

## 红外隐身涂料环温发射率校准技术

杨毓鑫 王学新 张旭 俞兵 李四维 谢毅 闫晓宇

### Emissivity calibration technology for infrared stealth coatings at ambient temperature

YANG Yuxin, WANG Xuexin, ZHANG Xu, YU Bing, LI Siwei, XIE Yi, YAN Xiaoyu

引用本文:

杨毓鑫, 王学新, 张旭, 等. 红外隐身涂料环温发射率校准技术[J]. 应用光学, 2023, 44(3): 655–660. DOI: 10.5768/JAO202344.0304004

YANG Yuxin, WANG Xuexin, ZHANG Xu, et al. Emissivity calibration technology for infrared stealth coatings at ambient temperature[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(3): 655–660. DOI: 10.5768/JAO202344.0304004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0304004>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 低温真空红外傅里叶光谱仪噪声等效辐亮度定标系统

Noise equivalent radiance calibration system for infrared Fourier spectrometer at low-temperature and vacuum environment

应用光学. 2019, 40(6): 1103–1108 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0603004>

#### 运输机蒙皮红外辐射特性建模与分析

Modeling and analysis of infrared radiation characteristics of transport aircraft skin

应用光学. 2019, 40(5): 923–928 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0509002>

#### 基于凸优化的傅里叶叠层成像技术研究

Research on Fourier ptychography technology based on convex optimization

应用光学. 2021, 42(4): 651–655 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0402003>

#### 高量值红外辐射照度校准技术研究

Study on calibration method for high infrared irradiance

应用光学. 2020, 41(6): 1262–1267 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0606001>

#### 考虑太阳辐射影响的飞机实时红外探测成像仿真

Real-time infrared detection imaging simulation of aircraft considering influence of solar radiation

应用光学. 2019, 40(6): 929–936 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0601001>

#### 目标辐射特性现场校准用大面积黑体辐射源技术研究

Research on technology of large area blackbody radiation source used in field calibration for target radiation characteristics

应用光学. 2021, 42(2): 292–298 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0203001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 03-0655-06

# 红外隐身涂料环温发射率校准技术

杨毓鑫, 王学新, 张旭, 俞兵, 李四维, 谢毅, 闫晓宇

(西安应用光学研究所 国防科技工业光学一级计量站, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 发射率作为飞机蒙皮隐身性能的关键指标, 是评估飞机综合隐身性能的重要手段。介绍了红外隐身涂料光谱发射率的测量方法, 研制了环境温度条件下红外隐身涂料光谱发射率校准装置, 设计了基于迈克尔逊干涉理论的傅里叶变换光谱仪实现光谱分光, 采用镀金积分球样品室实现信号的垂直入射与漫射接收, 实现了隐身涂层光谱发射率的准确测量。提出以漫反射片为标准物质的溯源方法, 实现了测量装置的溯源。利用校准装置对黄铜等样品的光谱发射率进行测量, 给出了光谱范围为  $3\ \mu\text{m}\sim 12\ \mu\text{m}$  的测量结果, 光谱发射率测量不确定度优于  $3.2\%$  ( $k=2$ )。

**关键词:** 红外隐身涂料; 飞机蒙皮; 发射率测量; 傅里叶光谱分光

中图分类号: TN216

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0304004

## Emissivity calibration technology for infrared stealth coatings at ambient temperature

YANG Yuxin, WANG Xuexin, ZHANG Xu, YU Bing, LI Siwei, XIE Yi, YAN Xiaoyu

(The First Scale Optical Metrology Station of the Science, Technology and Industry for National Defense, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** As the key index of stealth performance of aircraft skin, the emissivity is an important means to evaluate the comprehensive stealth performance of the aircraft. The spectral emissivity measurement method of infrared stealth coatings was introduced, and the corresponding calibration device at ambient temperature was established. A Fourier transform spectrometer based on Michelson interference theory was designed to realized the spectral splitting. The sample chamber with gold-plated integrating sphere was used to realize the vertical incidence and diffuse receiving of the signal, and the accurate measurement for spectral emissivity of stealthy coating was realized. A traceability method using diffuse reflection films as the reference standard was proposed, which realized the traceability of calibration device. Finally, the spectral emissivity of brass and other samples was measured by using the proposed calibration device, and the measurement results with a spectral range of  $3\ \mu\text{m}\sim 12\ \mu\text{m}$  were obtained. The measurement uncertainty of spectral emissivity is better than  $3.2\%$  ( $k=2$ ).

