

文章编号:1001-5078(2017)09-1137-05

· 红外技术及应用 ·

随钻检测用微型红外甲烷气体传感器

刘延祥¹, 李 铁¹, 姚金志², 周发举², 周建立², 周 宏¹, 王 翊¹

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200233;

2. 中石化胜利石油工程有限公司地质录井公司, 山东 东营 257064)

摘 要: 为了满足石油勘探过程钻井液中甲烷气体同步检测分析的需要, 实现甲烷气体随钻检测的目标, 本文设计了一种可集成于钻具内的随钻检测用微型红外甲烷气体传感器。首先利用 Hitran 数据库对甲烷气体的红外吸收峰进行了对比分析, 确定了探测器滤光片的中心波长; 然后利用光学仿真软件 TacePro 对腔体内的光线传播方向进行了光线追迹分析, 并对到达探测器 2 个接收面的光强分布进行了模拟分析, 确定了光学腔体设计的合理性, 随后根据红外气体传感器的工作原理设计了相应的工作电路。测试结果表明该传感器对甲烷气体的检测精度在常温下优于 0.5% F. S., 在 120 °C 下优于 0.8% F. S.; 常温下实现了对甲烷饱和水溶液中脱出的微量甲烷气体的检测, 可以满足甲烷气体随钻检测的需要, 在石油钻井行业的随钻检气检测领域具有广阔的应用前景。

关键词: 随钻检测; 甲烷; 红外; 微型; 气体传感器

中图分类号: TN219; TP212.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2017.09.015

Miniature infrared methane gas sensor for measurement while drilling

LIU Yan-xiang¹, LI Tie¹, YAO Jin-zhi², ZHOU Fa-ju², ZHOU Jian-li², ZHOU Hong¹, WANG Yi¹

(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200233, China;

2. Geo-logging Company, Sinopec Shengli Petroleum Engineering Co. Ltd., Dongying 257064, China)

Abstract: In order to meet the needs of synchronous analysis of methane gas in drilling fluid and realize the goal of methane gas measurement while drilling (MWD), a miniature infrared methane gas sensor for MWD is designed. First, the infrared absorption peak of methane gas was compared and analyzed with Hitran database to determine the center wavelength of the detector filter. Then the optical simulation software TacePro was used to analyze the light propagation direction of the cavity and the light intensity distribution of the two receiving surfaces of the detector, which can determine the rationality of the optical cavity design. Finally, the corresponding working circuit is designed according to the working principle of infrared gas sensor. Experimental results indicate that the detection accuracy of the sensor is better than 0.5% F. S. at room temperature and better than 0.8% F. S. at 120 °C. The detection of trace methane gas in the saturated aqueous solution of methane can be realized at room temperature, which can meet the needs of methane gas measurement while drilling. This sensor has a wide application prospect in the field of oil drilling.

Key words: drilling detection; methane; infrared; miniature; gas sensor

1 引 言

石油作为国家的一种重要能源, 随着经济的发展, 人们对其依赖性不断加强, 石油的开采量不断加

大, 从而导致开采的难度逐渐变大。作为勘探钻井找油最直接的手段——录井技术应运而生, 其通过分析钻井过程中返回的固体、液体、气体等物质的信

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (No. 2013AA064701; No. 2015AA042602) 资助。

作者简介: 刘延祥 (1978 -), 男, 硕士, 工程师, 主要从事红外气体传感器方面的研究。E-mail: liuyanxiang@mail.sim.ac.cn

