

〈红外应用〉

石化企业气体泄漏红外成像检测技术实验研究与分析

迟晓铭^{1,2}

(1. 化学品安全全国重点实验室, 山东 青岛 266104;

2. 中石化安全工程研究院有限公司, 山东 青岛 266104)

摘要: 针对石化企业气体泄漏红外成像检测技术应用问题, 对常见气体甲烷、乙烯等开展实验研究, 系统性地研究了气体红外吸收特性、气体浓度、背景温度、探测器灵敏度影响因素并分析了气体红外热成像技术与红外光谱成像技术特点。在实验研究分析的基础上, 对企业提出使用建议, 为石化企业应用气体泄漏红外成像检测技术提供技术参考。

关键词: 气体泄漏; 红外; 光谱成像; 热成像; 影响因素

中图分类号: TE99.TN2 文献标志码: A 文章编号: 1001-8891(2024)08-0947-10

Experimental Research and Analysis of Infrared Imaging Detection Technology for Gas Leakage in Petrochemical Enterprises

CHI Xiaoming^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Chemical Safety, Qingdao 266104, China;

2. SINOPEC Research Institute of Safety Engineering Co., Ltd., Qingdao 266104, China)

Abstract: To apply infrared imaging detection technology for gas leakage in petrochemical enterprises, experimental research has been conducted on common gases such as methane and ethylene. The influencing factors, such as gas infrared absorption characteristics, gas concentration, background temperature, and detector sensitivity, were systematically studied, and the characteristics of gas infrared thermal imaging technology and infrared spectral imaging technology were analyzed. Based on the experimental research and analysis, some suggestions have been put forward for the application of infrared imaging detection technology for gas leakage in petrochemical enterprises.

Key words: gas leakage, infrared, spectral imaging, thermal imaging, influencing factors

0 引言

石化企业气体泄漏会造成环境污染、火灾、中毒、爆炸等事故, 危害巨大。企业现有泄漏检测方式主要为检测人员定期巡检与定点检测相结合的方式, 检测时必须对每个设备逐一进行接近式测量, 检测效率相对较低, 且无法接近高处的设备及工艺管线, 泄漏检测技术单一、有效性不足。近年来, 气体泄漏红外成像检测技术由于响应快、遥测成像等优势, 成为石化企业气体泄漏检测的有效手段之一^[1-2]。2015年11月环境保护部颁发的《石化企业泄漏检测与修复工作指南》^[3]中明

确要求, 光学检查通常采用基于红外热成像技术的气体泄漏探测专用设备(检查热像仪)。2019年9月住房和城乡建设部发布的国家标准《石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准》^[4]中新增了红外探测器内容, 进一步完善了探测器的布点和布置要求。气体泄漏红外成像检测技术中, 被动式红外成像检测技术基于气体分子对背景的辐射吸收, 不需要光源, 系统结构相对简单, 是实现气体泄漏快速检测的主要途径, 该技术又分为红外热成像技术和红外光谱成像技术^[5]。红外热成像技术通过在探测器前添加与待检测气体吸收波段对应的窄带滤光片, 实现气体泄漏直观、可视化成像

收稿日期: 2023-09-23; 修订日期: 2023-10-17.

作者简介: 迟晓铭(1994-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事气体泄漏检测技术研究与应用工作。E-mail: chixm.qday@sinopec.com

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技部项目(322084)。

显示,操作简便,不能定性辨别气体种类,根据探测器种类及是否采用制冷机分为制冷型与非制冷型。目前已有针对多种气体不同型号的气体热成像仪,能满足石化企业常见易燃易爆气体甲烷、乙烯等泄漏检测需求^[6]。红外光谱成像技术将热成像与气体的光谱吸收结合,采用棱镜色散成像、光栅色散成像、干涉成像、计算机层析成像等原理,可基于场景成像,通过比较待测物质光谱特性实现对物质种类的识别^[7-8],实现气体泄漏监测与报警。该技术按照光谱分辨率可分为多光谱、高光谱和超光谱,适用范围广,但操作复杂、设备通讯负荷高,成本较高^[9-10]。石化企业场景复杂,生产具有“三高”(高温、高压、高腐蚀)的特点,介质多为易燃易爆、有毒有害气体,红外成像技术作为气体泄漏检测的重要手段之一,应用时受到多种因素影响。本文对气体泄漏红外成像技术进行实验研究,比较红外热成像技术与红外光谱成像技术特点,系统性地研究气体红外吸收特性、气体浓度、背景温度、探测器灵敏度等因素对红外成像技术的影响规律,对企业科学有效地应用红外成像检测技术具有重要意义。

1 实验方法

1.1 原理

气体泄漏红外成像检测技术的原理是基于气体分子的红外吸收,气体分子一直处于运动状态,当背景红外辐射的能量与分子振动能级跃迁所需的能量相等时,气体会吸收这部分红外辐射能量由基态向激发态跃迁,使吸收区域的透射光强度减弱,产生红外

吸收光谱。不同种类的气体由于分子结构不同,对应不同的光谱特征吸收峰^[11]。在中、长波红外区域,2.5~7.52 μm(4000~1330 cm⁻¹)和 7.41~16.67 μm(1350~600 cm⁻¹)两个波段聚集了众多气体的吸收峰且避免了大气衰减的影响,是气体检测的理想波段。

气体目标及其背景的辐射过程可通过简化的3层传输模型表述^[12-13],如图1,每一层的热辐射量都包括本层的出射辐射和上一层的入射辐射, T_i 和 τ_i 分别为第*i*层的温度和透射率, T_{gas} 和 τ_{gas} 分别为气体的温度和透射率, $M_{i-\text{on}}$ 和 $M_{i-\text{off}}$ 分别为气体路径和非气体路径中各个层出射的总辐射, M_{BG} 为背景辐射。第一层为大气对背景辐射的吸收和散射;第二层为气体云团对背景辐射的吸收及气体云团自身发出的辐射;第三层为大气对背景和气体云团辐射的吸收和散射。沿着气体传播路径,当到达探测器前,通过气体路径的热辐射总量与非气体路径的热辐射总量差值在探测器灵敏度范围内,原则上气体可被检测到。

