

陈强, 刘琨, 梁宇, 等. 天然气水合物开采井 CH₄-CO₂ 光纤气体传感监测仪器研发[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(10): 78-84.

天然气水合物开采井 CH₄-CO₂ 光纤气体 传感监测仪器研发

陈强^{1,2}, 刘琨³, 梁宇³, 孙建业^{1,2}, 李彦龙^{1,2}, 吴能友^{1,2*}, 刘昌岭^{1,2}

(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国家试点实验室海洋矿产资源与探测技术功能实验室, 青岛 266237;

3 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:天然气水合物资源开发备受关注, 日本、中国等国家相继实施海域天然气水合物试采, 证实了其资源潜力和开发可行性。目前对水合物开采过程中生产井内气体成分的监测手段尚不完善, 制约了对生产过程监控及安全风险评估等工作的开展。本研究基于可调谐半导体激光吸收光谱 (TDLAS) 原理, 设计出一套 CH₄、CO₂ 气体成分传感监测系统, 并针对天然气水合物生产井工况进行小型化、抗干扰改良, 最终形成设备样机。经测试验证, 研制的光纤气体传感监测仪器具备对浓度 $>50 \times 10^{-6}$ 的 CH₄、浓度 $>100 \times 10^{-6}$ 的 CO₂ 稳定的测量能力。

关键词:天然气水合物; 光纤气体传感器; 可调谐半导体激光吸收光谱; 甲烷; 二氧化碳

中图分类号: P744.4; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.178

0 引言

海域天然气水合物多以孔隙或裂隙充填的固体状态分布于海底浅层沉积物中, 需通过水合物储层降压或者使用更易形成水合物的二氧化碳 (CO₂) 气体置换等方式, 使甲烷 (CH₄) 为主的天然气水合物原位分解成为较易运移的气体和水进行开采^[1]。井底温度受降压和水合物分解等多重因素影响不断变化, 生产管柱内存在 CH₄ 或 CO₂ 水合物二次形成的温度压力环境, 从而增加水合物开采过程管柱堵塞风险。因此, 及时监测水合物开采过程中井筒内天然气的成分和含量, 对于判断井下开采状态, 保障管道流动安全具有重要作用^[2-4]。

目前全球已实施的天然气水合物试采均采用监测井对水合物分解过程进行监控。监测井中使用的主要手段有温压阵列、垂直地震剖面、多参量

电缆测井、随钻测井等^[5-7], 用于对比生产前后储层的纵横波速度、电阻、核磁共振等参数的变化情况。现有监测手段仍以监测井周围的储层物性变化测量为主, 井筒内获得的只有温度、压力数据, 而在水合物开采过程中生产井内气体成分的实时测量方面目前仍未见成熟的技术应用。以抗干扰、抗腐蚀为特点的光纤温度传感器, 能够有效克服油气井内空间狭小、环境恶劣等因素的影响, 在历次水合物开采中均得到较好的应用^[8-9]。受此启发, 本研究旨在开发一种基于光纤气体传感器的测量系统, 实现在天然气水合物生产井中实时监测 CH₄、CO₂ 气体成分的变化, 为水合物资源开发提供技术服务。

1 基于 TDLAS 技术的甲烷气体监测系统

1.1 测量原理与主要流程

可调谐半导体激光吸收光谱 (TDLAS) 具备高选择性、高灵敏度和检测速度快等优点, 其利用半导体激光器的可调谐和窄线宽等特性, 可有效提高气体测量的抗干扰性^[10-12]。基于 TDLAS 技术的甲烷气体传感监测系统的结构如图 1 所示, 系统由激

收稿日期: 2020-11-09

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0307600); 海洋地质调查二级项目 (DD20190231); 泰山学者特聘专家项目 (ts201712079)

作者简介: 陈强 (1980—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事天然气水合物开采技术研发方面的工作。E-mail: chenqiang_hds@126.com

* 通讯作者: 吴能友 (1965—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事海域天然气水合物资源勘查与开发方面的工作。E-mail: wunyu@ms.giec.an.cn