收稿日期: 2017-02-02

息,对油气层进行分析、评价。气测录井作为录井的一种手段是基于地层中烃类气体的组分、含量同地层油气的相关性进行工作的,其通过脱气器获得从井底送上来的钻井液所携带的气体,对其组分和含量进行检测、分析,从而对油气层进行判断、识别,一直被认为是鉴别石油储集层的主要手段之一。二十世纪五十年代人们开始将气相色谱技术应用于石油勘探,钻井液送到地面上后通过脱气器将钻井液中含有的部分烃类气体从钻井液中分离出来,通过特定的方式送入到色谱仪等设备进行检测分析,对油气层进行识别。但是此过程获得的油气信息相对滞后,不能实时获得钻井地层的油气信息,且钻井液送到地面的过程中气体成分可能会发生变化从而造成获得油气信息不准,因此人们希望将钻井液内烃类气体的检测从地面转移到地下,从井外转移到井内,实现钻井与油气检测的同步。针对钻具装置空间小的特点,人们开展了随钻气体检测装置小型化的研究,以便能够集成于钻具内,从而实现油气层的快速发现与识别。目前能够小型化并可以应用于随钻轻烃气体检测的主要技术有光电检测技术、MEMS 传感器技术、微型色谱技术等^[1-3]。欧美国家先后在光电检测模块、MEMS 传感器等方面申请了一系列适用于随钻检测装置的专利,开发出了可下井的微型色谱仪,并设计了相关集成用的短节,推出了随钻气体检测的产品^[4-5]。国内在光电检测技术、MEMS 传感器技术、微型色谱技术等方面同样开展了相关研究工作,开发出了多款适用于环境检测、煤矿安全等场合的红外气体传感器和 MEMS 气体传感器等微型气体检测装置^[6-14],但是针对钻井环境的气体检测装置的研究相对较少,尚未有具有自主知识产权的随钻气体检测装备,针对这一情况本文提出了一种适用于随钻检测的甲烷红外气体传感器。

2 工作原理

红外气体传感器基于非色散红外吸收的原理,利用待测气体的红外特征吸收峰进行检测,其工作原理为:红外光源辐射出的红外光通过充满待测气体的气室(其中待测气体红外特征吸收峰对应波长的红外光部分被待测气体吸收),然后透过滤光片(其中心波长对应待测气体红外特征吸收峰的峰值)到达探测器接收面,探测器将其转化为电信号输出。气体浓度测量的过程伴随着待测气体对红外

光源发出的红外光中待测气体红外特征吸收峰对应部分红外光的吸收,待测气体浓度不同,被吸收的红外光多少也将不同,从而到达探测器接收面的红外光强度将随着腔室中待测气体浓度的变化而变化,而探测器输出的电信号将随着接收红外光强的变化而变化,因而腔体中待测气体浓度的变化直接影响着探测器输出信号的大小,探测器输出信号的变化直接体现了待测气体浓度的变化。

3 系统设计

3.1 探测器滤光片中心波长的选择

待测气体红外吸收的强弱直接影响传感器的精度和灵敏度,待测气体红外吸收峰即滤光片中心波长的选择成为红外气体传感器设计中至关重要的环节。甲烷气体红外光谱如图1所示。

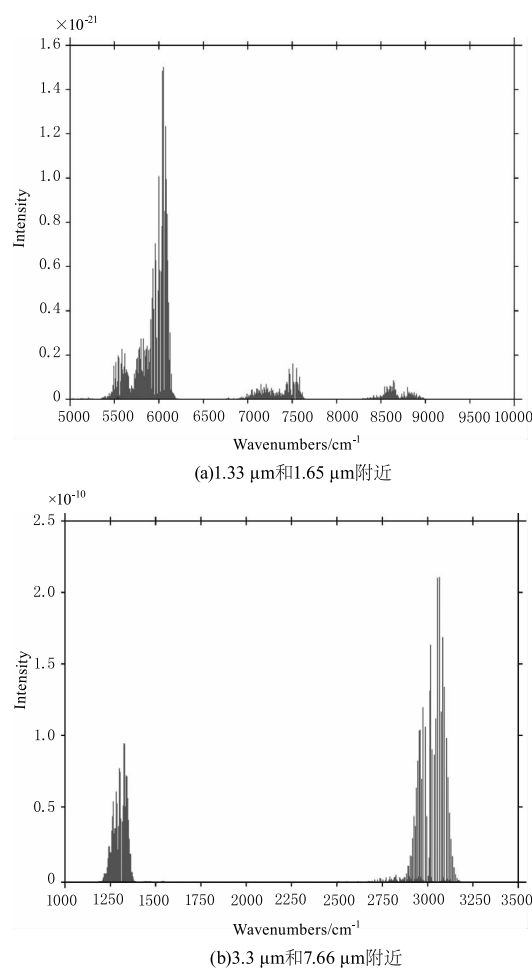


图1 甲烷红外吸收谱图

Fig. 1 Infrared absorption spectrum of methane

由图1可看出甲烷在近红外存在1.33 μm 和1.66 μm 两个特征吸收峰,在中远红外存在3.31 μm 和7.66 μm ,其中甲烷对波长3.31 μm 的吸收强度

