

红外成像光谱在泄漏气体处置中的应用研究

朱亮 邹兵 高少华 丁德武

中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院, 山东 青岛 266071

摘要 在石化生产过程中, 有害气体泄漏时有发生, 为了快速准确地确定泄漏气体种类, 以便及时给事故应急提供指导, 提出了基于傅里叶光学红外成像的分析方法, 通过远距离遥测识别泄漏气体种类。实验研究了光谱分辨率、气体排放流量对遥测识别的影响, 并且在某公司乙烯装置开展了现场泄漏检测与识别应用。识别实验和现场应用结果表明, 傅里叶光学红外成像分析方法可以快速定位泄漏气体位置, 并且识别气体种类, 正确检测并识别目标气体后, 进一步减小光谱分辨率和泄漏目标气体流量对气体识别的影响较小, 该方法有利于石化生产安全隐患排查与事故应急处置。

关键词 傅里叶光学; 红外成像; 图像处理; 泄漏气体; 安全

中图分类号 TN219 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.080701

Application Research on Infrared Imaging Spectroscopy in Leakage Gas Disposal

Zhu Liang Zou Bing Gao Shaohua Ding Dewu

Qingdao Safety Engineering Institute, China Petroleum and Chemical Corporation, Qingdao, Shandong 266071, China

Abstract The leakage of harmful gas occasionally happens in the production process of petroleum and chemical industry. In order to accurately determine the leakage gas types and provide emergency guidance on time, a new optical infrared imaging analysis method based on the Fourier optics is proposed for the identification of leakage gas types. The experiments also study the influence of spectral resolution, the flow of gas emission on telemetry recognition identification, and use the method to detect and identify leakage gas in an ethylene unit. The experiment and field application results show that Fourier optical infrared imaging spectrum analysis can locate the gas position quickly, and identify leakage gas type. After detecting and identifying target gas correctly, reducing the spectral resolution and gas flow has no influence on gas identification. This method is beneficial to finding safety troubles and dealing with emergency accidents.

Key words Fourier optics; infrared imaging; image processing; leakage gas; safety

OCIS codes 070.4790; 110.2970; 100.3008; 120.0280

1 引言

石油炼制、天然气开采及管道输送以及危险化学品运输过程中, 存在着大量的碳氢化合物气体、 SO_2 、 NO_x 、 NH_3 等可燃及有毒有害气体, 复杂的工艺、空间布局、腐蚀、振动、设备老化等原因容易造成气体泄漏, 给安全生产造成隐患。在气体泄漏事故中, 由于气体种类未知, 给事故应急处置、应急人员安全防护等带来不便。例如2010年8月, 武汉出现不明气体泄漏导致多人中毒; 2010年12月, 位于纽约的联合国总部出现不明气体泄漏导致人员紧急疏散, 都未能及时了解泄漏气体种类, 导致事故应急处置针对性不强。本文通过介绍傅里叶光学红外成像技术^[1], 引出了一种气体识别装置, 开展了实验室研究和现场应用。

2 傅里叶变换红外成像光谱技术

傅里叶变换红外成像光谱技术是傅里叶变换红外光谱技术和红外成像技术的结合, 能够同时获取目标

收稿日期: 2015-01-22; 收到修改稿日期: 2015-02-27; 网络出版日期: 2015-07-11

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAK13B05)

作者简介: 朱亮(1982—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事气体红外成像、光谱分析在石化企业泄漏检测中的应用等方面的研究。E-mail: zhul.qday@sinopec.com

的空间信息和光谱信息,经过处理后可以转换成包含目标二维空间信息和一维光谱信息的三维数据立方体,目前已被广泛应用于军事、卫星遥感、海洋、医药、石油化工、环保等领域^[2-4]。

2.1 傅里叶变换红外光谱技术

红外光谱属于分子振动转动光谱,由分子能级跃迁而产生^[5]。气体分子受到特定波长红外光源辐射时,分子吸收了某些频率的辐射,由其振动或转动引起偶极矩的净变化,产生分子振动或转动,能级从基态跃迁到激发态,使相应于这些吸收区域的透射光强度减弱,通过记录红外光的透射百分比与波数或波长的关系曲线得到气体红外谱线^[6]。不同分子受到辐射时产生的振动方式各不相同,这使得分子特征谱线具有高度唯一性,在特定波长的红外光辐射过程中,成为区分某种气体分子在某个特定区域是否存在的重要分析工具^[7]。傅里叶变换红外光谱技术利用计算机进行快速傅里叶变换处理,完成时域干涉图到频域光谱图的转换,得到气体红外特征谱线。

