

引用本文: 刘昌霞, 李健. 高温单模喇曼自校准监测系统设计[J]. 光通信技术, 2023, 47(2): 44-47.

高温单模喇曼自校准监测系统设计

刘昌霞, 李 健

(上海拜安传感技术有限公司, 上海 200120)

摘要: 为了保证油气井高温分布式温度测量的准确度, 设计了高温单模喇曼自校准监测系统, 分别介绍了系统中分布式喇曼测温系统、光纤光栅温度校准系统的工作原理, 并对系统的测温范围和测温精度进行了 800 °C 的高温监测实验。实验结果表明: 在测温距离为 0~1 km, 温度范围为 0~800 °C 条件下, 该系统的温度分辨率为 0.1 °C, 测温精度为 ± 2 °C, 基本满足高温分布式温度监测要求。

关键词: 高温; 单模喇曼散射; 光纤光栅; 自校准

中图分类号: TN914 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2023)02-0044-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.02.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of high temperature single mode Raman self-calibration monitoring system

LIU Changxia, LI Jian

(Shanghai Baiantek Sensing Technology Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: In order to ensure the accuracy of high temperature distributed temperature measurement in oil and gas wells, a high temperature single mode Raman self-calibration monitoring system is designed. The working principles of the distributed Raman temperature measurement system and the fiber grating temperature calibration system in the system are introduced, and the high temperature monitoring experiment of 800 °C is carried out for the temperature measurement range and accuracy of the system. The experimental results show that the temperature resolution of the system is 0.1 °C and the temperature measurement accuracy is ± 2 °C under the condition that the temperature measurement distance is 0~1 km and the temperature range is 0~800 °C, which basically meets the requirements of high temperature distributed temperature monitoring.

Key words: high temperature, single mode Raman scattering, fiber grating, self-calibration

0 引言

在开采石油的过程中, 石油井中的温度会升高, 地下的高温会随着石油的采出而向外界扩散, 对石油井的开采造成安全隐患问题, 故分布式温度监测是十分重要的环节。光纤传感技术能够在地下煤炭气化时, 对井内的温度进行有效地监测, 并能准确地记录石油井中温度的细微变化^[1-2]。

目前, 分布式喇曼散射技术对油气井监测的温度

范围为 20~350 °C, 测温精度为 ± 2 °C^[3]。为了测量地下煤炭气化中气化炉的燃烧温度, 需要使用分布式喇曼测温系统来测量更高的温度且能保证高温测量的准确度^[4]。因此, 本文设计高温单模喇曼自校准监测系统。

1 高温单模喇曼自校准监测系统设计

本文设计的高温单模喇曼自校准监测系统示意图如图 1 所示。系统主要包括脉冲光源、掺铒光纤放大器(EDFA)、带通滤波器、扫描光源、C 波段滤波器、99:1 耦合器、光开关、环形器、参考光纤、保温装置、测温光栅、镀金光纤、温度光纤光栅传感器、主控板、光学标准具、光电探测器、采集卡、50:50 耦合器、1 450 nm 波分复用器(WDM1)、1 663 nm WDM2、1 450 nm 带通滤波器、1 663 nm 带通滤波器、双路雪崩二极管(APD)、工控机等部分。

收稿日期: 2022-06-03。

作者简介: 刘昌霞(1989—), 女, 上海人, 硕士, 光学工程师, 2014 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 现任职上海拜安传感技术有限公司, 负责上海科技项目“轨道交通弓网关系光纤传感实时监测系统”, 曾参与了国家重大科学仪器设备开发重点专项“分布式光纤应变监测仪”研究工作。



