

文章编号:1673-9469(2025)04-0091-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.04.013

傅里叶变换红外光谱技术在火灾调查中应用研究

裴 锴¹, 石家旭², 王 嘉², 李泽楠², 韩 韬²

(1. 河北省邯郸市消防救援支队, 河北 邯郸 056004; 2. 中国船舶集团第七一八研究所, 河北 邯郸 056004)

摘要: 为弥补现有火灾调查技术的不足, 基于红外遥测技术研发了傅里叶变换红外光谱仪。该设备主要由遥测探头和二维转台构成, 遥测探头用于扫描有毒有害气体云团并采集红外光谱数据。然后, 经过数据的插值和滤波、快速傅里叶变换、光谱定标、数据库光谱格式转换、毒剂种类鉴别和相对浓度计算, 实现对危险毒害气体的远距离识别, 进行显示报警。为验证研发设备在火灾调查应用中的可行性, 在某化工园区和模拟火灾场景对傅里叶变换红外光谱仪的应用效果进行了实测, 结果表明: 研发的傅里叶变换红外光谱仪可以将预处理后的实测光谱与建立的有毒有害气体库进行对比, 从而标记出泄露气体的范围, 定位泄漏位置, 确定泄漏源。该设备不仅可为灭火救援提供参考指导, 还能在火灾调查中为确定调查范围、找准调查方向、提供数据支撑、强化人身保障等方面发挥积极作用。

关键词: 火灾调查; 傅里叶变换红外光谱技术; 傅里叶变换红外光谱仪; 光谱定标

中图分类号: X928.7

文献标识码: A

Research on the Application of Fourier Transform Infrared Spectroscopy Technology in Fire Investigation

PEI Kai¹, SHI Jiayu², WANG Jia², LI Zenan², HAN Tao²

(1. Handan City Fire Rescue Detachment, Handan, Hebei 056004, China;

2. The 718th Research Institute of China Shipbuilding Group, Handan, Hebei 056004, China)

Abstract: In order to make up for the shortcomings of the existing fire investigation technology, a Fourier transform infrared spectrometer was developed based on infrared remote sensing technology. The equipment is mainly composed of a telemetry probe and a two-dimensional turntable. The telemetry probe is used for the scanning of toxic and harmful gas clouds and the acquisition of infrared spectral data. After data interpolation and filtering, fast Fourier transform, spectral calibration, database spectral format conversion, poison type identification and relative concentration calculation, the remote identification of hazardous toxic gases is realized and the display alarm is performed. In order to verify the feasibility of the research and development equipment in the application of fire investigation, the application effect of Fourier transform infrared spectrometer was measured in a chemical industry park and simulated fire scene. The results show that the developed Fourier transform infrared spectrometer can compare the measured spectrum after pretreatment with the established toxic and harmful gas library, and then mark the range of leaked gas, locate the leak location and determine the leak source. The equipment can not only provide reference guidance for fire fighting and rescue, but also play an active role in determining the scope of investigation, finding the direction of investigation, providing data support and strengthening personal security.

Key words: fire investigation; Fourier transform infrared spectroscopy technology; Fourier transform infrared spectrometer; spectral calibration

收稿日期: 2025-07-23

基金项目: 河北省重点研发计划项目(22371702D)

第一作者: 裴锴(1975—), 男, 河北武安人, 硕士, 高级专业技术职务, 主要从事火灾事故调查、消防产品监管和科技研发工作。

火灾是各类灾害中极具破坏力的灾害之一,不仅会造成巨大的财产损失,还会严重威胁人民群众的生命安全^[1]。火灾的燃烧是一个非常复杂的化学反应过程,阴燃阶段产生的气体早于烟、光、热等火灾特征出现^[2]。探测火灾现场的有毒有害气体种类,对于高效救援和科学决策具有重要意义。为了研究火灾发生原因、统计火灾损失,需要综合运用复杂的学科知识来进行调查分析,从而探究火灾的发展规律,为此类灾害的科学预防提供依据。因此,火灾调查工作对于维护社会的安全与稳定具有重要的社会意义。然而,由于电化学方法探测气体种类依赖于传感器的使用寿命,受环境因素影响较大,环境温度、湿度均会影响探测的精度,尤其是在多组分气体测量时稳定性较低。电气法容易受环境中的干扰气体而产生虚假报警,并且测量范围比较小,无法探测低浓度的气体^[3-4]。

