



海洋天然气水合物储层蠕变行为的主控因素与研究展望

吴能友, 李彦龙, 刘乐乐, 万义钊, 张正财, 陈明涛

Controlling factors and research prospect on creeping behaviors of marine natural gas hydrate-bearing-strata

WU Nengyou, LI Yanlong, LIU Lele, WAN Yizhao, ZHANG Zhengcai, and CHEN Mingtao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021092201>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海洋天然气水合物储层特性及其资源量评价方法

Characteristics of marine gas hydrate reservoir and its resource evaluation methods

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 44

海洋沉积物中金属依赖型甲烷厌氧氧化作用研究进展及展望

Research progress and prospects of metal-dependent anaerobic methane oxidation in marine sediments

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 58

南黄海崂山隆起二叠系砂岩储层特征及其油气勘探前景

Characteristics and hydrocarbon prospects of the Permian sandstone reservoirs of the Laoshan Uplift, South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 181

海洋环境中甲烷好氧化过程的研究进展

A review on microbial aerobic methane oxidation in marine environment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 67



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021092201

海洋天然气水合物储层蠕变行为的主控因素与研究展望

吴能友^{1,2}, 李彦龙^{1,2}, 刘乐乐^{1,2}, 万义钊^{1,2}, 张正财², 陈明涛^{1,2,3}

1. 自然资源部天然气水合物重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237
3. 河海大学海洋学院, 南京 210024

摘要:蠕变是指沉积物在特定应力状态下变形与时间的关系,属于沉积物的固有力学属性。厘清海洋天然气水合物开采过程中储层蠕变的主控因素及其控制机理,对量化评价潜在工程地质风险的发生和演变规律具有重要意义。本文将在综述海洋天然气水合物储层破坏特征的基础上,梳理海洋天然气水合物储层蠕变特征及主控因素,厘清关键科学问题;结合最新研究成果,阐述天然气水合物储层蠕变特征多尺度表征与探测技术体系的基本内涵,简要探讨该领域的未来研究方向。初步分析认为,海洋天然气水合物开采过程中储层蠕变行为是水合物本身及其分解产出过程中的应力、温度、渗流等动态因素综合作用的结果,现有蠕变本构模型无法完全反映上述相变-传热-渗流-应力多场多相多组分耦合过程。为建立适合南海北部水合物储层的蠕变本构,进而为后续开采工程安全设计提供理论支撑,建议从天然气水合物储层的力学性能弱化特征及蠕变各阶段的时效参数两方面入手,从分子尺度、纳微尺度、岩心尺度、中试尺度、矿藏尺度 5 个层面,建立天然气水合物储层蠕变行为的跨尺度研究方法体系;以南海实际储层样品为研究对象,剖析天然气水合物开采过程中储层蠕变行为的主控因素。

关键词:天然气水合物;储层;蠕变机理;水合物开采;力学响应

中图分类号:P744

文献标识码:A

Controlling factors and research prospect on creeping behaviors of marine natural gas hydrate-bearing-strata

WU Nengyou^{1,2}, LI Yanlong^{1,2}, LIU Lele^{1,2}, WAN Yizhao^{1,2}, ZHANG Zhengcai², CHEN Mingtao^{1,2,3}

1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266237, China
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China
3. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210024, China

Abstract: Creeping of HBS is a common behavior of hydrate-bearing strata in the process of gas production and has great impact on the occurrence and development of engineering geohazards. In this paper, we summarized the main failure modes of HBS based on the investigation of a large number of literatures. Then the research thoughts and strategies on strata creeping behaviors during hydrate exploitation are comprehensively discussed, based on the key scientific issues expounded. Afterwards, a multi-scale creeping detection and characterization approach for HBS is put forward, together with its future research trends. It is supposed that creeping behaviors of HBS during gas extraction are the result of combination of hydrate distribution and its dissociation-induced changes in multi-physical fields such as phase transformation, heat exchange, seepage, and stress evolution. The current constitutive models for conventional soils are not effective enough to reflect such a complex dynamic multifield, multiphase and multicomponent coupling effect, which are doubtlessly inadaptable for evaluating the geotechnical issues during hydrate exploitation in the case of northern South China Sea. For this reason, a multi-scale detection and characterization system needs to be established to analyze the dynamic damage behaviors of HBS during hydrate production, which consists of the molecular scale, nano-to-micro scale, core scale, pilot scale, and field scales techniques. Using the sediments collected from the HBS at the northern South China Sea, the control mechanisms of different geological and engineering parameters on hydrate-bearing strata creeping should be quantitatively modeled.

Key words: natural gas hydrate; hydrate bearing sediment; creeping mechanism; hydrate production; geotechnical response

资助项目:国家自然科学基金项目“南海神狐海域水合物储层的蠕变特征与主控因素研究”(42076217);山东省泰山学者特聘专家计划(ts201712079)

作者简介:吴能友(1965—),男,研究员,主要从事海洋地质与天然气水合物研究, E-mail: wuny@ms.giec.ac.cn

通讯作者:李彦龙(1989—),男,副研究员,主要从事天然气水合物开采研究, E-mail: ylli@qnlm.ac

收稿日期:2021-09-22; **改回日期:**2021-10-08. 蔡秋蓉编辑

天然气水合物作为未来战略能源已成为国际共识,受到世界各国尤其是发达国家和能源短缺国家的高度重视。近年来,国际天然气水合物研发态势已逐步从资源普查阶段转入勘查试采一体化阶段,迄今已在加拿大麦克米伦三角洲、美国阿拉斯加北坡、中国青海祁连山3个陆地冻土区和日本南海海槽、中国南海神狐2个海域成功实施试采^[1-2]。2013年、2017年,日本南海海槽砂质储层天然气水合物试采结果表明,大量出砂是试采被迫终止的主要原因^[3-4]。2017年、2020年中国在南海神狐海域分别运用垂直井和水平井成功实施了针对泥质粉砂储层的天然气水合物试采,2017年连续稳定生产60天,累计产气 $30.9 \times 10^4 \text{ m}^3$,2020年连续稳定生产30天,累计产气 $86.14 \times 10^4 \text{ m}^3$,取得了理论与技术的重大突破^[5-6]。