**Key words:** infrared stealth coatings; aircraft skin; emissivity measurement; Fourier spectrum spectroscopy

## 引言

随着红外传感器技术水平的飞速发展, 红外探测系统对各种目标的探测距离、识别准确度等都大大提升<sup>[1]</sup>。同时各国也开始大力发展红外隐身技术, 开展红外隐身材料研究<sup>[2-3]</sup>, 采用红外隐身材料作为蒙皮涂料, 是军用飞机降低自身发射率, 减弱敌方红外探测系统威胁的重要手段之一<sup>[4-5]</sup>。在不同红外波段下测量涂有隐身涂料蒙

皮样品的光谱发射率是一种经济有效的飞机隐身性能验证手段<sup>[6-7]</sup>。为了定量描述涂层材料的隐身效果, 研制了环境温度下红外隐身涂料光谱发射率校准装置, 采用傅里叶变换光谱仪作为光谱分光模块, 利用垂直入射/漫射接收的方法采集红外光谱信号, 通过与标准漫反射片比对获得材料光谱发射率测量结果, 为后续研究提供重要技术支持<sup>[8-10]</sup>。

收稿日期: 2022-05-26; 修回日期: 2022-11-07

作者简介: 杨毓鑫 (1995—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事红外辐射计量研究。E-mail: 15029580886@163.com

通信作者: 王学新 (1972—), 男, 博士, 研究员, 主要从事红外辐射计量研究。E-mail: wx205@163.com

## 1 测量方法

对于具有漫反射特性的材料,红外隐身涂料光谱发射率校准装置采用垂直入射/漫射接收的方法进行,通过测量标准片与被测样品的漫反射通量间接计算得到被测样品的半球发射率,示意图如图1所示。D为放置探测器窗口,探测器的响应度为固定值,将接收到的光信号转换为电信号;S为放置标准反射板或待测样品窗口;P为挡屏;M为反射镜<sup>[11]</sup>。积分球内部放置反射镜,入射光束经反射后到达被测样品,D与S之间放置P,防止标准片与被测样品之间第一次的反射光直接进入探测器<sup>[12]</sup>。到达被测样品的入射光光轴与被测样品法线之间夹角不大于 $10^\circ$ ,入射光束的光轴与任何光线之间夹角不大于 $5^\circ$ 。测量时任何规则漫反射光束不能从积分球的入射窗口出射<sup>[13]</sup>。入射光束通过积分球内部多次反射转换为漫反射通量后被探测器接收。入射窗的总面积不超过积分球内部反射面积的10%。

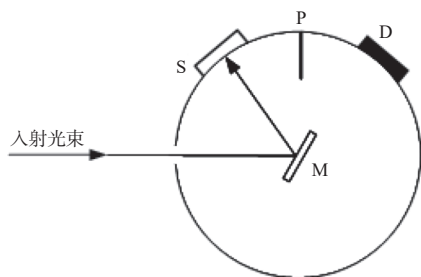


图1 光谱发射率测量示意图

Fig. 1 Schematic of spectral emissivity measurement

测量时将一块已知光谱反射率为 $\rho_\lambda^0$ 的标准漫反射片放置在S,测出其光谱反射通量转换后的电压信号为 $V_\lambda^0$ ,然后用被测样品替换标准片,测出其光谱反射通量转换后的电压信号为 $V_\lambda$ 。根据能量守恒定律,当物体表面温度处于稳定状态时,透明物体的光谱反射率、光谱发射率、光谱透过率之和为1。对于不透明物体,由基尔霍夫定律可知,光谱反射率与光谱发射率之和为1,即 $\varepsilon_\lambda = 1 - \rho_\lambda$ <sup>[14-15]</sup>。因此,被测样品的光谱发射率为

$$\varepsilon_\lambda = 1 - \frac{V_\lambda}{V_\lambda^0} \rho_\lambda^0 \quad (1)$$

## 2 校准装置组成

环境温度下红外隐身涂料光谱发射率校准装置主要由红外准直光源、光谱分光模块、积分球样

品室、红外探测系统、探测信号处理系统和计算机处理系统组成,如图2所示。红外准直光源提供覆盖波长范围 $3\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 的高稳定准直红外辐射信号。光谱分光模块为基于迈克尔逊干涉理论的傅里叶变化光谱仪,主要用于将红外辐射信号细分为最小光谱分辨率可达 $0.5\text{ cm}^{-1}$ 的单光谱信号。积分球样品室整体镀金,主要用于放置样品,使出射光束为漫射信号。红外探测系统用于红外辐射收集,并实现光电转换。探测信号处理系统主要用于探测器输出信号滤波放大及A/D转换等。计算机处理系统主要用于主机控制和数据采集计算,显示测量结果。

