

〈系统与amp;设计〉

气体泄漏热成像检测系统性能的多指标测试评价系统

秦超, 张旭, 袁盼, 金伟其, 李力, 王霞

(北京理工大学 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 目前针对气体泄漏热成像检测系统性能的相关评价技术还不够成熟, 相应评价指标的测试系统及其测量方法尚无系统的研究报道。而常规热成像系统的性能评价方法难以直接用于评价气体泄漏热成像检测系统对泄漏气体的探测能力, 本文结合泄漏气体特性及各测试系统的特点, 设计了一种可测量多类性能指标的气体泄漏热成像检测系统性能的测试评价系统, 并以乙烯和甲烷气体为检测目标在实验室环境中分别对 NECL、MRGC 和 MDGC 三种评价指标进行了实验测量, 结果表明了测试评价系统的可行性和实用性。

关键词: 气体泄漏热成像检测; 性能评价; 测试系统

中图分类号: TN219/TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2020)12-1134-07

Multi-index Test Evaluation System for Performance of Gas Leak Thermal Imaging Systems

QIN Chao, ZHANG Xu, YUAN Pan, JIN Weiqi, LI Li, WANG Xia

(MoE Key Lab of Photoelectronic Imaging Technology and System, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: At present, the technology for the performance evaluation of gas leak thermal imaging detectors is not sufficiently well-developed, and there is no systematic research report on the test systems or methods of the corresponding evaluation index. However, it is difficult for the performance evaluation methods of conventional thermal imaging cameras to directly evaluate the detection capabilities of gas leak thermal imaging systems. We designed a test and evaluation system that can measure the performance of gas leak thermal imaging systems with multiple types of performance indicators. NECL, MRGC, and MDGC were measured experimentally in a laboratory environment with ethylene and methane gas as the detection target. The experimental measurements verify that the test evaluation system is feasible and practical.

Key words: gas leak thermography, performance evaluation, test system

0 引言

近年来, 基于制冷或非制冷红外焦平面探测器的气体泄漏热成像检测系统不断推出^[1-3], 在气体泄漏检测的市场中所占份额逐渐增加。然而, 目前能够有效评估此类设备检测泄漏气体能力的相关方法和技术还不成熟, 相应的评价测试系统尚未统一。相应的性能指标主要分为两大类: ①第一类为直接利用泄漏气体自身特征, 将测试气体泄漏热成像检测系统对该类特征的检测极限作为描述系统检测性能的直观评价指标, 常用评价指标为最小可探测泄漏速率 (minimum

detectable leak rate, MDLR)^[1-2]; ②第二类基于常规热成像系统的性能评价技术, 针对气体目标的相关特性, 定义了气体泄漏热成像检测系统性能的实验室测量指标, 常用性能指标包括噪声等效浓度路径长度 (noise equivalent concentration path length, NECL)^[3-7]、最小可分辨气体浓度 (minimum resolvable gas concentration, MRGC)^[8-9]和最小可探测气体浓度 (minimum detectable gas concentration, MDGC)^[10]。其中, 第一类性能指标直观简便、动态场景成像且无需复杂的测量系统, 但其测量方法粗略, 未考虑气体温度、浓度及吸收特性等因素影响, 检测结果难以直接

收稿日期: 2020-07-03; 修订日期: 2020-09-09。

作者简介: 秦超 (1995-), 男, 湖南人, 硕士研究生, 主要从事气体泄漏红外成像检测技术研究。E-mail: 407394833@qq.com。

通信作者: 金伟其 (1961-), 男, 上海人, 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、光电检测与仪器等方面的研究工作。

