

## 基于光纤感测技术的水合物储层动态温度、应力监测探头研发

陈明涛,李彦龙,赵 强,张亚娟,范好好,王振豪,吴能友

Research and development of a dynamic temperature and stress monitoring probe for hydrate reservoirs based on fiber optic sensing technology

CHEN Mingtao, LI Yanlong, ZHAO Qiang, ZHANG Yajuan, FAN Haohao, WANG Zhenhao, and WU Nengyou

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023112001

## 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蠕变行为的主控因素与研究展望

Controlling factors and research prospect on creeping behaviors of marine natural gas hydrate-bearing-strata 海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 3-11

#### 水合物藏的类型、特点及开发方法探讨

Gas hydrate reservoir types, characteristics and development methods 海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(1): 194-213

# 北极波弗特—马更些三角洲盆地天然气水合物成藏模式

Accumulation model of natural gas hydrate in the Beaufort-Mackenzie Delta Basin, the Arctic 海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 146-158

## 南海神狐海域非均质性天然气水合物储层的分频反演

Frequency-divided inversion method of heterogenous natural gas hydrates reservoir in the Shenhu area, South China Sea 海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 106-120

## 天然气水合物微观测试技术与应用进展

Advances in microscopic testing techniques and applications for natural gas hydrates 海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(3): 136-148

## 储层和开采参数对天然气水合物开采产能的影响分析

The influence of reservoir and exploitation parameters on production capacity of gas hydrate 海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(6): 202-216



关注微信公众号,获得更多资讯信息

陈明涛,李彦龙,赵强,等.基于光纤感测技术的水合物储层动态温度、应力监测探头研发 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(3): 166-180. CHEN Mingtao, LI Yanlong, ZHAO Qiang, et al. Research and development of a dynamic temperature and stress monitoring probe for hydrate reservoirs based on fiber optic sensing technology[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(3): 166-180.

# 基于光纤感测技术的水合物储层动态温度、应力 监测探头研发

陈明涛1,3,李彦龙2,3,赵强4,张亚娟1,3,范好好4,王振豪5,吴能友1,2,3

- 1. 河海大学海洋学院, 南京 210098
- 2. 崂山实验室, 青岛 266237

3. 自然资源部天然气水合物重点实验室, 青岛 266237

4. 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 青岛 266100

5. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061

摘要:水合物生成与分解以及加载变形下含水合物沉积物内部的温度、应力变化规律对破解水合物储层失稳破坏的演化机制 至关重要。为了监测含水合物沉积物内部温度、应力在水合物生成、分解、变形等全过程中的演化机制,本文提出一种基于光 纤传感技术的含水合物沉积物温度、应力监测方案,并研制了集温度、应力监测于一体的光纤探头,实现了从沉积物装样到水 合物合成到加载变形,再到水合物分解过程中试样温度和应力的监测。与常规热电阻温度传感器和加载压力传感器监测数据 初步对比表明,二者具有一致的变化趋势。但在数值上存在一定差异,分析认为是储层的非均质性、应力加载端与光纤感测 端的距离变化共同导致。整体而言,光纤感测探头可以较好地捕捉因水合物合成产生的挤压应力升高与水合物分解过程中含 水合物沉积物水平应力的降低。

关键词:天然气水合物;光纤感测;地质力学;储层稳定性;分级加载 中图分类号:P754.1;P736 文献标识码:A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023112001

# Research and development of a dynamic temperature and stress monitoring probe for hydrate reservoirs based on fiber optic sensing technology

CHEN Mingtao<sup>1,3</sup>, LI Yanlong<sup>2,3</sup>, ZHAO Qiang<sup>4</sup>, ZHANG Yajuan<sup>1,3</sup>, FAN Haohao<sup>4</sup>, WANG Zhenhao<sup>5</sup>, WU Nengyou<sup>1,2,3</sup>

1. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China

3. Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266237, China

4. Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Science, Qingdao 266100, China

5. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

Abstract: Studying the changes in temperature and stress of hydrate-bearing sediment (HBS) during hydrate growth, decomposition, and deformation is crucial for understanding the destabilization mechanism of hydrate reservoir. To monitor the changes of internal temperature and stress in HBS during these processes, we proposed a temperature and stress monitoring scheme for HBS based on fiber-optic sensing technology, for which an optical fiber monitoring probe was designed. The feasibility and precision of the probe in the temperature and stress of HBS were compared with those of conventional sensors. Additionally, the changes of horizontal stress of HBS during hydrate formation and dissociation were effectively monitored by the optical fiber sensor. Experimental results show that the stress and temperature obtained by fiber-optic probe exhibit similar trends to those obtained with conventional sensors. However, some differences were observed due mainly to the heterogeneity of the HBS and the distance between the loading point and the sensing point. Overall, the fiber optic probe could better capture the increase in compressive stress caused by hydrate formation and the decrease in horizontal stress of hydrate-bearing sediments during hydrate decomposition.

Key words: natural gas hydrate; optical fiber sensing; geomechanics; reservoir stability; multistep loading

**资助项目:**国家自然科学基金"南海天然气水合物降压开采储层人工裂缝失效机理与增渗修复方法"(U2444215);江苏省研究生科研创新项目"水力割缝对南海神狐海域含水合物沉积物变形的影响"(KYCX22\_0584)

作者简介:陈明涛(1994—),男,博士研究生,主要从事天然气水合物开采理论与技术研究,E-mail: ChenMt2022@hhu.edu.en

通讯作者:李彦龙(1989—),男,博士,研究员,主要从事天然气水合物开采理论与技术研究, E-mail: ylli@qnlm.ac

收稿日期: 2023-11-20; 改回日期: 2024-07-04. 张现荣编辑

海洋天然气水合物具有巨大的资源潜力,但受 其储层埋藏浅、弱固结、非成岩等固有属性的影 响,开发面临潜在的地层失稳风险。理论上,单纯 的温度升高或压力降低均会打破水合物相平衡,从 而导致分解,水合物分解又会使储层内部压力和温 度发生变化。水合物分解导致的储层强度弱化<sup>11</sup>, 使诸如井筒失稳、储层出砂、海底沉降、海底滑坡 等地质灾害发生的风险陡增。上述地质灾害的发 生往往体现在储层应力、变形、温度等物理参量的 突变。其中,水合物分解产生的甲烷气体不断聚集 则会导致储层气、水压力的上升,从而产生超压,并 进而导致储层有效应力的减小,可能加剧储层出砂 风险[2]。而出砂导致的沉积物颗粒亏空会导致开采 井附近储层沉降,直接威胁井筒安全。只有弄清楚 在不同变形阶段内,储层内部上述物理参量的演化 机理,才能根本认识储层发生失稳破坏的内生机 制。原位监测手段可有效获取上述物理参量。海 底原位储层的物理特性(应力、应变、温度、孔隙水 压力等)监测与测试是破解储层变形演化机制的重 要手段,也是预测储层是否发生失稳的重要基础数 据来源门。利用原位监测手段对储层应力动态变化 过程中的物理参量进行监测和研究可极大改善我 们对含水合物储层在水合物开发中灾变机制的认 识,更好服务于海洋天然气水合物的安全、高效开发。