傅里叶变换红外光谱(Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)技术是通过测量干涉仪产生的干涉图,利用快速傅里叶变换算法来获取和研究光谱图像,与传统的方法相比,该技术在原理上具有高光通量、高分辨率、波段宽、多通道、测量精度高和杂散光低等优点,而且能适应很宽的光谱范围^[5]。

本文基于FTIR技术原理,开发了一款傅里叶变换红外光谱仪,应用红外遥测技术和广谱辨识技术,通过采集不同种类气体的红外光谱数据,结合先进的数据智能识别处理算法,实现对多种危险毒害气体的远距离识别和多组分混合气体的解析,实现有毒有害气体远距离探测。除可为灭火救援提供参考指导外,更可在火灾调查中为确定调查范围、找准调查方向、提供数据支撑、强化人身保障等方面发挥积极作用。

1 测量原理与设备设计及功能

光谱成像技术起源于多光谱遥感技术,融合了光学、电子技术、计算机技术、机械结构等多种学科,结合光谱技术和光学成像技术,可同时获取观测目标的二维空间信息和一维光谱技术。在整个光谱区内红外光谱所占光谱范围为0.78~25 μm,应用范围较为广泛。红外光谱技术具有在线实时监测、非接触、快速监测分析等优点。光谱成像技术根据分光原理的不同,可以分为滤光片型光谱仪、色散型光谱仪、傅里叶变换型光谱仪、二极管阵列

光谱仪、声光可调滤光器型光谱仪^[6],其中以FTIR技术应用最为广泛。

1.1 有毒有害气体浓度定量反演分析

最经典的傅里叶变换光谱仪是1891年迈克尔逊设计的双光束干涉仪^[7],干涉装置分为两种类型,即分波前干涉装置和分振幅干涉装置,迈克尔逊干涉仪是一种分振幅干涉装置,光源发出的光被分束器分为两束,一束光经透射到达动镜,另一束光经反射到达定镜,两束光分别经定镜和动镜反射回到分束器。动镜以恒定速度做直线运动,因而经分束器分束后的两束光形成光程差,产生干涉。得到的干涉图中含有光源的频率和强度信息,干涉光在分束器汇合后通过样品池,通过样品后含有样品信息的干涉光到达探测器。进入探测器及返回光源的光强变化是光程差的函数,然后通过傅里叶变换对信号进行处理,最终得到透过率或吸光度随波数或波长变化的红外吸收光谱图。由干涉的基本条件可知,干涉光的强度与干涉过程中的光程差密切相关,所以通过光强与光程差的关系即可得到干涉图。

假设准直单色入射光线的振幅为 A ,波数为 σ (单位是 cm^{-1} ,是波长 λ 的倒数),分束镜的反射率为 R ,透射率为 T ,在探测器上产生干涉的两光束干涉产生的干涉光强为

$$I(\Delta) = 2TRB(\sigma)(1 + \cos 2\pi\sigma\Delta) \quad (1)$$

式中, $B(\sigma)$ 为与波数相关的入射光强度, W/S^2 ; $I(\Delta)$ 为光强, W/S^2 ; Δ 为光程差, mm 。

从式(1)可以看出干涉光强 $I(\Delta)$ 为一个余弦函数,当 $\Delta = n\lambda$ (n 为整数)时,干涉光最强,当 $\Delta = (n + 0.5)\lambda$ 时,干涉光最弱。

将式(1)对波数进行积分,得到任意复色光的干涉图表达式:

$$I(\Delta) = \int_0^{\infty} 2TRB(\sigma)(1 + \cos 2\pi\sigma\Delta) d\sigma \quad (2)$$

