

天然气泄漏被动式红外成像检测技术及系统性能评价研究进展

张旭, 金伟其, 李力, 王霞, 秦超

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 由于被动式气体红外成像检测技术具有检测效率高、直观可视和不需要激光照明等特点, 成为石油天然气泄漏检测的重要手段。从红外成像检测石油天然气等烷类气体泄漏的原理出发, 重点介绍了国内外具有代表性的红外探测器、气体泄漏红外成像检测系统, 分析了其技术特点和成像系统中的一些关键技术; 归纳总结了气体探测系统性能评价技术的发展现状, 对于气体检测技术应用和系统性能改善具有较大的参考作用。最后, 分析了烷类气体泄漏红外成像检测技术发展的方向及存在的问题。

关键词: 天然气泄漏; 烷类气体; IRFPA; 红外成像; 性能评价

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S204001

Research progress on passive infrared imaging detection technology and system performance evaluation of natural gas leakage

Zhang Xu, Jin Weiqi, Li Li, Wang Xia, Qin Chao

(Ministry of Education Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Passive gas infrared imaging detection technology has become an important method for oil and natural gas leakage detection due to its high detection efficiency, intuitive visualization and no need for laser illumination. Based on the infrared imaging detection principle of alkane gas leakage such as oil and natural gas. The representative detectors and gas leakage infrared imaging detection systems at foreign and domestic were focused, and its technical characteristics and some key technologies in the imaging system were analyzed. The development status of gas detection system performance evaluation technology was comprehensively summarized, which played an important role in promoting the application of gas detection technology and improving system performance. Finally, the development direction and existing problems of infrared gas imaging detection technology for alkane gas leakage were analyzed.

Key words: natural gas leak; alkanes gas; IRFPA; infrared imaging; performance evaluation

收稿日期: 2019-04-01; 修订日期: 2019-05-14

基金项目: 首都科技平台科学仪器开发培育项目(Z171100002817011)

作者简介: 张旭(1991-), 男, 博士生, 主要从事气体泄漏红外成像检测技术、数字图像与视频处理技术方面的研究。

Email: zhangxu610521@163.com

导师简介: 金伟其(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事夜视与红外技术、光电图像处理、光电检测技术方面的研究。

Email: jinwq@bit.edu.cn

0 引言

天然气(多组分的混合气体,包括甲烷、乙烷、丙烷等,主要含量为甲烷)是人们日常生活中不可缺少的生活资料。近年来,几次重大的天然气和各类烷类气体泄漏事故造成了严重的人力、物力和财力的损失,迫切需要发展新的天然气等工业气体泄漏检测技术。传统的石油天然气行业普遍使用基于接触式探测原理的定点在线式或手持式气体泄漏点探测仪,虽然灵敏度较高,但受安装位置和风向的影响,不能快速定位泄漏源,检测效率很低。随着红外成像检测技术的发展,近年来针对红外波段特征吸收开展了甲烷、乙烷等烷类气体泄漏的红外成像检测技术研究,研发了相关的检测仪器,展现出广泛的应用前景。2009年北京理工大学刘秀等^[1]介绍了对危险气体遥测技术的原理、应用和进展,分析了气体光学遥测的关键技术。2014年同校李家琨等^[2]综述了气体泄漏红外成像检测技术现状,分析了气体泄漏红外成像检测技术的发展方向及存在的问题。

基于气体吸收的红外成像检测技术以视频图像方式及时发现气体泄漏的具体位置和周边态势,不仅工作效率和模式具有明显的优势^[3],而且可半定量分析气体浓度、标记爆炸限区域、及时进行报警。按检测源不同,气体泄漏红外成像检测方法分为对人工辐射吸收/散射的主动式成像和对背景辐射吸收的被动式成像两类。主动式成像灵敏度高,在气体背景无辐射对比度的情况下也可进行有效探测,但受到照射光源影响,探测气体种类有限,且系统体积大、功耗高。被动式成像采用被动热成像或光谱检测模式,不需要照射源,可探测气体种类多,应用范围广。近年来,随着烷类气体泄漏红外成像检测需求的日益增长,气体泄漏红外探测器、热成像检测系统及其系统性能评价方法取得了较大进展。文中将分析现有烷类气体红外成像技术和应用现状,以及热成像检测关键技术的发展趋势和存在的问题。

1 天然气红外成像检测的原理

天然气包括甲烷、乙烷、丙烷等,主要含量为甲烷,因此天然气泄漏的检测可归结为甲烷等气体分子对红外辐射特征吸收的检测。甲烷气体分子是五

原子分子,C原子在中心,H原子在4个角上,分子之间的化学键处于不断的振动之中,这些振动形式包括伸缩振动和弯曲振动。在气体分子吸收红外辐射后,引起分子能级间的跃迁,CH、CH₂和CH₃团的伸缩振动对应2 800~3 000 cm⁻¹波数,弯曲振动对应1 300~1 500 cm⁻¹波数。图1是HITRAN on the web数据库^[4]给出的甲烷气体主要吸收谱线(@1 atm大气压,300 K温度),其吸收波段3.15~3.45 μm和7.2~8.2 μm分别处于中波和长波大气红外窗口,中波的吸收系数高于长波,但吸收带宽小于长波。

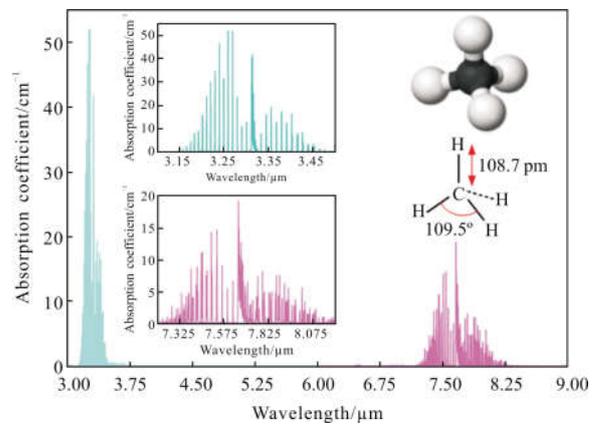


图1 甲烷气体分子模型及吸收谱线

Fig.1 Methane gas molecular model and absorption line

红外成像系统探测气体是对系统响应范围内的辐射积分,整个成像过程可简化为如图2所示的三层辐射传输模型。第一层为背景辐射通过A层大气到达气体云团前边界的部分,该层中的大气对背景辐

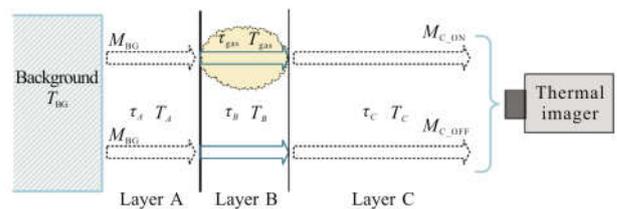


图2 三层辐射传输模型

Fig.2 Three-layer radiation transmission model

射产生吸收和散射;第二层为气体云团前边界的辐射通过气体云团到达气体云团后边界的辐射,该层辐射分为气体云团对背景辐射的吸收和气体云团自身发出的辐射两部分;第三层为气体云团后边界至热像仪前的部分,该层的大气对背景辐射和气体云

团辐射产生吸收和散射。如果含气体云团的辐射 MC_ON 和不含气体云团的辐射 MC_OFF 差异大于热像仪的灵敏度,则理论上就能探测到气体云团。

2 探测器及系统研究进展

烷类气体探测器和成像系统在过去几十年里取得了一系列重要进展。世界上第一款实用的烷类气体成像检测技术是在中波制冷型探测器前加装与气体吸收峰匹配的单一制冷滤光片,目前发展方向为多滤光片和非制冷成像技术,形成了多种成像探测方法。