光驱动器、波分复用器、传感气室、探测器、锁相模块和数据采集系统等部分组成。

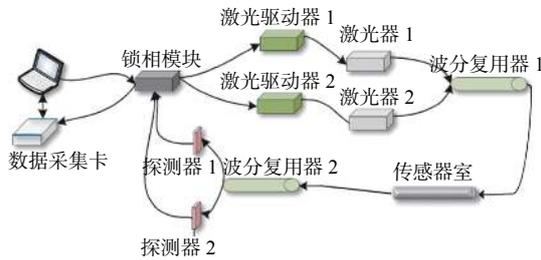


图 1 TDLAS 气体传感系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of TDLAS gas sensor system

系统运行过程如下: ①编写 Labview 程序控制锁相放大模块产生 1 个锯齿波扫描电压信号和 1 个正弦电压信号, 其中锯齿信号的频率较低, 通常为几赫兹; 正弦信号的频率较高, 一般设为几万赫兹。2 个信号在电路模块中求和, 通过信号线(BNC-SMA)接口传输到激光驱动器。②调制电压信号在激光驱动器中转化为驱动电流信号, 输入至可调谐分布式反馈(DFB)激光器; DFB 激光器接收到信号之后发射经过调制的 2 路出射激光。③2 路出射光(1653、2004 nm 激光)经由波分复用器(WDM)合并成 1 条通路进行传输, 经由光线准直器进入传感气室。④激光与气体进行相互作用之后, 由传感气室另一端的光纤准直器耦合进入光纤中, 再经过解波分复用器(DWDM), 将合并的光信号分解成 1653 和 2004 nm 2 路激光。⑤2 路激光经光电探测器转化为电信号后接入数据采集卡, 数据采集卡将采集到的信号经输出口传输到计算机中, 通过 Labview 程序对采集到的信号进行处理。⑥处理后的信号经数据采集卡再次输入到锁相放大模块。锁相放大模块利用自身提供的参考信号对待测信号的二次谐波进行提取并回传至计算机。Labview 程序对

得到的谐波信号进行滤波、降噪等处理, 随后保存到指定位置, 得到所需要的待测气体浓度信息。搭建完成的实验室样机系统如图 2 所示。



图 2 TDLAS 气体传感系统实验室样机

Fig.2 Prototype of TDLAS gas sensor in laboratory

1.2 光学器件优选

本系统中包含多种光学器件, 为了实现最优的测量精度和系统稳定性, 需对主要器件的性能参数进行分析优化。

1.2.1 DFB 激光器

DFB 激光器作为系统光源, 是 TDLAS 的关键性器件, 其中心波长、线宽、电流响应参数、温度响应、可调谐范围等性能特性指标将直接影响系统的探测精度。使用时要确保管脚对应连接, 使驱动器通过控制驱动电流来调节 DFB 激光器的工作温度及调制波长, 保障探测精度。研究所用的 NEL-DFB 激光器的功率为 20 mW, 阈值电流为 20 mA。为考察激光器在不同驱动电压下的波长, 功率和温度特性, 对中心波长 1 654 nm 的 DFB 激光器进行了光谱测量。结果如图 3 所示。