然而,上述海域天然气水合物试采实践暴露出的部分工程、地质难题仍悬而未决,严重制约了后续试采方案的制定和产业化进程。其中,工程地质风险调控领域的重大未解难题是:日本2013年试采和2017年第一口井试采均因储层大量出砂堵塞管道而被迫终止^[2],但中国南海北部神狐海域泥质粉砂天然气水合物储层在产气的同时出砂却较少^[5,7],给外界造成很多困惑。初步研究认为,造成这种现象的主要原因可能是储层在开采过程中发生蠕变,封闭原有产砂通道(即出砂蚯蚓洞、裂隙在蠕变过程中逐渐闭合)^[8-9]。但是,天然气水合物储层蠕变特征对出砂规律的量化控制程度如何?目前暂时悬而未决。解决该问题的前提是厘清水合物开采过程中储层蠕变主控因素及其控制机理。本文将聚焦南海北部神狐海域泥质粉砂型天然气水合物储层特征,探讨不同的工程、地质因素对储层蠕变行为的影响规律,深入分析水合物储层的蠕变特征参数,阐明水合物降压开采过程中多相多场耦合条件下储层蠕变特征的响应机理及主控因素,为解决水合物试采工程发现的工程、地质问题提供科学依据。

另外,在综述海洋天然气水合物储层破坏特征的基础上,梳理海洋天然气水合物储层蠕变特征及主控因素,厘清关键科学问题;结合最新研究成果,阐述天然气水合物储层蠕变特征多尺度表征与探测技术体系的基本内涵,简要探讨该领域的未来研究方向。

1 水合物储层蠕变行为的主控因素与科学挑战

1.1 水合物储层蠕变行为的主控因素

天然气水合物开采过程中的储层力学动态响应特征是揭示开采诱发的工程地质风险发生临界条件、演变规律的基础。天然气水合物开采过程中储层(特别是未固结成岩储层)的破坏过程在很大程度上属于长期载荷作用下的缓慢变形和破坏,即沉积物在开采过程中主要发生流变性破坏,蠕变参数是储层长期稳定性评价的重要指标。

从微观角度分析,蠕变伴随着沉积物内部微观结构随时间的变化、调整,主要表现为微裂纹、微压实等损伤形式的不断累积、发展和扩散。因此,蠕变本身是一个动态过程,其涉及的蠕变应变、蠕变应变速率、蠕变破坏强度等参数也均为动态指标。基于损伤带的演化特征,大部分岩土材料的蠕变过程包含衰减蠕变、稳态蠕变和加速蠕变3个基本阶段^[10]。然而,初步研究结果显示,含水合物沉积物在三轴应力状态下的蠕变特征曲线并不完全遵循常规意义上的3个基本蠕变阶段^[11],不同沉积物本底特征的含水合物沉积物储层表现出不同的蠕变规律。

导致上述差异的第一个重要影响因素是水合物储层的相变(天然气水合物分解)。常规岩土材料蠕变特征分析中,沉积物内部不存在动态相变过程,也不存在水气两相动态渗流过程。因此,我们将这种单纯外应力作用下沉积物内部损伤累积引起的沉积物流变行为定义为“静态”蠕变。但天然气水合物开采过程中存在相变(即天然气水合物分解相变),天然气水合物分解产生的水气处于渗流流动状态,而天然气水合物相变和多相渗流过程本身会对储层所受的应力状态产生影响,因而储层所受的应力状态处于实时动态变化中^[12]。因此,天然气水合物开采过程中储层的变形行为受相变-渗流与应力状态实时耦合的影响,比单纯应力作用下的岩土蠕变特征复杂得多^[13]。我们将这种应力状态与实时相变、多相渗流过程动态耦合作用下的流变特征定义为“动态”蠕变。

为克服储层相变对储层基础物性研究带来的挑战,国内外学者曾尝试应用冰的结融过程替代天然气水合物生成分解过程,以简化对天然气水合物储层基本性质的研究^[14]。如现在被天然气水合物界普遍接受并认可的饱和度阿尔奇公式及其饱和度指数取值($n \approx 2$),其实就是基于含冰沉积物模拟结果获取的^[15]。由此推断,冻土融冰条件下的蠕变行为可为天然气水合物储层蠕变特性的研究提供

一定的思路借鉴。在相同应力路径下,衰减蠕变、稳定蠕变及加速蠕变阶段均受融冰引起的岩石劣化程度的影响,具有典型的非线性特征,而这种非线性行为可以通过冻融损伤效应来定量评价^[16]。另外,冻融循环导致冻土层从稳定蠕变到加速破坏所经历的时间更短,对应的蠕变量及蠕变速率增大,且宏观破裂形态由单一斜剪切破坏模式向共轭断面拉剪复合破坏模式演化^[17-18]。

在不恰当的井底工况条件下,地层中可能存在多轮次的天然气水合物分解-生成-再分解过程,这一过程类似于冻土层中的结融冰循环过程。因此,上述冻融循环载荷对沉积物蠕变的影响对天然气水合物储层蠕变特性分析具有重要的启示意义。但冰结融过程毕竟与天然气水合物合成-分解过程存在巨大的差异:天然气水合物合成分解过程中的潜热效应(62.83 kJ/mol)远大于冰结融过程的潜热(6.0 kJ/mol),导致天然气水合物开采过程中储层温度剧烈变化。因此,天然气水合物储层蠕变规律建模不仅需要考虑相变的影响,而且要考虑相变引起的温度变化。

针对常规不含天然气水合物的黏土沉积物的蠕变试验结果表明:温度的升高会提升黏土储层的蠕变速率,延长衰减蠕变阶段的时间^[19]。在降压开采过程中,由于天然气水合物分解吸热和多相渗流Joule-Thomson效应的联合作用,近井地层的温度急剧降低^[20],可能导致储层结冰或天然气水合物二次生成^[21-22]。因此,天然气水合物开采条件下的储层蠕变行为受相变过程与温度效应的耦合控制,天然气水合物储层蠕变特征分析必须首先考虑相变与温度效应的耦合影响^[23-24]。