E-mail: jinwq@bit.edu.cn。

基金项目: 北京市科委计划项目 (Z171100002817011)。

定量对比;第二类性能指标综合考虑了气体自身特性对气体泄漏热成像检测系统探测能力的影响,然而此类指标的测试原理限制其测量过程必须在实验室环境下进行。

目前各性能指标没有形成统一的测量标准,相应的测试系统也不完善,对于不同生产厂商或研究机构而言,使用单一指标描述气体泄漏热成像检测系统性能时,其值往往不具有可比性。因此,通过搭建统一的测试系统,建立稳定的测量环境,以多指标测量的方式能够更全面地获取气体泄漏热成像检测系统的性能。由于各评价指标性能模型的辐射传输过程具有较大的相似性,通过结合各指标测试系统的特点^[2-3,5,8,10],综合考虑实验室性能测试的安全性和稳定性,设计并搭建了一种可测量多指标的评价测试系统,能够对常见的气体泄漏热成像系统性能评价指标进行测量。本文主要介绍该测试系统的设计思想,并利用该测试系统在实验室测量了一款非制冷气体泄漏热成像检测系统的性能指标,验证了测试系统的有效性和实用性。

1 多指标测量的评价测试系统设计

1.1 测试系统设计

目前可有效描述气体泄漏热成像检测系统性能的评价指标为 NECL、MDLR、MRGC 和 MDGC,设计多指标测量的评价测试系统需要基于待测气体的相关特性(红外吸收特性、气体浓度、气体温度、气体压力和气云尺寸等),对各性能指标的测试方法和测量标准进行研究,提出相应的设计要求:①首先气体泄漏热成像检测系统需要选用与待测气体红外吸收特性相适应的成像波段;②采用特定的气室约束气云尺寸,使待测气体浓度在测量过程中均匀稳定,并从安全性考虑对气室采用常压设计;③需要均匀稳定且温度可控的目标或背景辐射源作为客观测量的基础;④测试系统可测量多种性能指标,并且可便捷地切换需要检测的性能指标;⑤确保与性能指标相关的测试变量如温度、气体浓度等可精确测得;⑥实验过程需要保证测试的安全性。基于以上设计要求,图1给出设计的测试系统原理框图。

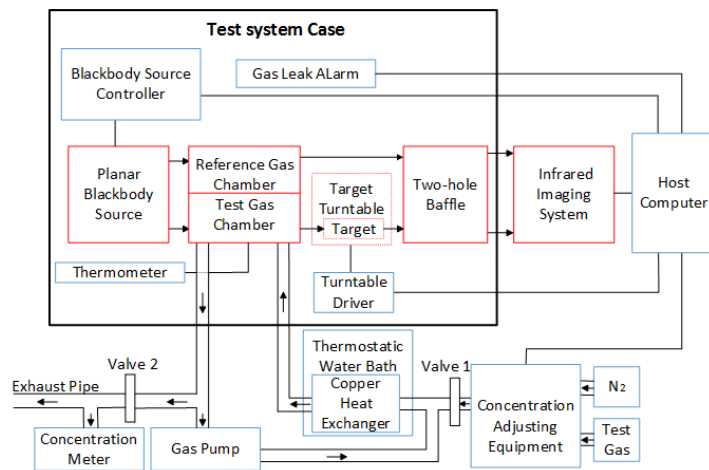


图1 多指标测量的评价测试系统原理框图

Fig.1 Functional block diagram of the evaluation test system for multi-index measurement

1.2 系统组成结构和功能实现

测试系统主要组成部件包括:黑体辐射源及控制器、气体浓度混合设备、双腔红外气室、恒温水浴箱及铜管换热器、气体循环泵、气体泄漏报警器、靶标转盘、黑体双孔挡板、浓度计、温度计等。待测气体泄漏热成像检测系统置于气室外侧,并对黑体靶标聚焦成像。上位机可控制黑体辐射源、气体浓度混合设备、黑体靶标轮盘等,并采集处理图像数据。

黑体双孔挡板正面均匀喷涂高发射率黑色涂料,用于提供均匀的测试背景,通过在双孔挡板的其中一孔安装空白参考靶标,并与靶标转盘配合(如图2),可在实验中灵活地切换靶标种类和单/双气室的使用。