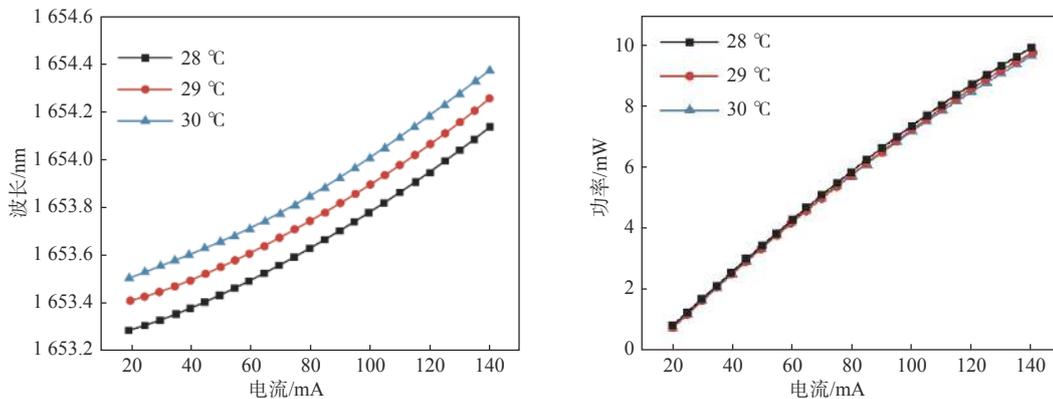


图 3 中心波长为 1654 nm 激光器不同温度下电流-波长和电流-功率曲线

Fig.3 The relations between current and wavelength or power of laser with central wavelength of 1 654 nm at different temperatures

可以看出,在不同温度下激光器的波长随电流的增加而变长;激光器的功率随电流增大而增大。但是在同一温度下,激光器在不同的调制电流下的功率有微小波动,这是由于驱动器的不稳定性以及光谱仪读数的跳动造成的。测试结果表明,控制器的温度越高,激光器输出的功率越稳定;同一温度下的电流越低,输出功率越稳定。因此,在实验过程中,选取激光驱动器稳定性较高的电流范围的参数。

1.2.2 怀特池窗片

气体的有效吸收光程越长,通过锁相系统解调出的二次谐波信号的幅值越大,系统的探测精度也就越高。因此,使用多次反射式气体吸收池可降低系统的最低检测下限(图4)。由光纤输出的光信号通过单模光纤准直器透镜准直后,通过反射镜反射进入气体吸收池。入射光经透射进入气体池后,经过上下表面的镀金高反射镜多次反射后,由出射窗片出射进入光电探测器。

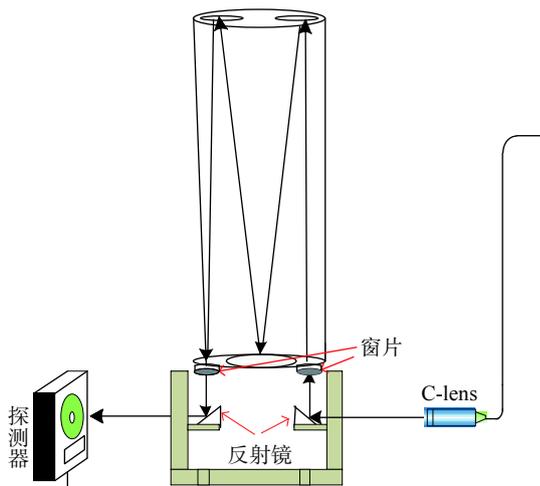


图4 多次反射式长光程气体吸收池结构图

Fig.4 Structure diagram of multi reflection long optical path gas absorption cell

在此过程中,光学器件的特性将会影响系统光斑的质量,从而影响探测信号的质量。为此,选择设计楔形镜片作为气体池的入射和出射窗片。窗片材料选用溴化钾,在楔形窗片上涂有增透膜,加强对1550 nm中红外波的透射,优化后的透过率可达98%。窗片大小根据气体吸收池窗口的大小确定,尺寸为25 mm×4 mm的圆柱形镜片,楔形角为6°。楔形窗片的角度设计可阻止多光束干涉后的光进入气体池,能达到降低系统噪声、提高系统检测精度的效果。

1.2.3 光电探测器

TDLAS 气体传感系统的工作波段是近红外区

域,要求探测器需具备在700~2010 nm波段光电响应度高的特点。带宽为17 MHz的增益可调放大式铟镓砷探测器满足检测需求。需要注意的是,由于铟镓砷探测器中的感光材料价格昂贵,探测器光敏面上感光面积一般较小,以Thorlabs型号PDA10CS的探测器为例,其光敏面只有0.8 mm²。因此,为保证探测信号能被高效接收,必须使出射光垂直入射,尽量与探测器的光敏面重叠。

1.2.4 锁相放大器

锁相放大器用来提取光电探测器输出信号的二次谐波,从而判断气体浓度。本检测系统中锁相放大器需要2路输入信号,分别是光电探测器产生的电压信号和提取该电压信号二次谐波的参考信号。参考信号是频率为高频调制波2倍的信号,需要通过倍频电路产生,本系统采用乘法器来实现2倍频信号的生成。