红外探测器的灵敏度是决定烷类气体成像探测效果的重要因素,其响应波段须覆盖气体的吸收波段,图 3 为目前常用红外探测器材料的相对光谱响应曲线^[5]。

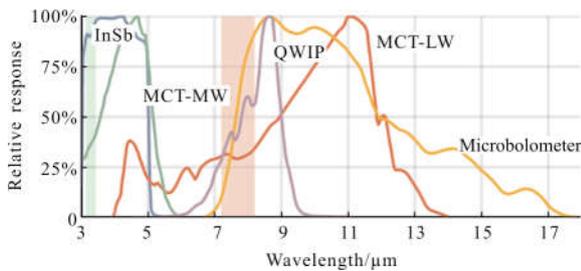


图 3 常用红外探测器相对光谱响应

Fig.3 Relative spectral response of commonly used infrared detectors

中波波段可选的红外探测器主要有 InSb 和 HgCdTe 等高灵敏度的制冷型焦平面探测器,要求 3.2~3.4 μm 波段具有较高的响应,其中 InSb 探测器主要工作中波红外波段。长波波段现有制冷(如 QWIP 和 HgCdTe 探测器)和非制冷(如氧化钒和多晶硅)型焦平面探测器两类。

非制冷型红外焦平面探测器属于热探测器,通常其光谱响应范围限制在 8~12 μm。为适应检测烷烃类(甲烷)气体中波和长波红外两个特征吸收波段的需要,近年来发展了响应涵盖中波和长波红外的宽波段非制冷焦平面探测器。目前典型的探测器如法国 ULIS 公司的多晶硅、以色列 SCD 公司的氧化钒、中国艾睿和北方广微的氧化钒等宽波段红外焦平面探测器,成像检测系统如美国 FLIR 公司的 GasFind 气体成像仪、法国 Bertin 公司的 SecondSight 气体成像仪、美国 Rebellion 公司的 GCI 成像光谱仪,以及近年来国内推出的气体泄漏成像检测仪。

2.1 国外发展现状

2.1.1 制冷型气体成像技术

2004 年,美国 FLIR 公司推出 Therma CAM GASFindIR 中波烷类气体成像仪^[6],采用制冷型碲化铟(InSb)探测器^[7]。由于 InSb 探测器的光谱响应范围较宽(1~5.5 μm),为了提高烷类气体探测的灵敏度,限制杂散背景辐射,在镜头和探测器之间加装了 3.2~3.4 μm 的窄带滤光片,并将滤光片和探测器一起制冷,以减少滤光片本身热辐射的影响。此外,FLIR 公司为气体检测热像仪开发了带缩放因子的帧间差分技术^[8],不仅能快速提取运动的气体云团,而且提高了细微泄漏气体的可视化性能。近年又开发了安全型光学气体成像仪 GFx320^[7](如图 4 所示,NETD<15 mK,像元大小 30 μm×30 μm),能快速检测泄漏、维持危险场所的安全性。

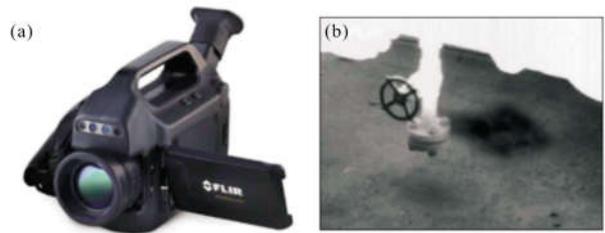


图 4 GFx320 及甲烷气体成像效果

Fig.4 GFx320 and imaging effects of methane gas

2011 年,Naoya Kasai 等采用雷神公司 InSb 探测器研究了对丙烷气体的成像探测性能^[9](图 5),采用碳红外辐射器(Carbon Infrared Emitter, CIE)作为背景辐射源,辐射波段为 1~5 μm,峰值辐射 3 μm 处的

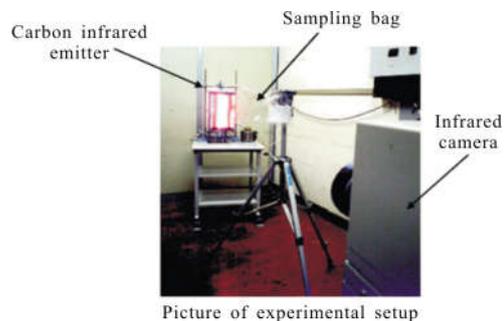


图 5 丙烷气体成像测试装置

Fig.5 Imaging test device of propane gas

辐射强度为 $80 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。在镜头前加装与丙烷吸收峰(3.37 μm)匹配的窄带滤光片(峰值波长为 3.38 μm),半带宽为 70 nm。图 6 为模拟的丙烷气体

成像效果,蓝色区域为丙烷气体。由于丙烷气体的吸收,背景灰度值由 3 700 下降到 2 000。测试了吸收强度和气体浓度路径积之间的关系,在小于1 000 ppm·m 时,强度随着浓度增加而线性降低,在大于1 000 ppm·m 时,强度不再发生变化,达到探测器的信噪比极限。

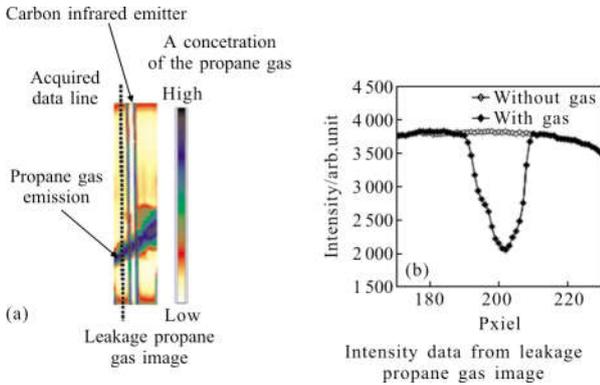


图 6 丙烷气体成像效果

Fig.6 Imaging effect of propane gas

2015 年以来美国 Zeng 等研究了量化光学气体成像技术(图 7)^[10],测试了 FLIR GF300 气体成像仪对甲烷、乙烷等烷类气体在不同浓度和不同温差下的响应因子^[11],在成像仪对某一种气体的探测能力已知时,比较未知气体和已知气体的响应因子,即可确定成像仪对未知气体的探测灵敏度。进一步通过接收到的原始图像数据反推出气体的流量,并进行伪彩色处理,对 80 种不同泄漏流量测试的精度达到-17% ~43%^[12]。

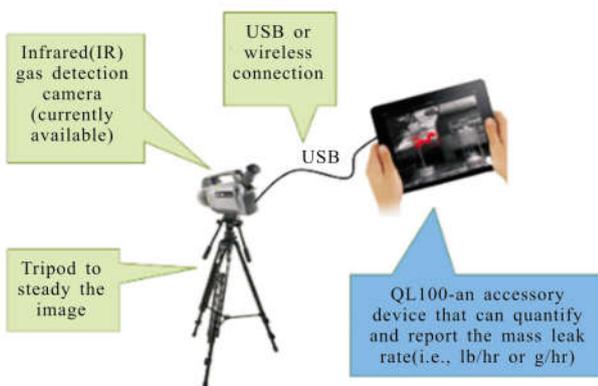


图 7 量化光学气体成像技术

Fig.7 Quantitative optical gas imaging technology

制冷型烷类气体红外成像检测系统大都采用 3.2~3.4 μm 波段^[6,13],这是因为该波段的吸收系数

大,且大气衰减很小。但由于该波段的甲烷、乙烷等气体的吸收光谱近似,难以区分不同气体谱,而长波段烷类气体吸收谱差异较大,虽然长波波段甲烷气体吸收谱附近存在水蒸气的部分吸收,但通过系统优化,长波红外成像依然可有效进行成像检测。