2.2 红外成像技术

红外成像技术是利用各种探测器来接收物体发出的红外线辐射,再进行光电信息处理,最后以数字图像的方式显示出来,并加以利用来探知、观察和研究各种物体的一门综合性技术。红外线辐射是自然界存在的一种最为广泛的电磁波辐射,对于人类生活的空间大气,这些辐射却是透明的,通过肉眼无法观察到^[8]。自然界中物质分子和原子产生无规则的运动,这种运动愈剧烈,辐射的能量愈大;反之,辐射的能量愈小。由于气体红外辐射特征谱线表征了某种特定气体的存在,而红外热成像技术可以让肉眼无法看到的红外线辐射成为可见影像,这种结合可以直观可视的方式查看某种气体物质的存在,并且精确判断其位置。

2.3 主要特点

傅里叶变换红外成像光谱技术具有以下特点:1)多路优点,与传统扫描单色仪相比,傅里叶变换红外光谱技术可以同时测量所有光谱元信号,测量速度快^[9];2)高灵敏度,傅里叶变换红外光谱技术没有入射和出射狭缝限制,因而光通量高,提高了测量灵敏度,有利于弱信号检测^[10];3)直观,结合红外成像技术可以直观可视的方式查看某种气体物质的存在。

3 实验装置

实验装置包括排气系统、数据采集单元和数据分析软件。排气系统可以调节排放气体流量,数据采集单元由傅里叶光学红外成像光谱仪构成,采集目标气体的空间信息和光谱信息,利用数据分析软件处理得到包含二维空间信息和一维光谱信息的三维数据立方体,进一步分析识别出目标气体种类。

3.1 数据采集单元

数据采集单元由加拿大Telops公司生产的Hyper-CAM傅里叶光学红外成像光谱仪构成,该光谱仪可以观测860~1285 nm波长范围的气体云团辐射,实时展现目标气体云团红外图像,绘制云团光谱图,光谱分辨率可以达到 0.25 cm^{-1} ,图1所示为Hyper-CAM光谱仪原理图。目标气体云团辐射的红外光经过分光器

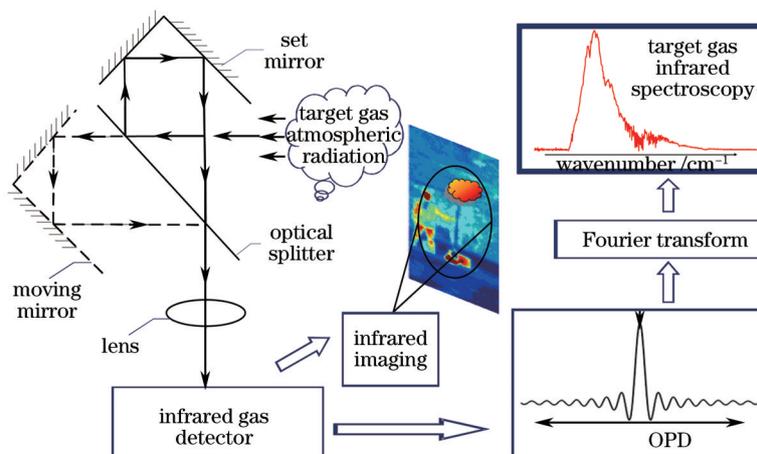


图1 傅里叶光学红外成像光谱仪原理图

Fig.1 Principle of Fourier optics infrared imaging spectrometer

分成相等的两部分,一半光束经过定镜反射,另一半光束经过动镜反射,之后两束光会聚在一起,投射在气体红外检测器上,由于动镜的移动,使两束光产生光程差(OPD),形成明暗相间的干涉图,通过快速傅里叶光学,得到目标气体以波长或波数为函数的光谱图^[11-12]。同时,气体红外探测器实时显现观测目标红外图像,包括视窗背景和目标气体气团。