1.2.5 激光驱动器

激光驱动器用于控制可调谐DFB激光器的输出光。该设备需具备1个高稳定性的低噪声恒流源、1个具有高性能宽控温范围的温度控制器和广泛适用的激光器夹具输出接口。

1.3 TDLAS 光纤气体监测系统的室内测试

1.3.1 CH₄ 气体检测

分别测试了(50~500)×10⁻⁶浓度CH₄的二次谐波幅值。每个浓度获取50个数据,取算数平均作为该浓度下的二次谐波幅值以减小误差。所用激光器中心波长为1563.72 nm,激光驱动器设置温度为25℃,低频锯齿波驱动电压范围是-50~20 mV,气室长度为80 cm,余弦信号频率为20 kHz,振幅为100 mV,相位差为270°,气体温度为293 K,气压为101 kPa。对测得的结果进行了二次多项式拟合,结果如图5所示。R²值为0.9998。

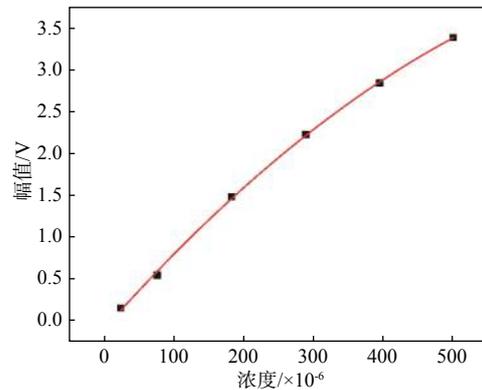


图5 甲烷浓度标定结果

Fig.5 Methane concentration calibration results

1.3.2 CO₂ 气体检测

分别测试了 $(50 \sim 500) \times 10^{-6}$ 浓度 CO₂ 的二次谐波幅值。每个浓度获取 50 个数据, 取算数平均作为该浓度下的二次谐波幅值以减小误差。所用激光器中心波长为 2 004 nm, 激光驱动器设置温度为 25 °C, 低频锯齿波驱动电压范围是 -80 ~ 40 mV, 气室长度为 80 cm, 余弦信号频率为 20 kHz, 振幅为 100 mV, 相位差为 270°, 气体温度为 293 K, 气压为 101 kPa。对测得的结果进行了二次多项式拟合, 结果如图 6 所示。R² 值为 0.999 5。

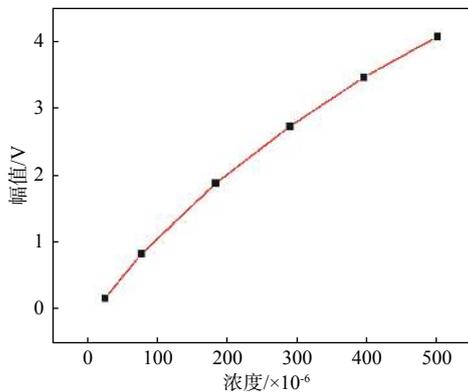


图 6 二氧化碳浓度标定结果

Fig.6 Carbon dioxide concentration calibration results

2 TDLAS 气体监测系统的现场应用优化

2.1 软硬件现场适应性改造

为适应天然气水合物开采现场监测, 必须对 TDLAS 气体监测系统进行改造, 以实验室内搭建的样机为基础, 开展了气体传感器井下适应性改造、地面设备的便携化升级以及数据采集处理系统的整合优化。

2.1.1 CH₄-CO₂ 光纤气体传感器下井改造

天然气水合物开采井井筒空间环境狭小, 必须缩小气体传感器体积。气室内采用波分复用技术, 将原本分别在 2 条通路上传播的 1 653 和 2 004 nm 波段的 2 束激光复用到 1 条通路通过传感气室, 与气室内气体接触测量后, 将其再重新分解成 2 束光分别进行光信号探测与处理, 最终实现下井传感气室体积缩小 50%。气室容积下降, 还缩短了气体交换所需时间, 仅需 2 min 就可以完成与外界环境的气体交换, 从而节省了气体交换辅助工具, 进一步降低下井难度。