以被动式红外热成像系统为例,系统示意图如图2所示。环境中的红外辐射由红外镜头汇聚后,经滤光片滤光,仅通过特定波段的红外辐射,红外辐射信号被红外成像探测器接收后经过模数转换,形成红外图像。原始的红外图像经信号处理及控制系统,通过非均匀性校正、图像增强等过程后,以视频形式输出。

根据气体泄漏红外成像检测技术原理,红外成像技术的检测能力与气体的红外吸收能力、背景温度、探测器灵敏度等多种因素相关。

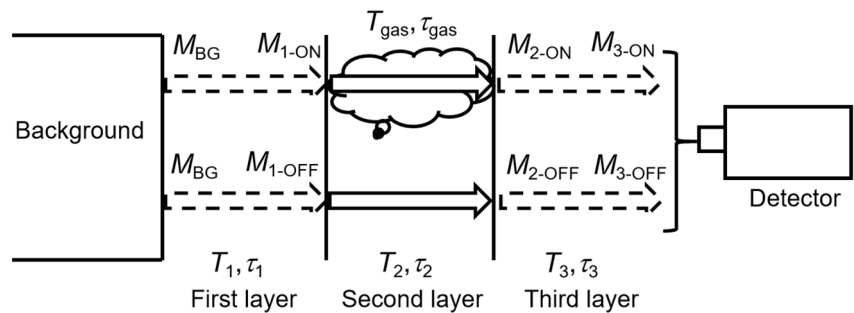


图1 三层辐射传输模型

Fig. 1 Three-layer radiation transmission model

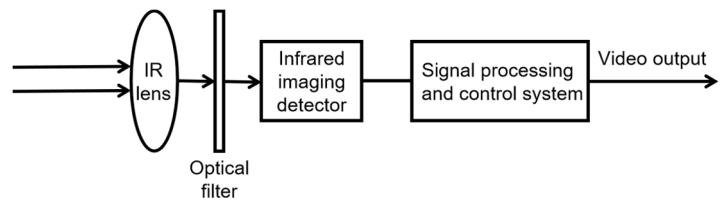


图2 被动式红外热成像系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of passive infrared thermal imaging system

1.2 实验仪器及材料

实验采用石化企业常见气体甲烷、乙烷、乙烯、丙烯等模拟气体泄漏，分别通过红外热成像技术与红外光谱成像技术检测并观察成像结果。共采用 6 种不同型号的红外热像仪与红外光谱成像仪，具体参数如下：①非制冷红外热像仪-1，中石化安全工程研究院有限公司定制化烯烃类热像仪，非制冷型面式成像探测器（8~14 μm），滤光片中心波长 10.6 μm；②非制冷红外热像仪-2，中石化安全工程研究院有限公司定制化烷烃类热像仪，非制冷型面式成像探测器（3~14 μm），滤光片中心波长 7.7 μm；③制冷红外热像仪-1，FLIR GF306，制冷型面式成像探测器（10.3~10.7 μm）；④制冷红外热像仪-2，FLIR GF320，制冷型面式成像探测器（3.2~3.4 μm）；⑤红外光谱成像仪-1，Rebellion GCI，非制冷型面式成像探测器（3~14 μm），高光谱成像；⑥红外光谱成像仪-2，Telops

Hyper-Cam，制冷型面式成像探测器（8~12 μm），高光谱成像。气体位于 8 L 气瓶中，气瓶瓶口与减压阀、流量计连接，气体经气体管路输出。通过在室外一固定铝板前放置不同温度的热水，模拟不同背景温度条件。研究不同种气体在不同浓度、不同背景温度、不同检测技术条件下的气体红外成像结果，实验仪器及材料如表 1，实验装置示意图如图 3。

1.3 实验步骤

为研究气体泄漏红外成像检测技术的影响因素、混合气体识别能力、监测能力，按照以下步骤开展实验，各个步骤间相互独立。其中，步骤①、②研究不同背景温度、不同气体种类、不同类型探测器、不同体积浓度的气体对红外成像检测技术的影响；步骤③研究红外热成像技术与红外光谱成像技术对混合气体的检测识别能力；步骤④、⑤研究气体泄漏红外成像检测技术的监测能力。具体步骤如下：

表 1 实验仪器及材料
Table 1 Experimental instruments and materials

Number	Category	Specification
1	Methane, ethane, propane, n-butane, ethylene, propylene, difluoroethane, sulfur hexafluoride	Volume concentration 99.99%
2	Ethylene, propylene, methane	Volume concentration 5%
3	Ammonia solution	Volume concentration 26%
4	Pressure reducing valve	Inlet pressure 16 MPa, outlet pressure 10 MPa
5	Flowmeter	0-5 L/min
6	25℃ hot water	1 L
7	75℃ hot water	1 L
8	Aluminium plate	Aluminium alloy, 30 cm×20 cm