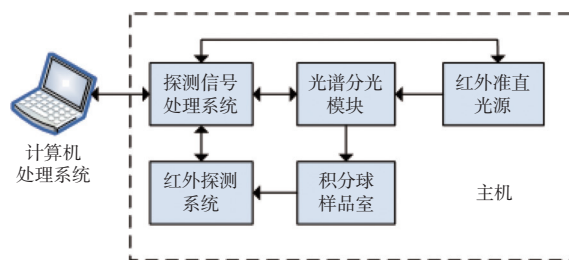


图2 光谱发射率校准装置示意图

Fig. 2 Schematic of spectral emissivity calibration device

光谱发射率校准装置工作原理如图3所示。红外光源1发出的辐射,经过光阑2和准直镜3准直后变为平行辐射,平行辐射进入光谱分光模块4后细分为连续单色光,然后通过积分球窗口6照射到被测样品7上,单色光经过被测样品7发生漫反射,漫反射光在积分球5内通过多次反射后照射到红外探测器8的光敏面上,通过探测器光电转换后光信号转换为电信号,通过探测信号处理系统后被计算机采集。2次测量得到标准漫反射片和被测样品的光谱电压信号,通过比较得到被测样品的光谱反射率,根据式(1)即可得到被测样品的半球发射率<sup>[16]</sup>。

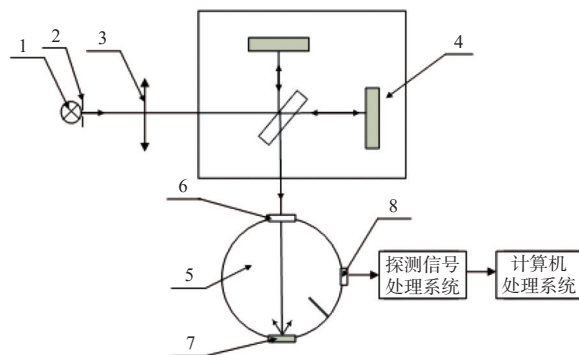


图3 光谱发射率测量装置结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of spectral emissivity calibration device

## 2.1 红外准直光源

红外准直光源主要由红外光源、光阑和准直镜组成。光谱发射率校准装置需要的理想红外光源应具备以下特征: 1) 光源发出的光谱连续, 在所使用的波长范围内可提供连续辐射; 2) 辐射能量不随着波长的变化而变化, 且具有足够的强度; 3) 使用寿命长; 4) 具有良好的稳定性<sup>[17-18]</sup>。

红外光源一般选择性能稳定不易氧化的材料制作, 并且通电后发热能够产生高强度的红外辐射, 通常使用的主要有能斯特灯、硅碳棒光源以及陶瓷光源。能斯特灯是由氧化锆、氧化钇、氧化钽混合物烧结而成的中空棒或实心棒, 其两端绕有铂丝作为电极, 工作时不用水冷却, 发出的光强较强, 但机械强度较差, 使用前需预热。硅碳棒是一种红外辐射的强光源, 适合在波数  $100\text{ cm}^{-1}\sim 6\,000\text{ cm}^{-1}$  范围应用。传统硅碳棒的优点是光源能量高、功率大、发光面积大、较坚固, 缺点是耗能高、热辐射强, 使用时两端需要用水冷却电极接触点。陶瓷光源是陶瓷器件保护下的镍铬铁合金线光源, 早期的陶瓷光源为水冷却光源, 现在使用的基本为空气冷却光源。光谱发射率校准装置选用的光源为陶瓷光源, 可覆盖  $0.4\text{ }\mu\text{m}\sim 30\text{ }\mu\text{m}$  的波段范围。