此外, 还对气室的内径以及管壁的厚度做了减小减薄调整、气室内壁进行了防锈处理。考虑到传感气室在下井的过程中可能会遇到磕碰的问题, 设计并制作了保护套筒(图 7)。保护套筒全长为 110 cm, 外径为 7 cm, 材质为 316 L 不锈钢, 经过防腐喷涂后还能够有效抵御酸性流体的侵蚀, 从而保证可在低浓度 H₂S 或 CO₂ 等气体环境中工作。保护套筒分为 3 截, 与气室通过螺丝固定, 方便替换。套筒内部最多可放置 3 根传感气室, 可以根据实际的探测浓度, 灵活地调整内部传感气室数目。当井下浓度较高时, 可以选择只放 2 根或者 1 根传感气室进行下井测试工作, 这样可以降低下井重量, 方便下井。



图 7 波分复用传感气室保护套筒

Fig.7 Wavelength division multiplexing sensing gas chamber protective sleeve

2.1.2 通信光纤升级

实验室内样机所用的信号传输光纤由裸纤升级为 3 mm 套管的光纤, 以应对井下恶劣环境, 防止光纤断裂。此外, 波分复用技术测量 CH₄ 所用的 1 653 nm 波段与测量 CO₂ 所用的 2 004 nm 波段的激光需在 1 条通路中进行传播, 而光纤通信波长窗口位于 1 550 nm 波段, 导致 2 004 nm 处光信号损耗较大。为此, 选用波长范围较宽的通讯光纤, 在 1 653 和 2 004 nm 处损耗分别为 3 和 5 dB/km, 可满足 100 m 深度测试需求。

2.1.3 地面设备优化改造

为了进一步完成仪器化工作, 对激光驱动、探测模块以及信号处理模块进行改进优化, 并编写 Labview 程序替代部分仪器功能, 精简设备体积和结构, 适应野外工作环境。

(1) 激光驱动器优化

使用体积 13 cm×9 cm×5 cm 的激光驱动模块替代体积较大的激光驱动器(图 8a)。

(2) 探测模块优化

设计制作光电探测电路板替代只能测量空间光的激光探测器。该电路板能够直接测量光纤里的光信号, 并且测量过程光信号质量中不受外部环境震动的影响(图 8b)。

(3) 信号处理模块优化

将锁相放大器、信号发生器、倍频信号产生电



(a)激光驱动器的优化; (b)探测模块优化; (c)信号处理模块的优化

图 8 地面设备的优化改造

Fig.8 Optimization of ground equipment

路的功能用锁相模块以及 Labview 程序进行替代。经改进,只需要 14 cm×10 cm×5 cm 的锁相模块以及 Labview 程序即可完成激光调制和采集信号的处理工作(图 8c)。

2.1.4 Labview 控制软件

基于图形化编程平台 Labview 软件编写了配套程序,用于控制仪器的各个模块,对探测到的信

号进行处理以及完成人机交互功能。软件界面如下图 9 所示:

运行程序后,点击运行按钮后,就可以在气体浓度界面上读出所需要的 CH₄ 以及 CO₂ 信息。可以在保存路径栏里根据实际的需要,将浓度信息保留到所需要的文件夹,还可通过文件名栏输入想要保存成的文件名称。