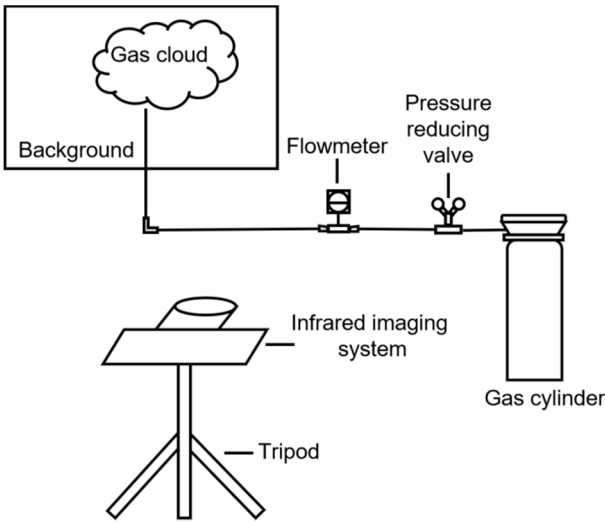


图 3 实验装置示意图
Fig. 3 Schematic diagram of experimental set-up

①释放气体体积浓度 5%的乙烯和丙烯，设置气体流量 4 L/min，分别以铝板、25℃热水、75℃热水为背景，同时用非制冷红外热像仪、制冷红外热像仪、红外光谱成像仪进行成像检测，研究不同背景温度、不同气体种类对气体泄漏红外成像检测技术的影响。其中，非制冷红外热像仪与制冷红外热像仪区别为探测器是否需要制冷机制冷，制冷红外热像仪采用斯特林制冷机，成本高、探测器灵敏度高。

②释放气体体积浓度为 5%和 99.99%的甲烷，设置气体流量 4 L/min，分别以铝板、75℃热水为背景，研究不同气体体积浓度、不同背景温度对气体泄漏红外成像检测技术的影响。

③同时释放甲烷、正丁烷、乙烯、丙烯、二氟乙烷、六氟化硫、氨气，采用红外热像仪与红外光谱成像仪进行成像检测，研究红外热成像技术与红外光谱成像技术对混合气体的检测识别能力。

④将甲烷气体和乙烯气体分别填充至直径 0.48 m 的气象气球中，监测距离 200 m，比较制冷型红外成像技术与非制冷红外成像技术特点。

⑤将乙烯气体填充至直径 1.5 m 的气象气球，将六氟化硫气体填充至 1 m×0.8 m 的气袋中释放，研究红外光谱成像技术远距离监测能力。

2 实验结果与讨论

2.1 影响因素测试

不同种类的气体有不同的光谱特征吸收峰，对应的光学检测波段不同。对乙烯和丙烯气体，两种气体在长波的光谱特征吸收峰接近（10.3~10.7 μm），分别采用非制冷红外热像仪、制冷红外热像仪、红外光谱成像仪在不同温度背景下进行红外成像检测。仪器设备均覆盖气体的光谱特征吸收峰，非制冷红外热像仪的探测器信噪比相对较低^[14]，比较不同种类气体在不同温度背景、不同种类探测器条件下的成像结果。对甲烷气体，采用制冷红外热像仪进行红外成像检测，探测器波段 3.2~3.4 μm，甲烷体积浓度为 5%和 99.99%，比较同一气体不同浓度的成像结果。实验时室外温度 19℃，测试结果如表 2，结果分别以可清晰观测到气体（Y）、观测不到气体（N）、可观测到微弱气体羽流（W）、可识别气体（I）表示，成像结果如图 4，图中红色方框为气体目标。

高温物体红外辐射强，在图像中呈现“高亮”态，低温物体红外辐射弱，在图像中呈现“灰黑”态，辐射差异越大，图像中“亮暗”对比越明显。根据实验结果：①对同种气体、同种浓度，气体本身的红外吸收能力一定，背景温度越高，红外辐射越强，气体与

表 2 实验条件及影响因素实验结果

Table 2 Experimental conditions and results of influencing factors					
Experiment number	Gas type	Volume concentration	Background	Equipment	Result
1	Ethylene	5%	25℃ hot water	Unrefrigerated thermal imaging system-1	N
2	Ethylene	5%	75℃ hot water	Unrefrigerated thermal imaging system-1	Y
3	Propylene	5%	75℃ hot water	Unrefrigerated thermal imaging system-1	N
4	Ethylene	5%	25℃ hot water	Refrigerated thermal imaging system -1	Y
5	Ethylene	5%	75℃ hot water	Refrigerated thermal imaging system -1	Y
6	Propylene	5%	75℃ hot water	Refrigerated thermal imaging system -1	W
7	Propylene	5%	75℃ hot water	Infrared spectral imaging system-1	I
8	Ethylene	5%	75℃ hot water	Infrared spectral imaging system-1	I
9	Methane	5%	Aluminium plate	Infrared spectral imaging system-1	I
10	Methane	5%	Aluminium plate	Refrigerated thermal imaging system -2	W
11	Methane	99.99%	Aluminium plate	Refrigerated thermal imaging system -2	Y
12	Methane	5%	75℃ hot water	Refrigerated thermal imaging system -2	W
13	Methane	99.99%	75℃ hot water	Refrigerated thermal imaging system -2	Y

环境背景的辐射相对差异越大,气体越容易被检出,如实验1和2;②相同实验条件下,不同气体种类由于自身的红外吸收能力不同,影响气体的检出结果,在长波波段,乙烯的红外吸收比丙烯强,气体的红外吸收与背景辐射差异大,对应气体泄漏位置与背景的灰度差值大,因此乙烯气体更易被检出,由于背景温度高于气体释放时的环境温度,气体呈“灰黑”态,乙烯气体比丙烯气体更“黑”,成像结果更优,如实验2和3、5和6;③同种气体、同种浓度、同种背景温度条件下,气体的红外吸收与背景的辐射差异相同,制冷红外成像探测器比非制冷红外成像探测器灵敏度高,更易检出气体,