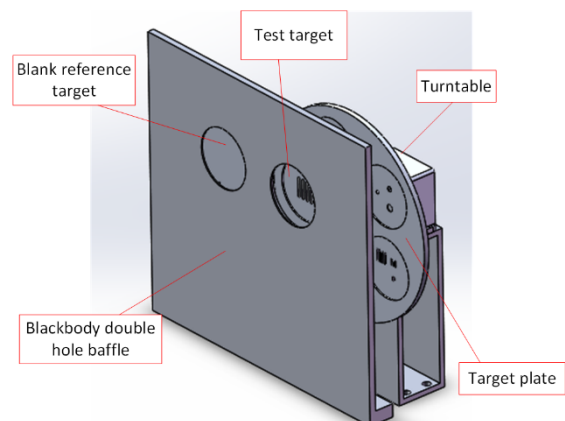


图2 黑体双孔挡板和靶标转盘

Fig.2 Blackbody double-hole baffle and target turntable

靶标转盘可装载5块不同类型的黑体靶标,靶标正面均匀喷涂发射率大于0.95的黑体涂料,背面镀制高反射率材料,并与导热性差的材料制成的隔热框固定,用于减小测试环境中环境温度变化的影响。黑体靶标元件用于在实验中测量气体泄漏热成像检测系统的MRGC和MDGC,由于MRGC和MDGC分别与热成像系统的最小可分辨温差MRTD(minimum resolvable temperature difference)和最小可探测温差MDTD(minimum detectable temperature difference)存在相似的测试原理^[11-12],因此根据气体泄漏热成像检测系统的技术参数,借鉴MRTD和MDTD的测量标准^[13-14],设计的黑体靶标尺寸如表1所示。

表1 靶标尺寸
Table 1 Target size

Circular target diameter/mm	0.68	1.28	2.04	2.55	3.83	5.10
Four-bar target cycle/mm	0.45	0.85	1.36	2.55	4.25	5.10

红外气室用于约束待测气体尺寸,使测量时待测气体的浓度均匀稳定,是气体泄漏热成像检测系统性能测试系统区别于普通热成像系统性能测试系统的关键组件(如图3所示)。气室被安装在靶标和黑体辐射源之间,分为目标气室和参考气室两个腔室,测量不同性能指标时根据需求选择单气室或双气室进行操作。此时,目标辐射由黑体辐射源经过目标气室中待测气体吸收后出射的辐射和待测气体自身辐射两部分组成,背景辐射为对应背景黑体的辐射。红外气室的通光口径 $\Phi 50\text{ mm}$,长度200 mm,气室窗口材料ZnSe,其表面镀制宽波段3~14 μm 增透膜,外框选用导热性差的材料聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl methacrylate),以减小外部环境对气室内待测气体温度的影响,在外框上合适位置还设有气体输入输出口、腔内气压表和温度计安装孔等。

测试系统其他重要部件如黑体辐射源,采用以色列CI-Systems公司面型黑体辐射源SR-800N,为实验测量提供均匀稳定温度可控的目标或背景辐射源;气体浓度混合采用成都莱峰科技公司Flux controller display-LFIX系列的混气仪,通过并联使用大量程和小量程质量流量控制器(mass flow controller, MFC),可较准确地控制待测气体的输出浓度和输出流量;由于部分评价指标如MRGC和MDGC的测量中需要使待测气体与背景黑体间具有较大温差,我们选用中国盛威实验仪器厂DC-1030的低温恒温水浴箱来控制通入红外气室的待测气体温度,并利用保温管连接气

体循环泵经由恒温水浴箱和目标气室设计气体循环路径,实现气室内待测气体的循环制冷并加速气体浓度混合均匀。



图3 双腔红外气室
Fig.3 Dual-chamber infrared gas chamber

实际搭建的气体泄漏热成像检测系统性能的评价测试系统如图4所示。由于测量MDLR需在开放空间释放待测气体,并严格控制风力等环境影响因素,出于对实验安全性和稳定性等方面的考虑,在后续实验室测量实验中未进行MDLR测试。