式(2)中,干涉光强 $I(\Delta)$ 由两部分组成,即直流分量和交流分量,其中直流分量不包含光谱信息,因而,在复原光谱时,需滤除直流分量,保留交流分量,得到干涉函数:

$$I(\Delta) = \int_0^{\infty} 2TRB(\sigma) \cos 2\pi\sigma\Delta d\sigma \quad (3)$$

式(3)中, $I(\Delta)$ 是关于光程差 Δ 的函数,对于复色光,当 $\Delta = 0$ 位于零光程差处,干涉信号最强,随着 Δ 的增大,干涉光强逐渐减弱,直至为0。

对一个函数进行傅里叶变换计算,其实质就是将该函数进行还原,还原成各个基本频率成分的简谐波。同时,还能得到这些频率的组成与强度的关系。对式(3)进行傅里叶变换可得:

$$B(x) = \int_0^{\infty} I(\sigma) \cos 2\pi\sigma x d\sigma \quad (4)$$

式(3)和式(4)构成余弦傅里叶变换对。对于给定的波数 σ ,通过测量干涉数据,经过傅里叶变换,即可得到该波数对应的光谱数据^[8-9]。

红外光谱的定量分析是根据朗伯-比尔定律,红外光透过被测气体时,光强会发生变化,入射光的强度和透射光的强度满足光强在气体介质中随被测气体浓度和透射光路厚度按指数衰减^[10-12]的变化规律。

当光源照射红外样品后,分子会吸收特定波长的光,未被吸收的光会被探测器探测。光信号经模数转换后,再经过傅里叶变换,即可得到样品光谱。在被吸收的光的波数位置会出现吸收峰,吸收强度在一定范围内与通过样品的光程长度(l)和物质的浓度(c)成正比关系,该关系可用于定量分析红外光谱^[13]。样品在任意波数的吸光强度 $A(\nu)$ 为

$$A(\nu) = \epsilon cl \quad (5)$$

式中, ϵ 为摩尔吸光系数。

定量分析时,首先要选取已知浓度的标准样品,测量其在特定波长处的吸光度,获取光谱图,建立有毒有害气体库,对于未知浓度的样品,在相同的实验条件下测量并分析红外光谱中的吸收特征,根据建立的有毒有害气体库,对采集的原始光谱进行干涉图截取和插值处理,经傅里叶变换转换为红外光谱。对红外光谱进行基线校正、谱图平滑等数据处理,消除环境干扰等因素的影响,提取有效光谱信息。将预处理后的实测光谱与建立的有毒有害气体库进行对比,根据光谱相似度、特征峰位置等指标,基于朗伯-比尔定律,采用最小二乘法对实测的光谱与气体库图谱进行拟合计算,通过多次迭代调整样品厚度和样品浓度,当偏差值达到最小时,即可反演出特定波数上的相关气体浓度^[14-16]。定量分析系统由探测装置、云团和背景组成。探测装置获得的红外光谱由背景透过云团与云团自身辐射的红外光谱共同构成,因此,根据云团与背景温差造成的辐射量变化可以探测目标气体的存在。

1.2 傅里叶变换光谱仪系统设计构成及功能

本文研发的 FTIR 光谱仪主要由遥测探头、二维转台、主机和电源模块构成,如图 1 所示。电源模块用于为遥测探头供电,输入端连接 AC220V,输出 24 V 稳定电压给遥测探头供电。遥测探头主要由干涉仪系统、信号采集与处理系统、黑体定标模块和视频采集模块等组成,用于毒剂云团的扫描和远距离探测。干涉仪系统主要由红外辐射源、角反射器、分束镜、平面反射镜,角反射器支架、枢轴、摆臂和探测器等组成。两个角反射器关于枢轴对称分布,通过电机和枢轴驱动做摆扫运动,从而使这两束光线的光程差发生变化,每个角反射器的三个反射面均相互垂直,该结构能够保证任意入射光线均能以相反方向反射出去,使得干涉光能够在角反射器内发生回复反射^[17-19]。二维转台具备两轴转动功能,实现在方位和俯仰轴系上的定位,两轴均采用力矩电机直驱驱动,同轴安装码盘测角。主机是上位机软件运行平台,主要完成视频图像显示、报警信息获取与分析工作。设备性能介绍如表 1 所示。