如实验1和4、2和5、3和6;④红外光谱成像技术通过比较气体的特征吸收光谱库与检测路径上实测的红外吸收光谱,对比分析气体光谱特征吸收峰,判断识别泄漏的气体种类,热成像技术依据红外吸收原理,根据有无气体前后检测路径上的红外辐射差异,检测在探测波段范围内有无气体泄漏,不具备识别气体种类的能力,如实验7、8和9;⑤同一种类、不同浓度的气体红外吸收能力不同,浓度越高,红外吸收能力越强,与背景的红外辐射差异越大,对应气体泄漏位置与背景的灰度差值大,越易被检出,在图像中更“黑”,如实验10和11、12和13。

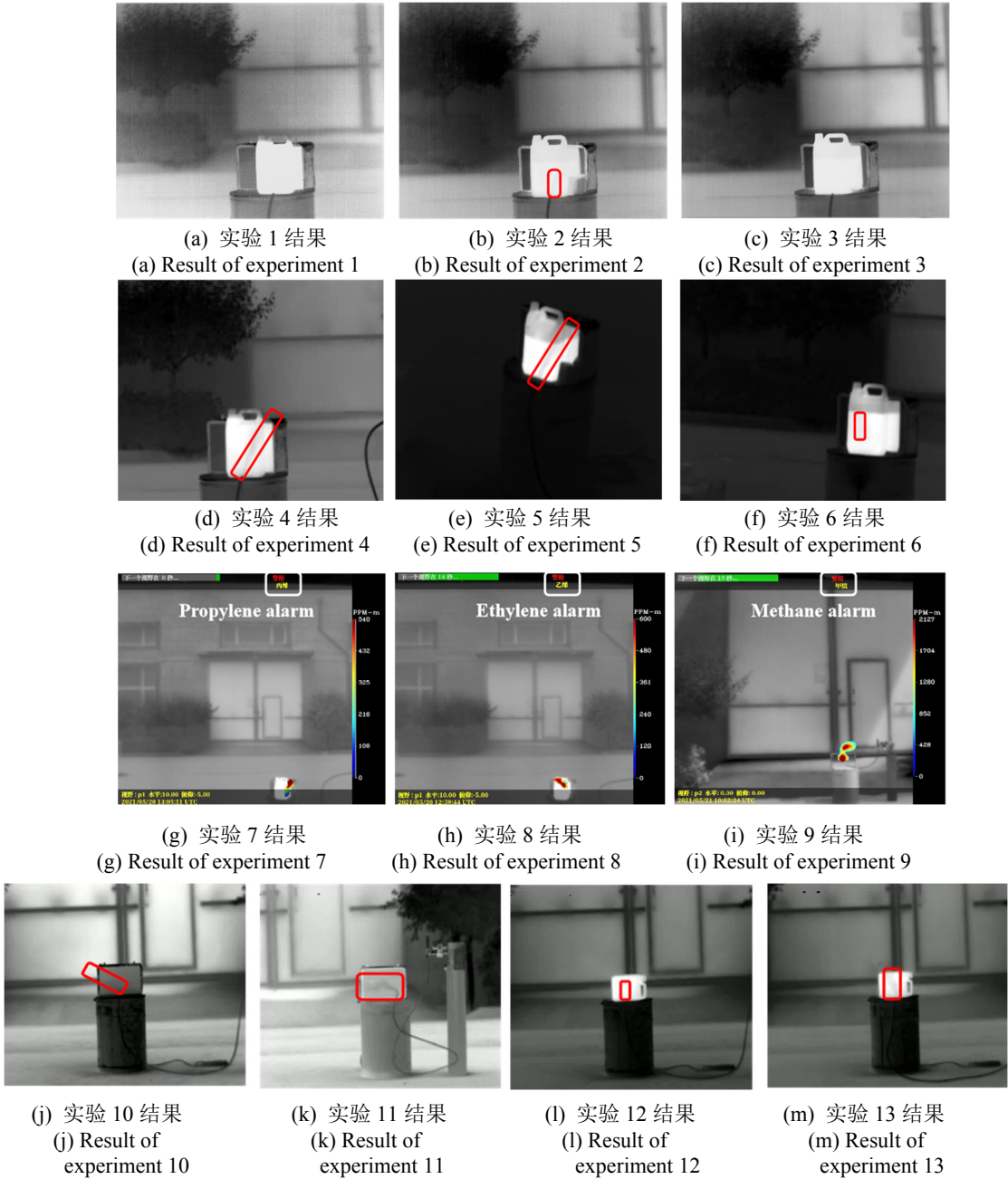


图4 影响因素实验结果

Fig.4 Experimental results of influencing factors

2.2 混合气体识别

气体泄漏红外热成像技术通过在探测器前添加窄带滤光片，响应待检测气体的光谱特征吸收峰，比较气体泄漏前后检测路径上的红外辐射差异，实现气体云团成像检测。气体的光谱特征吸收峰与成像系统覆盖的波段范围相匹配是气体泄漏成像检测的前提条件，检测路径上气体的光谱特征吸收峰在系统检测波段范围内，气体会被检出，以云团形式呈现在视频画面中，但是该技术不具备辨识气体种类的能力。气体泄漏光谱成像技术通过宽波段探测器，响应不同种气体的光谱吸收，比较检测路径上的红外吸收光谱与系统的气体吸收光谱库，识别泄漏的气体种类，混合气体间的光谱特征吸收峰对应的光谱波数差值在检测系统的光谱分辨率范围内，气体均可检测识别。分别对红外热成像技术与红外光谱成像技术进行混合气体成像测试，实验结果如表 3，成像结果如图 5。其中，制冷红外热像仪-2 的探测器范围 3.2~3.4 μm，可实现对常见烷烃气体的红外成像检测。实验距离 10m，同时释放甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷，这 4 种气体在 3.2~3.4 μm 均有红外吸收，系统能同时检出 4 种气体，可在成像画面中呈现气体云团，但不能区分气体种类，丙烷的红外吸收最强，与背景的辐射差异最大，在成像画面中最“黑”。制冷红外热像仪-1 的探测器范围 10.3~10.7 μm，实验距离 10 m，同时释放乙烯、六氟化硫、氨气，将氨水倒入至托盘中挥发释放氨气，这 3 种气体在 10.3~10.7 μm 均有红外吸收，系统能同时检出 3 种气体，可在成像画面中呈现气体云团，但不能区分气体种类，六氟化硫的红外吸收最强，与背景的辐射