分别是 $1.33\ \mu\text{m}$ 的 1300 多倍, $1.66\ \mu\text{m}$ 的 160 多倍, $7.66\ \mu\text{m}$ 的 2 倍多。同时鉴于本文选用白炽灯泡作为红外光源,其辐射波长超过 $5\ \mu\text{m}$ 的红外光均被玻璃外壳吸收,因此本文选择 $3.31\ \mu\text{m}$ 的特征吸收峰进行甲烷气体的检测,探测器滤光片中心波长参数定为 $3.31\ \mu\text{m}$ 。

3.2 光路设计及光学仿真

针对携带甲烷气体传感器的钻杆内部空间尺寸狭小的特点,本文开展了传感器小型化研究,设计了如图 2 所示的“扁担”式折叠光路,红外光源发出的红外光经抛物面及 2 个 45° 角的平面镜反射后到达探测器接收面。



图 2 腔体结构图

Fig. 2 Cavity structure

为验证光路设计的合理性,本文选择光学仿真软件 TracePro 进行了光学分析。首先将光源类型设置为黑体,反射面和腔体内表面设置为镜面反射,对红外光源发出的红外光在腔体内部的传播进行了光线追迹分析,如图 3 所示。从图 3 看出红外光源发出的光线经大部分经抛物面反射后到达第 1 反射面,小部分直接照射在第 1 反射面;到达第 1 反射面的光线经第 1 反射面反射后大部分直接到达第 2 反射面,小部分经侧壁反射后到达第 2 反射面;所有到达第 2 反射面的光线经第 2 反射面反射后进入到探测器接收面。此仿真结果为腔体内表面的加工及表面处理提供了至关重要的理论依据。

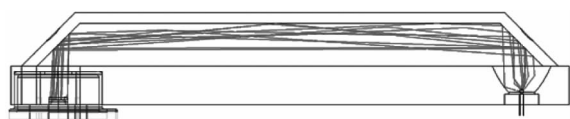


图 3 光线追迹仿真图

Fig. 3 Ray trace simulation diagram

接着将探测器测量、参考接收面设置为吸收面,对到达探测器测量、参考接收面的光强分布进行仿真分析,其结果分别如图 4、图 5 所示。

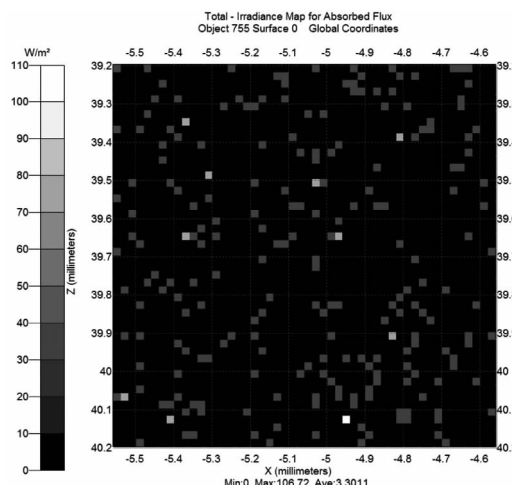


图 4 信号接收面光强仿真分布图

Fig. 4 Light intensity simulation distribution of the signal receiving surface

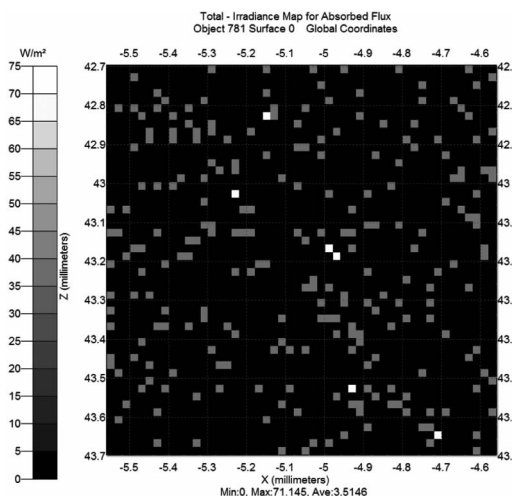


图 5 参考接收面光强仿真分布图

Fig. 5 Light intensity simulation distribution of the reference receiving surface

从图 4、图 5 看出光源到达探测器参考和测量接收面的光强基本相同,红外光源发出的光经过反射后均匀分布在探测器接收面。

3.3 电路设计

红外气体传感器工作示意图如图 6 所示,根据其工作原理设计了相应的光源调制电路、微弱信号放大电路、温度检测电路、信号处理电路、外部数据存储电路以及 485 通讯电路等相关电路。