近年来,与海底原位储层的物理特性监测相关 的技术手段取得了较大进展,在海底沉积物地质构 造监测手段方面,涌现了多波束测深仪、侧扫声 纳、海底地震仪等监测手段。这类仪器获取的海底 地层、地貌、沉降等数据为探究整个海底地层的构 造运动、地球化学环境变化、海底水动力条件等提 供了重要支撑<sup>[4]</sup>。但其常存在观测时间短、观测周 期长且空间分辨率低等缺点<sup>51</sup>,较难实现海底沉积 物内部原位物理特性的长期观测,并且不能有效监 测地层内部应力、变形、温度、盐度等物理参数随 时间的演化规律。

为了监测储层底部的温度、压力变化,部分学 者采用海底取样现场温度计直测试样温度。虽然 部分研究将多芯电缆连接的铂热电阻温度传感器 用于冻土区水合物稳定带温度的监测<sup>[7]</sup>,利用热传 导原理获取了储层的温度信息,显示了较好的监测 效果。但这类测试常需要较长的导线供电,传输距 离较短,严重限制了在海洋水合物储层温度、应力 监测领域的应用。即使是将热电阻传感器与目前 的贯入式探杆监测技术(如静力触探,电阻率探杆, 声波探杆等)181相结合,理论上可获取储层的力学

与温度数据,但也存在需长期电能保障、数据传输 距离较短、回收定位困难等问题,且这类仪器长期 驻留海底,对耐腐蚀性和可靠性都有较高要求。因 此,采用抗腐蚀、高灵敏、低成本、高安全的监测技 术监测海底水合物储层的温度和力学特性就显得 尤为重要。

在易燃、易爆气体环境中监测待测目标的应 力、温度等参数时,光纤监测技术具有本征安全、 灵敏度高、价格低廉、耐腐蚀、传输距离远等优势。 在陆地高边坡失稳、滑坡、地面沉降等地质灾害的 应力、应变监测及孔隙水压力监测等方面,光纤监 测技术发挥了重要作用[10-11]。在油气开采过程中, 光纤测井[12]、海底储层内部温度、压力的变化过程 等一直是储层失稳关注的重点方向。通过随钻下 入井底的分布式光纤,可有效监测不同深度处的温 度和压力[13]。但需要强调的是,这类分布式光纤监 测的压力和温度数据往往只反映井筒内部流体的 物理属性[14-15],间接反映储层的基本特性。且大部 分只集中在对储层温度的监测,即使有相应的压力 监测,也只反映储层内的流体压力,并不能直接转 化得到储层的地质应力。对井壁沉积物储层,以及 离井筒较远区域沉积物储层的内部应力和温度数 据仍较难获取。

深海环境下监测油藏温度、压力的准分布式光 纤传感系统已经受到重点关注<sup>116</sup>,如 2013年的日 本南海海槽(Nankai trough)水合物试采工程中,利 用分布式光纤温度传感器和阵列式电阻温度传感 器结合的方法,对生产过程中的储层温度进行了监 测[17]。另外,利用光纤监测水合物物理属性的尝试 也在不断发展[18],主要集中于利用光纤和拉曼散射 等技术研究纯水合物生成与分解过程中光信号的 变化[13,19]。也有部分学者研发了监测水合物分解过 程中甲烷浓度变化的光纤监测仪<sup>[20]</sup>,利用单根光缆 作为分布式声学传感器定位储层中的高产气层位[21]。 综上,在海洋天然气水合物储层温度、应力监测中, 光纤感测技术的应用整体还较少[16],且大多集中于 对纯水合物生长与分解过程的监测[22],即使有部分 研究利用光纤传感器获取了井筒内部的温度、压力 监测数据,其也只反映特定深度处流体的温度和压 力情况<sup>[23]</sup>,并不能直接获取储层原位应力数据。由 于其所处的监测环境不同,导致其监测值与含水、 气、沉积物等组分实际储层的值存在差异。

亟需一套储层原位温度和应力参数直接监测 的技术手段,直接感知水合物动态变化过程中储层 的温度、应力状态。水合物分解和气体运移过程中

所产生的储层应力变化可通过光波的变化来有效 捕捉,在监测变形条件下水合物储层内部的温度、 压力变化方面,光纤感测技术具有不可替代的作 用。监测含水合物沉积物在水合物生成、加载变 形、卸载、分解等过程中的温度、应力变化规律,对 避免水合物分解导致的储层强度弱化以至失稳均 具有至关重要的作用。水合物开发中涉及的相变、 气体压力传导等物理变化过程发展迅速,需要精度 高、响应迅速的监测手段对其进行实时监测,并将 监测结果快速解译,使其成为调整开采方案的数据 支撑,不断优化开采方案,保证储层在开采过程中 的稳定性[24-25]。实现光纤技术原位储层直接接触式 监测的主要挑战在于海底特定深度储层内探头如 何置放,以及置放之后如何保证光纤不损坏,然后 通过什么样的介质实现光纤光栅不接触储层的情 况下感知储层的变化。

为此,本文报道了一种用于直接监测含水合物 细砂沉积物从装样到水合物合成与应力加载、卸 载,再到水合物分解过程中的温度与应力的光纤探 头。其通过将感温和感压光纤光栅串联在一根光 纤上,实现储层温度和应力的实时同步监测。通过 对 25% 饱和度水合物细砂沉积物与含水细砂沉积 物的温度和应力监测验证探头的有效性。其中,储 层的应力监测主要关注整个试样合成过程中水合 物颗粒挤压、外部荷载施加后储层内部应力传递及 分解过程中储层内部应力调整等动态变化过程。 温度监测则主要关注整个合成、加载、分解过程中 沉积物的温度场变化,探讨水合物从生长到分解的 温度变化机制。

# 1 测试原理与探头结构设计

储层内部温度、应力变化在一定程度上可反映 储层的变形失稳发展趋势,对水合物生长和分解也 起着至关重要的作用。水合物的稳定存在受控于 其相态的稳定,相态的稳定与否取决于环境温度与 压力是否发生变化。