差异最大，在成像画面中最“黑”。释放甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷时，制冷红外热像仪-1 检测不到气体，因为系统覆盖的波段范围与气体的光谱特征吸收波段不匹配。释放乙烯、六氟化硫、氨气时，乙烯在中波波段存在光谱特征吸收峰，因此制冷红外热像仪-2 能检测到乙烯，但乙烯在中波波段的红外吸收比在长波波段的红外吸收弱，成像结果不如制冷红外热像仪-1 明显。红外光谱成像仪-1 探测器波段 3~14 μm，通过多通道分光，将检测路径上的红外光谱与气体吸收光谱库比对，实现对不同气体光谱吸收的响应，辨识出气体种类。实验时，同时释放乙烯、丙烯、甲烷、正丁烷、氨气、六氟化硫、二氟乙烷共 7 种气体，设备响应识别出 6 种气体并报警。

2.3 监测能力测试

气体泄漏红外成像检测技术的监测能力主要受以下因素影响：①待监测气体的红外吸收能力，气体的红外吸收是前提条件，气体红外吸收能力越强，同等条件下技术的监测能力越强。②气体泄漏红外成像检测技术硬件的系统参数，如探测器阵列、镜头焦距等，根据系统硬件参数，可依据约翰逊准则估算成像视场中可识别的目标尺寸^[15-16]，镜头焦距越长，成像距离越远。如：40 mm 的红外镜头监测距离百米级，100 mm 的红外镜头监测距离可达公里级，长焦距镜头需加工定制，硬件成本也相应提高。③探测器灵敏度，红外成像探测器灵敏度越高，检测能力越强，制冷型红外成像探测器通过斯特林制冷机制冷，探测灵敏度优于非制冷型红外成像探测器。随着国产化

表 3 实验条件及混合气体泄漏红外成像结果
Table 3 Experimental conditions and infrared imaging results of mixed gas leakage

Experiment number	Gas type	Equipment	Result
14	Methane, ethane, propane, n-butane	Refrigerated thermal imaging system -2	Simultaneously detect 4 types of gases, propane showed significant results
15	Ethylene, ammonia, sulfur hexafluoride	Refrigerated thermal imaging system -1	Simultaneously detect 3 types of gases, sulfur hexafluoride showed significant results
16	Methane, n-butane, ethylene, propylene, difluoroethane, sulfur hexafluoride, ammonia	Infrared spectral imaging system-1	Simultaneously detect and identify 6 types of gases and alarm