3.2 数据分析处理

数据分析软件将红外图像和光谱图处理成为包含目标二维空间信息和一维光谱信息的三维数据立方体,通过气体物质红外特征谱线数据库对比,识别目标气体种类,并且在红外图像中附着不同颜色,图2是数据分析软件主界面。通过改变红外成像分辨率、光谱分辨率等参数,采集目标气体红外图像和光谱图数据立方体,之后预设多种目标气体,通过分析红外图像区每个像素的光谱图,识别出目标气体种类。

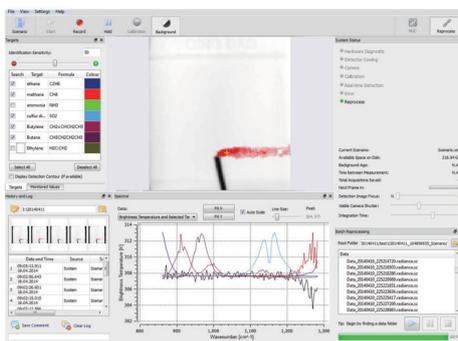


图2 数据分析软件主界面

Fig.2 Main interface of data analysis software

3.3 气体识别实验装置

图3所示为气体识别实验装置示意图,包括系统和数据采集分析两部分。前者由气袋、气泵、流量计、带温背景板、软管、通风橱组成,气袋用于盛装不同种类和浓度的单一气体和混合气体作为目标气体,目标气体通过气泵抽出,经过流量计后排出,所形成的云团飘散在带温背景板之前,以便使得云团与周围环境形成温度差,方便目标气体红外成像。以上设备都置于通风橱内,保障实验安全。数据采集与分析单元置于一定距离外采集目标气体数据,分析识别气体种类。

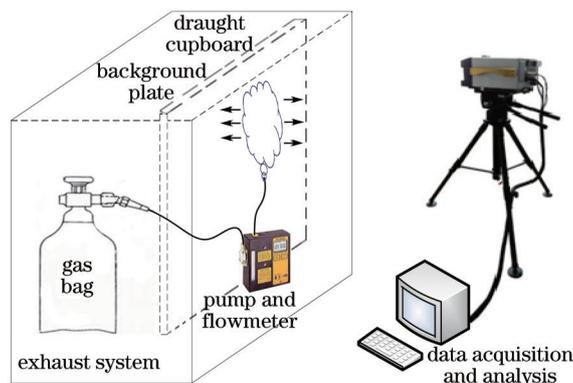


图3 气体识别实验装置示意图

Fig.3 Schematic of gas identification experiment equipment

4 气体识别实验与应用

选择 CH_4 气体开展了实验室识别实验,研究光谱分辨率、流量对气体识别的影响,并且在某公司乙烯装置开展了现场应用。

4.1 实验室识别实验

采用浓度为99.9%(体积分数)的 CH_4 气体作为目标气体开展了识别实验,研究光谱分辨率和流量对气体识别的影响,如果识别到目标气体,用红色标记。首先,逐渐增大目标气体排放流量直到明显检测到云团为止,当流量达到0.2 L/min时,可以观测到目标气体云团;当流量达到1.0 L/min时,云团非常明显。此时,将

光谱分辨率从 8 cm^{-1} 逐步调整到 2 cm^{-1} , 分别记录的目标气体云团光谱特征谱线如图 4 所示, 红色曲线是 CH_4 气体红外吸收特征谱线, 黑色曲线是实验装置记录的特征谱线。可以看出, 随着光谱分辨率波数减小, 记录的特征谱线越接近 CH_4 气体红外吸收特征谱线, 红外吸收特征表现越明显。