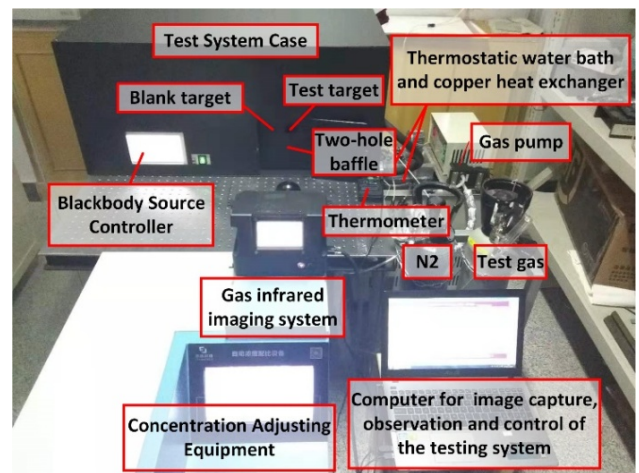


图4 多指标测量的评价测试系统
Fig.4 Evaluation test system for multi-index measurement

2 性能指标测量方法及结果分析

在实验室条件下,使用测试系统设计了各性能指标的测量实验,测量了自研的非制冷气体泄漏热成像检测系统^[15]对乙烯和甲烷气体成像检测的NECL、MRGC和MDGC三种性能评价指标值。该系统的响应波长为6.5~12 μm ,探测器像元数640×512,像元尺寸17 μm ,物镜焦距40 mm, F数0.8,特征频率 $f_0 = 1.1765\text{ cyc/mrad}$ 。

2.1 NECL 测量方法及结果分析

2.1.1 NECL 测量方法

NECL 定义为气体泄漏热成像检测系统输出目标图像信噪比为 1 时,沿检测系统视线方向的气体浓度分布路径积分。测量 NECL 可使用单气室分时段测试^[3]或双气室测试^[5],设计的测试系统采用双腔红外气室测量 NECL,可避免单气室测量的繁琐操作,并减少时间噪声对测量结果的影响。基于评价系统设计的 NECL 测量方法如下:

1) 调整气体泄漏热成像检测系统正对红外气室双腔中心,取下双孔挡板的空白参考靶标,转动靶标盘将测试靶标位置切换为空孔,使红外气室两腔成像在气体泄漏热成像检测系统的视野中心区域,调整成像系统位置,使双孔挡板高发射率一面覆盖成像系统的全部视场;

2) 利用无红外吸收的氮气清洗管道和气室,排出气路内二氧化碳、水蒸气和实验残余气体等影响测量结果的干扰气体;

3) 调节背景黑体温度为 T_b ,目标气室内待测气体温度为 T_g ,两者温差 $\Delta T = T_b - T_g$ 保持一定时,采集连续 100 帧 14 位图像原始数据,分别在成像区域目标气室和参考气室位置对应选定成像均匀的 30×30 像元区域,计算两像元区域内像元信号平均值分别为 I_{test} 和 I_{ref} ,令 $G = I_{test}/I_{ref}$,表示两气室测试信号的转换系数,可用于修正气室位置、窗口材料等不同引入的测量误差。

4) 将浓度为 c 的待测气体通入成像路径长度为 l 的目标气室,气室内待测气体浓度混合均匀并稳定后,采集连续 100 帧 14 位图像原始数据,计算参考气室对应选定像元区域信号随时间变化的标准偏差 $\sigma_t(x,y,cl)$,系统噪声包括时间和空间噪声,时间噪声由 $\sigma_t(x,y,cl)$ 的均值 $\bar{\sigma}_t(cl)$ 表示,空间噪声由各帧图像对应像元区域内信号的标准偏差 $\sigma_s(t,cl)$ 在连续 100 帧内的均值 $\bar{\sigma}_s(cl)$ 表示;

5) 由于待测气体的红外吸收特性,背景辐射信号经由待测气体被探测器接收后会产生信号衰减,利用双腔气室测量时信号衰减表示为 $\Delta S(cl) = I_{ref} \cdot G - I_{test}$,其中 I_{test} 和 I_{ref} 分别表示目标和参考气室方向对应选定像元区域内信号的平均值;

6) 调节目标气室内待测气体浓度,重复采集图像数据并计算对应的系统信号和噪声,计算不同浓度待测气体的系统输出图像信噪比 $SNR(cl)$ 为:

$$SNR(cl) = \Delta S(cl) / \sqrt{\bar{\sigma}_t^2(cl) + \bar{\sigma}_s^2(cl)} \quad (1)$$