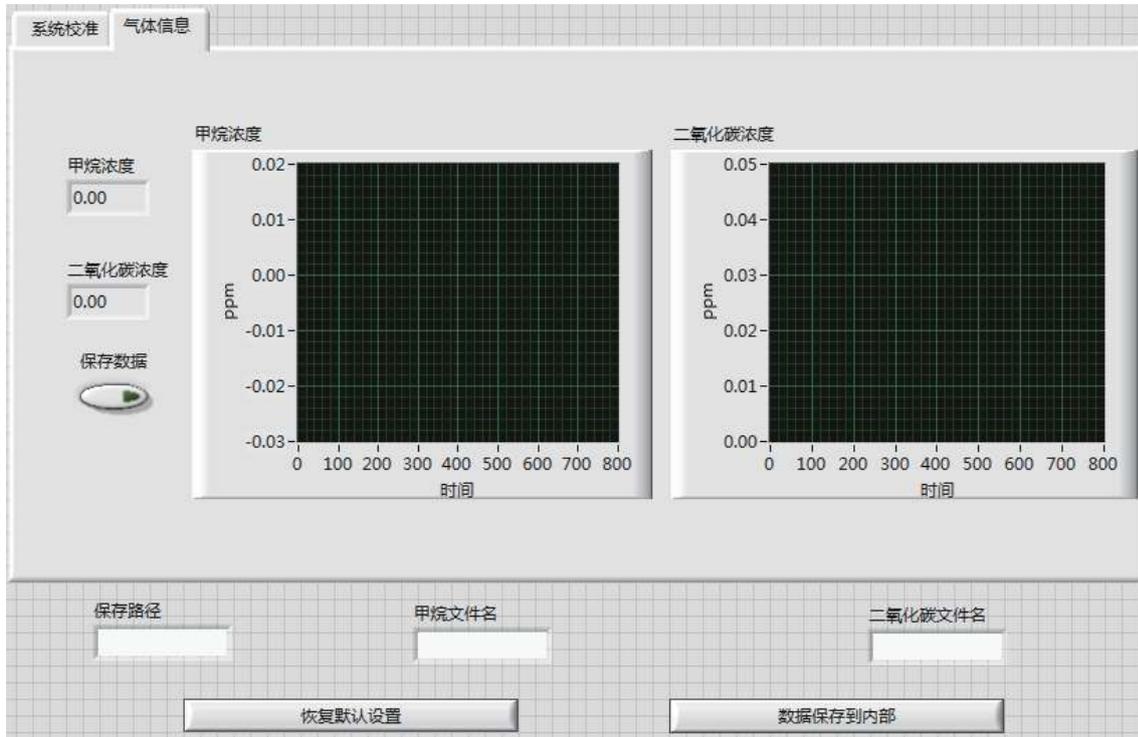


图 9 Labview 软件控制界面

Fig.9 Labview software control interface

2.2 TDLAS 光纤气体传感监测系统测试

2.2.1 CH₄ 和 CO₂ 气体浓度测试

以 (50~500)×10⁻⁶ 浓度的 CH₄ 气体为标准进行检测。采用 1 653.72 nm 激光器对 CH₄ 气体进行测

量,激光驱动器设置温度为 24 ℃,低频锯齿波驱动电压范围是-40~30 mV,信号电压与激光器电流的转换率为 0.25 A/V,频率为 10 Hz,气室长度为 2.4 m,余弦信号频率为 20 kHz,振幅为 100 mV,相位差为 270°,气体温度为 293 K,气压为 101 kPa。每个浓

度获取 50 个数据, 取算数平均作为该浓度下的二次谐波幅值以减小误差, 对测得的结果进行了多项式拟合, 结果如图 10 所示。R² 值为 0.998 6, 完全能够满足气体检测的要求。

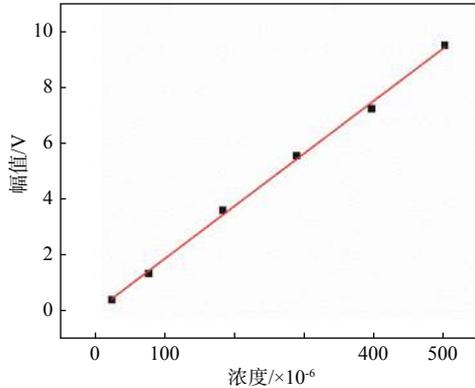


图 10 CH₄ 气体浓度标定结果

Fig.10 CH₄ concentration calibration results

以 (100~500)×10⁻⁶ 浓度 CO₂ 气体为标准进行检测。每个浓度同样是获得 50 个数据, 取算数平均作为该浓度下的二次谐波幅值以减小误差。激光驱动器设置温度为 25 ℃, 低频锯齿波驱动电压范围是 100~200 mV, 气室长度为 2.4 m, 余弦信号频率为 20 kHz, 振幅为 100 mV, 相位差为 135°, 气体温度为 293 K, 气压为 101 kPa。对测得的结果进行了多项式拟合, 结果如图 11 所示。R² 值为 0.990 1, 完全能够满足气体检测的要求。