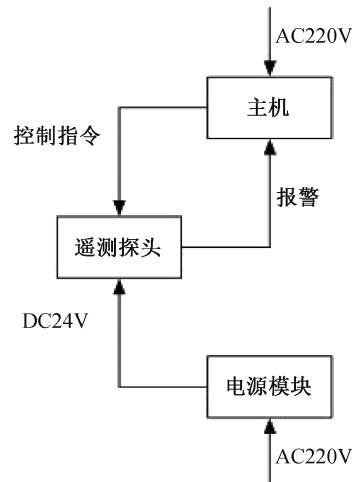


图 1 傅里叶变换光谱仪组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Fourier transform spectrometer components

表 1 设备性能

Tab. 1 Equipment performance

指标	详情
探测器类型	制冷器探测器
探测距离	最远 5 km
光谱分辨率	小于 2 cm ⁻¹
光谱探测速度	20 Hz
环境适应性	高温、低温、振动满足 GJB150A 相关要求
可探测气体	常见工业气体机有毒有害气体
安装方式	固定式、车载、无人机载

傅里叶变换红外光谱设备采用模块设计,实现设备在固定架设、车载、无人机机载等平台间的快速搭载转换,对多种有毒有害气体形成立体式遥测报警能力,可满足不同场景使用需求;充分利用各平台机动性强、视野开阔的优势,使监测能力显著增强。

通过将傅里叶变换红外光谱仪部署在消防侦察车上,可对 5 km 范围内 200 种以上有毒易燃危险气体实现非接触式大范围远距离动态监测,实现高灵敏度快速定性定量检测识别、及时报警。既能以高清可见光方式,也能以红外热成像形式显示检测区域现场、过程和检测结果,直观呈现气体动态分布和扩散趋势,可辅助溯源定位,其主要功能如下:(1)将单一的固态现场转变为多元的气态现场,将原本不可见的气态云团以图像呈现出来,使火灾发展具有了有形概念,这有助于人们更好地了解扩散蔓延规律,全面认识火灾,也为火灾调查工作带来全新的思路。(2)在火灾扑救阶段,即可在外围或远距离了解烟气成分和结构组成,有助于分析火灾现场情况,为现场勘验提供方向,为认定起火原因提供线索和证据。(3)通过判定火灾蔓延方向、扩散范围和现场变动情况,在不进入现场,仅从外围的情况下,就能预判火场中心位置,帮助确定起火部位、起火点、起火原因以及致灾素。(4)通过分析燃烧产物,辅助判定起火物种类。既能有效认定起火物,进而确定起火原因,也能排除某些不可能的起火原因,帮助判断火灾性质。尤其是在燃气爆炸现场或有助燃剂的放火现场,辅助确定泄漏点或助燃剂的类型。(5)依据火灾蔓延规律和现场燃烧情况,辅助计算起火时间,分析讨论可能的起火原因。(6)便于发现“不可见”检材,有利于气体检材的提取和现场判定,该方式较某些现场检测设备更为精准、快速和便捷。(7)对火灾现场进行全过程记录,便于数据建模和绘制现场图,为分析判断案情提供数据支持。(8)预先甄别火场中有毒有害气体,有针对性地指导火灾现场勘验人员做好现场防护,保障其生命健康安全。

2 傅里叶变换红外光谱设备实测试验

为检验本文设计的傅里叶变换红外光谱设备性能,使用配气装置、黑体、气体池、真空泵等装置,搭建了一套气体实测环境试验装置,如图 2 所示。结合二氧化硫、氨气和苯的特征光谱,如图 3