7) 利用测量数据中系统信噪比与待测气体浓度

的对应关系拟合曲线,根据曲线拟合结果对应信噪比 $SNR(cl) = 1$ 时的气体浓度沿仪器视线方向的路径积分即为 $NECL(\Delta T)$ 。

2.1.2 NECL 测量结果分析

图 5 为实际测试场景中气体泄漏热成像检测系统对双腔红外气室的成像图像,图中从左往右两块圆形区域分别为未充入待测气体的参考气室和充入待测气体的目标气室成像区域,两区域内像素值较低部分为腔室内壁的成像区域,像素值较高部分为背景黑体经腔室内气体的成像区域。

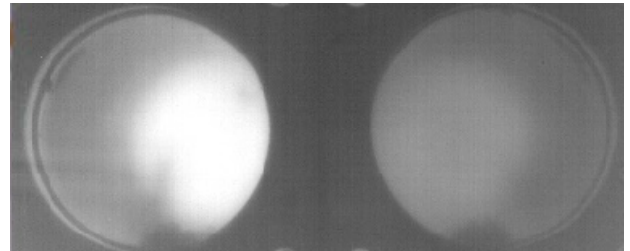
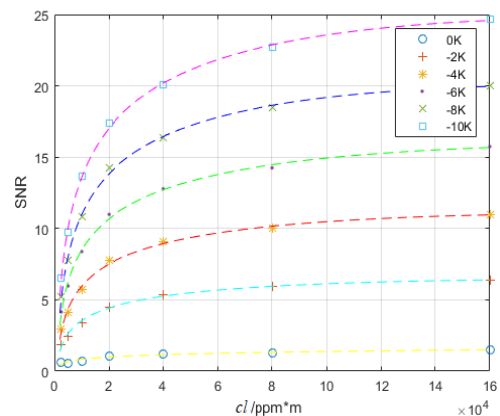


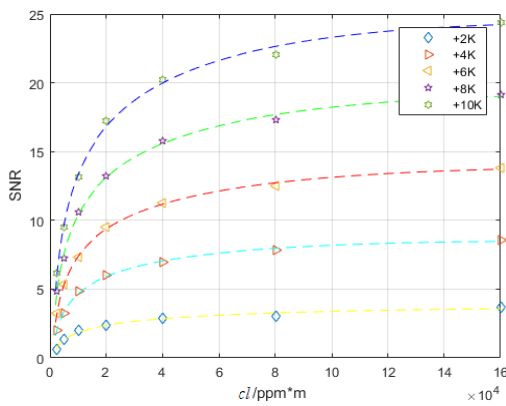
图 5 实测中双腔红外气室的成像图

Fig.5 Imaging of dual-chamber infrared gas chamber in the actual measurement

根据上述 NECL 测量方法,测试时会在参考气室和目标气室相应的气体成像区域内对应选定固定大小且成像均匀的像元块进行采样,并利用转换系数做了相应修正,不会影响最终的测量结果。实际测量时对待测气体为 28.1°C 的乙烯气体进行了测试,测得的气体目标与背景间温差为 $-10 \sim 10 \text{ K}$ 的乙烯气体浓度与系统信噪比对应关系的测量结果及拟合曲线如图 6 所示,根据图中测量数据可知,系统信噪比随气体浓度的变化先遵循对数关系,再趋于线性。这是由于随着目标气体浓度的提高,气体某些谱线的单色透射逐渐饱和,最终导致相应波长的所有光子能量被衰减,此时,通过提高气体浓度无法增大系统信噪比。



(a) $-10 \sim 0 \text{ K}$ 的测量数据



(b) 2~10K 的测量数据

图6 不同温差乙烯浓度-信噪比测量数据及拟合曲线

Fig.6 Measured results and fitting curve of ethylene concentration-SNR at different temperature differences