2.2.2 测试稳定性评价

稳定性对于仪器至关重要, 它决定了测量时能否得到可靠的数据, 为此开展了光纤气体传感监测仪器稳定性验证。在传感气室中充入一定浓度的气体, 设置固定的时间间隔进行采样, 观察测量时间内的数据变化情况。

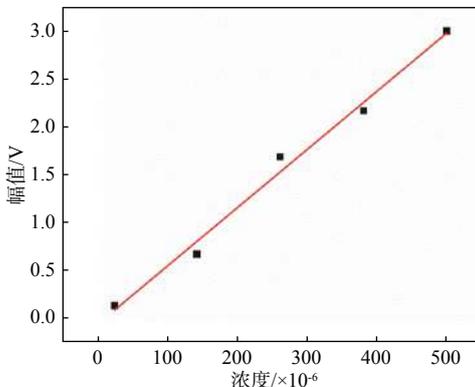


图 11 CO₂ 气体浓度标定结果

Fig.11 CO₂ concentration calibration results

首先, 在气室中充入浓度 500×10⁻⁶ 的 CH₄ 气体, 每隔 5 min 采样并存储数据, 50 次采样数据如图 12

所示。用标准差来衡量数据的离散程度, 数据的最大值为 528.664×10⁻⁶, 最小值为 479.715 3×10⁻⁶, 算数平均值为 504.779×10⁻⁶, 标准差为 11.932 5×10⁻⁶。因此, 对于 CH₄ 气体检测仪器表现出较好的稳定性。

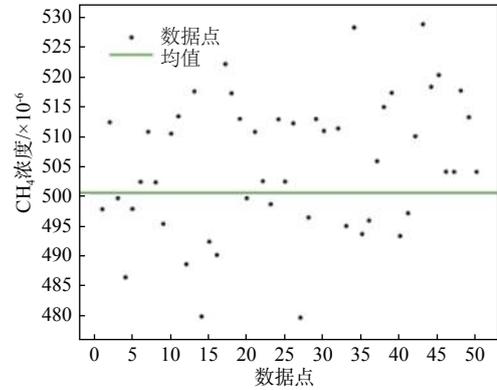


图 12 CH₄ 气体稳定性测试结果

Fig.12 CH₄ gas concentration stability test results

其次, 在气室中充入浓度 500×10⁻⁶ 的 CO₂ 气体, 每隔 5 min 采样并存储数据, 50 次采样数据如图 13 所示。用标准差来衡量数据的离散程度, 数据的最大值为 541.455 5×10⁻⁶, 最小值为 442.465×10⁻⁶, 算数平均值为 491.609 3×10⁻⁶, 标准差为 28.142 4×10⁻⁶。因此, 对 CO₂ 气体检测仪器表现出较好的稳定性。

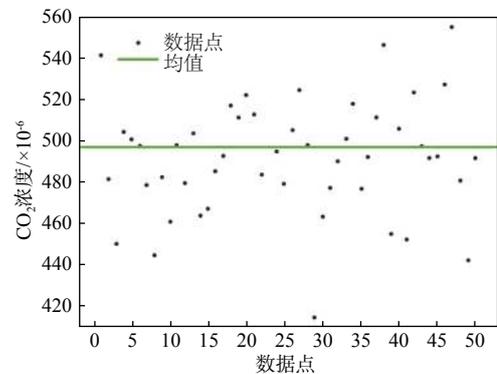


图 13 CO₂ 气体稳定性测试结果

Fig.13 CO₂ gas concentration stability test results

3 结论

针对现阶段海域天然气水合物试采井筒内气体成分实时监测手段的不足, 本研究利用光纤抗干扰、抗腐蚀能力强的特点, 研发了一套基于 TDLAS 原理的光纤气体传感监测系统, 实现了 CH₄、CO₂ 气体浓度测量。依据天然气水合物开采生产井工况, 完成测试系统硬件小型化、抗干扰改良、编制控制与处理软件, 最终形成一套设备样机。经测试和