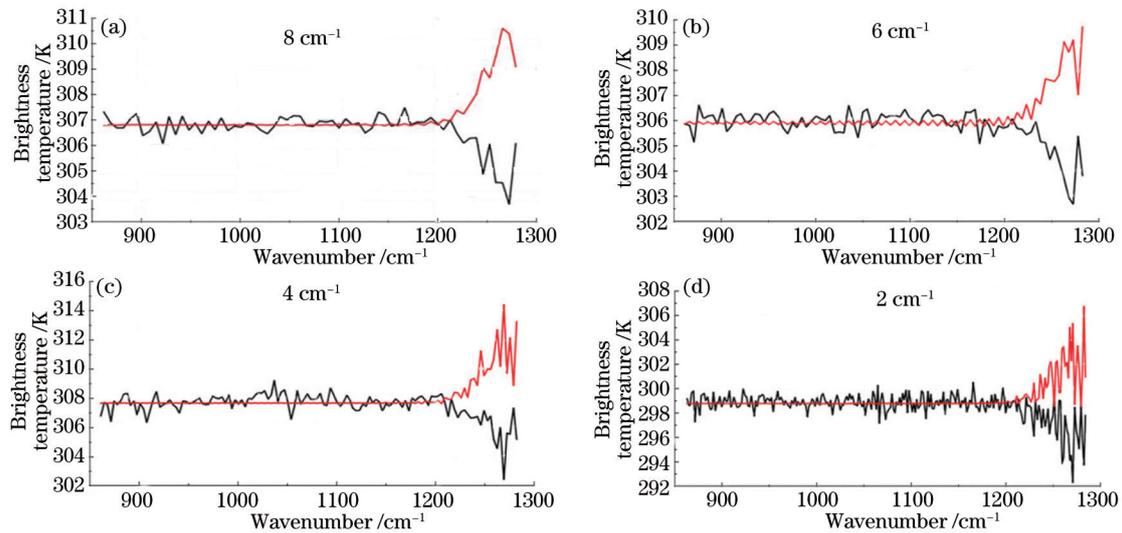


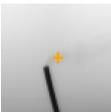
图 4 实验装置记录的目标气体谱线

Fig.4 Target gas spectra recorded by the experiment equipment

与此同时, 记录了不同光谱分辨率下的识别结果, 如表 1 所示。可以看出, 当光谱分辨率为 8 cm^{-1} 和 6 cm^{-1} 时, 可以检测到目标气体云团, 但是没有识别出云团气体种类, 当光谱分辨率为 4 cm^{-1} 时, 识别出云团气体为 CH_4 气体, 当光谱分辨率进一步减小为 2 cm^{-1} 时, 识别结果没有进一步增强, 随着光谱分辨率波数减小, 识别时间越来越长。结果表明, 正确识别目标气体种类后, 光谱分辨率的进一步减小对气体识别没有影响。

表 1 光谱分辨率对气体识别的影响

Table 1 Influence of spectral resolution on gas identification

Rate of flow /(L/min)	1.0	1.0	1.0	1.0
Concentration /%	99.9	99.9	99.9	99.9
Spectral resolution / cm^{-1}	8	6	4	2
Imaging resolution /(pixel×pixel)	64×64	64×64	64×64	64×64
Identification result				
Identification time /s	0.37	0.49	0.73	1.44

当光谱分辨率小于或等于 4 cm^{-1} , 流量为 1.0 L/min 时, 可以正确识别目标气体云团为 CH_4 气体, 在此基础上, 逐渐减小气体排放流量直到 0.2 L/min , 研究流量对气体识别的影响, 实验结果如表 2 所示。可以看出, 虽然流量逐渐减小, 目标气体云团扩散面积在减小, 但是仍然能够识别出目标气体云团为 CH_4 气体。结果表明, 只要检测到目标气体云团, 就能识别出气体种类, 此时目标气体流量对气体识别没有影响。

表 2 流量对气体识别的影响

Table 2 Influence of gas flow on gas identification

Rate of flow /(L/min)	1.0	0.8	0.5	0.2
Concentration /%	99.9	99.9	99.9	99.9
Spectral resolution / cm^{-1}	4	4	4	4
Imaging resolution /(pixel×pixel)	64×64	64×64	64×64	64×64
Identification result				
Identification time /s	0.73	0.73	0.73	0.73

4.2 现场应用

某公司乙烯装置现场巡检时,经常检测到异味,由于装置工艺复杂,密封点位较多,并且许多点位都在高温、高空区域,传统检测手段难以直接检测这些点位,一直没有找到异味排放源。利用气体红外成像光谱技术的远距离遥测特点,对该装置高空、高温等区域重点检测排查,将仪器架设在距离装置区域30 m远处,通过调节云台系统逐步观测高空设备密封点,最终发现脱丁烷塔回流罐顶放空处存在气体泄漏,进一步识别确认泄漏气体为丁烯,泄漏检测与识别结果如图5所示。