#### 1.1 光纤感测原理

光纤光栅对储层的应力、温度变化具有强敏感性<sup>[26]</sup>。本研究通过将监测含水合物沉积物温度和应力的两个光纤光栅串联组成FBG(Fiber Bragg Grating: FBG)传感器,以此监测沉积物内部不同物理过程中的温度、应力变化过程。FBG 传感器监测含水合物沉积物温度、应力的原理如下:

在 FBG 传感器中,当光栅受到所处环境的温度和应力的影响时,其栅距和有效折射率会发生相应变化<sup>19</sup>,从而使反射光谱中的光栅中心波长发生相应漂移,通过将漂移量与温度和应力导致的应变建立相应的数学关系,即可利用该公式根据反射光波信号反演出含水合物沉积物的温度、应力(图1)。波长漂移量与应变和温度的关系如下:

$$\frac{\Delta\lambda_{\rm B}}{\lambda_{\rm B}} = (1 - P_{\rm e})\varepsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T \tag{1}$$



图 1 光纤光栅传感原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the sensing principle of fiber Bragg grating

式中,  $\Delta\lambda_B$ 为光栅中心波长的变化量,  $P_e$ 为有效光弹 系数,  $\varepsilon$ 为光纤轴向应变,  $\Delta T$ 为温度变化量,  $\alpha$ 为光 纤的热膨胀系数,  $\zeta$ 为光纤的热光系数。

本文中的测试系统主要由光源、封装的 FBG 探头、调制与解调器、数据采集显示等组成(图 2)。 测试过程中,外界的干扰导致光纤光栅发生变化, 宽带光通过 FBG 传感器时在受干扰的光纤光栅处 的反射光光波会发生变化,通过解调模块将反射光 的光波变化进行解调,之后通过电脑即可记录和显 示其变化。

#### 1.2 光纤探头结构设计

光纤监测技术在水合物研究领域应用的核心 技术问题是如何在保护光纤的基础上探测储层物 理参量。这需要在结构设计和材质选择等方面进 行优化,以达到保护光纤,并直接获取储层温度、应 力的目的。

遵循集成化、小型化的原则,将温度感测光纤 光栅和应力感测光纤光栅串联在一根裸纤上。在 储层应力监测方面,为了克服单点受力不均的问 题,采用圆形铜片与应力感测光纤光栅相连的方式 监测含水合物沉积物施加的应力。为了克服装样 压实和水合物合成过程中对感温光纤光栅的影响, 将感力和感温光纤光栅进行了一定的分隔处理。 另外,由于装样压实和沉积物在垂向压实固结时对 光纤监测探头在垂向的影响较大,对感测部分采用 悬臂梁结构设计,并增加垂向支撑杆,以增加探头 在釜内的稳定性,具体结构见图 3。另外,为了防止 含水合物沉积物受横向应力加载挤压导致横向倾 倒滑移,在光纤探头的顶端增加卡环,并利用横向 支撑杆件与釜壁的连接保证光纤探头横向稳定。

#### 1.3 光纤探头组装和釜体整体布局

光纤监测探头内置于反应釜内,其靠近旁压加 载探头(图4),由负责温度、压力监测的光纤光栅 串联组成,外接数据采集模块(图 2)。在沉积物温 度和压力的常规手段监测方面,釜内沉积物的温度 和孔隙压力由布设于底部基座上的热电阻温度传 感器和压力传感器进行监测。而沉积物所受的加 载应力则通过与旁压探头相连的体积控制器内的 压力传感器进行监测。整个实验准备过程包括旁 压探头的安装与标定,与旁压探头相连体积控制器 的排气, FBG 传感器的安装等。其中, 旁压探头的 安装与标定和体积控制器的排气在本研究团队发 表的文章中已有详细介绍,本文不赘述。FBG 传感 器的安装主要包括裸纤的信号检测与环境温度校 准等。其中裸纤信号检测的目的是为了检查光纤 是否有断裂,如果有断裂发生,需通过熔接机进行 熔接。另外,在保证光纤信号正常采集后需及时记 录釜内未充填沉积物时的环境温度和压力,将其作 为后续测试的参考。

### 2 实验测试

在反应釜内对含水合物沉积物的温度、应力进 行监测,反应釜内置了常规温度、压力监测传感器 和新研发的光纤温度、应力传感器,可同时监测含 水合物沉积物受到的加载应力、温度、孔隙压力等 数据。其中,常规监测手段获取的釜内含水合物沉 积物所受的加载应力、温度、压力数据主要用于对



Fig.2 Schematic diagram of the testing system



图 3 光纤温度、压力监测探头结构示意图

Fig.3 Schematic of the structure of the temperature and pressure monitoring probe based on fiber-optic technology



图 4 反应釜内各测试探头布局示意(a)及实物照片(b) Fig.4 Layout of the testing probes in the chamber and the photo

比验证光纤探头的有效性。在整个测试过程中包 含两套测试流程,其中釜内储层加载应力、温度、 压力的常规监测流程本文不做介绍,主要对整个测 试过程中的光纤监测流程进行介绍。

在实际测试中,遵循如下测试流程,包括初始 环境压力温度信号监测、水砂混合物装样过程中应 力和温度信号的动态监测、应力加载和卸载过程中 的储层应力和温度信号动态监测、水合物分解过程 中的应力和温度监测,具体见图 5。下面对每个过 程进行详细介绍。

#### 2.1 水合物试样制备下的温度、压力监测

装样前的初始温度、应力监测主要用于对照, 检验光纤光栅的连通情况,并与原始标定曲线 (图 6)对比以确认光纤光栅是否发生温度或应力的 漂移。如果出现了漂移,确定其漂移量后对后续测 试结果进行校正。

本实验中,用于制备含水合物沉积物的骨架颗 粒为细砂,其表观密度为1.4 g/mL,孔隙度为42%, 整体颗粒大小为34~965 µm。颗粒的中值粒径 (*D*<sub>50</sub>)为180 µm,均匀系数为2.4,曲率系数为1.067, 具体级配曲线详见文献[27],在此不赘述。装样前, 根据目标饱和度计算需水量,称量所需水量并与 30 kg沉积物混合均匀。采用分层压实的方法将混 合好的湿砂装填于反应釜内。采用过量气法对目 标饱和度水合物进行合成,判断水合物合成结束与 否的基本条件是釜内沉积物孔隙内气压不再降低 或降低特别缓慢。釜内的气压在开始合成实验时 通过甲烷的分批缓慢注入升高到6.5~7.0 MPa,随 着水合物的生长,视压力降低情况进行补充。水合



图 5 测试流程图

Fig.5 Flow chart of the testing





Fitting curve of the optical wavelength versus temperature (a) and the stress (b).