验证, 光纤气体传感监测系统具备对 50×10^{-6} 以上浓度 CH_4 、 100×10^{-6} 以上浓度 CO_2 的有效稳定测量能力。该技术方法进一步丰富了水合物生产井内 CH_4 等气体监测, 为发展我国海域天然气水合物产业化开发装备体系提供了有效支撑。

参考文献:

- [1] BOSWELL R, MARSTELLER S, OKINAKA N, et al. Viable long-term gas hydrate testing site confirmed on the Alaska North Slope[J]. *Fire in the Ice*, 2019, 19(1): 1-22.
- [2] 申志聪, 王栋, 贾永刚. 水合物直井与水平井产气效果分析: 以神狐海域SH2站位为例[J]. *海洋工程*, 2019, 37(4): 107-116.
- [3] 杜卫刚. 天然气水合物试采技术[J]. *油气井测试*, 2019, 28(1): 20-24.
- [4] 孙小辉, 孙宝江, 王志远, 等. 超临界 CO_2 钻井筒水合物形成区域预测[J]. *石油钻探技术*, 2015, 43(6): 13-19.
- [5] 黄芳飞, 张旗, 何涛, 等. 海域天然气实物监测井技术进展与挑战[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(27): 21-30.
- [6] 何涛, 卢海龙, 林进清, 等. 海域天然气水合物开发的地球物理监测[J]. *地学前缘*, 2017, 24(5): 368-382.
- [7] WILSON A. System monitors sandface for deepwater offshore gas hydrate production[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2014, 66(9): 102-105.
- [8] 丁莹莹, 何泽新, 李世念, 等. 光纤传感监测技术在工程地质领域中的应用研究进展[J]. *矿产勘查*, 2019, 10(8): 2078-2085.
- [9] 庞洪晨, 崔记芳, 王安琪. 光纤监测技术在天然气管道清管跟踪中的应用[J]. *石化技术*, 2019, 26(11): 358-338.
- [10] 刘杰, 董洋, 古明思, 等. 基于TDLAS技术的吸入便携式甲烷探测仪研制[J]. *量子电子学报*, 2019, 36(5): 521-527.
- [11] 李奥奇, 王彪, 许玥, 等. 用于 CH_4 气体TDLAS检测系统的信号发生电路研制[J]. *激光杂志*, 2019, 40(12): 6-9.
- [12] 曹榕, 康信文, 傅鸣, 等. 基于TDLAS技术气体浓度测量的快速拟合方法[J]. *传感技术学报*, 2020, 33(2): 232-237.

DEVELOPMENT OF CH_4 - CO_2 OPTICAL FIBER GAS SENSOR MONITORING INSTRUMENT FOR NATURAL GAS HYDRATE PRODUCTION WELL

CHEN Qiang^{1,2}, LIU Kun³, LIANG Yu³, SUN Jianye^{1,2}, LI Yanlong^{1,2}, WU Nengyou^{1,2*}, LIU Changling^{1,2}

(1 Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266237, China; 2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3 Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The development of natural gas hydrate has attracted great attention from all over the world. Japan, China and some other countries have successfully implemented the trial production at sea, which further confirmed the resource potential and development feasibility of gas hydrate. However, the monitoring methods for gas composition in production well are far from perfect up to date, which restricts the production process evaluation and risk prediction. Based on the principles of TDLAS, a set of gas composition sensing and monitoring system for methane and carbon dioxide is designed, and the miniaturization and anti-interference improvement are realized according to the gas hydrate production well conditions. It is verified that the developed optical fiber gas composition monitoring instrument is effective and stable for measurement of CH_4 with concentration above 50×10^{-6} and CO_2 with concentration above 100×10^{-6} .

Key words: natural gas hydrate; optical fiber gas sensor; tunable diode laser absorption spectroscopy; methane; carbon dioxide