瑞典隆德理工学院的 Jonas Sandsten 等将传统的气体相关检测技术和红外成像技术相结合,研究了气体相关成像检测技术^[14]。气体相关成像检测技术把入射辐射分成两路,其中一路(参考光路)装有待检测目标气体的高浓度吸收气室,另一路为无吸收气室的目标光路。当成像视场区域内有气体时,参考光路上接收到的辐射吸收特征未发生变化,目标光路由于待测气体吸收使接收到的辐射减少。通过两路辐射信号的比较可以消除杂散背景辐射和非目标气体的干扰,能识别气体种类,确定气体空间位置分布,进而进行伪彩色渲染和气体浓度估算。图 8 为 2000 年采用 Agema Thermovision 900 长波热像仪和 Spectrogon BBP7040-8500 滤光片,考虑背景辐射、气体吸收、大气红外衰减等因素影响后,甲烷气体的成像检测效果。左图是对吸收直接处理后的图像,右图是用气体相关技术处理的图像,通过相关处理减少了水蒸气的干扰,改善了成像质量。2012 年提出块匹配和速度场两种方法量化气体泄漏速率,比较了实验室内外甲烷气体的量化测量结果^[15]。

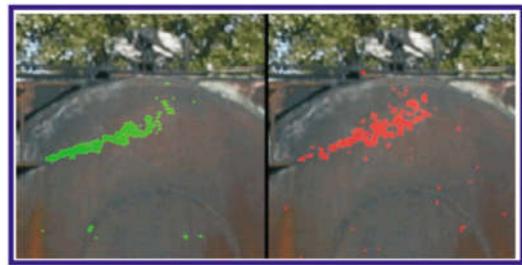


图 8 甲烷气体相关成像效果

Fig.8 Methane gas correlation imaging effect

2010 年,以色列 CI 系统公司发展了圆形渐变滤光片(CVF)制造技术^[16-17],并将其应用在高光谱成像仪^[18]中。如图 9 所示^[5],滤光片轮的上半部分安装多种滤光片,用于各中心波长的宽带或窄带检测,下半滤光片轮是具有可变中心波长的窄带干涉滤光片,透过波长由滤光片轮的旋转角度 α 决定。转轮旋转时,每个图像像素可实现被测场景的宽带红外成

像及多个预定离散波长的红外成像。在此技术基础上的 SR-7000 型长波高光谱热像仪多达 80 个光谱通道,光谱响应范围为 7.8~12 μm ,光谱分辨率 $d\lambda/\lambda=0.5\%$,分辨率为 320×256。

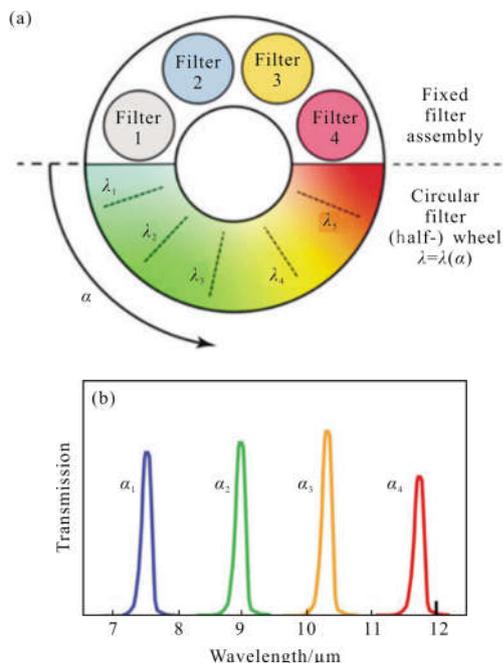


图 9 (a)圆形滤光片轮(b)干涉滤光片作为角度函数的透射原理示意图

Fig.9 (a) Circular filter wheel (b) Schematic diagram of transmission principle of interference filter as a function of angle

2014 年,瑞典 IR Nova 公司优化了 II 类超晶格焦平面探测器,使其满足 3.3 μm 波段甲烷和其他 VOC 气体探测需求^[19]。并以此为基础,研制了专用烷类气体探测的制冷红外探测器组件 IRnova 320ER-330^[20](图 10),像元尺寸为 30 μm ,阵列规模为 320×256,时间噪声等效温差为 22 mK,空间噪声等

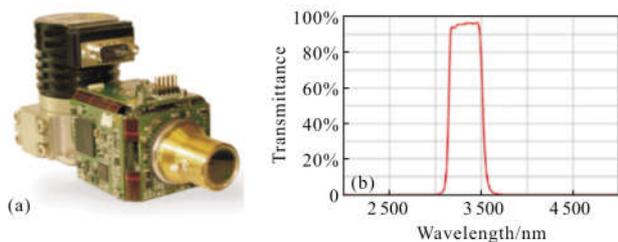


图 10 IRnova320ER-330 组件和中波滤光片透射率

Fig.10 IRnova320ER-330 component and the transmittance of MW filter

效温差为 8 mK, 由于 II 类超晶格探测器的光谱响应较宽,为了增强 3.3 μm 烷类气体探测的信噪比,加入了透射率曲线如图 10 所示的制冷型滤光片。

2014 年,加拿大 Telops 公司研发了适用于甲烷气体探测的 Hyper-Cam 系列傅里叶变换红外高光谱成像仪^[21-22](图 11),采用制冷型碲镉汞探测器,阵列规模为 320×256,不同型号光谱响应范围覆盖为 7.35~13.5 μm ,能对烷类气体泄漏进行实时的检测和识别。此后又研究了基于滤光片分光的多光谱成像仪 MS-IR^[22-23](图 12),MS-IR 配备了一个 8 孔位的高速旋转的滤光轮,将目标信号分成不同的光谱波段,滤光片轮旋转速度可达 100 转/s,不同型号响应波段覆盖范围为 7.5~11.8 μm 。



图 11 Telops Hyper-Cam 红外热像仪

Fig.11 Telops Hyper-Cam infrared imager

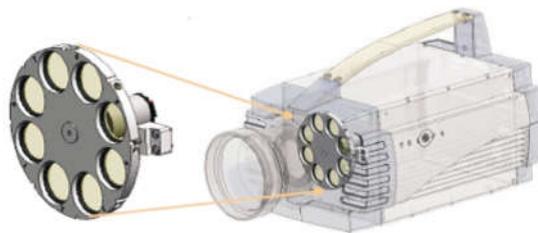


图 12 Telops MS-IR 红外热像仪

Fig.12 Telops MS-IR infrared imager

2016 年法国 Sofradir 公司推出了中波宽波段 MCT 探测器^[24],阵列规模为 640×512,像元尺寸为 15 μm ,光谱响应范围为 1.5~5 μm ,NETD<18mK。同年,又推出了响应范围为 2.7~10 μm 的中长波宽波段 MCT 探测器^[24],像元尺寸为 30 μm ,阵列规模为 320×256,NETD 为 27 mK,最大帧频为 320 fps。这两款探测器都强调了工业气体探测应用。