储层中的气水分布状态和两相渗流也可能直接影响水合物储层的蠕变行为。原位状态下海洋天然气水合物储层处于水饱和状态,水对储层产生物理、化学及力学作用,进而在微观上改变储层的强度等宏观力学性质^[25-26]。天然气水合物开采过程中,储层静止的饱水状态将被打破,沉积物孔隙被处于渗流状态的气水两相饱和^[27]。因此,天然气水合物开采环境下储层要承受静水压力及多相渗流产生的动水冲刷联合作用,其流变特性与静止水饱和状态的常规储层存在本质差别。

综上,海洋天然气水合物开采过程中储层的变形行为取决于水合物分解相变、储层温度扰动、储层多相渗流、井底工作制度(即外部载荷)等因素的综合作用。厘清这些主要影响因素及其耦合作用对储层蠕变行为的控制机理,是建立水合物储层蠕

变本构模型,精准预测水合物储层变性行为的关键。

1.2 水合物储层蠕变本构建模思路

为了综合描述各因素对岩土蠕变效应的影响,国内外研究者从不同的角度建立了非天然气水合物储层的蠕变本构模型。常用的建模途径主要有两种:一是基于试验结果建立应力-应变-时间经验模型,二是利用基本的虎克弹性体、牛顿黏性体、圣-维南塑性体等力学模型元件,通过基本元件的串并联建立线性蠕变模型^[28]。由于线性模型无法描述沉积物的加速蠕变过程,因此,前人尝试采用各种类型的非线性元件替代线性元件,进而建立了各种类型的黏塑性损伤本构模型。

然而,上述常规岩土蠕变本构模型均未考虑天然气水合物开采过程中可能存在的由相变-渗流-传热-应力综合作用引起的蠕变硬化、蠕变损伤、热损伤、动水冲刷效应,不能直接用于评价天然气水合物储层的损伤发展规律,更不能准确预测不同蠕变阶段的转化时机。因此,前人针对冻土和常规岩层建立的蠕变本构,一定程度上为天然气水合物开采储层的蠕变分析提供了借鉴,但现有模型均不能完全反映天然气水合物开采过程中储层的相变-渗流-传热-应力多场多相多组分强耦合过程,因此,不能照搬现有模型和方法对天然气水合物开采储层的蠕变行为进行预测。

1.3 关键科学挑战

天然气水合物开采过程中,储层受到应力、相变、温压场、井底工作制度变化的影响,而这些影响因素本身与时间存在复杂的对应关系。这是开采条件下天然气水合物储层蠕变行为区别于常规岩土材料的最显著特点。

与常规不含天然气水合物沉积物相比,天然气水合物的存在会对储层蠕变特性产生哪些独特影响?天然气水合物降压开采动态过程又会对储层蠕变行为产生哪些影响?这两个问题是理解天然气水合物开采过程中储层工程地质风险诱发机制的总开关,也是水合物储层蠕变行为研究的关键科学挑战。回答这两个问题,对于准确评价特定天然气水合物储层的蠕变特征、识别天然气水合物开采条件下的潜在工程地质风险并进行有效防控具有重要意义。具体阐述如下:

(1) 天然气水合物的存在及其空间分布特征对含天然气水合物沉积物蠕变特征的影响可视作“静态因素”,是导致含天然气水合物储层蠕变参数演

化特征区别于常规砂土沉积物蠕变特征的最根本因素。那么,含天然气水合物沉积物在特定应力加载条件下的蠕变演化特征究竟会不会像常规砂土沉积物那样遵守严格的衰减蠕变、稳态蠕变和加速蠕变模式呢?如果不是,这其中天然气水合物颗粒又扮演何种角色?具体而言,含天然气水合物沉积物是一个包含天然气水合物、沉积物两种固相和孔隙水、气等流体的多元体系。蠕变变形过程中与天然气水合物本身直接相关的因素如天然气水合物颗粒本身的碎裂、天然气水合物颗粒与沉积物颗粒之间的相对滑动、天然气水合物颗粒本身的压缩、沉积物颗粒在天然气水合物限制下发生不规则翻转错动等,这些因素都可能导致沉积物体系宏观蠕变应变、蠕变变形量及蠕变速率的改变(图1),进而影响含天然气水合物沉积物的蠕变参数演化模式。

(2)蠕变本身是一个动态过程,降压开采条件下的储层相变及伴随而来的储层多相渗流、相变潜热、应力状态改变等均为相互依存且与时间相关的必然性动态过程。因此,降压开采对含天然气水合物沉积物体系蠕变特征的影响可以视为“动态因素”。理论上而言,降压路径本身对蠕变的影响可以基于有效应力原理等效转化为储层有效应力改变的影响,而应力路径本身改变对储层蠕变行为预测造成的挑战较为有限,因此,降压路径本身带来的挑战完全可以克服。最大的挑战是降压开采过程中相变-传热-渗流与应力的多场双向耦合过程(图2)。揭示天然气水合物开采过程中多场耦合效应对蠕变行为的控制机理,是回答天然气水合物开采过程中储层潜在工程地质风险发生、发展规律的关键。

2 蠕变行为刻画方法展望

目前,国内外获取天然气水合物储层力学参数的主要技术手段有三轴剪切^[29-30]、直剪^[31]、静力触探^[32]等。这些技术手段主要以快速载荷作用下沉积物发生破坏作为评价含天然气水合物沉积物体系力学性能的依据,对长期开采条件下储层缓慢变形的时效性行为的分析与预测涉及较少^[33-34]。由于天然气水合物对沉积物骨架颗粒的胶结、填充作用,含天然气水合物沉积物在蠕变破坏过程中的微元损伤过程可视为由线弹性应力状态向非线性应力状态的转化^[35-36],具体的损伤演化形式可能包括水合物晶体结构破坏、沉积物孔隙结构变形、含水合物沉积物压实带或微裂隙等,不同的损伤演化形态所适应的模拟与探测手段不同。

总之,宏观尺度的变形破坏源自细观甚至微观尺度的损伤积累,跨尺度模拟与探测是研究天然气水合物开采储层蠕变的最佳路径,而试样内部的微元损伤实时状态及其发展演变速率则是含天然气水合物沉积物蠕变形为跨尺度表征的纽带。