物合成过程中保持循环水浴温度设置为1℃,避免 因温度较低而导致沉积物结冰。水合物合成过程 中,利用轴向加载压盘对沉积物试样施加6MPa左 右的垂向荷载使其不断固结。在水合物完全合成 后保持釜内压力为6.0MPa左右,水合物合成之后 去除试样的垂向加载。

需要强调的是,在装样压实和水合物合成阶段 均需对储层的温度、应力进行监测,以此测试光纤 传感探头对温度和应力的敏感性以及监测精度是 否达到要求。在装样压实过程中的储层应力、温度 监测的主要目的是获取初始状态下储层的挤压应 力与温度,为校准水合物合成过程中产生的挤压应 力提供基础数据。其中,水合物合成阶段的应力监 测主要探讨水合物成核生长对沉积物颗粒施加挤 压应力的变化规律,为研究水合物的生长规律和判 断水合物是否完全合成提供参考。

#### 2.2 分级加载测试与监测

分级加载过程中的水浴温度保持为1℃,加载 过程中均不存在垂向加载应力。对于常规加载,每 级加载应力的作用时长不低于3min,对于蠕变加 载,每级加载应力的作用时长不小于24h。加载过 程中的釜内甲烷压力保持在 6.0~6.1 MPa。加载过 程中,通过控制旁压探头内部的液体压力与釜内孔 压的差值对沉积物进行加载。在加载过程中,通过 监测含水合物沉积物引发的光纤探头铜片变形所 导致的光波变化信号,为含水合物沉积物变形机制 的探讨提供直接证据。

在应力加载阶段,对光纤传感器铜片施加的应 力源于旁压探头橡胶膜呈柱状膨胀时对周围含水 合物沉积物的挤压应力。在实验过程中,采用控制 应力的加载方式对含水合物沉积物进行加载。即 通过控制旁压橡胶膜内部压力与膜外含水合物沉 积物孔压压差保持不变。加载过程中,利用光纤探 头实时监测含水合物沉积物的应力与温度。以含 水细砂沉积物和水合物饱和度为 25% 的含水合物 细砂沉积物对光纤监测的有效性进行分级加载验 证,具体加载细节会在后文进行详细介绍。

# 2.3 应力卸载与水合物分解过程中储层温度、应 力监测

当生产井内部形成较大的压力时,可能会对井 壁产生较大的挤压应力,同时如果该压力向井口集 中,可能导致井喷事故的发生。为了防止井喷事故 的发生,需要采取措施及时降低井内的压力,降低 井内压力的过程可以简化为应力卸载的过程。对 该过程中的含水合物沉积物应力和温度的监测对 保持储层的稳定至关重要。本实验中,通过降低旁 压探头内部的压力模拟储层泄压过程,并监测储层 的变形情况。在降低旁压探头压力的过程中,保持 釜内沉积物的孔压为 6.0~6.1 MPa。

水合物的分解对含水合物沉积物的应力场和 温度场均会产生重大影响,分解状态下含水合物沉 积物不同空间位置处的应力和温度变化一直是水 合物开采研究的焦点。实验过程中,采用降压法对 水合物进行分解,即关闭恒温水浴后将釜内沉积物 孔压快速降至零,并保持釜体泄气阀门的持续开 启,以便水合物分解产生的甲烷气体可以快速排出。

实验过程中,通过监测应力卸载和水合物分解 过程中含水合物细砂沉积物内部应力、温度的变化 规律,可为探讨含水合物沉积物的变形机制和水合 物的分解规律提供直接数据,有望为探讨含水合物 沉积物强度弱化规律提供数据支撑。

3 结果与分析

作为监测含水合物沉积物这类特殊储层的重

要监测手段,光纤探头在不含水合物的常规细砂沉 积物中的适应性是验证其有效性的基础。为此本 文对该探头在含水细砂沉积物(含水率与用于合成 水合物饱和度为25%的含水合物细砂沉积物相同) 内的应力和温度变化进行监测,以验证其在常规加 载工况下的适应性。在此基础上,对水合物饱和度 为25%的含水合物细砂沉积物从装样、水合物合 成、分级加载、卸载和分解等过程中的温度和应力 变化进行监测,以此评估该测试手段对含水合物沉 积物变形过程的响应情况、灵敏度等。

## 3.1 常规加载下含水细砂沉积物内的温度、应力 变化规律

在常规加载下的含水细砂沉积物温度、应力的 光纤监测中,为了保证试验条件的一致性,控制砂 子内部的含水量与用于合成水合物饱和度为25% 的含水合物沉积物的含水量一致。采用分级加载 的方式对储层进行加载,每级加载应力的作用时间 不低于3分钟,初期的加载应力梯度为10kPa,共加 载16级,之后逐渐增加至20kPa和50kPa。光纤传 感器实时监测旁压探头橡胶膜施加给储层的应力 以及含水细砂沉积物本身的温度变化。实验过程 中,通过恒温水浴对反应釜进行降温,恒温水浴槽 的温度设定为1℃。

从图 7a 可以明显看出光纤监测的试样温度与 热电阻传感器监测的温度变化趋势在前 60 min 内 具有一定的相似性,但在数值方面存在较大的差 异。整个测试过程中热电阻温度传感器测得的温 度为 12~13 ℃, 在第 20~100 min 出现了一定的下 降,在100~140 min 时出现了缓慢的上升,整体波 动较小。光纤监测的细砂沉积物温度在初始时刻 为19℃,之后出现了缓慢的降低,最低监测温度为 14 ℃。出现上述不同现象是因为光纤在开始试验 前处于预拉伸状态,而沉积物受挤压后将这一应力 传递给光纤光栅会导致其预拉伸状态改变,从而出 现了温度的连续下降趋势。另外,由于光纤探头内 负责监测温度和应力的光纤光栅对温度和应力变 化均较为敏感,二者串联可能会存在一定的耦合影 响,从而造成与电阻探头监测值存在较大偏差。其 次,常规监测探头与光纤监测探头在釜内的空间位 置存在一定差异,也会导致二者监测到的数据存在 一定差异。

每一级加载应力作用下,光纤监测的应力曲线 如图 7b 所示。从图 7b 可以看出,前期加载应力与 光纤监测的应力基本重合,说明光纤探头可以有效



图 7 含水细砂沉积物加载过程中的温度(a)和应力(b)变化曲线 Fig.7 Curves of temperature (left) and stress (right) versus the time of water-bearing fine sand loading

监测到应力加载信号。之后随着有效应力的增加, 监测值与加载值逐渐偏离,加载结束时监测应力基 本稳定。分析认为,由于受旁压挤压的土体在光纤 探头圆形铜片边缘处出现切削作用,导致应力向细 砂沉积物强度较低的区域发展,所以监测到的应力 基本变化不大(图7b中蓝色线标注),只有在较大 加载应力时才会出现明显的增长。另外,旁压探头 橡胶膜的非均匀膨胀也可导致上述现象。

