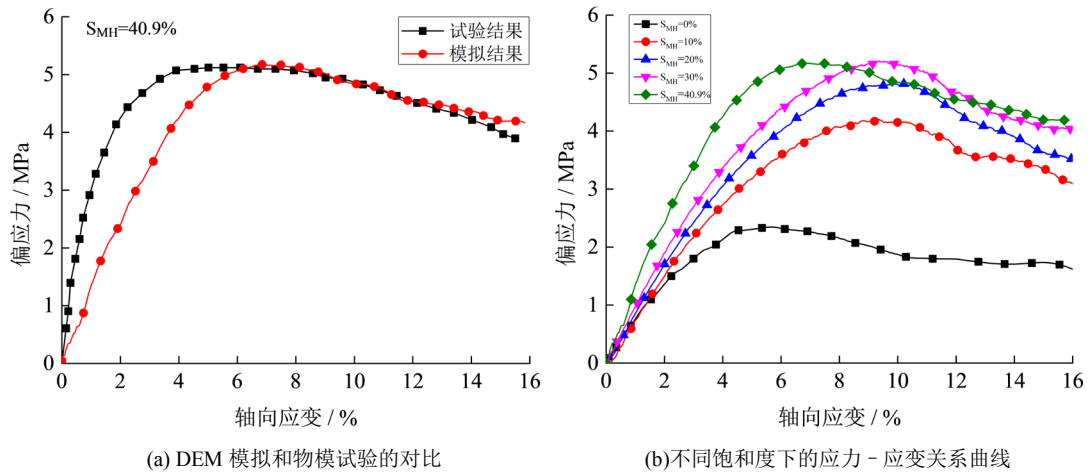


Figure 2. Stress-strain curves of combustible ice sediment
 图 2. 可燃冰沉积物的应力 - 应变关系曲线

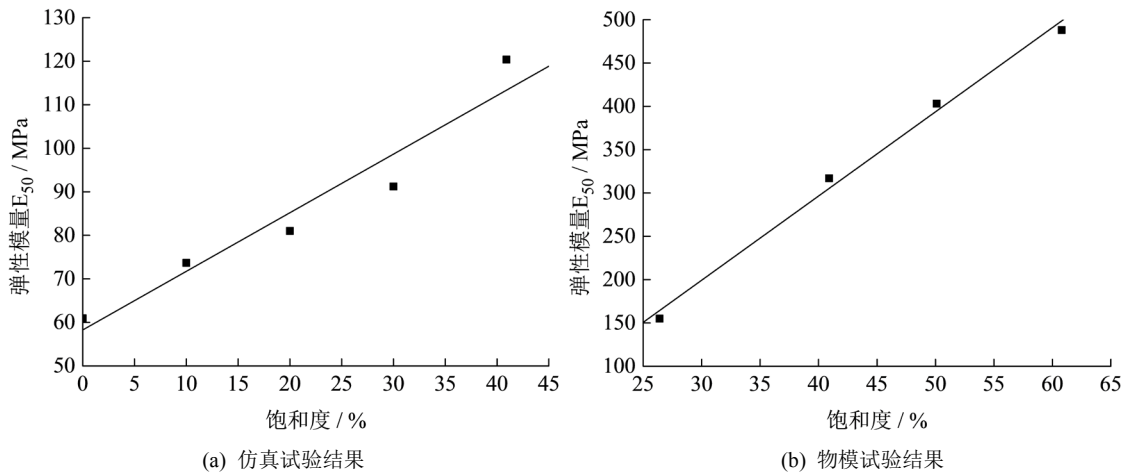


Figure 3. Curve of elastic modulus E_{50} and saturation of combustible ice sediment
 图 3. 可燃冰沉积物的弹性模量 E_{50} 与饱和度的关系曲线

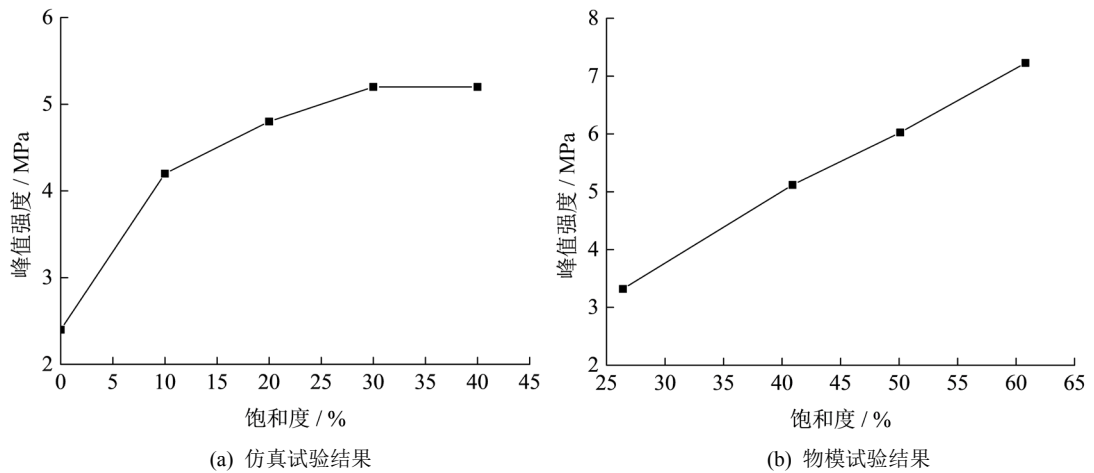


Figure 4. Curve of peak strength and saturation of combustible ice sediment
 图 4. 可燃冰沉积物的峰值强度与饱和度的关系曲线