电动孔径光阑用于调节辐射通量, 光阑孔径大小可变。当增大光阑孔径时, 辐射通量就加大, 有利于提高装置的灵敏度; 而缩小光阑孔径时, 光通量降低, 但可挡掉一些杂散光, 改善输出信号的质量, 可以提高光谱分辨率。光阑设置不当, 散射光过强, 测量重复性降低, 光谱会产生峰位移。准直镜为抛物面反射镜, 用于将红外光源发出的点源辐射准直为平行光。采用离轴全反射式设计, 无中心遮挡, 表面镀高反射金膜, 确保有充足的光通量进入分光模块, 提高了装置的信噪比。

## 2.2 光谱分光模块

光谱分光模块是光谱发射率校准装置的关键组件, 其性能水平对发射率测量结果有重要影响。

常用的光谱分光方式主要有 3 种: 光栅分光、CVF 分光和傅里叶干涉分光。光栅分光利用衍射原理, 通过光栅的旋转实现分光, 光栅采用电机控制, 扫描一次时间较长, 测量速度慢。CVF 分光装置采用渐变滤光片旋转实现分光, 其波长分辨率比较低, 一次测量可采集 100 个波长的信号。傅里叶干涉分光是目前最先进的分光方式, 基于迈克尔逊干涉理论, 将空间调制转换到时间调制型的

干涉光谱, 主要由动镜、定镜、分束器、补偿板等组成, 具有扫描速度快、灵敏度高、光谱分辨率高、光通量高、信噪比高、杂散光抑制能力强等优点, 适合于快速、高精度、宽光谱测量<sup>[19]</sup>。

光谱分光模块采用基于迈克尔逊干涉理论的傅里叶变换光谱仪, 其结构示意图如图 4 所示。动镜与定镜为 2 块精密磨光的平面反射镜, 相互垂直安装构成光谱仪的两臂, 动镜在直线运动机构的驱动下沿轴向前后移动; 定镜保持位置不变, 分束器的后表面上镀有由一种半透半反的光学材料制成的分束膜, 即为介质膜分束器, 入射光线在分束膜处通过反射和透射被分成 2 束光, 在光路中加入补偿板以保证两光束间无相位差, 光谱分光模块采用直线型动镜产生光程差, 从而实现干涉分光。

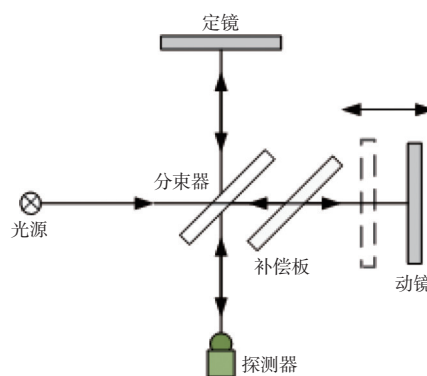


图 4 光谱分光模块结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of spectral spectrometer module

光谱分辨率是指分光仪器对 2 个相邻的谱线的辨别能力, 分辨率影响光谱发射率测量结果的准确性。傅里叶变换光谱仪的光谱分辨率由扫描速度决定, 可达到色散型分光仪器的数百倍, 且在任意测量时间内都能获得辐射源所有频率的全部信息。傅里叶变换光谱仪的扫描速度主要由动镜的移动速度决定, 动镜移动一次即可采集所有信息。因此一般采用在一次测量中多次扫描, 累加求平均的方法得到干涉光谱图, 同时有效地提高了信噪比, 在相同的总测量时间和相同的光谱分辨率条件下, 傅里叶变换光谱仪信噪比可达色散型分光仪器的 10 倍以上。因此, 采用傅里叶变换光谱作为光谱分光模块, 校准装置的光谱分辨率可达  $0.5\text{ cm}^{-1}$ 。

波数的准确性是指经过傅里叶变换后得到的光谱图中吸收峰对应的波数值与该吸收峰真实波数值的一致性, 波数是光谱发射率定性分析的关

键参数,波数准确性影响校准装置的重复性。傅里叶变换光谱仪的波数准确性可由分光装置中动镜精确驱动控制,而动镜的移动距离可通过激光光源的干涉条纹来测量。傅里叶变换光谱仪一般采用 He-Ne 气体激光器作为激光光源,在激光器内部,气体分子在电子振荡器的激励下发生非弹性碰撞,当电子跃迁时产生激光。He-Ne 激光器能产生噪声低、功率稳定性好、发散角小的优质光束。激光光束的光谱线宽窄,具有很好的单色性,能保持长距离的相干性,拥有高频率稳定性和高强度稳定度性能,最高的频率稳定度优于  $5 \times 10^{-10}$ ,从而保证傅里叶变换后得到的光谱图有很高的波数精度和准确度,满足光谱分光模块的重复性要求。