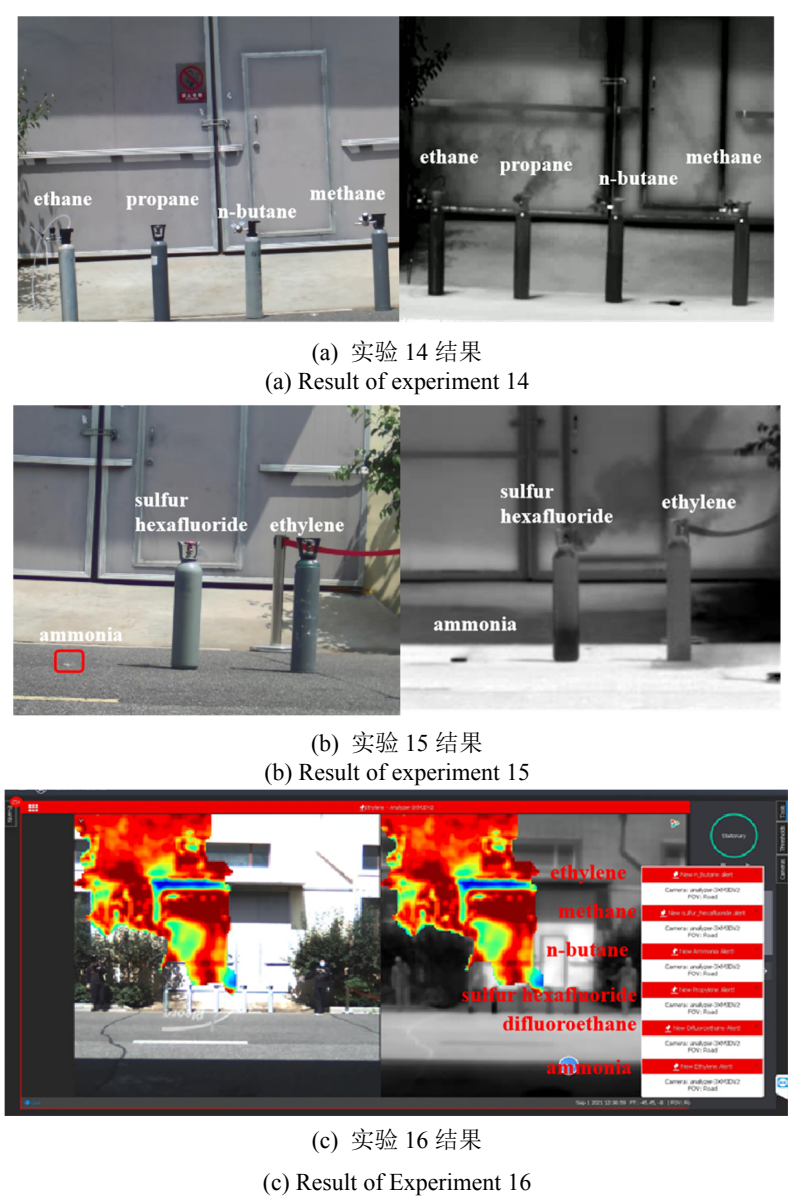


图 5 混合气体泄漏红外成像结果

Fig. 5 Infrared imaging results of mixed gas leakage

技术水平的提高，非制冷型探测器也逐步具备应用能力^[17]。④信号处理能力，气体泄漏红外成像检测技术从原理上可分为主动式检测技术和被动式检测技术，主动式红外成像检测技术通过发射激光等辐射源，信噪比高，但系统复杂、成本较高。被动式红外成像检测技术依靠气体与背景的辐射差异进行成像检测，结构简单、检测效率高，分为红外热成像技术与红外光谱成像技术。其中，红外光谱成像技术通过多通道分光、傅里叶变换、迈克尔逊干涉等原理获取待监测场景的光谱域和空间域信号，红外热成像技术通过添加窄带滤光片、加入图像增强等技术提升信噪比。

为验证气体泄漏红外成像检测技术的监测能力，分别将体积浓度为 99.99% 的甲烷气体和乙烯气体填

充至直径 0.48 m×0.48 m 的气象气球中，固定气球，在监测距离 200 m 处释放气体，比较红外成像技术的监测能力，实验结果如表 4，成像结果如图 6。结果分别以可清晰观测到气体（Y）、观测不到气体（N）、可观测到微弱气体羽流（W）、可识别气体（I）表示。实验装置如图 6(a)，图 6(b)和(c)分别为非制冷型和制冷型红外成像技术的监测结果，对甲烷气体，非制冷型红外成像技术观察到的气体羽流微弱，制冷型红外成像技术可观察到气体云团，但成像画面轮廓不清晰，图 6(c)为制冷型红外成像仪放大 2 倍的监测结果。成像结果的差别主要有 2 个原因：①非制冷红外成像技术的探测器在中波波段无吸收，检测甲烷时主要针对气体在长波波段的特征吸收峰（7.7 μm），制冷型红外成像技术主要针对甲烷在中波波段的特征吸收

峰 ($3.2\mu\text{m}$)，甲烷在中波波段的红外吸收强，因此更易被检出；②探测器的灵敏度差异，制冷型红外成像技术的探测器灵敏度更高，检测甲烷效果更优，但由于红外镜头的焦距限制 (38mm)，远距离监测时成像画面模糊，远距离成像监测适合使用长焦镜头^[17]。乙烯气体的红外特征吸收强，且主特征吸收峰集中在长波段 ($10.6\mu\text{m}$)，因此非制冷红外成像技术也可清晰监测乙烯气体泄漏，如图 6(d)。气体红外光谱成像技术获取气体光谱信号特征，通过特殊光学

原理处理信号，不仅可实现远距离气体泄漏监测，也可定性识别气体种类。如图 7，采用两种不同型号的红外光谱成像仪进行远距离成像测试，红外光谱成像仪-1 实现了 1050m 距离，直径 1.5m 的乙烯气球气体泄漏检测报警，红外光谱成像仪-2 实现了 1500m 距离， $0.8\text{m}\times 1\text{m}$ 的六氟化硫气袋气体泄漏检测报警。在上述实验条件下，本文采用的红外热成像监测技术失

表 4 实验条件及监测能力实验结果

Table 4 Experimental conditions and results of monitoring ability						
Experiment number	Gas type	Volume concentration	Distance /m	Target size/m	Equipment	Result
17	Methane	99.99%	10	0.48×0.48	Unrefrigerated thermal imaging system-2	W
18	Methane	99.99%	10	0.48×0.48	Refrigerated thermal imaging system-2	Y
19	Ethylene	99.99%	10	0.48×0.48	Unrefrigerated thermal imaging system-1	Y
20	Ethylene	99.99%	1050	1.5×1.5	Infrared spectral imaging system-1	I
21	Sulfur hexafluoride	99.99%	1500	0.8×1	Infrared spectral imaging system-2	I