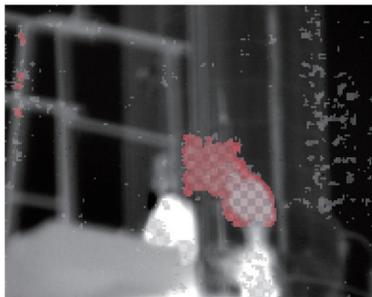


图5 泄漏检测与识别结果(红色气团为识别的丁烯)

Fig.5 Leakage detection and identification result (red gas cluster is identified butylene)

5 结 论

提出了一种基于气体红外成像光谱分析的识别方法。该方法利用傅里叶光学红外成像光谱采集观测对象空间信息和光谱信息,实时展现红外成像,并且精准绘制目标气体光谱图,与气体标准谱库对比后分辨识别出观测气体种类,通过开展 CH_4 气体识别实验发现,正确检测并识别目标气体后,进一步减小光谱分辨率和泄漏目标气体流量对气体识别影响较小。现场应用发现利用气体红外成像光谱遥测技术,有利于提高企业泄漏检测与修复效率,解决高空、高温等难于或险于检测的泄漏点位,为气体红外成像光谱技术在石化企业泄漏检测、炼厂火炬燃烧尾气检测、污染源排放监测、气体泄漏事故应急等应用提供了参考。

参 考 文 献

- 1 Zheng Longjiang, Li Peng, Qin Ruifeng, *et al.*. Research situation and developing tendency for optical measurement technology of gas density[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(8): 24-32.
郑龙江, 李 鹏, 秦瑞峰, 等. 气体浓度检测光学技术的研究现状和发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(8): 24-32.
- 2 Liu Xiu, Wang Lingxue, Jin Weiqi, *et al.*. The development of optical remote measurement for hazardous gas leakage[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(10): 563-567.
刘 秀, 王岭雪, 金伟其, 等. 危险气体泄漏的光学遥测技术及其进展[J]. *红外技术*, 2009, 31(10): 563-567.
- 3 Chen Quansheng, Zhang Yanhua, Wan Xinmin, *et al.*. Study on detection of pork tenderness using hyper-spectral imaging technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2602-2607.
陈全胜, 张燕华, 万新民, 等. 基于高光谱成像技术的猪肉嫩度检测研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2602-2607.
- 4 Xu Hong, Wang Xiangjun. Applications of multispectral hyper-spectral imaging technologies in military[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 13-17.
许 洪, 王向军. 多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 13-17.
- 5 Sun Zhenhua, Huang Meizhen, Yu Zhengang, *et al.*. Status and development of portable Raman spectrometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(7): 070001.
孙振华, 黄梅珍, 俞镇岗, 等. 便携式拉曼光谱仪现状及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(7): 070001.
- 6 Wang Shuduo. Research on infrared spectral imaging technology and their application[J]. *China Instrumentation*, 2010: 165-168.
王树铎. 红外光谱成像分析技术的应用[J]. *中国仪器仪表*, 2010: 165-168.
- 7 Xu Fei, Zhou Jinchi. Major characteristic and developing actuality of spectral class analytical instruments[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2012, 29(1): 457-461.
许 飞, 周金池. 光谱类分析仪器的主要特点及其发展现状[J]. *光谱实验室*, 2012, 29(1): 457-461.
- 8 Li Li, Wang Yiding, Li Shuwei. Application of infrared gas detection technology to safe production and transportation

- in natural gas industry[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(1): 96-103.
- 李 黎, 王一丁, 李树维. 红外气体检测技术在天然气安全生产中的应用[J]. *天然气工业*, 2011, 31(1): 96-103.
- 9 Liu Zhiming, Gao Minguang, Liu Wenqing, *et al.*. Passive remote measurement of flame infrared image by a FTIR scanning imaging system[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(11): 2520-2522.
- 刘志明, 高闽光, 刘文清, 等. 傅里叶变换红外光谱仪扫描成像系统被动遥测火焰红外图像[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(11): 2520-2522.
- 10 An Yan, Liu Ying, Sun Qiang, *et al.*. Design and development of the optical system for portable Raman spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0330001.
- 安 岩, 刘 英, 孙 强, 等. 便携式拉曼光谱仪的光学系统设计与研制[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0330001.
- 11 Racca R, Symons J. Imaging of fugitive gas leaks[P]. US Patent: 20050156111, 2005.
- 12 Grimberg E. System and method for gas leakage detection[P]. US Patent: 20100284570, 2010.

栏目编辑: 吴秀娟