从分子尺度,分子动力学模拟为水合物体系中微观结构的变化预测与行为研究提供了重要手段^[37-38]。分子动力学模拟可通过研究沉积物中水合物自身微观结构(如水合物晶体颗粒的大小、颗粒之间的结构、颗粒之间是否存在气泡等,图3)和沉积物与水合物之间的微观接触行为(如氢键的相互作用、矿物表面的吸附、甲烷气泡等)来获得蠕变行为的物理化学机制。初步研究表明,天然气水合物颗粒的蠕变主要表现为晶体溶解与晶体界面滑

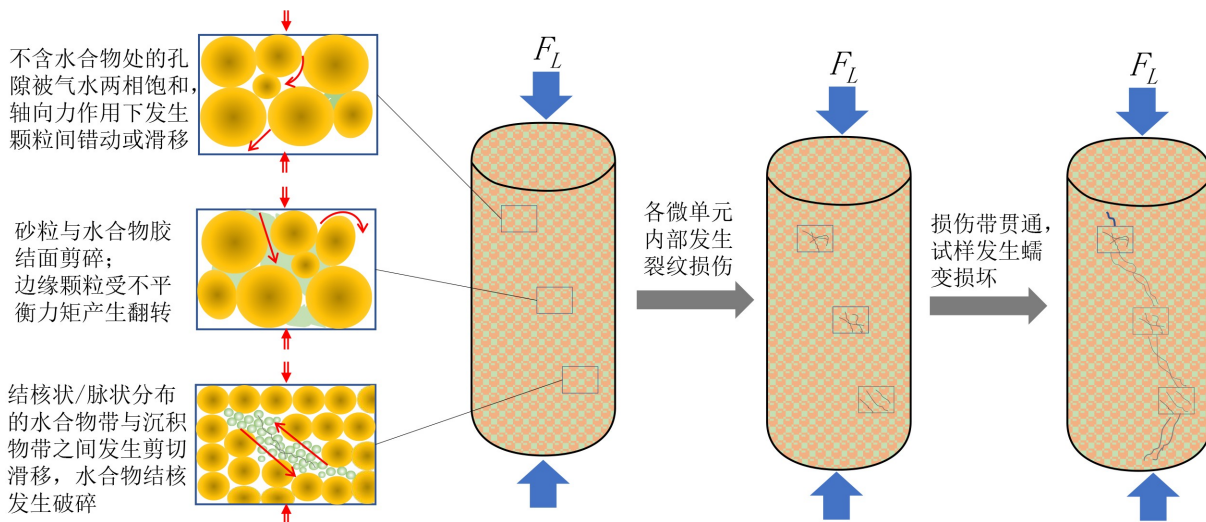


图1 天然气水合物空间分布对沉积物蠕变行为的潜在影响机理示意图

Fig.1 Schematic diagram illustrating influences of gas hydrate distribution on creeping behaviors of its host sediment

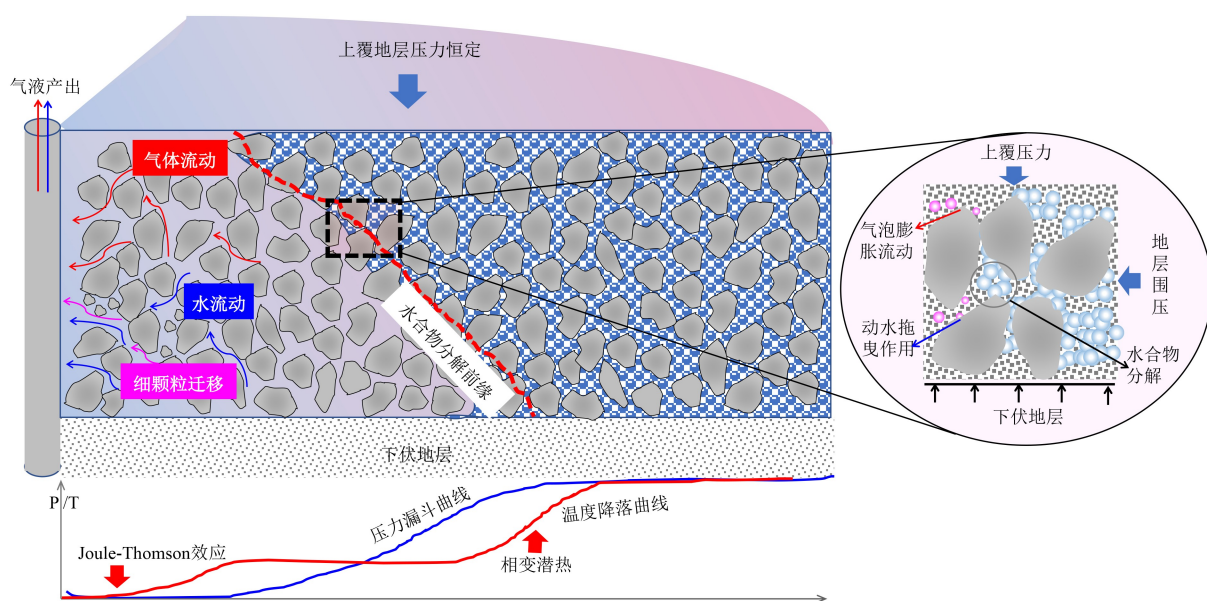
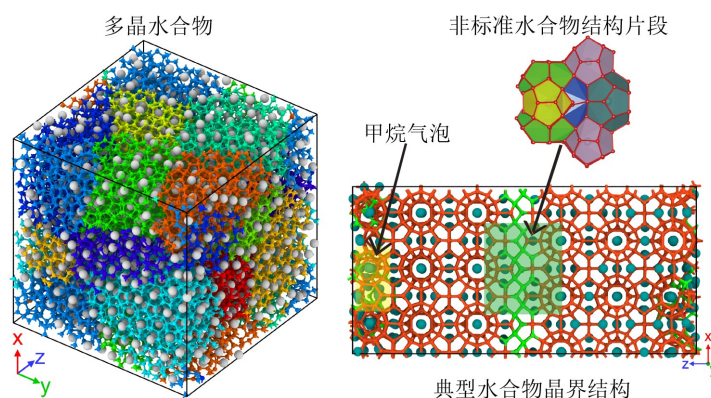