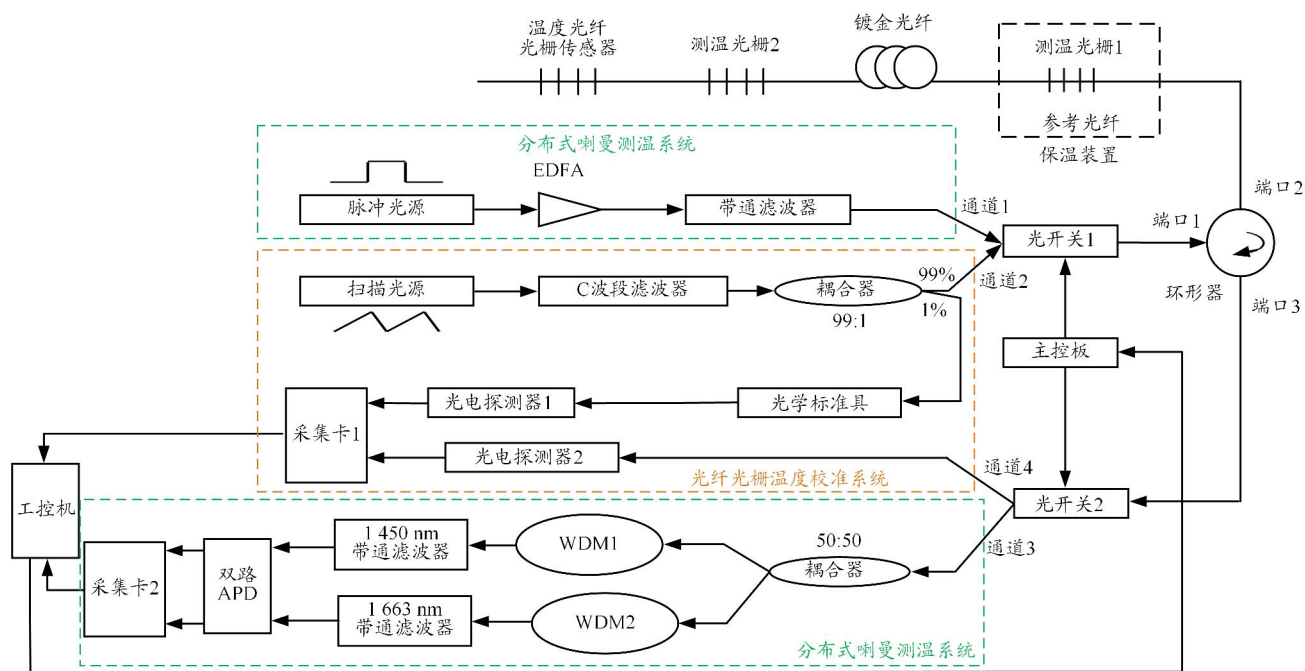


图1 高温单模喇曼自校准监测系统示意图

在分布式喇曼测温系统中,脉冲光源的工作波长为 1 550 nm,光纤光栅温度校准系统根据监测光纤的长度对脉冲宽度和脉冲重复频率进行调节。如果监测距离短,可以调窄脉宽,提高脉冲重复频率。首先,脉冲光源产生光脉冲,经过 EDFA 进行放大,再经过带通滤波器滤除带宽外的噪声。然后,由光开关 1 切换脉冲光源和扫描光源,再通过环形器将脉冲光源的光注入到参考光纤中。参考光纤的长度为 200~300 m,被放置到保温装置中,使其温度恒定。将被测量的镀金光纤一端接入到参考光纤尾端,另一端穿入到刚玉毛细管中进行封装。镀金光纤的背向散射光同样通过环形器端口 2 到端口 3,再经过光开关 2 切换喇曼背向散射光和光纤光栅背向散射光。光开关 1 和光开关 2 同步切换,当光开关 1 切换成脉冲光源(通道 1),光开关 2 则切换成喇曼散射光(通道 3);当光开关 1 切换成扫描光源(通道 2),光开关 2 则切换成光栅的背向散射光(通道 4)。经过光开关后,接入 50:50 光耦合器,分别通过 WDM1 和 WDM2 分离出 1 450 nm、1 663 nm 的反斯托克斯(Anti-Stokes)和斯托克斯(Stokes)光信号,经 1 450 nm 带通滤波器和 1 663 nm 带通滤波器滤波后,通过双路 APD 进行光/电转换、放大后的信号通过采集卡 2 的双通道进行同步采集。最终,将高速模拟信号转换成数字信号,并显示在工控机的上位机的界面上,可以直观地监测出光纤沿线的温度场分布曲线;同时,工控机的串口控制主控板,再使用主控电路板同时控制 2 个光开关。