### 2.3 红外探测系统与探测信号处理系统

红外探测器是光谱发射率校准装置中信号采集的核心器件,通常分为热探测器和光子探测器两大类。热探测器中性能最好的为热释电探测器,可全波段响应,实际工作波长范围仅受到窗口材料限制。热释电红外探测器中最常用的为 TGS (Tri-glycine sulfate) 探测器,主要采用硫酸三甘肽晶体 ( $(\text{NH}_2\text{CHCOOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ ) 制成,利用热释电效应工作。热释电效应和入射光的波长及强度有关,故可以利用它探测红外干涉光信号。DTGS(Deuterated tri-glyceride sulfate) 是目前使用最广的中红外探测器,即为氘化的 TGS 探测器,可在室温下工作,且无需液氮或其他冷却装置。居里点温度为  $62^\circ\text{C}$ ,热点系数小于 TGS。在传统的 DTGS 上涂上 L-丙氨酸,可提高探测器的热电系数和极化的稳定性。因此,光谱发射率校准装置采用热释电型探测器采集红外光谱信号。

探测器信号处理系统组成框图如图 5 所示。在探测器信号处理系统中,当测量高发射样品时,红外探测器接收到的信号非常小,微弱信号探测容易受到环境和电场的干扰,因而探测器信号电路全部安装在一个屏蔽罩内。在注意抑制干扰的同时对信号进行放大处理,放大电路采用自有噪声低且抑制比高的电路设计,保证探测器由稳定且低噪声的电源供电,提高其微弱电流信号的输出质量,同时也保证了后续放大与滤波电路不被引入较多的电源噪声。除了采用外壳屏蔽外,其与探测器的数据线采用屏蔽线,确保信号不受干扰。在放大电路之后再加一高阶带通滤波电路来进一步削弱噪声的影响,提高装置的信噪比。为了适应不同信号强度的探测,探测器信号处理系

统增加了增益调节功能。数据采集处理卡的作用就是将红外探测器输出的电信号通过模拟电路放大滤波等操作以后,经过模数转换器转换成数字信号输入计算机。

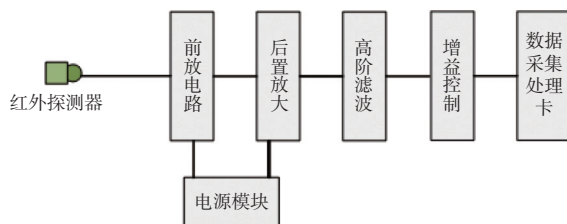


图 5 红外探测器信号处理模块框图

Fig. 5 Block diagram of infrared detector signal processing module

## 3 实验结果与分析

### 3.1 发射率的测量

实验中采用镀金标准漫反射片作为参考样品,反射率为  $\rho_{\lambda}^0$ , 将其放在样品窗口处探测其响应信号,测量得到基准光谱曲线。由被测样品取代标准板,探测得出被测样品的光谱响应信号,并通过测量软件计算得到被测样品相对于标准板的反射通量的电压信号之比,即  $V_{\lambda}/V_{\lambda}^0$ ,代入式(1)可得到被测样品的光谱发射率。

### 3.2 实验结果

采用校准装置测量得到黄铜、不锈钢(光面)、不锈钢(毛面)样品的发射率,如图 6 所示。对环温下黄铜样品和光面、毛面不锈钢样品在  $3\ \mu\text{m} \sim 12\ \mu\text{m}$  波长下的光谱发射率测量结果如图 7 所示。对黄铜样品进行 6 次测量后,在 3 个典型波长处的发射率测量重复性结果如表 1 所示。

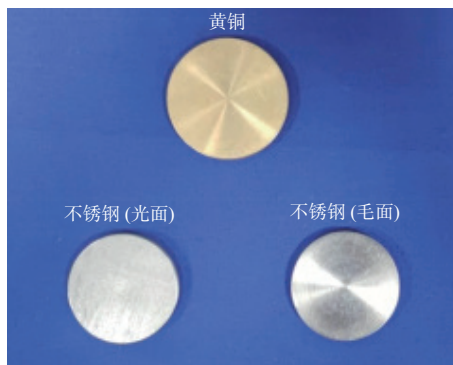


图 6 黄铜、不锈钢(光面)、不锈钢(毛面)样品

Fig. 6 Samples of brass, stainless steel (smooth), and stainless steel (rough)