4 测试结果

4.1 常温性能测试

本文分别测试了常温下传感器在 $0 \sim 10\%$ 和 $0 \sim 100\%$ 两个区间对甲烷的响应情况,如表 1 所示,其误差不大于 $0.5\% \text{ F. S.}$ 。

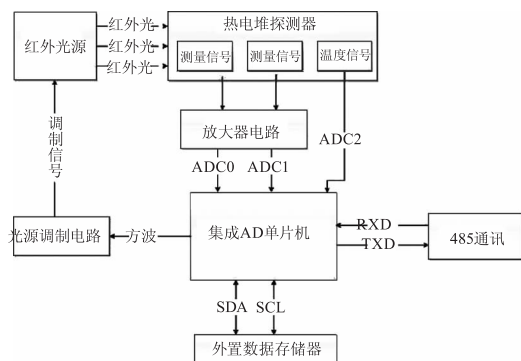


图 6 红外气体传感器工作示意图

Fig. 6 Infrared gas sensor schematic diagram

表 1 常温下传感器测试数据

Tab. 1 Sensor test data at room temperature

通气浓度 (vol%)	传感器示值 (vol%)	误差 (F. S. %)
0	0.06	0.06
1	0.96	0.04
3	2.95	0.05
5	4.97	0.03
7	6.97	0.03
10	9.94	0.06
30	29.96	0.04
50	49.90	0.10
70	69.50	0.50
100	99.60	0.40

4.2 120 ℃ 性能测试

鉴于随钻检测的高温环境,本文对 120 ℃ 下传感器对甲烷气体的响应进行了测试,如表 2 所示,其误差不大于 0.8% F. S.。

表 2 传感器 120 ℃ 下测试数据

Tab. 2 Sensor test data at 120 ℃

通气浓度 (vol%)	传感器示值 (vol%)	示值误差 (F. S. %)
0	0.08	0.08
1	0.94	0.06
3	2.96	0.04
5	4.94	0.06
7	7.06	0.06
10	9.90	0.10
30	29.88	0.12
50	49.41	0.59
70	69.24	0.76
100	99.41	0.59

4.3 模拟检测

为验证本文研制传感器的适用性,本文采用水中溶解甲烷气体模拟了钻井液的情况,测试过程为:常温先后将 200 mL 甲烷和 2 L 水注入到密闭容器中,加压至 10 MPa,然后通过机械减压,将溶有甲烷的水通入装有脱气膜的测装置的下侧,压缩空气作为载气以 10 mL/min 流量将经过脱气膜分离后的甲烷气体送入传感器检测腔室,其检测结果如图 7 所示,可看出经过载气稀释后的甲烷浓度最大值为 0.17% Vol。

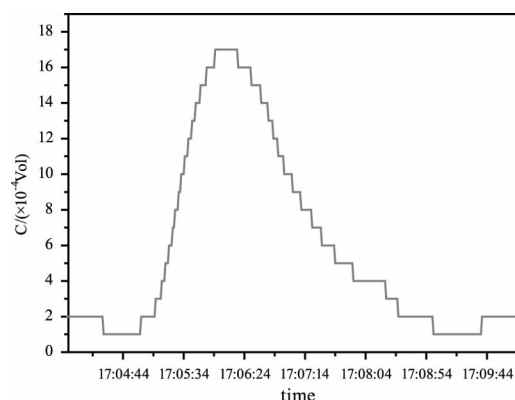


图 7 甲烷饱和和水溶液中甲烷脱出测试曲线

Fig. 7 Curve of methane emission in saturated aqueous methane

5 结论

本文根据石油钻井行业随钻气体检测设备小型化的要求,提出了一种微型甲烷红外气体传感器,介绍了红外气体传感器的工作原理,借助 Hitran 数据库对甲烷气体的红外吸收峰进行了对比分析,确定了探测器滤光片参数,接着通过光学仿真软件 TracePro 对所设计的气室内腔体“扁担”式折叠光路的光线传播及到达探测器接收面的光强进行了仿真分析,然后设计了相应的配套电路,最后对分别测试了传感器在常态及模拟井下环境下的响应,测试结果表明研制的甲烷气体传感器在常温下精度优于 0.5% F. S.,在 120 ℃ 下精度优于 0.8% F. S.,同时常温下可实现饱和甲烷水溶液中脱出的微量甲烷气体的检测,可以满足甲烷气体随钻检测装置的需要,该传感器的研制为甲烷等烃类气体的随钻检测提供了一种选择方案。