根据 NECL 的定义, 温差为 0 K 时, 系统噪声对信噪比-浓度的测量结果影响较大, 由图 6 的测量结果可见温差为 0 K 时曲线拟合效果较差, 根据拟合曲线测得的 NECL 值没有实际意义, 计算其他温差下对应的 NECL 值及其拟合曲线如图 7 所示。由测量结果可知, 气体目标与背景间的绝对温差越大 NECL 值越小, 绝对温差接近于零附近的某个较小值 (对应图 7 所示渐近线位置的温差值) 时, NECL 值趋于无穷, 此时气体泄漏热成像检测系统无法探测到气体目标。因此, 在对气体泄漏热成像检测系统性能的 NECL 指标进行测量时, 需要保证较大的测量温差, 同时对不同系统性能该指标的比较也应建立在相同测量温差下。

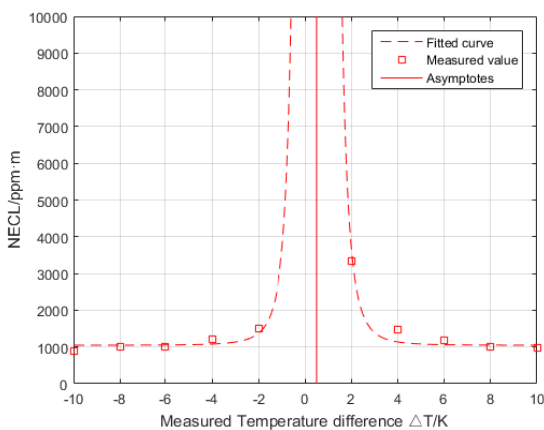


图7 不同温差 NECL 理想曲线和测量结果的拟合曲线

Fig.7 Ideal curve and fitting curves of measured results for NECL at different temperature differences

实验室测试 NECL 误差产生的主要原因为:

- 1) 实验数据采集过程中待测气体温度发生变化, 导致测量温差不准确;

- 2) 目标气室内待测气体混合不均匀, 导致系统信噪比随气体浓度无规律变化, 最终无法拟合测量数据计算 NECL;

- 3) 计算系统信噪比时选定的像元区域存在较多的像素坏点。

由图 6 所测数据, 温差不为 0 时拟合曲线方程的决定系数 $R^2 > 0.995$, 存在的测量误差在常规允许范围内。根据其测量模型分析, 由于红外气室窗口透过率小于 1, 图中渐近线对应温差位置从 0 K 向正温差方向有较小的偏移, 实际测试结果表明设计的测试系统及 NECL 测量方法可有效地测量气体泄漏热成像检测系统的 NECL 值。

2.2 MRGC、MDGC 测量方法及结果分析

2.2.1 MRGC、MDGC 测量方法

MRGC^[8]和 MDGC 模型^[10]是基于常规热成像系统的 MRTD 和 MDTD 模型建立的适用于气体目标检测性能的评价方法。根据定义^[8,10], MRGC 和 MDGC 分别指观察者不限时长观察检测系统成像图像时, 恰可分辨出目标四条带图案和恰可探测到圆状图案时对应的待测气体浓度沿检测系统视线方向的路径积分。由于 MRGC、MDGC 与 MRTD、MDTD 的测量原理基本相同, 利用设计的评价系统, 借鉴 MRTD 和 MDTD 的测量标准^[13-14], 设计 MRGC 和 MDGC 的测量方法如下:

- 1) 将空白参考靶标安装在双孔挡板上, 根据测量指标的种类 (MRGC 或 MDGC) 转动靶标盘将测试靶标位置切换为相应种类的黑体靶标 (四条带靶标或圆孔靶标), 使气室目标覆盖靶标镂空部分, 调整气体泄漏热成像检测系统位置, 使测试靶标图案位于视野中心, 然后通入氮气清洗气室及气路;

- 2) 测量 MRGC 时, 首先调节目标黑体的温度, 固定并记录当采集图像均匀且完全观察不到四条带靶标时的目标黑体温度 T_{b1} ; 在测量 MDGC 时, 满足上述观测条件的目标黑体温度的取值范围较大, 这里通过分别记录目标黑体与背景黑体之间温差为负值和正值时观察者恰好不能观测到圆状目标图案的目标黑体温度, 计算两者的平均温度 T_{b2} , 并调节目标黑体温度为 T_{b2} ;