2.1.2 非制冷型气体成像技术

虽然制冷型成像系统灵敏度较高,但由于制冷

部件寿命短、成本和功耗较高、体积大,主要适用于远距离遥感成像探测。一般工业检测应用往往需要全天时在线式监控成像,对红外成像检测系统的低成本和寿命要求较高。为此,近年来非制冷型红外焦平面探测器和相关成像技术取得了较大进展。

2011 年法国 ULIS 公司推出多晶硅非制冷红外焦平面探测器 Pico640E-BB^[25],阵列规模 640×480,光谱响应范围为 2~16 μm,像元尺寸为 17 μm,热时间常数<10 ms,NETD<50 mK,主要用于气体泄漏检测(光谱响应曲线如图 13 所示),在甲烷气体的长波吸收峰波段响应有较大优化,但中波波段响应较低。

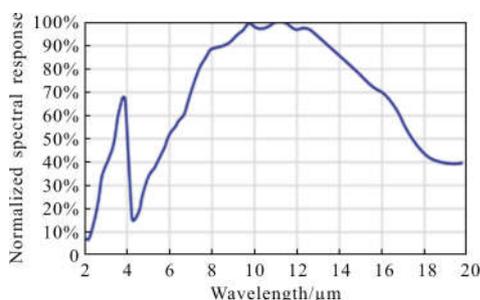


图 13 Pico640E-BB 光谱响应曲线

Fig.13 Spectral response curve of Pico640E-BB

法国 Bertin 公司 SecondSight 气体成像仪是最早用于常规环境下烷类气体探测的非制冷成像仪^[26-28]。Second Sight 使用多种长通宽带红外滤光片,分为参考滤光片和活动滤光片,如图 14 所示。通过参考滤

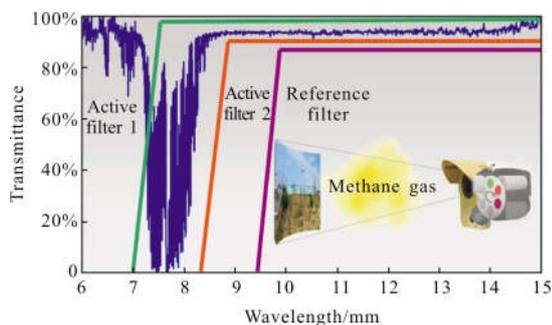


图 14 参考滤光片和活动滤光片应用示意

Fig.14 Application diagram of the reference/active filters

光片接收的红外辐射不受有无气体的影响,通过活动滤光片接收的红外辐射包含目标气体的吸收波段,采集两种滤光片后的红外辐射,进行相邻视频帧图像差分运算,提取气体云团目标,能够区分光谱特征相近的不同气体(如图 15 的甲烷和丁烷)。用于烷类气体探

测的成像仪,系统光谱响应范围为 7~14 μm,采用非制冷多晶硅探测器,探测器规模为 382×272,NETD 约为 10mK,对甲烷气体的探测灵敏度为 5 000 ppm·m。

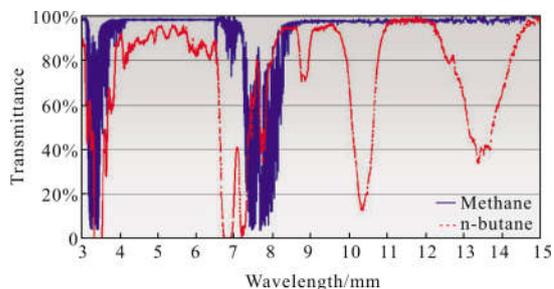


图 15 甲烷和正丁烷气体的红外吸收谱图

Fig.15 Infrared absorption spectra of methane and n-butane

2012 年,美国 Rebellion Photonics 公司研制了世界上第一款基于非制冷微测辐射热计的气体云团成像光谱仪(GCI),如图 16 所示,GCI 采用法国 Sofradir 公司非制冷微测辐射热计探测器(像元 17 μm,帧频 30 fps,阵列规模 1 024×768,光谱响应范围 7~12 μm),能对多种烷类气体进行成像探测^[29-30]。2013 年 Rebellion 公司测试了对丙烷气体的成像效果^[31](图 17),当环境温度和丙烷气体温度相差 7 °C 时,以天空为背景,可以有效地观察到气体泄漏。



图 16 Rebellion Photonics 气体云团成像仪

Fig.16 Rebellion Photonics gas cloud imager

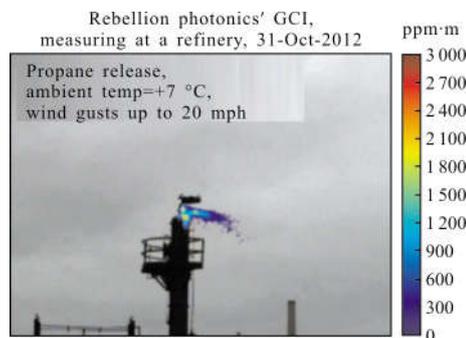


图 17 GCI 对丙烷的成像效果

Fig.17 Imaging effect of GCI to propane

GCI 成像映射光谱技术(IMS)的基本原理如图 18 所示,物镜将场景辐射会聚到映射镜上,映射镜由一系列镜面构成,每个镜面都有自身的 3D 倾斜角度,在由小镜面倾斜角决定的方向上,每个镜面反射场景的一列,所有的镜面最终形成如图 18 的子图像;准直镜收集子图像,棱镜阵列将子图像每一列的光谱信息分散并填充在光学空隙中;微透镜阵列将来自棱镜的子图像聚焦在探测阵列上;最后,利用算法重构原始目标信息。

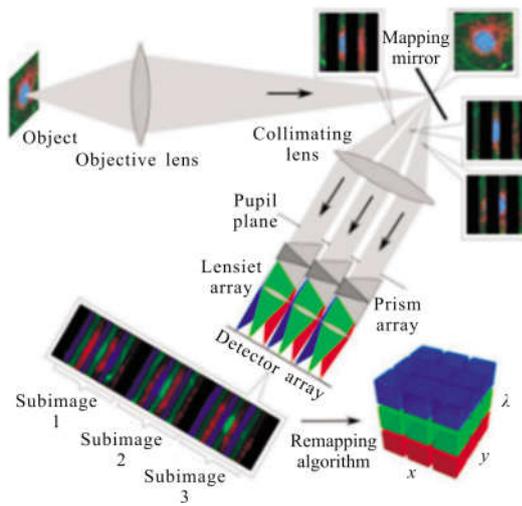


图 18 成像光谱映射技术原理

Fig.18 Principle of imaging spectral mapping technology

2013 年以色列 SCD 公司发展了宽波段非制冷氧化钒探测器^[32](图 19),阵列规模 640×480,像元间距 17/25 μm,NETD<35 mK,帧频 25/30/60 fps。虽然