#### 3.2 含水合物细砂沉积物温度、应力变化

3.2.1 沉积物装样压实过程中的温度、应力变化

整个装样压实过程中,含水细砂沉积物的温度 变化曲线如图 8a 所示。不论是电阻式温度传感器 测得的温度还是光纤测得的温度,整体均出现了上 升的趋势。其中,热电阻式传感器测的温度变化相 对较小,整个过程上升了 1℃ 左右。而光纤监测的 温度出现了阶跃式上升,在前 10 min 内温度出现了 一定的降低,之后温度阶跃上升到 11 ℃,自第 90 min 之后温度出现先上升后下降的现象,这一现象的出 现与装样压实过程中冲击荷载有关。

装样压实过程中扁铲膜片监测的压力变化整体较小,整体增加不到 20 kPa(图 8b)。而光纤监测的应力整体波动较大,在前 90 min 内呈现细微下降的 趋势,最大降低幅度达到了 0.2 MPa。在第 90~110 min 内应力出现了突变,最大应力达到了 2.4 MPa。该应力突变可能与装样压实中的短时冲击荷载有关。峰值之后出现了急剧的降低,之后又出现了一定的上升,监测的应力值达到了 0.6 MPa。 3.2.2 水合物合成阶段的温度、应力变化

从图 9a 中可以看出釜内热电阻式传感器测试的温度基本随水浴循环降温在不断降低,在第 20 h

之后基本稳定。对 25% 饱和度细砂沉积物在水合物合成过程中的温度监测表明,整个合成过程中光 纤监测的温度和釜内电阻传感器监测的温度变化 趋势基本相当(图 9a)。但二者在数值上具有较大 差异,其中热电阻式传感器监测的温度在初期基本 与光纤监测值相当,但在稳定后的温度存在较大差 异,具体表现为电阻测试的温度基本稳定在4℃, 而光纤测试的温度稳定在-1℃(图 9a)。在图 9b 中,水合物合成开始前光纤监测的应力值即出现了 一定的上升,这是因为垂向固结应力作用的结果。 在水合物合成开始前固结压力首先被施加于沉积 物的顶部,这时其应力作用传导至光纤探头,从而 导致监测到的应力升高。

理论上,甲烷气体与沉积物孔隙中的水在高压 低温的环境下成核生长会填充孔隙,且随着水合物 的不断生长,沉积物间的挤压应力会增长。而对于 埋置于含水合物沉积物中的扁铲探头和光纤探头, 沉积物内部挤压应力会作用于扁铲的圆形不锈钢 膜片和光纤的感力铜片上。通过分析上述探头监 测到的应力变化信号可在一定程度上反映水合物 成核生长的规律。

水合物饱和度为 25% 下的细砂沉积物试样在 水合物合成阶段的挤压应力监测曲线(图 9b)显示, 扁铲探头监测到的应力呈现出线性增长的趋势,而 光纤监测的应力呈现出先快速增长后基本保持不 变的趋势,在合成前 20 h内应力的波动整体较大。 整体而言,合成过程中光纤监测到的应力整体高于 扁铲监测到的应力(图 9b)。分析认为是由于沉积 物颗粒较细时,其与光纤感测膜片的接触较紧密, 光纤监测的应力是各接触点作用下的总应力,当水 合物生长呈现非均质时,会导致部分颗粒不能很好









将力传导至感力铜片,且光纤的感力铜片对于土体 来说其接触面较小,且存在内陷凹槽可能会加剧这 一影响。而扁铲不锈钢膜片为直径为60mm的圆 形钢片,其与颗粒的接触面相对光纤感力膜片较 大,水合物生长过程中颗粒间的挤压相对稳定、均 匀。整体而言,扁铲探头监测的压力与光纤监测的 应力存在一定差异,分析认为主要受膜片面积大小 与材质的不同共同控制。

3.2.3 蠕变加载过程中的储层温度、应力变化规律

本组实验采用加载应力梯度为 0.5 MPa 的多级 加载方式对水合物饱和度为 25% 的含水合物细砂 沉积物进行蠕变测试,在进行三级加载后含水合物 细砂沉积物发生蠕变失效。

整个加载过程中, 热电阻温度传感器采集到的 温度整体呈现波动下降的趋势, 在加载段的最大波 动值为 0.4 ℃(图 10a)。光纤监测的温度基本随加 载的进行呈现波动上升的趋势, 且随试样受加载应 力作用失效后出现急剧降低(图 10a)。上述现象的 产生可能和两个光纤光栅的串联有关,负责监测加 载应力的光纤光栅发生变形之后,通过光纤传导到 了负责监测温度的光纤光栅处,导致了其应变状态 发生了改变。

含水合物细砂沉积物所受加载应力的变化过 程与光纤探头监测的应力变化过程如图 10b 所示, 可明显看出光纤监测应力与加载应力具有较好的 同步变化趋势,但二者的数值存在较大差异,这是 因为旁压探头的橡胶膜与光纤探头的感力膜片之 间存在 2 cm 左右的距离,在二者之间被含水合物沉 积物充填,所以加载过程中应力在沉积物中的传递 会导致监测到的应力存在小于加载应力的情况。 3.2.4 卸载过程中的储层温度、应力变化规律

本组实验采用釜内的扁铲探头对含水合物细砂沉积物进行卸载。因为在 3.2.3 节已经表明含水合物细砂沉积物发生了蠕变破坏,这意味着旁压探头的橡胶膜已经损坏,没法进行卸载操作。在实验过程中,我们采用旁压探头和扁铲探头同步加载的



图中灰蓝色阴影部分为加载阶段。

Fig.10 Temperature (a) and stress (b) monitoring curves of hydrate-bearing fine sand sediment loading

The shaded part represents the loading stage.