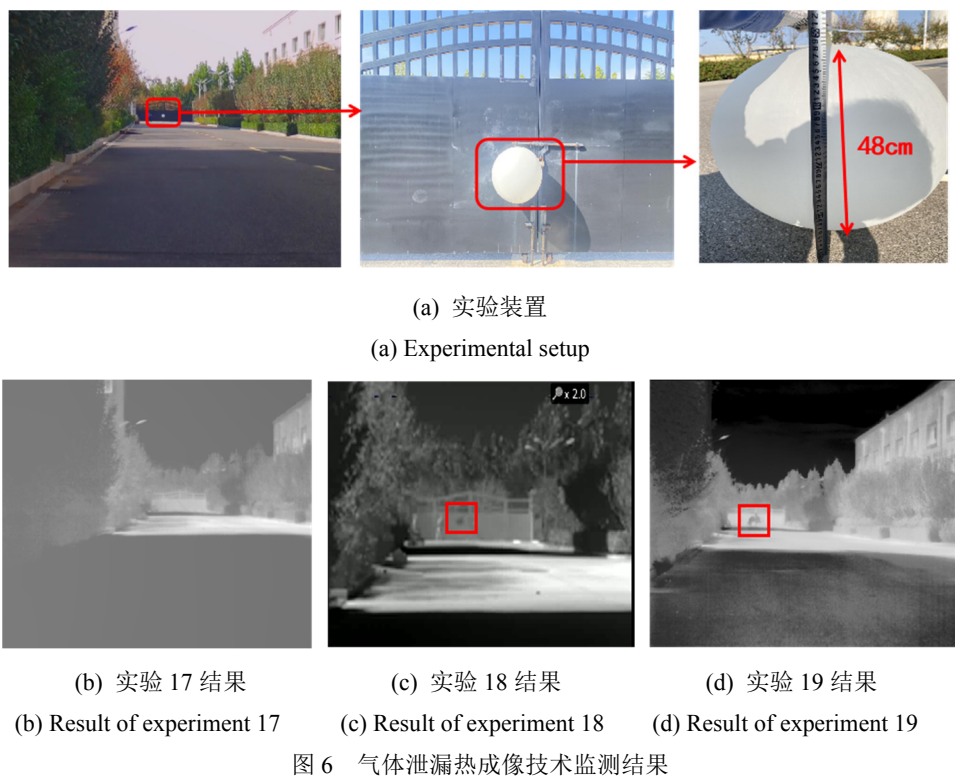
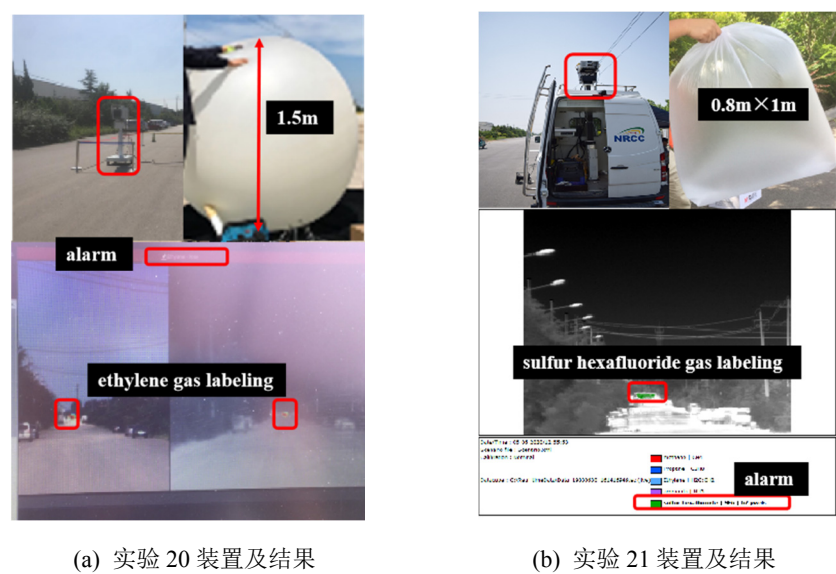


图 6 气体泄漏热成像技术监测结果

Fig. 6 Monitoring results of gas leakage by thermal imaging technology



(a) 实验 20 装置及结果 (b) 实验 21 装置及结果
(a) Experimental setup and result of experiment 20 (b) Experimental setup and result of experiment 21

图 7 红外光谱成像远距离监测结果

Fig. 7 Remote monitoring results of infrared spectral imaging

3 结论与建议

气体泄漏红外成像检测技术选型方面：①待检测气体的光谱特征吸收峰被检测技术的探测波段范围覆盖是前提条件，其中，红外光谱成像技术可根据气体的光谱吸收响应，检测识别出气体种类，但设备成本高、操作复杂、不适合作为常规检测手段；红外热成像技术操作简便、实用性高，可实现对已知易泄漏气体组分的工艺区块大范围快速监测，企业可通过固定高点安装，结合旋转云台，根据监测距离匹配定制不同焦距的红外镜头，实现厂区气体泄漏全覆盖监测。②红外热成像技术中，制冷型红外成像技术较非制冷红外成像技术灵敏度高，但使用寿命低（6000～8000h），随着非制冷红外成像技术的迅速发展，将成为长周期在线监测的重要手段。

气体泄漏红外成像检测技术应用方面：①应用时，可通过调整红外成像技术监测视角，以天空、高温设备等为背景，构建存在温差的视场，并排除水汽等干扰，呈现最优成像结果。②气体泄漏红外成像检测技术虽具备大范围、远距离、响应快等优势，但成像效果受目标与背景的辐射差异等影响因素限制，企业实际应用时，可结合多传感器阵列^[18]、声学阵列^[19]等多种检测方式组合使用，构建多维感知监测系统，提升泄漏综合监测预警能力。③气体泄漏红外成像技术检测气体目标形象直观，但主要依靠人工经验判别，泄漏气体目标机器识别预警^[20-23]将成为未来的发展趋势，如何针对实际应用场景的复杂性提升泄漏识别的准确性是研究重点，对企业智能化监测预警水平

的提升具有重要意义。

参考文献：

[1] 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.
LI Jiakun, JIN Weiqi, WANG Xia, et al. Review of gas leak infrared imaging detection technology [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(7): 513-520.

[2] 张振杰, 李志平, 张苗苗. 红外成像技术在石化装置易挥发性气体泄漏检测中的应用[J]. 山东化工, 2015, 44(12): 159-162.
ZHANG Zhenjie, LI Zhiping, ZHANG Miaomiao. Infrared thermal imaging technology in petrochemical device application of volatile gas leak detection[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2015, 44(12): 159-162.

[3] 环境保护部. 关于印发《石化行业 VOCs 污染源排查工作指南》及《石化企业泄漏检测与修复工作指南》的通知[EB/OL]. (2015-11-18)[2023-03-14]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201511/t20151124_317577.htm
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on Printing and Distributing "Guidelines for VOCs Pollution Source Investigation in Petrochemical Industry" and "Guidelines for Leak Detection and Repair Work in Petrochemical Enterprises"[EB/OL]. (2015-11-18) [2023-03-14]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201511/t20151124_317577.htm.