在光纤光栅温度校准系统中,扫描光源经过 C 波段滤波器,将扫描光源的波长限制在 1 525~1 565 nm 波段。然后,经过 99:1 耦合器,1%的光用于参考通道,接入光学标准具、光电探测器 1 中,将光信号转化为电信号;99%的光用于测量通道,经过光开关 1、环形器端口 1 进入到端口 2,将扫描光源的光注入到镀金光纤中,在参考光纤内接入测温光栅 1,测温光栅 1 用于监测参考光纤的温度。在参考光纤的开始端 10 m 位置处接入测温光栅 2,测温光栅 2 的温度监测用于修正设备内参考光纤和外接镀金光纤接头处的插入损耗。镀金光纤的尾端接入温度光纤光栅传感器,该传感器适用于修正光缆传输带来的损耗,且能校正喇曼测温系统光纤尾端的测温精度。由测温光栅 1、测温光栅 2 以及温度光纤光栅传感器的反射光经过环形器端口 2 进入到端口 3,背向散射光经过光开关 2 的通道 4,然后通过光电探测器 2 进行光/电转换。光电探测器 1 和光电探测器 2 接入到采集卡 1 中,采集卡 1 和采集卡 2 同时通过千兆网传输,将采集到的数据传给工控机,用于显示光纤沿线的温度场分布曲线。

2 实验及数据分析

2.1 温度标定实验

为了准确监测高温单模喇曼自校准监测系统的温度,需要对其进行温度标定,温度标定实验系统如图 2 所示。实验温度范围为 0~800 ℃,初始温度设置为

刘昌霞,李健:高温单模喇曼自校准监测系统设计

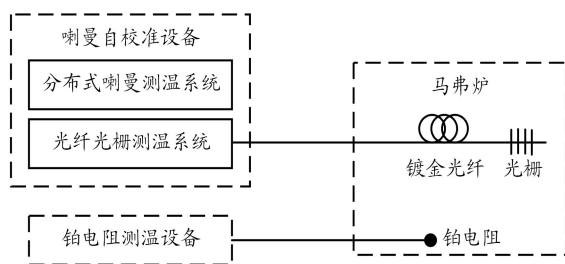


图2 温度标定实验系统

100 ℃,每次升温间隔为 100 ℃,每个标定点保温 1 h。其中,分布式喇曼测温系统选用镀金光纤初始 50 m 和尾端 50 m 两端作为标定光纤,该区域也包括测温光栅 2 和温度光纤光栅传感器。每间隔 30 s 切换 2 个系统 1 次,并采集 1 次数据。将铂电阻与光纤段以及光纤光栅放入到马弗炉中,对稳定以后的数据取平均值作为标定温度点对应的测量系统的值。分布式喇曼测温系统记录 Anti-Stokes 和 Stokes 在每个标定温度条件下的比值;光纤光栅测试系统记录光谱在每个标定温度条件下的中心波长值。本文分别将 2 个系统测量值与铂电阻的测量值进行数据拟合得到拟合公式。在实际测量温度的过程中,将测量值代入到拟合公式中,最终得出实际测量值。

2.2 高温数据测试和分析

本文根据系统设计方案搭建实验系统,如图 3 所示。高温喇曼自校准设备由分布式喇曼测温系统、光纤光栅测温系统、300 m 的参考光纤、测温光栅组成。镀金光纤的两端测温光栅 2 和温度光纤光栅传感器。测温光栅 1 的中心波长为 1 526.644 nm,测量温度范围为-40~85 ℃。本文通过测温光栅 1 测量设备内的工作温度,并预留出测温光栅 2 和温度光纤光栅传感器的工作波段范围,均不能在 1 525~1 565 nm 的波段内重叠。