参考文献:

- [1] WAN Yaqi, YAO Jinzhi, DAI Yongshou, et al. Research on the selection of high-temperature downhole combustible

- gas sensor [J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22 (19): 73–75. (in Chinese)
- 万亚旗, 姚金志, 戴永寿, 等. 高温井下可燃气体传感器选型研究[J]. 电子设计工程, 2014, 22(19): 73–75.
- [2] ZHOU Jianli, YAO Jinzhi. Infrared spectrum technique in mud logging gas detection[J]. Mud Logging Engineering, 2016, 27(3): 36–38. (in Chinese)
- 周建立, 姚金志. 红外光谱技术在录井气体检测中的应用分析与展望[J]. 录井工程, 2016, 27(3): 36–38.
- [3] LIN Zhaoxiang, WU Qi, LI Wei, et al. Application of differential optical absorption spectroscopy to geological logging [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21 (12): 3037–3042. (in Chinese)
- 林兆祥, 吴祺, 黎伟, 等. 差分吸收光谱技术在地质录井中的应用[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3037–3042.
- [4] ZHANG Wei. Progress of downhole gas detection technology while drilling[J]. Mud Logging Engineering, 2010, 21 (2): 51–54. (in Chinese)
- 张卫. 随钻井下气体检测技术进展[J]. 录井工程, 2010, 21(2): 51–54.
- [5] ZHANG Wei, ZHENG Chunshan, ZHANG Xinhua. New progress and development direction of foreign mud logging technology[J]. Mud Logging Engineering, 2012, 23(1): 1–4, 24 (in Chinese)
- 张卫, 郑春山, 张新华. 国外录井技术新进展及发展方向[J]. 录井工程, 2012, 23(1): 1–4, 24.
- [6] ZHU Hongxiu, SUN Liankun, WANG Zhonghua, et al. Design of infrared methane gas concentration detection system[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(5): 890–894 (in Chinese)
- 朱红秀, 孙连昆, 王忠华, 等. 红外甲烷气体浓度检测系统设计[J]. 应用光学, 2014, 35(5): 890–894
- [7] Qiulin Tan, Licheng Tang, Mingliang Yang, et al. Three-gas detection system with IR optical sensor based on NDIR technology[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 74: 103–108.
- [8] DONG Ming, SUI Yue, LI Guo-lin, et al. Mid-infrared carbon monoxide detection system using differential absorption spectroscopy technique [J]. Optoelectronics Letters, 2015, 11(6): 469–472.
- [9] ZHANG Jian, WAN Xiaofei. Application of gas logging in reservoir interpretation [J]. Petrochemical Industry Technology, 2016, 6: 130. (in Chinese)
- 张建, 万晓飞. 气测录井技术在储层解释评价中的应用研究[J]. 石化技术, 2016, 6: 130.
- [10] Ning Zhanwu, Sun Jianhai, Zhang Yanni, et al. Fabrication of micro packed gas chromatography column for gas analysis [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28 (6): 064122–1–064122–4.
- [11] LIU Shukai. Production of portable SF₆ gas phase chromatograph [J]. Journal of Jiujiang Vocational and Technical College, 2013, 2: 19–21. (in Chinese)
- 刘书凯. 便携式 SF₆ 气相色谱仪的研制 [J]. 九江职业技术学院学报, 2013, 2: 19–21.
- [12] JIANG Meng, FENG Qiaoling, WEI Yufeng, et al. Recent advance in miniaturization of photo-acoustic spectroscopy gas sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 2: 020006–1–020006–11. (in Chinese)
- 姜萌, 冯巧玲, 魏宇峰, 等. 小型化光声光谱气体传感器研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 2: 020006–1–020006–11.
- [13] CHENG Yue, LUO Xiaole, LIU Lei, et al. Study of absorption cell gas sensor with adjustable optical path [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(6): 56–58, 65 (in Chinese)
- 程跃, 罗晓乐, 刘磊, 等. 光程可调吸收气室气体传感器研究 [J]. 传感器与微系统, 2016, 35(6): 56–58, 65.
- [14] FENG Hongnian, XU Hu, REN Yan, et al. Development of on-line GC analyzer for natural gas [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2014, 43(2): 192–195, 199. (in Chinese)
- 冯红年, 徐虎, 任焱, 等. 天然气在线气相色谱仪的研制 [J]. 石油与天然气化工, 2014, 43(2): 192–195, 199.