图 19 SCD 宽波段 VOx 红外成像组件

Fig.19 SCD wideband VOx infrared imaging component

其资料上强调用于气体检测成像,灵敏度得到明显提升^[33](图 20,黑线),在 10~14 μm 红外窗口透射率

高于 90%,在 3~5 μm 上平均响应得到了较大的提升。但在烷类气体探测波段的响应反而比一般氧化钒探测器低(图 20 中灰色虚线)。

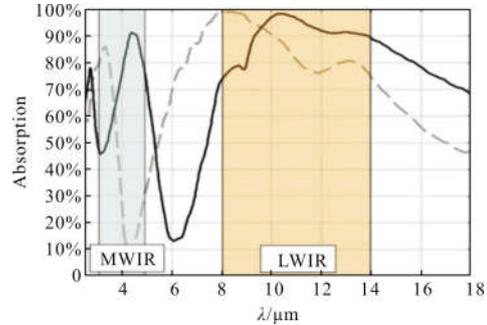


图 20 宽波段(黑色实线)和普通长波像元吸收

Fig.20 Wide band(black solid line) and ordinary LW pixel absorption

2014 年西班牙马德里卡大学 R. Barber^[34]等设计了用于工业环境自动检查气体泄漏的非制冷红外成像系统,采用以色列 SCD BIRD-640 探测器,光谱响应范围 3~5 μm,阵列规模 640×480,像元间距 25 μm,帧频 60 fps。鉴于中波非制冷型红外探测器的灵敏度偏低,采用 IR18 红外光源进行主动式成像,并分析了被动式和主动式成像下甲烷气体探测的最小可探测气体浓度。

2015 年西班牙 New Infrared Technologies 公司推出了 PbSe 非制冷中波焦平面探测器^[35],峰值探测波长 3.7 μm,光谱响应范围 1~5 μm,应用领域主要为中波烷类和二氧化碳等气体探测。基于 1×128 线阵硒化铅和线性渐变滤光片又开发了低成本 MWIR 光谱仪(图 21),能每秒提供 5 000 个光谱,每个像素对应 80 nm 窄带光谱波段。

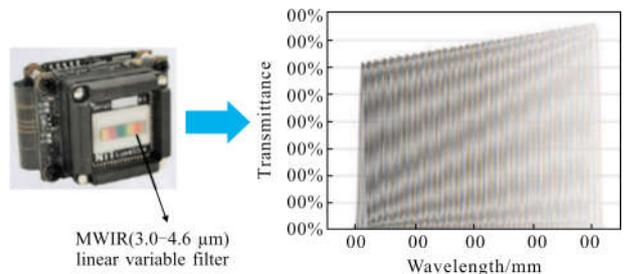


图 21 用于气体探测和识别的低成本光谱仪

Fig.21 Low cost spectrometer for gas detection and identification

2019 年,FLIR 系统公司推出了用于甲烷泄漏检测的非制冷型红外热像仪 FLIR GF77^[7](图 22),光谱

响应范围为 $7.0\sim 8.5\ \mu\text{m}$, 阵列规模为 320×240 , NETD $< 25\ \text{mK}$, 像元间距为 $25\ \mu\text{m}$, 在其指标中采用了表征气体探测时的灵敏度: 噪声等效浓度路径 (NECL) $< 100\ \text{ppm}\cdot\text{m}$ 。针对气体检测需求, 开发了多种提高目标探测能力的方法, 如采用单触式电平/跨度自动调整功能增强对比度, 采用高灵敏度模式突出显示烟缕运动。



图 22 FLIR GF77 气体成像仪
Fig.22 Gas imager of FLIR GF77

2.2 国内研究进展与现状

国内在烷类气体红外成像检测领域的起步较晚, 近年来随着对石油天然气等危险工业气体泄漏事件防范意识的提高, 相关的理论和技术研究取得较大进展, 且在红外焦平面探测器、热成像检测应用等方面均取得实质性的成果。

2011 年在北京市自然科学基金重点项目的支持下, 全面开展了基于宽波段非制冷红外焦平面探测器的危险气体泄漏热成像检测理论和技术的研究。2012 年设计并研制了中长波宽波段红外成像光学系统^[36], 牵引烟台艾睿公司和北方广微公司分别研制了氧化钒非制冷宽波段红外焦平面探测器组件(如图 23 所示, 响应波段为 $3\sim 14\ \mu\text{m}$, 阵列规模为 320×256 ,

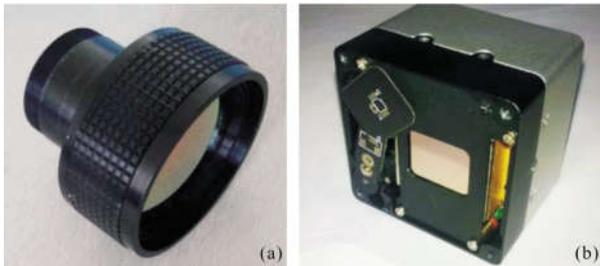


图 23 宽波段非制冷焦平面探测器组件和光学系统
Fig.23 Wide band uncooled IRFPA and optical system

像元间距 $25\ \mu\text{m}$)^[37]。2014 年研制成宽波段红外气体

泄漏热成像检测原理样机, 实现了对乙烯、六氟化硫、氨气等多种工业危险气体的泄漏检测。

2012 年北京理工大学王岭雪等^[38]研究了甲烷气体的红外吸收光谱特性, 基于国产 PtSi 制冷型红外焦平面探测器(光谱响应范围为 $1.2\sim 4.4\ \mu\text{m}$, 像元尺寸为 $30\ \mu\text{m}\times 30\ \mu\text{m}$, NETD $< 150\ \text{mK}$), 研制了甲烷气体泄漏成像探测系统, 如图 24 所示; 研究了单帧气体图像对比度增强和基于帧间差分的多帧图像处理算法, 并在 DSP 上实现算法的实时化处理。2016 年采用国产制冷中波碲镉汞 IRFPA 加窄带滤光片方法, 搭建了石油和天然气红外成像检漏演示系统^[39]; 通过对打火机气体的扩散运动特性分析, 研究了基于背景动态范围压缩和基于气体边缘迁移的方法, 对系统图像进行实时增强处理。

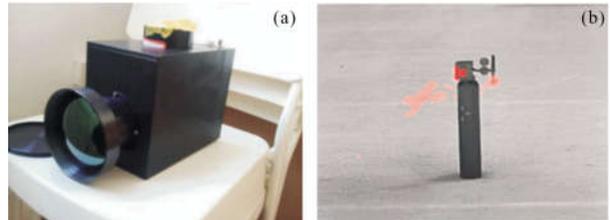


图 24 甲烷气体成像探测系统及成像效果

Fig.24 Imaging detection system and imaging effect of methane gas

2017 年进一步获得首都科技平台科学仪器开发培育项目的支持, 研究了石油天然气泄漏的非制冷红外热成像检测优化理论, 对红外物镜和滤光片进行了优化设计。以艾睿公司氧化钒宽波段非制冷焦平面探测器(响应波段为 $3\sim 14\ \mu\text{m}$, 阵列规模为 640×512 , 像元间距为 $17\ \mu\text{m}$, NETD $< 60\ \text{mK}$, 帧频为 50 fps)为基础, 2018 年研制了基于非制冷 IRFPA 的甲烷气体红外成像检测工程样机, 如图 25 所示, 实现了天然气等烷类气体泄漏的有效成像检测。图 26 显示了以黑体为背景的甲烷气体泄漏成像检测效果^[40]。