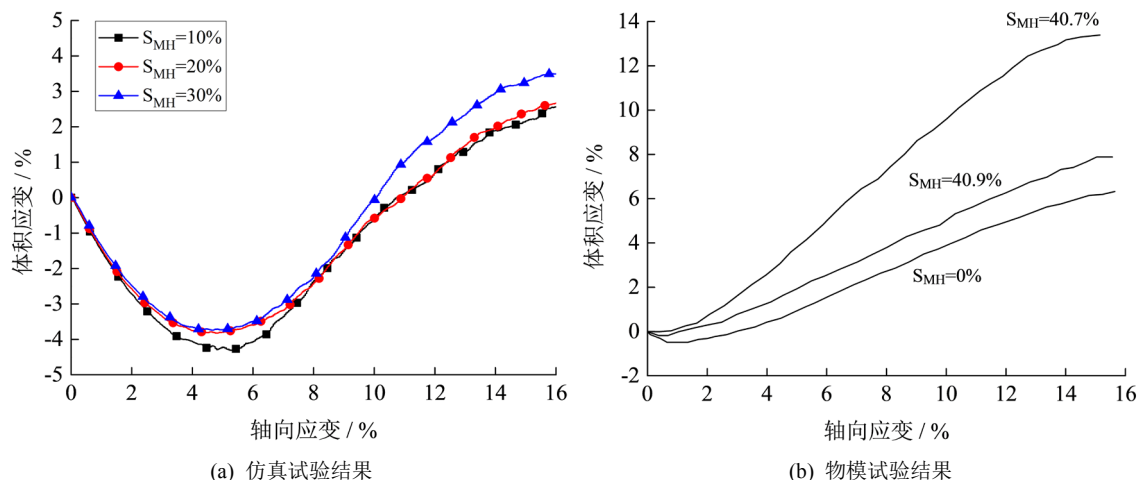


Figure 5. Curve of volumetric strain vs. axial strain of combustible ice sediment

图 5. 可燃冰沉积物的体积应变 - 轴向应变曲线

分析了可燃冰饱和度对可燃冰沉积物力学特性的影响, 主要结论如下:

1) 可燃冰沉积物的初始弹性模量、峰值应力、残余强度均随着可燃冰饱和度的增加而增大, 可燃冰饱和度越高对沉积物的胶结作用越强, 可燃冰的存在提高了沉积物的强度和刚度;

2) 可燃冰沉积物具有明显的应变软化特性, 在可燃冰饱和度小于 20% 时, 应变软化开始时的轴向应变随饱和度增加而增大; 在可燃冰饱和度大于 20% 时, 应变软化开始时的轴向应变随饱和度的增加而减小, 当饱和度过大时可燃冰沉积物有脆性增加、延性降低的趋势;

3) 在加载过程中可燃冰沉积物表现出先剪缩后剪胀的趋势, 可燃冰沉积物的剪胀现象随着可燃冰饱和度的增加而愈发明显, 在高可燃冰饱和度情况下可燃冰沉积物的剪胀效应不容忽视;

4) 本文工作可为可燃冰商业化开采所涉及的井壁失稳、海底滑坡及地层变形等工程问题, 提供必要的力学基础和技术参考。

基金项目

国家重点研发计划(2017YFC0307604)资助项目。

参考文献

- [1] 祝有海, 张光学, 卢振权, 等. 南海天然气水合物成矿条件与找矿前景[J]. 石油学报, 2001, 22(5):6-10
- [2] 丁丽颖. 甲烷水合物分解及自保护效应的分子动力学模拟[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院过程工程研究所, 2008.
- [3] 王智明, 曲海乐, 菅志军. 中国可燃冰开发现状及应用前景[J]. 节能, 2010, 29(5): 4-6.
- [4] 刘华, 李相方, 隋秀香, 等. 天然气水合物勘探技术研究现状[J]. 石油勘探技术, 2006, 34(5): 87-90.
- [5] 李彦龙. 我国海域天然气水合物试开采圆满完成并取得历史性突破[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017(5): 34.
- [6] Klar, A., Soga, K. and Ng, M.Y.A. (2010) Coupled Deformation-Flow Analysis for Methane Hydrate Extraction. *Geotechnique*, **60**, 765-776. <https://doi.org/10.1680/geot.9.P.079-3799>
- [7] Freij-Ayoub, R., Tan, C., Clennell, B., et al. (2015) A Wellbore Stability Model for Hydrate Bearing Sediments. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, **57**, 209-220.
- [8] 张旭辉, 王淑云, 李清平, 等. 天然气水合物沉积物力学性质的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3069-3074.
- [9] 李令东, 程远方, 孙晓杰, 等. 水合物沉积物试验岩样制备及力学性质研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(4): 97-101.

- [10] 刘芳, 寇晓勇, 蒋明镜, 等. 含水合物沉积物强度特性的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1565-1572.
- [11] Hyodo, M., Li, Y., Yoneda, J., *et al.* (2013) Mechanical Behavior of Gas-Saturated Methane Hydrate-Bearing Sediments. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **118**, 5185-5194. <https://doi.org/10.1002/2013JB010233>
- [12] 刘乐乐, 张旭辉, 刘昌岭, 等. 含水合物沉积物三轴剪切试验与损伤统计分析[J]. 力学学报, 2016, 48(3): 720-729.
- [13] 李彦龙, 刘昌岭, 刘乐乐, 等. 含水合物松散沉积物三轴试验及应变关系模型[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(3): 383-390.
- [14] Masui, A., Haneda, H., Ogata, Y., *et al.* (2005) Effects of Methane Hydrate Formation on Shear Strength of Synthetic Methane Hydrate Sediments. *The Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Seoul, 19-24 June 2005, International Society of Offshore and Polar Engineers, 364-369.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org