图 2 天然气水合物降压开采多场动态耦合过程对蠕变行为的潜在影响机理示意图

Fig.2 Interactions between creeping behaviors of hydrate-bearing strata and multi-physical fields evolving behaviors during gas extraction

图 3 典型水合物晶界微观结构示意图^[38]Fig.3 Schematic of typical grain boundary of methane hydrate^[38]

移, 主要的影响因素包括晶体颗粒大小、外界温度与加载应力路径等^[39-41]。

从纳微米尺度, X-CT、LF-NMR 等微观探测技术可以为天然气水合物沉积物蠕变过程中的损伤动态探测提供有效支撑。目前国内外已基于低场核磁共振(LF-NMR)开展了水合物动态聚散过程中黏土质粉砂沉积物孔隙结构变化特征的探测, 获得了不同水合物饱和度条件下样品横向弛豫时间谱、孔隙尺寸信息的对应关系、横向弛豫率与水合物饱和度的关系^[42]。初步结果表明, 小孔隙里的水合物优先分解, 孔隙尺寸变大, 核磁信号量逐渐增加; 在一定水合物饱和度范围内(比如小于 45% 的情况), 随着水合物饱和度的降低, 横向弛豫率小幅减小^[42-43]。实际上, 除了指示水合物的优先合成/分解位置, LF-NMR 横向弛豫谱(T_2)也可以得到沉积物样品中的孔隙、裂隙、破碎带分布^[18]。为此, 笔者团队提出了

基于 LF-NMR 探测水合物沉积物中微元损伤演化的装置(图 4)与方法^[44], 其基本的测量原理是: 将低场核磁共振探测和三轴应力加载相结合, 在低场核磁共振平台上同时获取水合物储层的宏观力学数据和加载过程中的微观孔隙结构演化特征, 为跨尺度研究天然气水合物储层的力学性能及其变形机理提供技术保障。

另外, 将计算机断层扫描技术(X-CT)与三轴剪切技术结合, 能够同时获得应力-应变参数和加载过程中的微观破碎带结构演化特征^[45]。笔者运用 X-CT 三轴测试技术, 清晰地揭示了天然气水合物沉积物样品在三轴压缩过程中的微观结构演化规律, 随着水合物饱和度的增大, 剪切带的宽度逐渐减小, 倾角逐渐增大^[30], 这是由于随着饱和度的增大, 水合物对骨架的支撑作用增强, 沉积物极限强度增大, 提高了样品的抗剪切能力, 剪切带宽度减小。

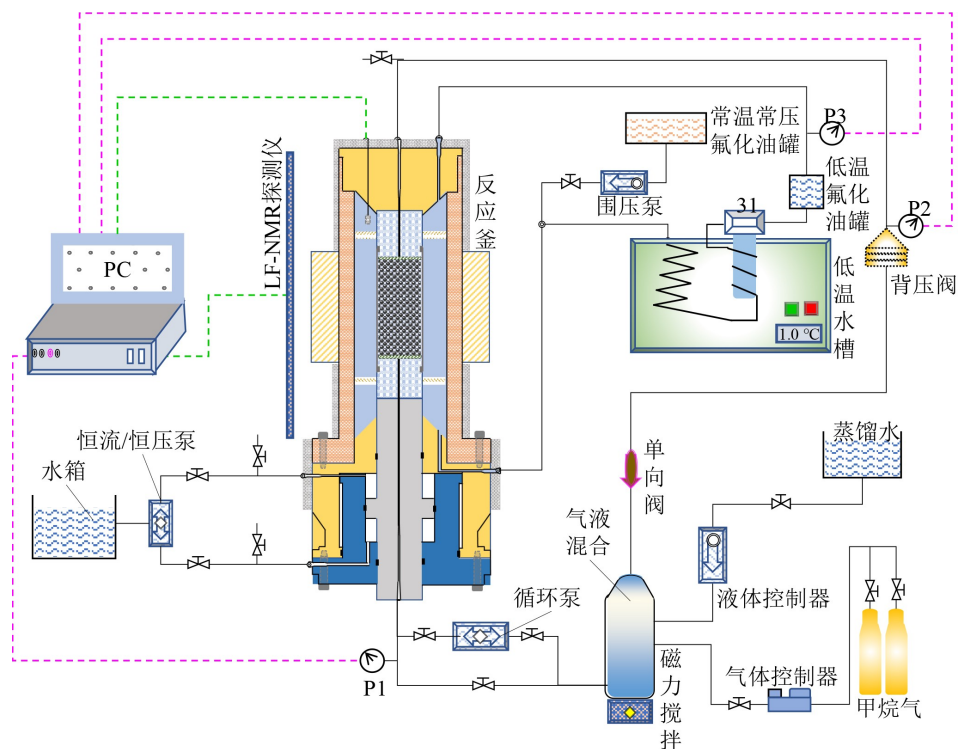


图 4 基于 LF-NMR 探测水合物沉积物中微元损伤演化的装置流程图

Fig.4 Device flowchart for micro-damage detection of hydrate-bearing sediment based on LF-NMR

从介观尺度(cm),开展水合物开采过程中沉积物变形行为的模拟实验,可以分析水合物饱和度、有效围压、偏应力水平对水合物开采过程中的沉积物变形量的影响(图5)。初步结果表明,水合物分解过程中试样的蠕变大致分为3个阶段:第1阶段为变形初始阶段,沉积物试样在围压的作用下等向固结,随着时间的推移,固结变形趋于稳定;第2阶段为加剧变形阶段,回压开始降低,试样中气压降低,随着水合物的分解,土体骨架刚度变弱,在偏应力作用下,产生体变;第3阶段为变形的稳定阶段,