方式对试样进行加载,所以在旁压橡胶膜损坏后, 还能通过扁铲探头对试样进行卸载。但由于扁铲 膜片与光纤探头之间存在一定的距离与角度偏差, 所以其卸载对光纤探头的影响是间接的。

图 11 展示了扁铲探头卸载过程中,通过光纤探 头监测的水合物饱和度为 25% 的含水合物细砂沉 积物内部温度和应力的变化曲线。从图 11a 可以看 出,随着扁铲探头的持续卸载,通过热电阻温度传 感器监测的含水合物细砂沉积物温度出现了缓慢 的上升,整体的温度波动约为 0.1 ℃。而光纤监测 的温度在刚开始时较大,达到了 0.75 ℃,之后出现 了一定的降低,最终保持在 0.18 ℃ 左右。在扁铲的 两次缓慢卸载过程中,光纤监测到的应力出现了先 升高后基本保持不变的趋势(图 11b)。 分析认为,造成上述现象是由于预拉伸的光纤 在卸载之后其变形由原来的压缩状态转向了拉伸 状态,即光纤的压缩变形出现了一定的回弹。但由 于土体的弹塑性变形,导致储层在卸载后并未发生 变形的完全恢复,所以其监测的应力在一定升高之 后基本保持稳定。

3.2.5 水合物分解过程中储层温度、应力变化规律

水合物分解过程中的温度、应力监测曲线如 图 12 所示。可明显看出,在开始降压的前 0.5 h内, 釜内的热电阻温度传感器监测到的温度出现了急 剧降低,这主要受釜内水合物分解吸热控制,另 外压缩的甲烷气体的膨胀泄出也会带走部分热量, 从而共同导致釜内温度的降低。之后,温度在水合 物的分解过程中出现了小幅上升,分析认为是受环









境温度影响。在第5.56h时出现了先下降再上升的 现象,上升后的温度最终基本保持在16.4℃,说明 水合物基本分解完。由于自第10h之后未利用热 电阻对储层温度进行监测,所以在图中显示为缺 失。总之,光纤监测到的储层温度变化与热电阻温 度传感器监测的温度变化趋势基本同步,说明利用 光纤感测技术监测储层的温度变化具有较好的灵 敏性。

水合物分解过程中的含水合物细砂沉积物内 的应力变化如图 12b 所示,可以看出其基本呈现出 不断降低的趋势,自第 30 h 后基本保持在 0.135 MPa 左右。其中,在前 10 h 内光纤监测的应力出现了台 阶式下降的趋势,尤其在降压的短时期内,其监测 的压力出现急剧的下降,这说明光纤探头可以识别 出含水合物细砂沉积物内孔压的变化。

#### 3.3 监测值偏差的原因分析

#### 3.3.1 光纤探头与成熟探头的原理对比分析

本文中的成熟感温探头为电阻式探头,即利用 材料的阻抗随温度变化而变化的特性对环境温度 进行监测。而用于监测加载压力的探头为压阻式 探头,其利用压力促使材料的阻抗发生变化从而发 生电流信号的改变来监测环境压力。上述成熟探 头都是通过监测电信号的改变来达到监测待测物 理参量的一类技术,而光纤监测技术是通过监测光 信号的改变来监测待测物理量的变化。相较于电 阻对特定条件敏感的特性,光纤光栅技术不仅对环 境温度敏感,还对储层的变形敏感。所以其在监测 含水合物沉积物储层的温度和应力时,会由于自身 对温度和变形的敏感性而出现耦合影响,从而出现 监测值与成熟探头有一定差异的情况。

#### 3.3.2 与前人监测结果的对比分析

实验结果显示,光纤监测的温度与热电阻监测 值存在较大差异,在此将其与前人的研究结果进行 了对比分析。图 13 为前人利用光纤传感器和热电 阻传感器监测的同一位置与不同位置处的温度。 采油树与输油管道内的水合物生成都将严重影响 采油效率,所以对其内部的温度监测显得尤为重 要。图 13a 为 Faichnie 等<sup>[28]</sup> 在海底采油树设备内部 获取的温度曲线,可明显看出虽然光纤传感器与热 电阻传感器采集到的温度变化趋势类似,但明显光 纤监测的值小于热电阻监测的值,二者差距为2~ 4℃。另外,另外一项针对油气管道绝缘层的温度 监测的研究也显示,当光纤传感器与热电阻传感器 在空间位置存在差异时,二者监测的温度值存在较 大差异(如图 13b 中 Fw 和 3 位置处监测的温度曲 线所示),说明传感器在环境中所处的位置对检测 值具有较大影响。而Liu等<sup>[29]</sup>研制的用于监测海 水深度、海底振动与温度的光纤系统显示出监测温 度与热电阻监测温度一致的现象,究其原因是这类 探头属于浸没于海水里并未贯入沉积物储层的探 头,其主要通过热传导进行海水温度的测量,沉积 物的变形并不会对其产生影响。

对于图 7a 中光纤监测温度在加载过程中一直 呈现下降趋势,这可能与光纤光栅受到力的挤压作 用有关。因为在 Ying 等<sup>[30]</sup>利用缠绕在聚丙烯管上 的光纤监测结冰导致的应变发展规律时,发现串联 的光栅光纤在管的不同侧出现应变的相反变化趋 势,这主要由于两侧的光纤光栅受不同性质(拉力 与压力)的力作用所致。另外也发现多孔介质的存 在会限制冰晶体的生长,导致光纤检测到的变形在 开始呈现线性,之后呈现非线性的变化规律。上述



Fig.13 Comparison of the monitoring results from fiber-optic probe and from traditional resistance temperature detectors

a. Modified from literature [28], b. modified from literature [32].

研究的基本现象与本文的监测曲线(图 7 和图 9b) 变化趋势基本一致。

综上,本文中光纤监测温度与热电阻监测温度 的差异与前人研究基本一致,并且由于光纤监测探 头与热电阻探头处于釜内不同位置处(图 4b),所以 监测所得的温度出现差异是合理的。对于串联光 纤光栅在测温和测压方面的耦合影响,笔者所在团 队也尝试了相应的解决方法,具体可见文献[31]。

3.3.3 储层非均质导致的变形差异对监测数据的影响机制分析

在含水沉积物和含水合物沉积物的温度和压力的光纤监测中均出现了监测值与常规技术获取的值存在较大差异的情况。为此,本部分从颗粒角度对各阶段储层的变形机制出发,分析造成上述差异的原因。主要选取水合物生长阶段、受外力变形阶段与分解阶段分析储层内部的应力变化情况,以及导致光纤光栅变化的机制进行探讨。

不同变形阶段,含水合物沉积物所受到的应力 存在差异。在水合物合成阶段,随着沉积物孔隙内 部水分与甲烷结合不断生成水合物,水合物会在孔 隙内或孔喉的位置挤压沉积物颗粒,这些应力不断 随水合物的生长而增长(图 14a)。这些应力在侧向 会作用于光纤探头的感力铜片上,从而引起与之相 连的光纤光栅发生变化,从而使得光纤监测到的温 度和压力发生变化。由于光纤监测的沉积物温度 除受热传导作用其还受水合物生长产生的挤压应 力的作用,所以导致其监测值与常规热电阻监测到 的值存在较大差异。