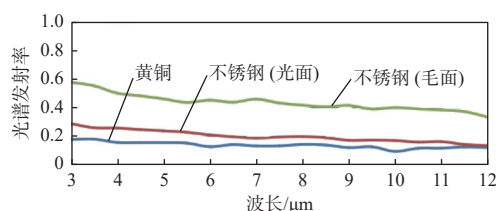


图7 校准装置光谱发射率测量结果

Fig. 7 Measurement results of spectral emissivity for calibration device

表1 黄铜样品测量结果重复性

Table 1 Repeatability of measurement results for brass samples

波长/ $\mu\text{m}$	黄铜发射率测量结果						重复性 $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}{n-1}}$
	I	II	III	IV	V	VI	
5.0	0.15	0.15	0.16	0.15	0.15	0.15	0.002
8.0	0.15	0.14	0.14	0.14	0.15	0.14	0.007
12.0	0.12	0.11	0.12	0.12	0.13	0.12	0.005

### 3.3 测量不确定度评估

光谱发射率测量采用反射法,其测量不确定度的主要来源有:标准漫反射片带来的测量不确定度 $u_1$ ;装置标定的非线性引起的测量不确定度 $u_2$ ;测量结果重复性引起A类测量不确定度 $u_3$ ;重复性引入的测量不确定度由重复性试验得到。

由于各分量之间独立不相关,所以合成相对标准不确定度<sup>[20-22]</sup>为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad (2)$$

按照置信水平为95%,取 $k=2$ ,则相对扩展测量不确定度为

$$U_{\text{rel}} = ku_c \quad (3)$$

将所有不确定度分量代入,计算得到测量黄铜样品时,光谱发射率校准装置的不确定度为3.2%。在后续的研究中,提高校准装置的标标准度,有利于测量不确定度提升。

## 4 结论

介绍了一种环境温度下红外隐身涂料光谱发射率测量方法,采用垂直入射/漫射接收的方法及间接计算,实现了光谱发射率测量。在此基础上,建立了环温下红外隐身涂料光谱发射率校准装置,提出了以标准漫反射片为标准的溯源方法,实现了校准装置的溯源。测量光谱范围为 $3\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ ,测量不确定度为3.2%( $k=2$ )。

随着飞行器红外隐身技术与红外探测系统的持续发展,该装置可为飞机红外隐身性能的评价与提升提供计量保障,具有广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 文娇,李介博,孙井永,等. 红外探测与红外隐身材料研究进展[J]. 航空材料学报, 2021, 41(3): 66-82.  
WEN Jiao, LI Jiebo, SUN Jingyong, et al. Research progress of infrared detection and infrared stealth materials[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(3): 66-82.
- [2] 湛玉莲,李春海,郭少云,等. 红外隐身材料研究进展[J]. 红外技术, 2021, 43(4): 312-323.  
SHEN Yulian, LI Chunhai, GUO Shaoyun, et al. Research development of infrared stealth materials[J]. Infrared Technology, 2021, 43(4): 312-323.
- [3] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013: 17-20.  
SANG Jianhua. Low-observable technologies of aircraft [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013: 17-20.
- [4] 周亮,许卫东,张月. 低发射率材料红外隐身效果研究[J]. 电子技术, 2021, 50(7): 46-47.  
ZHOU Liang, XU Weidong, ZHANG Yue. Study on infrared stealth effect of low emissivity materials[J]. Electronic Technology, 2021, 50(7): 46-47.
- [5] 梁晓东,王佳,姚林海,等. 迎头方向隐身导弹红外辐射特性分析[J]. 应用光学, 2022, 43(1): 41-44.  
LIANG Xiaodong, WANG Jia, YAO Linhai, et al. Infrared radiation characteristics of head-on stealth missile[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(1): 41-44.
- [6] 丁文皓,张霞,方奇. 红外辐射特性校准技术研究进展[J]. 宇航计测技术, 2021, 41(1): 9-14.  
DING Wenhao, ZHANG Xia, FANG Qi. Research progress of infrared radiation characteristic calibration technology[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2021, 41(1): 9-14.
- [7] 王学新,闫晓宇,岳文龙,等. 国防红外辐射计量技术[J]. 应用光学, 2016, 37(1): 27-31.  
WANG Xuexin, YAN Xiaoyu, YUE Wenlong, et al. Technology of infrared radiation measurement in national defense metrology[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(1): 27-31.
- [8] 王学新,岳文龙,杨鸿儒,等. IRS400型材料发射率测试装置的研制[J]. 应用光学, 2015, 36(2): 272-276.  
WANG Xuexin, YUE Wenlong, YANG Hongru, et al.