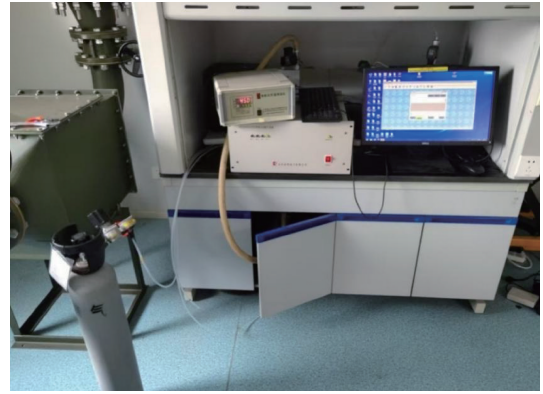


图 2 气体测试装置

Fig. 2 Gas testing setup

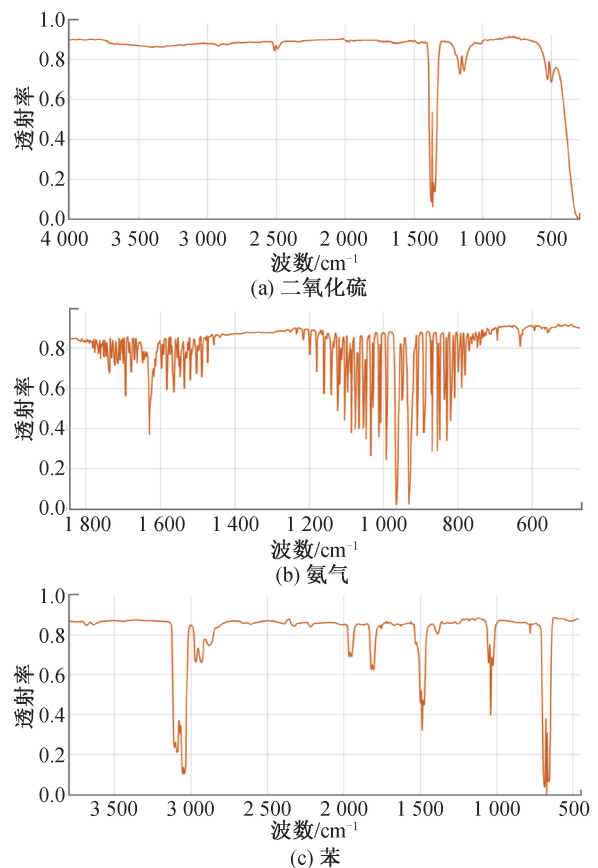


图 3 三种气体的特征光谱

Fig. 3 Characteristic spectra of three gases

所示,三种气体的特征红外光谱图波段分别在 $1\ 370, 1\ 000, 670\ \text{cm}^{-1}$ 附近,本文对不同浓度的三种气体进行了测试,经过对测试数据的处理,发现二氧化硫在 $950 \sim 1\ 100\ \text{cm}^{-1}$ 处的光谱特征峰信号较强,氨气在 $950 \sim 1\ 050\ \text{cm}^{-1}$ 处的光谱特征峰信号较强,苯在 $670\ \text{cm}^{-1}$ 处的光谱特征峰信号较强,通过对实测谱与标准谱进行对比,依据朗伯-比尔定律,采用最小二乘法对实测的光谱与标准谱进行拟合计算,反演出对应浓度。气体实测数据如图 4 所示。