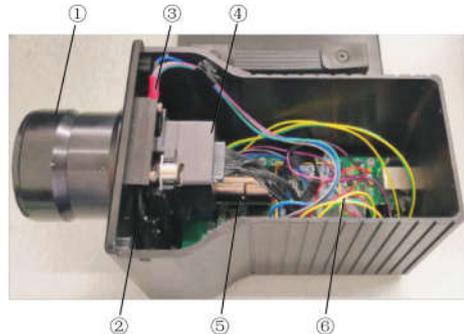


图 25 非制冷甲烷气体红外成像检测系统

Fig.25 Uncooled methane gas infrared imaging detection system

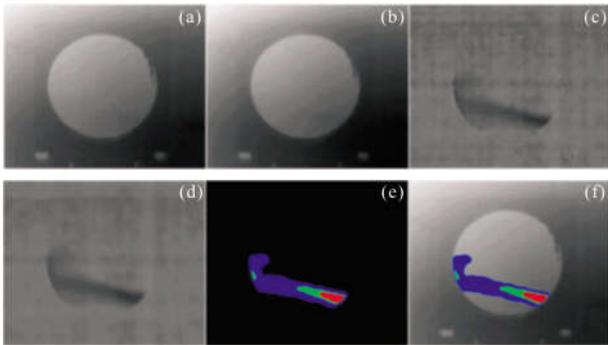


图 26 甲烷气体成像效果

Fig.26 Imaging effect of methane gas

2018 年长春理工大学付秀华等研究了甲烷气体探测关键技术^[40],采用法国 ULIS 公司非制冷 Pico640E-BB 探测器,搭建了甲烷气体成像实验系统,通过加入与甲烷气体吸收峰相匹配的 $(3.31 \pm 0.025) \mu\text{m}$ 和 $(7.669 \pm 0.03) \mu\text{m}$ 窄带滤光片,实现了中波和长波波段的甲烷气体探测,并对系统的成像质量和探测识别能力进行了测试与分析。

2018 年北京富吉瑞公司利用瑞典 IRnova 320 ER-330,研制了红外成像气体检漏仪 FG100(图 27),能够检测吸收谱为 $3.2 \sim 3.5 \mu\text{m}$ 的烷类气体。



图 27 FG100 气体检测仪

Fig.27 FG100 gas detector

3 气体泄漏红外成像检测系统的性能评价

如何评价气体泄漏红外成像检测系统对特定气体泄漏的探测性能成为应用急需解决的问题。目前主要有三类较为有效的气体泄漏成像检测系统性能评价方法:(1) 直接采用传统的热像仪性能指标,如噪声等效温差(NETD)^[42]、噪声等效光谱辐射(NESR)^[43]

等;(2) 直接给出热像仪对某种气体在特定条件下的最小可探测泄漏速率(MDLR)^[44-45];(3) 采用噪声等效浓度路径长度(NECL)^[46-47]、最小可分辨气体浓度(MRGC)^[48]和最小可探测气体浓度(MDGC)^[49]等。

2002 年,A.B.David 提出相关光谱探测系统性能评估模型 NECL^[46]。在相关光谱探测中,检测通道分为信号通道和参考通道。信号通道是大气和待测气体辐射直接进入探测器的通道,参考通道是装有目标气体的通道。信号通道和参考通道的辐射差定义为有效辐射信号,而辐射差的方差则定义为探测器的噪声。根据辐射差和噪声可以得到信噪比,当信噪比等于 1 时对应的气体浓度为噪声等效浓度路径。

MDLR 定义为在某种条件下仪器能够直接观察到的最小泄漏量,其与风速、气体的浓度、背景温度、泄漏点到探测系统的距离等密切相关,因此,很难保证比对实验条件的一致性。2006 年,FLIR 公司测试了 GAS FINDIRTM 成像系统对不同化合物和气体在不同风速下的 MDLR^[45],并拟合得到 MDLR 与风速存在的幂律关系;并测试了 MDLR 与光学视场、探测距离之间的关系,MDLR 和视场满足近似的线性关系。

2006 年,R.G.Benson 等提出一种被动红外成像系统最小可探测气体浓度的直接测量方法^[50],其测量原理为:信号值为气体的吸收对入射红外辐射的改变量,噪声值为黑体的光子信号本身相关的散粒噪声,当信噪比为 1 时,对应的气体浓度为最小可探测气体浓度。实验装置如图 28 所示,采用两个黑体

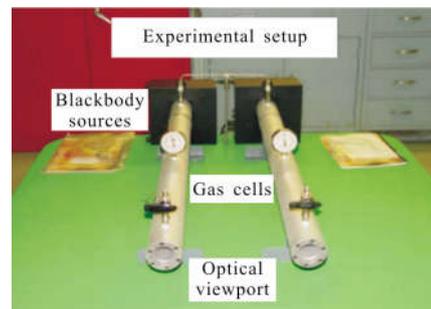


图 28 最小可探测气体浓度测试装置

Fig.28 Test device of minimum detectable gas concentration

辐射源和两个 1 m 长的气室(窗口为镀有带高通透膜的 ZnSe 窗口)。气体通过气管流入气室,且浓度可通过 Environics 公司 4000 系列多成份气体稀释混合

系统进行调节。气室出口处装有相机,且气室出口覆盖相机的大部分视场。采集相机原始视频数据后,使用 Santa Barbara 红外图像处理软件得到平均信号、噪声和信噪比;测量不同浓度下的信噪比拟合出曲线,当信噪比等于 1 时得到 GAS FindIR™ 对甲烷的最小可探测气体浓度为 275 ppm·m。

2014 年以来,考虑到气体吸收、气体和背景温差等综合因素,基于热成像系统常用的最小可分辨温差(MRTD)和最小可探测温差(MDTD)参量,提出了 MRGC^[48]和 MDGC 模型^[49],搭建了相应的性能评价测试系统,如图 29 所示。MRGC 和 MDGC 测试方法

MDTD 相同的判据标准条件下,得到检测系统对气体的 MRGC 和 MDGC 性能,实现了红外成像检测系统对特定气体检测灵敏度的定量描述。

2016 年,北京理工大学王岭雪等^[51]建立了定量预测热像仪探测泄漏气体能力的信噪比 SNR 与气体浓度 C 模型 SNR-C,搭建了室内测试系统,如图 30 所示;并利用 SNR-C 模型对制冷热像仪 Gas FindIR™ 在 SNR=1 时的甲烷气体浓度进行预测,结果为 220 ppm·m,与参考文献[50]的实测结果接近。

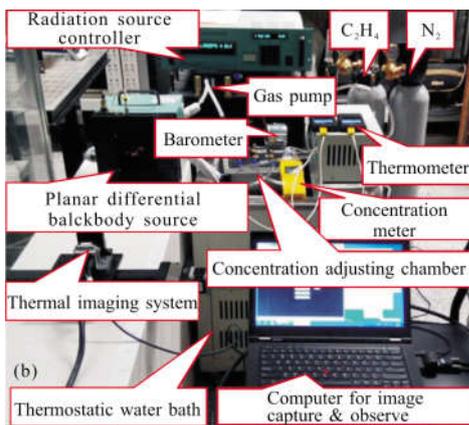
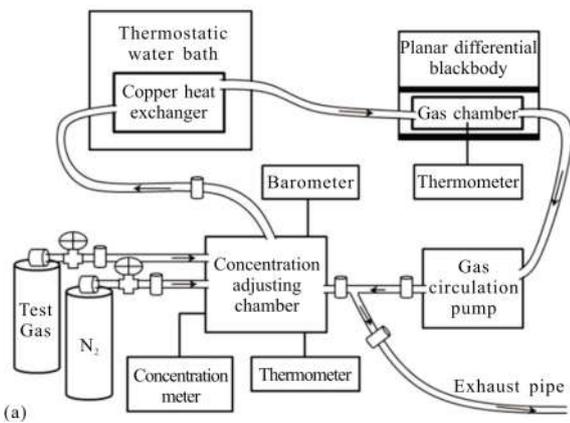