- 3) 气室内待测气体的温度为 T_g , 保持待测气体温度与背景黑体间的温差相对稳定, 逐渐增大或减小气室内待测气体浓度, 当观察者恰可分辨出四条带目标图案 (或定位到圆状目标图案) 时, 此时对应的待测气体浓度沿检测系统视线方向的路径积分即为 MRGC 或 MDGC 的测量值, 假设气室内待测气体浓度均匀分布, 则 MRGC 或 MDGC 可表示为此时的待

测气体浓度与腔室有效长度的乘积。

4) 通过调整测试靶标尺寸和气体泄漏热成像检测系统的间隔距离, 改变测试靶标的空间频率或角直径, 重复上述步骤, 可得到反映 MRGC 和 MDGC 变化趋势的测量结果。

2.2.2 MRGC 和 MDGC 测量结果分析

根据实际泄漏场景中泄漏气体温度往往低于环境温度的特点, 在实验中测量了乙烯和甲烷气体温度低于背景黑体的 MRGC 和 MDGC 值。图 8(a)给出成像系统对乙烯气体温度为 24.4℃、背景温度为 29.0℃ 和甲烷气体温度为 25.4℃、背景温度为 29.8℃ 的 MRGC 测量值和拟合曲线, 图 8(b)给出气体泄漏热成像检测系统对乙烯气体温度为 24.3℃、背景温度为

29.0℃ 及甲烷气体温度为 24.8℃、背景温度为 29.9℃ 的 MDGC 测量值和拟合曲线。

根据图 8 中测量数据可以看出, 乙烯气体和甲烷气体的 MRGC 测量结果随空间频率的变化趋势与理论模型分析结果具有较好的一致性。对于 MDGC, 靶标角直径越大, 其值越小, 对应乙烯气体和甲烷气体的测量值随靶标角直径的变化趋势也与理论模型推导结论基本相符。其中, 测量误差主要来源于测试环境中的温度波动 ($\pm 0.1\text{ K}$)、气体浓度的测量精度 ($\pm 3\%$) 和人眼观测判读时的主观性误差, 存在的误差在常规允许范围之内, 表明所设计的多指标评价测试系统的可行性及 MRGC、MDGC 测量方法的有效性。

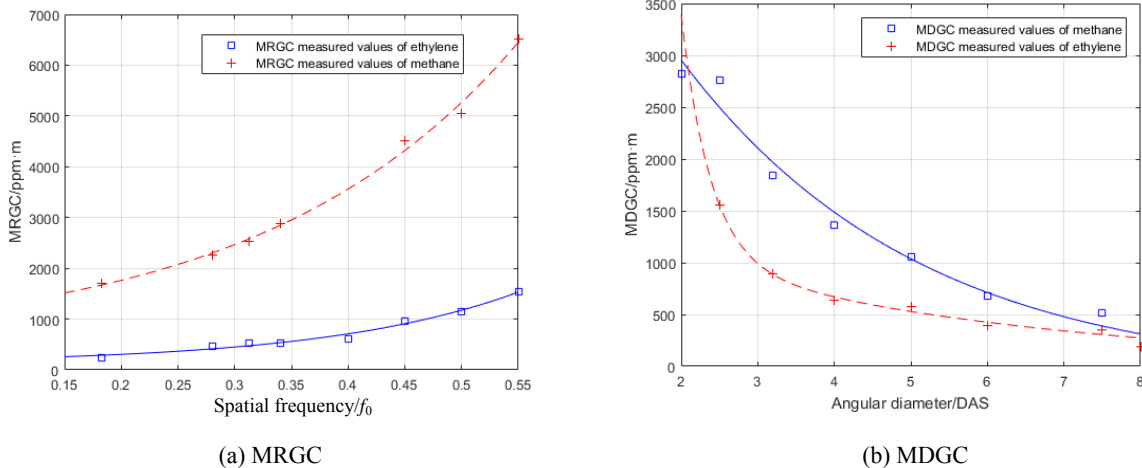


图 8 对乙烯、甲烷气体的 MRGC 和 MDGC 测量值
Fig.8 MRGC and MDGC measured values of ethylene and methane gas by gas thermal imager