在旁压加载阶段,常规技术监测到的压力为旁 压探头内部的压力(P<sub>z</sub>),当不断增加旁压探头内部 的压力时,旁压橡胶膜会不断挤压周围的含水合物 沉积物,导致沉积物孔隙被压缩(图 14b)。当应力 增加到一定值时,含水合物沉积物内部会出现微裂 隙,且在光纤探头的感压铜片的边缘凹槽部分会出 现应力集中,导致这些裂隙会不断发展,从而引发 沉积物沿光纤探头边沿被"切削",直至发生储层的 滑移(图 14b 蓝色线框示意)。当滑移发生,旁压橡 胶膜就会向着这些软弱区域膨胀,从而导致光纤监 测到的应力达到一定值后基本保持不变。另外,在 加载过程中,光纤光栅会由初始的预拉伸状态转向 压缩状态(图 14b 右下角),从而导致监测到的应 力、温度等与常规手段监测的值出现较大差异 (图 7a)。对于水合物分解阶段,由于原来充填于孔 隙中的水合物发生分解,原有的挤压应力出现相应 的降低是容易理解的(图 14c)。

#### 3.4 监测探头用于海底原位监测的可行性探讨

本文对光纤光栅技术用于监测含水合物沉积 物温度、应力进行了初步尝试,监测结果显示其与 常规监测手段获取的数据具有一致的变化趋势,但 数值仍存在较大差异。未来还需对光纤信号解调、 误差分析等加强研究。本部分主要探讨该监测探 头、技术未来如何应用于海底水合物沉积物储层的 温度、应力监测中。

贯入式的原位力学测试手段为海底沉积物储 层的稳定性评估提供了可能。这类测试手段包括 静力触探,扁铲侧胀测试仪,旁压测试仪等,其中前 两种测试手段通常利用外力压入储层,而旁压测试 仪可分为自钻式和预钻式两类。含水合物沉积物 的原位参数监测的困难主要在于探头的贯入,以及 到达目标深度后探头的展开,至于裸纤容易断裂的 问题目前可利用包覆层进行保护。在贯入方面,光





Fig.14 Deformation mechanism of hydrate-bearing sediments at different stages of hydrate formation (a), stress applying (b), and hydrate decomposition (c), and the stress variation of the optical fiber probe

 $p_z$ , p, and  $\sigma$  denote the liquid pressure of the pressure meter, pore pressure of hydrate-bearing sediment, and effective stress of hydrate-bearing sediment, respectively.





纤感测与静力触探、扁铲侧胀测试仪、旁压测试仪 等结合将是不错的选择,通过将光纤光栅集成到这 类探头的尖端或尾部可以实现在海底贯入获取储 层原位力学特性的基础上获取储层的温度和应力 数据(图 15)。另外,将这些探头驻留海底可实时监 测海底储层的温度、应力、盐度等数据。

上述只对该技术用于海底原位力学参数监测 的可能方向进行了简要的分析,至于具体的实施还 涉及到具体探头结构的设计与海试的组织实施等, 本文不作分析。

# 4 结论与展望

本文介绍了新开发的基于光纤感测技术的原 位应力和温度监测探头的基本原理、结构、测试流 程,并通过水合物饱和度为25%的含水合物细砂沉 积物的实际测试,验证了该监测探头在沉积物装样 压实、水合物合成、应力加载、卸载、水合物分解等 过程中监测沉积物温度和应力的有效性,结论如下:

(1)光纤监测到的储层温度和热电阻温度传感器监测的温度具有相似的变化趋势,但是整体而言,光纤监测的温度更低。其中,在水合物合成阶段,光纤监测温度与热电阻温度传感器监测值最大存在5℃的差距;在应力加载阶段,光纤传感器监测的温度和热电阻式传感器监测的储层温度均出现了不同程度的波动。

(2)光纤监测探头可以灵敏捕捉到含水合物细砂沉积物的应力变化,具体表现为:水合物合成阶段监测到的应力呈现衰减性上升之后保持不变;应力加载段,光纤监测到的应力呈现随梯级加载应力升高而同步增长的趋势;水合物分解阶段,光纤监测到的应力随水合物分解逐渐降低直至不变。

(3)扁铲探头卸载对光纤监测探头附近的含水 合物细砂沉积物的温度和应力影响整体较小,应力 的影响不到 10 kPa, 而温度影响不到 0.1 ℃, 说明应 力的影响集中在较小的区域, 而较远的区域较少受 到影响。

(4)目前的测试只对光纤探头监测含水合物沉积物应力和温度的有效性进行了初步研究,从实验结果看含水合物沉积物的应力和温度对光纤探头存在耦合性影响。如何去除这些耦合干扰是保证监测数据反映储层实际物理属性的关键。未来需在光纤测试数据的误差分析、量化储层温度和应力对单个光纤光栅的影响、改进探头结构等方面加强研究,实现对水合物储层应力和温度的精准监测。

#### 参考文献 (References)

- 胡高伟,李彦龙,吴能友,等. 神狐海域 W18/19 站位天然气水合物 上覆层不排水抗剪强度预测 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(5): 151-158. [HU Gaowei, LI Yanlong, WU Nengyou, et al. Undrained shear strength estimation of the cover layer of hydrate at site W18/19 of Shenhu area[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(5): 151-158.]
- [2] Li Y L, Wu N Y, Gao D L, et al. Optimization and analysis of gravel packing parameters in horizontal wells for natural gas hydrate production[J]. Energy, 2021, 219: 119585.
- [3] Chen M T, Li Y L, Merey Ş, et al. Review on the test methods and devices for mechanical properties of hydrate-bearing sediments[J]. Sustainability, 2022, 14(10): 6239.
- [4] 葛勇强,曹晨,陈家旺,等.基于 MEMS 传感阵列的海底地形形变原 位监测装置 [J]. 浙江大学学报:工学版, 2022, 56(9): 1732-1739.
  [GE Yongqiang, CAO Chen, CHEN Jiawang, et al. In-situ monitoring device for seabed terrain deformation based on MEMS sensor array[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2022, 56(9): 1732-1739.]
- [5] 贾永刚,陈天,李培英,等.海洋地质灾害原位监测技术研究进展[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 1-14. [JIA Yonggang, CHEN Tian, LI Peiying, et al. Research progress on the in-situ monitoring technologies of marine geohazards[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 1-14.]
- [6] 栾锡武,秦蕴珊,张训华,等.东海陆坡及相邻槽底天然气水合物的 稳定域分析 [J]. 地球物理学报, 2003, 46(4): 467-475. [LUAN Xiwu, QIN Yunshan, ZHANG Xunhua, et al. The stability zone of gas hydrate in the slope of East China Sea and neighboring trough basin area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(4): 467-475.]
- [7] 王超群,丁莹莹,胡道功,等. 祁连山冻土区 DK-9 孔温度监测及天然 气水 合物 稳定带厚度 [J]. 现代地质, 2017, 31(1): 158-166.
  [WANG Chaoqun, DING Yingying, HU Daogong, et al. Temperature monitoring results for gas hydrate borehole DK-9 and thickness of gas hydrate stability zone in the Qilian mountains permafrost[J].