- Development of measurement equipment for IRS400 type material emissivity[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(2): 272-276.
- [9] 戴景民, 宋扬, 王宗伟. 光谱发射率测量技术[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(4): 710-715.
- DAI Jingmin, SONG Yang, WANG Zongwei. Review of spectral emissivity measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 710-715.
- [10] 王学新, 杨鸿儒, 俞兵, 等. 红外目标等立体角标定和测量方法研究[J]. *应用光学*, 2018, 39(4): 518-521.
- WANG Xuexin, YANG Hongru, YU Bing, et al. Calibration and measurement method for IR target under the same solid angle[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(4): 518-521.
- [11] 郑克哲. 光学计量[M]. 北京: 原子能出版社, 2002: 155-157.
- ZHENG Kezhe. Optical metrology[M]. Beijing: Atomic Press, 2002: 155-157.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 光学仪器术语: GB/T 13962—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 2-4.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Optical instruments —vocabulary: GB/T 13962 —2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010: 2-4.
- [13] 国防科学技术工业委员会. 漫反射假目标通用规范: GJB 3260-98[S]. 北京: 军标出版发行部, 1998: 7-8.
- Commission of Science, Technology and Industry for National Defence. General specification for diffused pseudo-targets: GJB 3260-98[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department, 1998: 7-8.
- [14] 中国人民解放军总装备部. 材料和涂层反射率和发射率测试方法: GJB 5023 -2015[S]. 北京: 军标出版发行部, 2015: 2.
- GAD of the PLA. The method of measuring reflectivity and emissivity for material and coating: GJB 5023 -2015[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department, 2015: 2.
- [15] 范毅, 戴景民, 褚载祥. 积分球反射法测量铌的发射率随温度的变化[J]. *上海交通大学学报*, 2003, 37(2): 285-288.
- FAN Yi, DAI Jingmin, CHU Zaixiang. Normal spectral emissivity changes of niobium measured by a pulse heating reflectometric technique[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2003, 37(2): 285-288.
- [16] 张宇峰, 戴景民, 张昱, 等. 基于积分球反射计的红外光谱发射率测量系统校正方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(8): 2267-2271.
- ZHANG Yufeng, DAI Jingmin, ZHANG Yu, et al. Correction method for infrared spectral emissivity measurement system based on integrating sphere reflectometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(8): 2267-2271.
- [17] 吴江辉, 高教波, 李建军. 固体材料定向光谱发射率测量装置研究及误差分析[J]. *应用光学*, 2010, 31(4): 597-601.
- WU Jianghui, GAO Jiaobo, LI Jianjun. Directional spectral emissivity measurement of solid materials and its error analysis[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(4): 597-601.
- [18] 余时帆, 崔超, 王晓, 等. 固定发射率工作用辐射温度计校准方法研究[J]. *计量学报*, 2017, 38(1): 40-42.
- YU Shifan, CUI Chao, WANG Xiao, et al. The calibration method of working radiation thermometer with fixed emissivity[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2017, 38(1): 40-42.
- [19] 王宗伟, 戴景民, 何小瓦, 等. 超高温FTIR光谱发射率测量系统的线性度分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(2): 313-316.
- WANG Zongwei, DAI Jingmin, HE Xiaowa, et al. The linearity analysis of ultrahigh temperature FTIR spectral emissivity measurement system[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(2): 313-316.
- [20] 王学新, 杨鸿儒, 吴李鹏, 等. MRTD高精度测试和校准技术研究[J]. *应用光学*, 2020, 41(5): 1026-1031.
- WANG Xuexin, YANG Hongru, WU Lipeng, et al. Research on high precision MRTD testing and calibration technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(5): 1026-1031.
- [21] 王中宇, 刘智敏, 夏新涛. 测量误差与不确定度评定[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 19.
- WANG Zhongyu, LIU Zhimin, XIA Xintao. Measurement error and uncertainty evaluation[M]. Beijing: Science Press, 2008: 19.
- [22] 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013: 3-25.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Evaluation and expression of uncertainty in measurement: JJF 1059.1—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013: 3-25.