土体发生急剧变形,随着气压的进一步降低,水合物分解完成。

除了从应变-时间关系直观了解沉积物的蠕变特征,还可以引入一些损伤探测手段与剪切破坏实验相结合,实现从介观尺度表征沉积物内部损伤的目的。声波探测在含天然气水合物沉积物模拟实验中已有非常成熟的应用^[24]。蠕变变形过程中,沉积物内部会发生微观结构的变化,即微裂隙的产生及发育,会使得沉积物的声波特征发生改变,因而沉积物内部结构的变化情况可能通过某一个或者

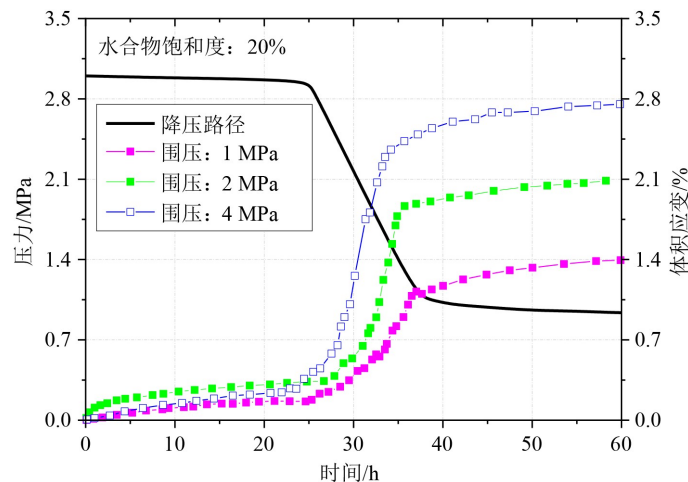


图 5 典型沉积物体积应变变量随水合物分解的变化规律

Fig.5 An example of volumetric strain behaviors during hydrate dissociation

多个宏观声波特征参数反映出来。因此, 通过探测不同蠕变状态下声波衰减及波形变化规律, 进一步建立声波特征与沉积物损伤动参数间的关系, 能够为沉积物岩心尺度的蠕变动态演化分析提供支撑。

从中试尺度(m), 分布式光纤感测技术作为一种广泛应用于野外监测和物模试验的在线监测技术^[46], 能够直接测量模型中的温度场、应变场, 间接获取应力场、渗流场、水饱和度场^[47], 在岩土沉降、边坡灾害分析等方面已有非常广泛的应用。理论上而言, 该技术引入天然气水合物蠕变分析模型试验, 达到天然气水合物饱和度场、储层应力场、温度场、渗流场、变形量场一体化的监测目的, 从而为揭示天然气水合物开采储层多相多场强耦合条件下储层的蠕变机制提供依据。但目前仍需要从基础理论、硬件选型、数据解调等多方面开展大量的基础研究工作。

对于现场尺度(km), 数值模拟技术可以利用大尺度模型模拟天然气水合物开采过程中的传热(T)、渗流(H)、相变(C)和应力响应(M)及其耦合特征, 为矿场尺度下天然气水合物长期开采储层蠕变特征和工程地质风险评价提供重要手段。目前, 国内外研发了众多的天然气水合物开采 THMC 数值模拟器, 并对开采过程中的 THMC 耦合行为进行了研究^[48-49]。然而, 现有的数值模拟器还缺少水合物开采蠕变过程的模拟能力, 本质原因在于天然气水合物储层蠕变的本构模型的不完善, 且水合物开采传热、渗流、相变等过程与蠕变行为之间的耦合关系也仍未明确, 导致无法建立有效的数学模型描述长期开采条件下的水合物储层蠕变行为。因此, 需要开展系统的实验研究, 建立水合物储层的蠕变本构模型和水合物对蠕变参数的影响模型, 从而建立有效的数学模型, 发展相应的数值模拟器, 对水合物长期开采条件下的蠕变行为进行预测。

综上所述, 在天然气水合物测试中已发挥重要作用的纳微米探测(如 X-CT、LF-NMR)技术和岩心尺度的实验模拟技术为天然气水合物储层蠕变时效性参数评价提供了重要的支撑, 光纤感测技术也有望在中试尺度为揭示天然气水合物多场耦合条件下的储层蠕变机理提供一定的支撑, 分子模拟和数值模拟技术则能分别从更微观(分子尺度)和更宏观(矿场尺度)的尺度弥补物理探测与分析技术的不足, 为天然气水合物储层蠕变行为研究提供重要的研究手段, 但目前基于上述先进技术进行天然气水合物储层蠕变特征评价处于起步阶段, 亟需形成分子-纳微米-厘米-米-千米级跨尺度的天然气水

合物储层蠕变评价技术体系。

3 结论与展望

(1) 本文首次提出储层蠕变现象在水合物开采过程中不仅是客观存在的, 而且对工程地质灾害的发生发展都有非常重要的作用, 摸清海洋天然气水合物储层力学性质及其随水合物开采过程的动态变化规律, 是准确认识天然气水合物开采过程中工程地质风险发生、发展及其潜在危害的前提。海洋天然气水合物储层的蠕变行为因储层地质背景、开采模式而异, 厘清这些因素是评价特定储层蠕变特征、识别水合物开采的潜在工程地质风险的前提。特别是对于南海北部神狐海域泥质粉砂型储层而言, 其蠕变过程与砂质储层存在本质区别, 是导致两者试采过程中工程地质风险演化差异的根本原因。

(2) 天然气水合物的存在及其空间分布特征对含天然气水合物沉积物蠕变特征的影响可视为“静态因素”, 是导致含天然气水合物储层蠕变参数演化特征区别于常规砂土沉积物蠕变特征的最根本因素。蠕变本身是一个动态过程, 降压开采条件下的相变(天然气水合物分解)及伴随而来的储层多相渗流、相变潜热、应力状态改变等均为相互依存且与时间相关的必然性动态过程。因此, 降压开采对含天然气水合物沉积物体系蠕变特征的影响可以视为“动态因素”。