[4] 住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于发布国家标准《石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准》的公告[EB/OL]. (2019-9-25)[2023-03-14]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdgdgknr/tzgg/201911/20191101_242517.html
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Ministry of Housing and Urban-Rural Development on

- Issuing National Standards Announcement of "Petrochemical Combustible Gas and Toxic Gas Detection and Alarm Design Standards"[EB/OL]. (2019-9-25) [2023-03-14]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/tzgg/201911/20191101_242517.html.
- [5] 李家琨. 气体泄漏被动式红外成像检测理论及方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- LI Jiakun. Research on the Theory and Method of Passive Gas Leak Infrared Imaging Detection[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [6] FLIR. 气体泄漏检测热像仪[EB/OL]. [2023-03-14]. <https://www.flir.com/browse/industrial/gas-detection-cameras/>
- FLIR. Gas detection cameras[EB/OL]. [2023-03-14]. <https://www.flir.com/browse/industrial/gas-detection-cameras/>
- [7] Savary S, Gagnon J P, Gross K, et al. Standoff identification and quantification of flare emissions using infrared hyperspectral imaging[C]// *Conference on Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies VIII, Proceedings of SPIE*, 2011, **8024**: 1-8.
- [8] 朱亮, 邹兵, 高少华, 等. 红外成像光谱在泄漏气体处置中的应用研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, **52**(8): 118-123.
- ZHU Liang, ZOU Bing, GAO Shaohua, et al. Application research on infrared imaging spectroscopy in leakage gas disposal[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, **52**(8): 118-123.
- [9] Hagen N, Kester R T, Morlier C G, et al. Video-rate spectral imaging of gas leaks in the long-wave infrared[C]// *Conference on Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XIV, Proceedings of the SPIE*, 2013, **8710**: 1-7.
- [10] 刘欢, 胡畔宁, 魏莱. 气云成像摄像机气体泄漏监测技术研究及应用[J]. *天然气技术与经济*, 2019, **13**(1): 53-56, 83.
- LIU Huan, HU Panning, WEI Lai. Gas-cloud imaging cameras to monitor gas leakage[J]. *Natural Gas Technology*, 2019, **13**(1): 53-56, 83.
- [11] US. Department of Commerce. NIST Chemistry WebBook [EB/OL]. [2023-03-14]. <https://webbook.nist.gov/chemistry/form-ser/>.
- [12] Flanagan D F. Limits of Passive Remote Detection of Hazardous Vapors by Computer Simulation[C]// *Proceedings of SPIE*, 1996, **2763**: 117-127.
- [13] 张旭, 金伟其, 李力, 等. 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[J]. *红外与激光工程*, 2019, **48**(S2): 53-65.
- ZHANG Xu, JIN Weiqi, LI Li, et al. Research progress on passive infrared imaging detection technology and system performance evaluation of natural gas leakage[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, **48**(S2): 53-65.
- [14] 迟晓铭, 肖安山, 朱亮, 等. 石化企业气体泄漏红外成像检测技术研究进展[J]. *安全、健康和环境*, 2021, **21**(2): 1-5.
- CHI Xiaoming, XIAO Anshan, ZHU Liang, et al. Research progress of infrared imaging detection technology for gas leakage in petrochemical enterprises[J]. *Safety Health & Environment*, 2021, **21**(2): 1-5.
- [15] Sjaardema T, Smith C, Birch G. History and Evolution of the Johnson Criteria[R]. Albuquerque, Sandia National Lab, 2015: 1-40.
- [16] Vollmerhausen R H, Driggers R G, Wilson D L. Predicting range performance of sampled imagers by treating aliased signal as target-dependent noise[J]. *JOSA A*, 2008, **25**(8): 2055-2065.
- [17] 迟晓铭. 国产非制冷气体泄漏红外成像检测技术试验研究[J]. *安全、健康和环境*, 2023, **23**(2): 28-34.
- CHI Xiaoming. Experimental research on domestic uncooled infrared imaging technology of gas leakage[J]. *Safety Health & Environment*, 2023, **23**(2): 28-34.
- [18] 李明骏. 基于传感器阵列的危害气体快速预警与识别方法研发[J]. *传感技术学报*, 2021, **34**(8): 1069-1074.
- LI Mingjun. Research of rapid warning and recognition method for hazardous gases based on sensor array[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2021, **34**(8): 1069-1074.
- [19] 李明骏. 基于声成像的泄漏源三维空间定位技术研究[J]. *消防科学与技术*, 2023, **42**(7): 978-982.
- LI Mingjun. Research on three-dimensional spatial location of leakage source based on acoustic imaging[J]. *Fire Science and Technology*, 2023, **42**(7): 978-982.
- [20] WANG J, Tchampi L P, Ravikumar A P, et al. Machine vision for natural gas methane emissions detection using an infrared camera[J]. *Applied Energy*, 2020, **257**: 113998.
- [21] SHI J, CHANG Y, XU C, et al. Real-time leak detection using an infrared camera and faster R-CNN technique[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2020, **135**: 106780.
- [22] 何自芬, 曹辉柱, 张印辉, 等. 融合注意力分支特征的甲烷泄漏红外图像分割[J]. *红外技术*, 2023, **45**(4): 417-426.
- HE Zifen, CAO Huizhu, ZHANG Yinhui, et al. Infrared image segmentation of methane leaks incorporating attentional branching features[J]. *Infrared Technology*, 2023, **45**(4): 417-426.
- [23] 王琦, 潘夏童, 邢明玮, 等. 被动式红外成像气体目标智能检测算法及量化研究进展[J]. *控制与决策*, 2023, **38**(8): 2265-2282.
- WANG Qi, PAN Xiatong, XING Mingwei, et al. A survey of automatic gas leakage detection and quantification based on passive infrared imaging[J]. *Control and Decision*, 2023, **38**(8): 2265-2282.