图 29 MRGC 测量原理及装置

Fig.29 Measurement principle and device of MRGC

是在热成像系统 MRTD 和 MDTD 测试系统基础上,加入吸收气室和对应的测试靶标 (MRGC 采用不同频率的四条带黑体靶标,MRGC 采用不同尺寸的圆形黑体靶标),在设定的黑体背景辐射及气体温度和压力条件下,通过调节气体浓度,在与 MRTD 和

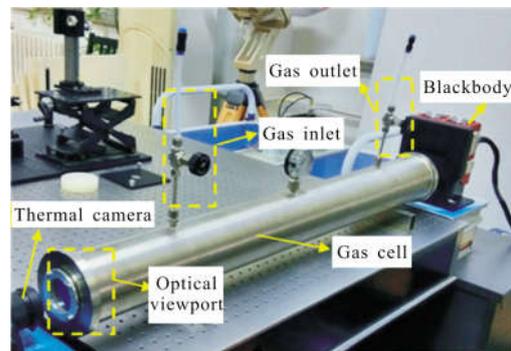


图 30 SNR-C 测试装置

Fig.30 Test device of SNR-C

4 结论

目前,甲烷气体红外成像检测技术主要分为两大方向:

(1) 以高灵敏度的制冷红外焦平面探测器为核心,在常规环境下采用较窄的响应波段(例如 50 nm 带宽)可获得较高的灵敏度^[52-53],可探测微量泄漏下的烷类气体,并在实验室条件下获得 275 ppm·m 的灵敏度^[50],MDLR 达到 10 ml/min(FLIR InSb 探测器,焦距为 50 mm,探测距离为 3 m,甲烷浓度为 100 vol%,风速为 0 m/s)^[45],可实现远距离遥感成像探测,适用于环保、管道等的安全巡检。

(2) 以非制冷 IRFPA 为核心的低成本非制冷红外成像仪。在实验室条件下对烷类气体的浓度灵敏度达 5 000 ppm·m^[26],MDLR 达到 250 mL/min(探测距离为 3.4 m,甲烷浓度为 100 vol%,风速为 0 m/s)^[31],适用于天然气储气管道、油气开采平台等工业行业的全天候监控需求。

甲烷气体泄漏红外成像检测技术发展呈现以下几个趋势:(1) 采用高性能非制冷 IRFPA。非制冷探

测器寿命长、成本低、功耗小,已在 SF₆、乙烯(10.5 μm 附近,最大吸收系数分别为 740 cm⁻¹ 和 36.2 cm⁻¹)等气体泄漏探测方面取得了较好的效果,但由于甲烷气体的吸收波段较特殊,吸收系数小(长波最大吸收系数为 17 cm⁻¹,中波吸收系数为 42.8 cm⁻¹),需要进一步优化探测器在这两个工作波段的灵敏度。在探测气体时,成像系统中需要加上相应的光学滤光片,由于非制冷 IRFPA 响应波段较宽,当滤光片安装在镜头和探测器之间时,滤光片本身产生的杂散辐射较大。需要进一步减小非制冷成像系统中杂散背景辐射,提高系统灵敏度。(2) 基于多传感器融合的气体光学成像系统。由于红外图像细节差,在实际应用中当有气体泄漏时,难以在复杂场景中精确定位泄漏源的位置。鉴于可见光图像良好的细节和适宜于人眼观察的特性,将提取的伪彩色图像叠加到可见光图像上,以增强显示的对比度。(3) 气体热成像仪对气体的量化测量和标定方法。气体泄漏红外成像检测技术主要分为三个阶段进行:气体探测→气体定位→气体定量测量。气体探测主要是能够“看见”气体泄漏,气体定位主要是采用伪彩色标记出泄漏气体的位置,气体定量测量需要实时显示泄漏气体的浓度和泄漏速率等因子。通过设定阈值浓度,当浓度大于预设的阈值时,系统会报警并自动记录气体云团视频。对于光谱成像方式,这三个阶段都已实现。但对于热成像方式,目前大多数处于探测阶段,研究气体红外图像处理方法,准确定位泄漏源,研究气体浓度标定方法并考虑到复杂的环境条件和成像系统特性等综合因素下气体浓度反演方法成为一个重要研究方向。(4) 专用的气体红外成像探测器的研发。针对气体探测需求,研究人员开发了多款专用的红外探测器,在气体的吸收波段进行了优化。对于气体探测时,全像素单一的响应波段难以实现气体的定量测量,在图像处理时,难以区分气体和其他的动态目标,误警率较高。为了识别气体种类,必须结合其他的光谱分光技术,这将增加了系统的体积和响应时间。需要根据气体探测需求,将探测器像元设计为可响应不同波段的特殊探测器。(5) 类似于热成像系统性能评价测试系统和方法,需要研制集多种测试模型于一体的气体探测系统综合性能评价测试系统,简化测试系统结构。

文中针对烷类气体泄漏红外成像检测技术、系

统及其性能评价进行综述和分析,今后几年预期相关技术将获得广泛的应用,成为石油石化等工业领域安全监测的重要手段。在技术上,进一步发展专用红外探测器、图像处理增强技术和浓度、泄漏速率等量化测量技术对于推动工业气体泄漏红外成像技术和装备发展具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 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. (in Chinese) 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.
- [2] Li Jiakun, Jin Weiqi, Wang Xia, et al. Review of gas leak infrared imaging detection technology [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(7): 513-520. (in Chinese) 李家琨, 金伟其, 王霞, 等. 气体泄漏红外成像检测技术发展综述[J]. 红外技术, 2014, 36(7): 513-520.
- [3] Tan Yuting, Li Jiakun, Jin Weiqi, et al. Model analysis of the sensitivity of single-point sensor and IRFPA detectors used in gas leakage detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2489-2495. (in Chinese) 谭雨婷, 李家琨, 金伟其, 等. 气体泄漏的单点探测器与红外成像检测的灵敏度模拟分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2489-2495.
- [4] HITRAN on the web [EB/OL]. [2018-12-05]. <http://hitran.iao.ru/>.
- [5] Vollmer M, Möllmann K P. Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications [M]. Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, 2018: 107-350.
- [6] Furry D, Richards A, Lucier R, et al. Detection of volatile organic compounds (VOC's) with a spectrally filtered cooled mid-wave infrared camera [C]//Infra Mation 2005 Proceedings, 2005.
- [7] <https://www.flir.cn/browse/industrial/gas-detection-cameras>. [2018-12-20].
- [8] Mammen C H, Benson R G. Thermography camera configured for gas leak detection: US, 7, 649, 174 [P]. 2010-01-19.
- [9] Kasai N, Tsuchiya C, Fukuda T, et al. Propane gas leak detection by infrared absorption using carbon infrared emitter and infrared camera [J]. *NDT & E International*, 2011, 44(1): 57-60.
- [10] Zeng Y, Morris J. Calibration and quantification method for