Geoscience, 2017, 31(1): 158-166.]

- [8] Fan Z H, Zhu X M, Xu H B, et al. A new method for long-term in situ monitoring of seabed interface evolution: A self-potential probe[J]. Ocean Engineering, 2023, 280: 114917.
- [9] Mei W X, Liu Z, Wang C D, et al. *Operando* monitoring of thermal runaway in commercial lithium-ion cells via advanced lab-on-fiber technologies[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 5251.
- [10] Li T L, Tan Y G, Shi C Y, et al. A high-sensitivity fiber Bragg grating displacement sensor based on transverse property of a tensioned optical fiber configuration and its dynamic performance improvement[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(18): 5840-5848.
- [11] 仲志成,赵斌,林君,等.基于光纤传感技术的三维地应力传感器 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(2): 325-335. [ZHONG Zhicheng, ZHAO Bin, LIN Jun, et al. Three dimensional in-situ stress sensor based on optical fiber sensing technology[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(2): 325-335.]
- [12] De Moustier C, Spiess F N, Jabson D, et al. Deep-sea borehole re-entry with fiber optic wireline technology[C]//Proceedings of the 2000 International Symposium on Underwater Technology. Tokyo, Japan: IEEE, 2000: 379-384.
- [13] 万庭辉, 邱海峻, 陆敬安, 等. 天然气水合物试采中分布式光纤测温 (DTS) 数据现场处理及可视化 [J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(2): 59-64. [WAN Tinghui, QIU Haijun, LU Jing'an, et al. Study of on-site processing and visualization of DTS data from China's first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(2): 59-64.]
- [14] 段胜男,潘勇,芦志伟.光纤温压动态监测技术的油田应用和发展趋势 [J]. 石油工业技术监督, 2016, 32(5): 49-52. [DUAN Shengnan, PAN Yong, LU Zhiwei. Oilfield application and development trend of optical fiber temperature and pressure dynamic monitoring technology[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2016, 32(5): 49-52.]
- [15] 张怀文,李庭强.油气井光纤测温技术及其应用 [J]. 新疆石油科技, 2009, 19(4): 22-25. [ZHANG Huaiwen, LI Tingqiang. Fiber optic temperature measurement technology for oil and gas wells and its application[J]. Xinjiang Petroleum Science & Technology, 2009, 19(4): 22-25.]
- [16] He X G, Xie S R, Gu L J, et al. High-resolution quasi-distributed temperature and pressure sensing system for deep-sea reservoir monitoring[J]. Measurement, 2022, 199: 111568.
- [17] Chee S, Leokprasirtkul T, Kanno T, et al. A deepwater sandface monitoring system for offshore gas hydrate[C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas , 2014.
- [18] Schwenk M, Katzir A, Mizaikoff B. Mid-infrared fiber-optic evanescent field spectroscopy for *in situ* monitoring of tetrahydrofuran hydrate formation and dissociation[J]. The Analyst, 2017, 142(5): 740-744.
- [19] 刘康,朱渊,陈国明,等. 天然气水合物开采井筒温度监测实验 [J].
  实验室研究与探索, 2019, 38(10): 76-79,161. [LIU Kang, ZHU Yuan, CHEN Guoming, et al. Experimental study on wellbore monitoring of methane hydrate[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2019, 38(10): 76-79,161.]

- [20] 陈强, 刘琨, 梁宇, 等. 天然气水合物开采井 CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> 光纤气体传感 监测仪器研发 [J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(10): 78-84. [CHEN Qiang, LIU Kun, LIANG Yu, et al. Development of CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> optical fiber gas sensor monitoring instrument for natural gas hydrate production well[J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(10): 78-84.]
- [21] He X G, Wu X M, Wang L, et al. Distributed optical fiber acoustic sensor for *in situ* monitoring of marine natural gas hydrates production for the first time in the Shenhu Area, China[J]. China Geology, 2022, 5(2): 322-329.
- [22] Longo J P N, Galvao J R, Antes T, et al. Sensing hydrates in pipes by a combined electrical and optical fiber sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(9): 5012-5018.
- [23] Qian H F, Wang X C, Chen X L, et al. Research on noise suppression technology of marine optical fiber towed streamer seismic data based on ResUNet[J]. Energies, 2022, 15(9): 3362.
- [24] Chen M T, Li Y L, Zhang Y J, et al. Recent advances in creep behaviors characterization for hydrate-bearing sediment[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 183: 113434.
- [25] Chen M T, Li Y L, Zhang P H, et al. Numerical simulation of failure properties of interbedded hydrate-bearing sediment and their implications on field exploitation[J]. Ocean Engineering, 2023, 274: 114030.
- [26] 施斌,张丹,朱鸿鹄. 地质与岩土工程分布式光纤监测技术 [M]. 北京:科学出版社, 2019: 12-20. [SHI Bin, ZHANG Dan, ZHU Honghu. Distributed Fiber Optic Sensing for Geoengineering Monitor-

ing[M]. Beijing: Science Press, 2019: 12-20.]

- [27] Li Y L, Chen M T, Guang S X, et al. "Ladetes"—A novel device to test deformation behaviors of hydrate-bearing sediments[J]. Review of Scientific Instruments, 2022, 93(12): 125004.
- [28] Faichnie D M, Graham A, McStay D. The application of fibre optic temperature sensing for under insulation monitoring of subsea infrastructure[C]//Proceedings Volume 7726, Optical Sensing and Detection. Brussels, Belgium: SPIE, 2010: 522-528.
- [29] Liu Z Y, Zhang S Q, Yang C K, et al. Submarine optical fiber sensing system for the real-time monitoring of depth, vibration, and temperature[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 922669.
- [30] Teng Y, Wang P F, Zhou Y B, et al. Potential applications of distributed optical fiber sensor in hydrate-induced sedimentary deformation research[J]. Energy Science & Engineering, 2022, 10(1): 4-12.
- [31] 范好好,赵强,杜大伟,等.高抗噪光纤光栅波峰计数式位移传感器
  [J]. 光学学报, 2024, 53(6): 0606003. [FAN Haohao, ZHAO Qiang, DU Dawei, et al. High anti-noise displacement sensor base on fiber Bragg grating peak counting[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(6): 0606003.]
- [32] Faichnie D M, Graham A, Costello L, et al. Use of fibre sensors for temperature measurement in subsea infrastructure to monitor flow-loop cool-down[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2009, 178(1): 012018.