在高温单模喇曼自校准监测系统中,本文使用法兰盘将 1 km 的单模镀金光纤连接到高温单模喇曼设备上,并在单模镀金光纤上采用飞秒光刻技术刻蚀光栅。经过温度标定后,光纤光栅测温系统的精度可以达到 ± 2 ℃,分布式喇曼测温系统的测温精度达到

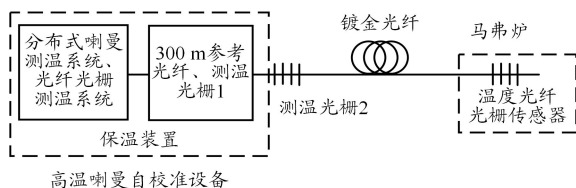
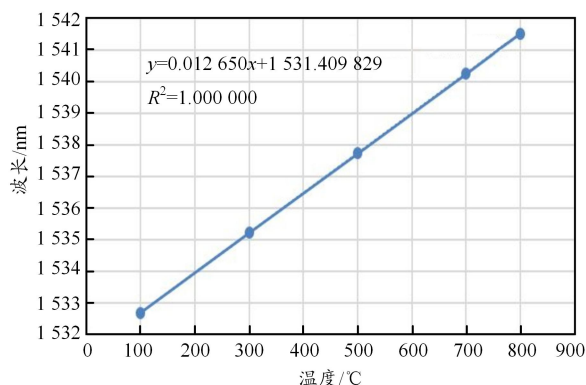


图3 实验系统图

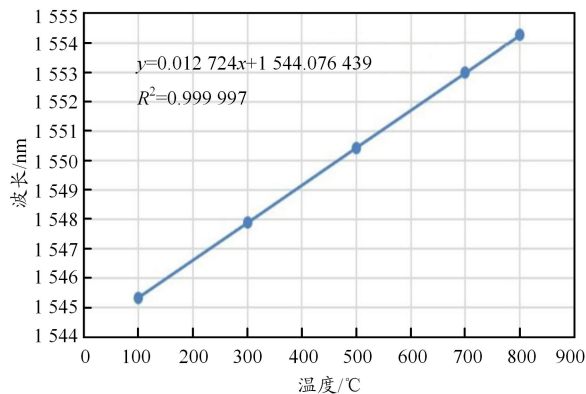
± 5 ℃,所以这 2 个系统可以进行系统温度相互校准。

在镀金光纤初始 10 m 位置处,刻蚀 10 mm 的测温光栅 2,使用法兰盘连接设备内参考光纤和设备外镀金光纤,由于插入损耗会使分布式喇曼测温系统的测试温度偏离准确温度,故需要根据测温光栅 2 的温度来准确校准分布式喇曼测温系统的镀金光纤初始端的温度。在镀金光纤的尾端 2 m 位置处,同样刻蚀 10 mm 的光纤光栅(温度光纤光栅传感器,用于准确测量镀金光纤的尾端温度)。由于镀金光纤采用刚玉管进行封装,使光栅位置处于自由状态,故光纤光栅只受到温度的影响。

将高温单模喇曼自校准设备切换至光纤光栅解调,对测温光栅 2 和温度光纤光栅传感器进行温度标定。首先,分别测量 5 个温度点,即 100、300、500、700、800 ℃,每个温度点保温 1 h,然后记录温度稳定后的光纤光栅解调出的波长,拟合出光纤光栅的温度系数。光纤光栅中心波长随温度变化的曲线如图 4 所示。经计算可得,测温光栅 2 的温度系数为 12.65 pm/℃,0 ℃的初始波长约为 1 531.410 nm;温度光纤光栅传感器的温度系数为 12.72 pm/℃,0 ℃的初始波长约为