- gas imaging camera: US, 225, 915[P]. 2015–12–29.
- [11] Zeng Y, Morris J, Sanders A, et al. Methods to determine response factors for infrared gas imagers used as quantitative measurement devices [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2017, 67(11): 1180–1191.
- [12] Abdel-Moati Hazem, Morris Jonathan, Zeng Yousheng, et al. New optical gas-imaging technology for quantifying fugitive-emission rates [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2016, 68(8):78–79.
- [13] EyeCGas®–Optical gas imaging camera [EB/OL]. [2018–12–20]. <http://eyecgas.com/>.
- [14] Sandsten J, Weibring P, Edner H, et al. Real-time gas-correlation imaging employing thermal background radiation [J]. *Optics Express*, 2000, 6(4): 92–103.
- [15] Sandsten J, Andersson M. Volume flow calculations on gas leaks imaged with infrared gas-correlation [J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20318–20329.
- [16] Cabib D, Lavi M, Orr H. Revival of circular variable filters [C]//Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications IV. International Society for Optics and Photonics, 2010, 7835: 78350O.
- [17] Cabib D, Orr H. Circular Variable Filters (CVF) at CI, progress and new performance [C]//Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications VI. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8542: 85420U.
- [18] Cabib D, Lavi M, Gil A, et al. A Long Wave Infrared (LWIR) spectral imager (7.7 to 12.3 μ) based on cooled detector array and high resolution Circular Variable Filter (CVF)[C]//Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications X. International Society for Optics and Photonics, 2013, 8896: 88960R.
- [19] Malm H, Gamfeldt A, von Würtemberg R M, et al. High image quality type –II superlattice detector for 3.3 μ m detection of volatile organic compounds[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 70: 34–39.
- [20] <https://imovase/products/>[2018–12–20].
- [21] Gagnon M A, Tremblay P, Savary S, et al. Direct imaging of shale gas leaks using passive thermal infrared hyperspectral imaging [C]//2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE, 2017: 4479–4481.
- [22] Products and services available at Telops [EB/OL]. [2018–12–20].<https://www.telops.com/products/>.
- [23] Gagnon M A, Jahjah K A, Marcotte F, et al. Time-resolved thermal infrared multispectral imaging of gases and minerals [C]// Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XI. International Society for Optics and Photonics, 2014, 9249: 92490U.
- [24] <http://www.softadir.com/application/commercial/>. [2019 –01 –05].
- [25] PICO640E–041 [EB/OL]. [2011–12–12].www.ulis-ir.com.
- [26] Naranjo E, Baliga S, Bernascolle P. IR gas imaging in an industrial setting [C]//Thermosense XXXII. International Society for Optics and Photonics, 2010, 7661: 76610K.
- [27] Naranjo E, Baliga S, Park J, et al. IR gas cloud imaging in oil and gas applications: immunity to false stimuli [C]//Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIII. International Society for Optics and Photonics, 2011, 8013: 80130B.
- [28] Bernascolle P F, Elichabe A, Fervel F, et al. Stand-off CWA imaging system: second sight MS [C]//Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XIII. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8358: 83581B.
- [29] Hagen N, Kester R T, Walker C. Real-time quantitative hydrocarbon gas imaging with the gas cloud imager (GCI) [C]//Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XIII. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8358: 83581J.
- [30] Kester R T. A real-time gas cloud imaging camera for fugitive emission detection and monitoring [C]//Applied Industrial Optics: Spectroscopy, Imaging and Metrology. Optical Society of America, 2012: AW1B. 1.
- [31] Hagen N, Kester R T, Morlier C G, et al. Video-rate spectral imaging of gas leaks in the longwave infrared[C]// Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XIV. International Society for Optics and Photonics, 2013, 8710: 871005.
- [32] VOX Imager BB (Broad Band) –Broadband uncooled IR video core [EB/OL]. [2019–01–10].www.scd.co.il.
- [33] Klipstein P, Mizrahi U, Fraenkel A, et al. Status of cooled and uncooled infrared detectors at SCD, Israel [J]. *Defence Science Journal*, 2013, 63(6): 555–570.
- [34] Barber R, Rodriguez–Conejo M A, Melendez J, et al. Design of an infrared imaging system for robotic inspection of gas leaks in industrial environments [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2015, 12(3): 23.

- [35] Linares R, Vergara G, Gutiérrez R, et al. Gas and flame detection and identification using uncooled MWIR imaging sensors [C]//Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVII. International Society for Optics and Photonics, 2015, 9485: 94851F.
- [36] Jin Weiqi, Dun Xiong, Wang Xia, et al. An infrared MW/LW spectral imaging optical system: China, 201210490490 [P]. 2013-03-20. (in Chinese)
金伟其, 顿雄, 王霞, 等. 一种红外中长波光谱成像光学系统: 中国, 201210490490[P]. 2013-03-20.
- [37] Jin W Q, Li J K, Dun X, et al. Wide-band gas leak imaging detection system using UFPA [C]//International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2014: Image Processing and Pattern Recognition. International Society for Optics and Photonics, 2014, 9301: 930102.
- [38] Wang Meirong. Key technologies for methane gas imaging detection [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
王美荣. 甲烷气体成像探测关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2012.
- [39] Tang Jing, Luo Xiuli, Liu Shaohua, et al. Infrared imaging detection of oil and natural gas leakage [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(1): 62-66. (in Chinese)
唐璟, 罗秀丽, 刘绍华, 等. 石油和天然气红外成像检漏[J]. *激光与红外*, 2016, 46(1): 62-66.
- [40] Xu Z, Jin W, Li L, et al. Band optimization of passive methane gas leak detection based on uncooled infrared focal plane array [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(15): 3991-4001.
- [41] Xiong Shifu. Studies on key technology of infrared thermal imaging detection and identification system for methane gas [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
熊仕富. 红外热成像甲烷气体探测与识别系统关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [42] Sabbah S, Harig R, Rusch P, et al. Remote sensing of gases by hyperspectral imaging: system performance and measurements[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(11): 111717.
- [43] Farley V, Vallières A, Chamberland M, et al. Performance of the FIRST: a long-wave infrared hyperspectral imaging sensor [C]//Optically Based Biological and Chemical Detection for Defence III. International Society for Optics and Photonics, 2006, 6398: 63980T.
- [44] Tegstam J F, Danjoux R. Gas leak detection in the oil and gas industry using infrared optical imaging [J]. *Thermografie-Kolloquium*, 2007(3): 1-10.
- [45] Benson R, Madding R, Lucier R, et al. Standoff passive optical leak detection of volatile organic compounds using a cooled InSb based infrared imager [C]//AWMA 99th Annual Meeting Papers, 2006: 131.
- [46] Ben-David A, Ifarraguerri A I, Samuels A C. Correlation spectroscopy with diffractive grating synthetic spectra and orthogonal subspace projection filters[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(2): 325-334.
- [47] Anderson K K, Tardiff M F, Chilton L K. Predicting the detectability of thin gaseous plumes in hyperspectral images using basis vectors [J]. *Sensors*, 2010, 10(9): 8652-8662.
- [48] Li J, Jin W, Wang X, et al. MRGC performance evaluation model of gas leak infrared imaging detection system [J]. *Optics Express*, 2014, 22(107): A1701-A1712.
- [49] Zhang X, Jin W, Li J, et al. Minimum detectable gas concentration performance evaluation method for gas leak infrared imaging detection systems [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2952-2959.
- [50] Benson R G, Panek J A, Drayton P. Direct measurements of minimum detectable vapor concentrations using passive infrared optical imaging systems [C]//Air and Waste Management Association's Annual Conference and Exhibition (AWMA), 2006.
- [51] Luo Xiuli, Tang Jing, Wang Lingxue, et al. Modeling and test of signal to noise ratio of leaking gas thermal imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1204003. (in Chinese)
罗秀丽, 唐璟, 王岭雪, 等. 热像仪探测泄漏气体的信噪比建模与测试[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(12): 1204003.
- [52] Hinrichs M, Gupta N. Comparison of QWIP to HgCdTe detectors for gas imaging [C]// Infrared Technology and Applications XXXIV. International Society for Optics and Photonics, 2008, 6940: 69401Q.
- [53] Vollmer M, Möllmann K P. IR imaging of CO₂: basics, experiments, and potential industrial applications [J]. *Proceedings IRS²*, 2011, 2011: 59-64.