(3) 针对上述问题, 我们需要从天然气水合物储层的力学性能弱化特征及蠕变各阶段的时效参数两方面入手, 以我国南海北部天然气水合物储层样品为重点研究对象, 将 LF-NMR、X-CT、超声探测、光纤多场监测技术与三轴蠕变控制技术有机结合, 并利用分子模拟和数值模拟手段向更微观和更宏观两个尺度拓展, 建立天然气水合物储层蠕变行为的跨尺度研究方法体系, 探索实际天然气水合物开采储层蠕变行为的主控因素; 最终建立适合南海北部储层的、考虑天然气水合物开采过程中相变-渗流-潜热-应力综合作用的蠕变本构, 从而为天然气水合物开采条件下储层流变学理论框架的建立奠定基础, 并为天然气水合物开采工程安全设计提供理论支撑。

参考文献 (References)

- [1] 吴能友, 黄丽, 胡高伟, 等. 海域天然气水合物开采的地质控制因素和科学挑战[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(5): 1-11. [WU

- Nengyou, HUANG Li, HU Gaowei, et al. Geological controlling factors and scientific challenges for offshore gas hydrate exploitation [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(5): 1-11.]
- [2] Collett T. Gas hydrate production testing – knowledge gained[C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 2019: 1-16.
- [3] Yamamoto K, Terao Y, Fujii T, et al. Operational overview of the first offshore production test of methane hydrates in the Eastern Nankai Trough[C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA: Offshore Technology Conference, 2014.
- [4] Yamamoto K, Wang X X, Tamaki M, et al. The second offshore production of methane hydrate in the Nankai Trough and gas production behavior from a heterogeneous methane hydrate reservoir [J]. *RSC Advances*, 2019, 9(45): 25987-26013.
- [5] 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.
- [6] Mao P X, Sun J X, Ning F L, et al. Effect of permeability anisotropy on depressurization-induced gas production from hydrate reservoirs in the South China Sea [J]. *Energy Science & Engineering*, 2020, 8(8): 2690-2707.
- [7] Wu N Y, Li Y L, Chen Q, et al. Sand production management during marine natural gas hydrate exploitation: review and an innovative solution [J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(6): 4617-4632.
- [8] 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.
- [9] Jin Y R, Li Y L, Wu N Y, et al. Characterization of sand production for clayey-silt sediments conditioned to openhole gravel-packing: experimental observations [J]. *SPE Journal*, 2021: 1-18.
- [10] Mu Y H, Ma W, Li G Y, et al. Long-term thermal and settlement characteristics of air convection embankments with and without adjacent surface water ponding in permafrost regions [J]. *Engineering Geology*, 2020, 266: 105464.
- [11] Wang R H, Liu W G, Li Y H, et al. Effects of porosity on the creep behavior of hydrate-bearing sediments[C]//ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Rio de Janeiro, Brazil: ASME, 2012.
- [12] Liu L L, Zhang Z, Li C F, et al. Hydrate growth in quartzitic sands and implication of pore fractal characteristics to hydraulic, mechanical, and electrical properties of hydrate-bearing sediments [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 75: 103109.
- [13] Li Y H, Liu W G, Song Y C, et al. Creep behaviors of methane hydrate coexisting with ice [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 33: 347-354.
- [14] Yang J, Hassanpouryouzband A, Tohidi B, et al. Gas hydrates in permafrost: distinctive effect of gas hydrates and ice on the geomechanical properties of simulated hydrate-bearing permafrost sediments [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2019, 124(3): 2551-2563.
- [15] Pearson C F, Halleck P M, McGuire P L, et al. Natural gas hydrate deposits: a review of in situ properties [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1983, 87(21): 4180-4185.
- [16] 张峰瑞, 姜诣男, 杨秀荣, 等. 冻融循环下花岗岩剪切蠕变试验与模型研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(2): 509-519. [ZHANG Fengrui, JIANG Annan, YANG Xiurong, et al. Experimental and model research on shear creep of granite under freeze-thaw cycles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(2): 509-519.]
- [17] 陈国庆, 万亿, 裴本灿, 等. 冻融循环作用下砂岩蠕变特性及损伤模型研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(1): 19-28. [CHEN Guoqing, WAN Yi, PEI Bencan, et al. The creep characteristics and damage model of sandstone under freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(1): 19-28.]
- [18] Fan Z, Sun C M, Kuang Y M, et al. MRI analysis for methane hydrate dissociation by depressurization and the concomitant ice generation [J]. *Energy Procedia*, 2017, 105: 4763-4768.
- [19] 陈卫忠, 李翻翻, 雷江, 等. 热-水-力耦合条件下黏土岩蠕变特性研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(2): 379-388. [CHEN Weizhong, LI Fanfan, LEI Jiang, et al. Study on creep characteristics of claystone under thermo-hydro-mechanical coupling [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(2): 379-388.]
- [20] Sun Y H, Ma X L, Guo W, et al. Numerical simulation of the short- and long-term production behavior of the first offshore gas hydrate production test in the South China Sea [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 181: 106196.
- [21] Yang M J, Zhao J, Zheng J N, et al. Hydrate reformation characteristics in natural gas hydrate dissociation process: A review [J]. *Applied Energy*, 2019, 256: 113878.
- [22] Li Y L, Wu N Y, He C Q, et al. Nucleation probability and memory effect of methane-propane mixed gas hydrate [J]. *Fuel*, 2021, 291: 120103.
- [23] Zhu Y M, Chen C, Luo T T, et al. Creep behaviours of methane hydrate-bearing sediments [J]. *Environmental Geotechnics*, 2019: 1-11.
- [24] Bu Q T, Hu G W, Liu C L, et al. Acoustic characteristics and micro-distribution prediction during hydrate dissociation in sediments from the South China Sea [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 65: 135-144.
- [25] 于超云, 唐世斌, 唐春安. 含水率对红砂岩瞬时和蠕变力学性质影响的试验研究[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(2): 473-481. [YU Chaoyun, TANG Shibin, TANG Chun'an. Experimental investigation on the effect of water content on the short-term and creep mechanical behaviors of red sandstone [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(2): 473-481.]
- [26] 李彦龙, 刘昌岭, 廖华林, 等. 泥质粉砂沉积物—天然气水合物混合体系的力学特性[J]. *天然气工业*, 2020, 40(8): 159-168. [LI Yanlong, LIU Changling, LIAO Hualin, et al. Mechanical properties of the mixed system of clayey-silt sediments and natural gas hydrates [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(8): 159-168.]
- [27] 郝永卯, 黎晓舟, 李淑霞, 等. 天然气水合物降压开采半解析两相产能模型[J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2020, 50(6): 064701. [HAO Yongmao, LI Xiaozhou, LI Shuxia, et al. The semi-analytical two-phase productivity model of natural gas hydrate by