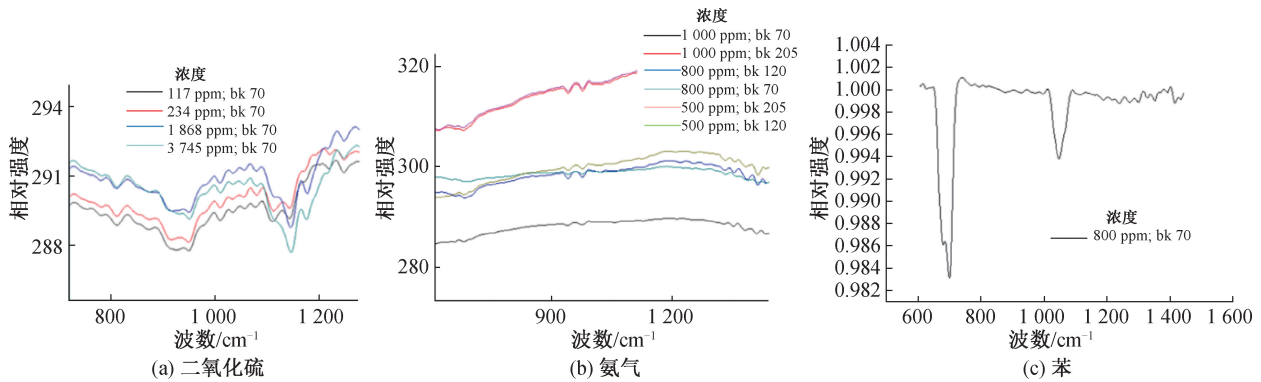


图 4 实测光谱图

Fig. 4 On-site measured spectra

可以看到,在 $1\ 150\ \text{cm}^{-1}$, $975\ \text{cm}^{-1}$ 和 $700\ \text{cm}^{-1}$ 波段,二氧化硫、氨气和苯气体有明显的光谱吸收。

为了验证设备在实际救灾中的应用效果,在某工业园区进行泄露气体测试,如图 5 所示。选择区域扫描模式,由图 6 可以看出,该设备能够对泄露出来的气体范围进行标记,定位出泄漏位置,确定泄漏源。同时通过模拟火灾场景,在武汉外场

实验基地开展实验。准备了规格为 $20\ \text{cm}\times 20\ \text{cm}$ 的废弃轮胎碎片,将其放置在距离实验装置 $1\ \text{km}$ 处,点燃轮胎碎片后,开启有毒有害气体光谱仪,对燃烧的轮胎烟雾进行探测,定位火源如图 7 所示,设备显示检测出二氧化硫,浓度为 $45\ \text{ppm}$ 。测试结果表明设备可以在火灾场景稳定工作,促进了遥测设备在火灾事故调查中使用,进一步检验和测试了设备的整体性能。



图 5 某工业园区现场实测图

Fig. 5 On-site measurement diagram of a certain industrial park



图 7 轮胎燃烧实地测试

Fig. 7 Field test of tire combustion

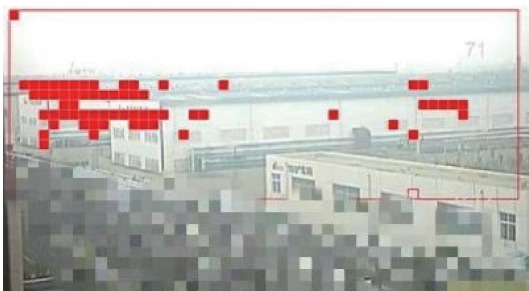


图 6 气体泄露及区域显示图

Fig. 6 Gas leakage and affected area diagram

3 结论

1) 建立了定量分析系统。通过遥测探头采集毒害气体的红外光谱数据,基于朗伯-比尔定律,经过定量反演分析,实现有毒有害气体的种类鉴别,并确定毒剂云团方位。

2) 验证了傅里叶变换红外光谱仪在现场检测环境的可行性。在某化工园区模拟火灾场景中对 FTIR 光谱仪进行了实测,设备成功定位出泄露位置。该设备不仅可为灭火救援提供参考指导,同时可为火灾调查在确定调查范围、找准调查方向、提供数据支撑、强化人身保障等方面发挥积极作用。

参考文献:

- [1] 李飞. 汽油对木材燃烧前后的影响研究[D]. 安徽:中国科学技术大学,2011.
LI F. Study on the influence of gasoline on wood before and after combustion [D]. Anhui: University of Science and Technology of China,2011.
- [2] 张志东,何诚,张明远,等. 无人机探测扑救森林阴燃火技术[J]. 林业机械与木工设备, 2019, 47(8):36-39.
ZHANG Z D, HE C, ZHANG M Y, et al. UAV detection-based forest smoldering fire suppressing technology [J]. Forestry Machinery&Woodworking Equipment, 2019, 47(8):36-39.
- [3] 汪涛. 基于傅里叶红外的 110 kV 高压电缆 PVC 外护套热解特性研究[D]. 重庆:重庆科技学院. 2023.
WANG T. Pyrolysis characteristics of PVC outer sheath for 110 kV high voltage cable based on Fourier infrared [D]. Chongqing: Chongqing University of Science and Technology, 2023.
- [4] 赵建华. 现代安全监测技术[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2006.
ZHAO J H. Modern safety monitoring technology [M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2006.
- [5] 魏周君. 基于傅里叶变换红外光谱分析的火灾气态产物定量监测技术研究[D]. 安徽:中国科学技术大学,2009.
WEI Z J. Study on quantitative monitoring technology of fire gaseous products based on FTIR [D]. Anhui: University of Science and Technology of China, 2009.
- [6] 王建宇,舒嵘,刘银年,等. 成像光谱技术导论[M]. 北京:科学出版社,2011.
WANG J Y, SHU R, LIU Y N, et al. Introduction to imaging spectroscopy technology [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [7] 吴瑾光. 近代傅里叶变换红外光谱技术及应用[M]. 北京:科学技术文献出版社,1994.
WU J G. Modern fourier transform infrared spectroscopy technology and its application [M]. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 1994.
- [8] 翁诗甫,徐怡庄. 傅里叶变换红外光谱分析:第3版[M]. 北京:化学工业出版社,2016.
WENG S F, XU Y Z. Fourier transform infrared spectroscopy analysis; 3rd edition [M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2016.
- [9] 李全臣,蒋月娟. 光谱仪器原理[M]. 北京理工大学出版社. 1999.
LI Q C, JIANG Y J. Principles of spectral instruments [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press. 1999.
- [10] 吴晗平. 光电系统设计方法实用技术及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2019.
WU H P. Optoelectronic system design methods, practical techniques, and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019.
- [11] 梁逸曾,俞汝勤. 分析化学手册[M]. 北京:化学工业出版社[M]. 2005.
LIANG Y Z, YU R Q. Handbook of analytical chemistry [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [12] 陆婉珍. 现代近红外光谱分析技术[M]. 中国石化出版社,2006.
LU W Z. Modern near infrared spectroscopy analytical technology [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2006.
- [13] 曲立国,刘建国,徐亮,等. 便携式 FTIR 的机动车尾气检测方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(6):1751-1757.
QU L G, LIU J G, XU L, et al. Portable FTIR vehicle exhaust detection method [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(6):1751-1757.
- [14] 赵建华,高明亮,魏周君,等. 基于傅里叶变换红外光谱技术的混合毒性气体定量分析研究[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(1):131-135.
ZHAO J H, GAO M L, WEI Z J, et al. Study on the quantitative analysis of multi-component toxic gases based on FTIR [J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11(1):131-135.
- [15] 高明亮. 基于傅里叶变换红外光谱技术的多组分气体定量分析研究[D]. 合肥:中国科学技术大学. 2010.
GAO M L. Study on multi-component gases quantitative analysis based on FTIR [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.
- [16] 潘玉珏,基于 FTIR 的多组分气体在线监测技术研究[D]. 杭州:中国计量大学,2019.
PAN Y J. Research on on-line monitoring technology of multi-component gas based on FTIR [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2019.
- [17] 张淳民. 干涉成像光谱技术[M]. 北京:科学出版社,2010.
ZHANG C M. Interference imaging spectroscopy [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [18] 王文桂. 干涉光谱仪[M]. 北京:宇航出版社,1987.
WANG W G. Interference spectrometer [M]. Beijing: Astronautical Press, 1987.
- [19] IO. B. 考洛米佐夫. 干涉仪的理论基础及应用[M]. 李承业,吴景文,秦南荣,译. 北京:技术标准出版社,1982.
IO. B. Kolomytsov. The theoretical basis and application of interferometer [M]. LI C Y, WU J W, QIN N R, translation. Beijing: Technical Standard Publishing House, 1982.

(责任编辑 王利君)