3 结论

基于对泄漏气体自身特性及现有气体泄漏热成像检测系统性能评价技术的研究, 设计并搭建了一种气体泄漏热成像检测系统性能的多指标测试评价系统, 基于测试评价系统从实验的稳定性和操作的简便性方面改进了 NECL、MRGC 和 MDGC 的实验室测量方法, 充分考虑了气体相关特性和测试环境中的影响因素, 有效减小了测量误差, 并利用乙烯和甲烷气体进行了测量, 分析了实验测量误差的主要产生原因, 各指标的测量结果与理论推导结论具有较好的一致性, 说明了用于气体泄漏热成像检测系统性能的多指标测试评价系统及其测量方法的有效性。

对于气体泄漏热成像检测系统性能的多指标测试评价系统, 通过更有效的气体浓度和温度控制手段及研究主观性能指标的客观测量方法等途径, 可进一步减小实验误差, 在未来将有望发展为能够自动且有

效评价气体泄漏热成像检测系统性能的可靠平台。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Bernascolle P F, Elichabe A, Fervel F, et al. Stand-off CWA imaging system: Second sight MS[C]//Proc. of SPIE, 2012, **8358**: 83581B.
- [4] Flanigan D F. Detection of organic vapors with active and passive sensors: a comparison[J]. *Applied Optics*, 1986, **25**(23): 4253-4259.
- [5] 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: 1025.
- [6] 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.
- [7] Bendavid 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): 325-333.
- [8] LI Jiakun, JIN Weiqi, WANG Xia, et al. MRGC performance evaluation model of gas leak infrared imaging detection system[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(S7): A1701- A1712.
- [9] 李家琨, 金伟其, 王霞, 等. 气体泄漏红外成像检测系统的性能测试方法研究[J]. *北京理工大学学报*, 2016, **36**(6): 630-634.
- LI Jiakun, JIN Weiqi, WANG Xia, et al. Research on performance testing method of gas leak infrared imaging detection system[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2016, **36**(6): 630-634.
- [10] ZHANG Xu, JIN Weiqi, LI Jiakun, et al. Minimum detectable gas concentration performance evaluation method for gas leak infrared imaging detection systems[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(10): 2952-2959.
- [11] Holst G C. *Electro-optical Imaging System Performance*[M]. 5th ed: JCD Publishing, 2008: 316-381.
- [12] Holst G C. *Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems*[M]. 3rd ed: JCD Publishing, 2008: 307-318.
- [13] ASTM. Standard test method for minimum resolvable temperature difference for thermal imaging systems[S]. ASTM E 1213-97, 2009.
- [14] American Society for Testing and Materials. Standard test method for minimum detectable temperature difference for thermal imaging systems [S]. ASTM E 1311-89, 2010.
- [15] ZHANG X, JIN W, YUAN P, et al. Research on passive wide-band uncooled infrared imaging detection technology for gas leakage [C]//*International Conference on Optical Instruments and Technology*, 2019: doi:10.1117/12.2542906.

《红外技术》第八届编辑委员会名单

荣誉主编: 褚君浩 姜会林 曾毅 曾桂林

主 编: 苏君红

执行主编: 姚立斌

副 主 编: 刘逸平 唐 剑 李 凯 朱颖峰 陈 钱

蔡毅 何 力 金伟其 郑云峰(常务)

编 委(以姓氏笔画为序)

马文坡 王双保 王 霞 石 峰 卢 进 史衍丽 白廷柱 白 瑜

朱颖峰 刘逸平 麦绿波 苏君红 巫广华 李云红 李 凯 李晓峰

杨 宇 吴一冈 吴晗平 何 力 邹继鑫 汪岳峰 张长泉 张若岚

张建奇 陆 卫 陈 钱 陈效双 陈福胜 金伟其 郑云峰 郑 凯

赵勋杰 赵 俊 胡伟达 施加林 姚立斌 顾国华 凌福日 郭 杰

唐利斌 唐良瑞 唐 剑 姬荣斌 常本康 葛宝臻 蒋亚东 曾 宇

蔡毅 熊 平