- depressurization [J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2020, 50(6): 064701.]
- [28] 罗飞, 张元泽, 朱占元, 等. 一种青藏高原冻结砂土蠕变本构模型[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(2): 26-32. [LUO Fei, ZHANG Yuanze, ZHU Zhanyuan, et al. Creep constitutive model for frozen sand of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(2): 26-32.]
- [29] 李彦龙, 刘昌岭, 刘乐乐, 等. 含甲烷水合物松散沉积物的力学特性[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(3): 105-113. [LI Yanlong, LIU Changling, LIU Lele, et al. Mechanical properties of methane hydrate-bearing unconsolidated sediments [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2017, 41(3): 105-113.]
- [30] Li Y L, Dong L, Wu N Y, et al. Influences of hydrate layered distribution patterns on triaxial shearing characteristics of hydrate-bearing sediments [J]. *Engineering Geology*, 2021, 294: 106375.
- [31] Liu Z C, Dai S, Ning F L, et al. Strength estimation for hydrate-bearing sediments from direct shear tests of hydrate-bearing sand and silt [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(2): 715-723.
- [32] Li Y L, Hu G W, Wu N Y, et al. Undrained shear strength evaluation for hydrate-bearing sediment overlying strata in the Shenhu area, northern South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(3): 114-123.
- [33] 孔亮, 刘文卓, 袁庆盟, 等. 常剪应力路径下含气砂土的三轴试验[J]. *岩土力学*, 2019, 40(9): 3319-3326. [KONG Liang, LIU Wenzhuo, YUAN Qingmeng, et al. Triaxial tests on gassy sandy soil under constant shear stress paths [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(9): 3319-3326.]
- [34] 韦昌富, 颜荣涛, 田慧会, 等. 天然气水合物开采的土力学问题: 现状与挑战[J]. *天然气工业*, 2020, 40(8): 116-132. [WEI Changfu, YAN Rongtao, TIAN Huihui, et al. Geotechnical problems in exploitation of natural gas hydrate: Status and challenges [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(8): 116-132.]
- [35] 李彦龙, 刘昌岭, 刘乐乐. 含水合物沉积物损伤统计本构模型及其参数确定方法[J]. *石油学报*, 2016, 37(10): 1273-1279. [LI Yanlong, LIU Changling, LIU Lele. Damage statistic constitutive model of hydrate-bearing sediments and the determination method of parameters [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(10): 1273-1279.]
- [36] 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 Rongtao, ZHANG Binghui, YANG Dehuan, 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.]
- [37] Chen J, Liu C J, Zhang Z C, et al. Molecular study on the behavior of methane hydrate decomposition induced by ions electrophoresis [J]. *Fuel*, 2022, 307: 121866.
- [38] Zhang Z C, Kusalik P G, Guo G J, et al. Insight on the stability of polycrystalline natural gas hydrates by molecular dynamics simulations [J]. *Fuel*, 2021, 289: 119946.
- [39] Cao P Q, Wu J Y, Zhang Z S, et al. Mechanical properties of methane hydrate: intrinsic differences from ice [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2018, 122(51): 29081-29093.
- [40] Cladek B R, Everett S M, McDonnell M T, et al. Guest-host interactions in mixed CH₄-CO₂ hydrates: insights from molecular dynamics simulations [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2018, 122(34): 19575-19583.
- [41] Song W L, Sun X L, Zhou G G, et al. Molecular dynamics simulation study of N₂/CO₂ displacement process of methane hydrate [J]. *ChemistrySelect*, 2020, 5(44): 1393613950.
- [42] Zhang Y C, Liu L L, Wang D G, et al. Application of Low-Field Nuclear Magnetic Resonance (LFNMR) in characterizing the dissociation of gas hydrate in a porous media [J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(3): 2174-2182.
- [43] 张永超, 刘昌岭, 刘乐乐, 等. 水合物生成导致沉积物孔隙结构和渗透率变化的低场核磁共振观测[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(3): 193-202. [ZHANG Yongchao, LIU Changling, LIU Lele, et al. Sediment pore-structure and permeability variation induced by hydrate formation: Evidence from low field nuclear magnetic resonance observation [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(3): 193-202.]
- [44] 吴能友, 李彦龙, 刘昌岭, 等. 一种基于低场核磁分析水合物沉积物力学特性的装置及方法: 中国, 202010147539.5[P]. 2021-02-26 [WU Nengyou, LI Yanlong, LIU Changling, et al. Dwtection device and method for mechanical properties of hydrate-bearing sediment based on low-field nuclear magnetic resonance: CN, 202010147539.5[P]. 2021-02-26.]]
- [45] Seol Y, Lei L, Choi J H, et al. Integration of triaxial testing and pore-scale visualization of methane hydrate bearing sediments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(12): 124504.
- [46] 张诚成, 施斌, 朱鸿鹄, 等. 分布式光纤探测地裂缝的理论基础探讨[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(6): 1473-1482. [ZHANG Chengcheng, SHI Bin, ZHU Honghu, et al. A theoretical framework for detecting and monitoring ground fissures using distributed fiber optic sensing [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(6): 1473-1482.]
- [47] Zhang C C, Zhu H H, Liu S P, et al. A kinematic method for calculating shear displacements of landslides using distributed fiber optic strain measurements [J]. *Engineering Geology*, 2018, 234: 83-96.
- [48] 万义钊, 吴能友, 胡高伟, 等. 南海神狐海域天然气水合物降压开采过程中储层的稳定性[J]. *天然气工业*, 2018, 38(4): 117-128. [WAN Yizhao, WU Nengyou, HU Gaowei, et al. Reservoir stability in the process of natural gas hydrate production by depressurization in the Shenhu area of the South China Sea [J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(4): 117-128.]
- [49] 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.