(a) 测温光栅



(b) 温度光纤光栅传感器

图4 光纤光栅中心波长随温度变化的曲线

1 544.076 nm。光纤光栅中心波长随温度变化的线性相关系数 R^2 高达 0.999; 光纤光栅解调系统的分辨率为 0.1 °C, 测温精度达到 ± 2 °C。该测试证明用于校准的测温光栅 2 和温度光纤光栅传感器可以长期在高温条件下使用, 同时可以校准镀金光缆的测试温度。

为了验证高温单模喇曼自校准监测系统的测温范围和测温精度, 将设备切换至分布式喇曼测温系统, 测量单模镀金光纤长度为 1 km, 在镀金光纤尾端选取 10 m 的镀金光纤, 盘成光纤线圈放入马弗炉中, 缓慢地将马弗炉温度升温至 800 °C。在温度为 800 °C 时, 经过温度标定后, 重复测量 5 次系统的温度数据, 并每次保存整段光纤的温度原始数据, 经过 5 次光纤光栅校准分布式喇曼测温的实验结果如图 5 所示。可以看出, 5 次最高点的测量温度分别为 800.5、799.2、798.4、801.7、801.5 °C, 温度精度在 ± 2 °C 之内。此外, 由于镀金光纤只能短期工作在 800 °C, 因此在 10 m 光纤线圈的温度曲线上, 系统温度整体波动较大。

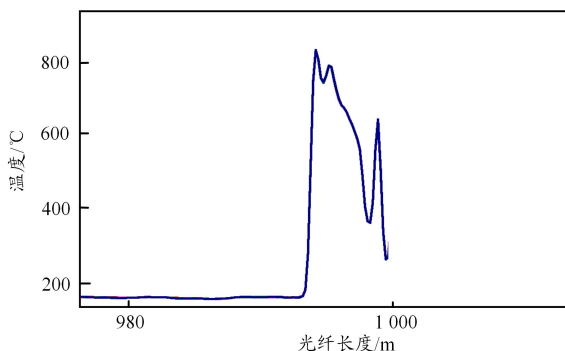


图 5 5 次重复温度测量曲线图

3 结束语

本文设计了高温单模喇曼自校准监测系统, 该系统是分布式喇曼测温系统和光纤光栅温度校准系统的结合, 通过在单模镀金光纤的前后两端刻蚀光纤光栅, 通过对光纤光栅测温系统测温来校准分布式喇曼光纤系统的测温精度, 可以监测镀金光纤沿线的温度分布。经过标定后的单模喇曼自校准监测系统测量 800 °C 的测温精度为 ± 2 °C, 可以用于高温油气井实时的温度监测, 满足了实际测量高温油气井的需求。

参考文献:

- [1] ERLANDSEN S, VOLD G, MAKIN G D. World's first multiple fiber-optic intelligent well: intelligent wells [J]. World Oil, 2003, 224(3): 29-32.
- [2] 张怀文, 李庭强. 油气井光纤测温技术及其应用[J]. 新疆石油科技杂志, 2009, 14(9): 22-25.
- [3] 刘媛, 雷涛, 张勇, 等. 油井分布式光纤测温及高温标定实验[J]. 山东科学, 2008, 21(6): 40-44.
- [4] 郑晓亮, 胡业林. 基于分布式光纤测温技术的井下电缆温度监测系统[J]. 煤炭工程, 2009(9): 19-21.
- [5] GUO Q, YU Y S, ZHENG Z M, et al. Femtosecond laser inscribed sapphire fiber Bragg grating for high temperature and strain sensing [J]. IEEE Transactions on Nano Technology, 2019, 18: 208-211.
- [6] 苟怡, 郭清华. 分布式光纤测温系统温度与定位补偿算法研究[J]. 检测技术与数据处理, 2021, 36(4): 83-86.
- [7] 高静怀, 汪文秉, 朱光明. 小波变换与信号瞬时特征分析[J]. 地球物理学报, 1997, 40(6): 821-832.