

高温状态下的材料法向光谱发射率测量

袁良 袁林光 董再天 李燕 范纪红 卢飞 赵俊成 张灯 尤越

Measurement of normal spectral emissivity of materials at high temperature

YUAN Liang, YUAN Lin'guang, DONG Zaitian, LI Yan, FAN Jihong, LU Fei, ZHAO Juncheng, ZHANG Deng, YOU Yue

引用本文:

袁良, 袁林光, 董再天, 等. 高温状态下的材料法向光谱发射率测量[J]. 应用光学, 2023, 44(3): 580–585. DOI: 10.5768/JAO202344.0303002

YUAN Liang, YUAN Lin'guang, DONG Zaitian, et al. Measurement of normal spectral emissivity of materials at high temperature[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(3): 580–585. DOI: 10.5768/JAO202344.0303002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0303002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

可用于现场快速检测的小型化多通道光谱测量系统

Portable multi-channel spectral measurement system for rapid on-site detection

应用光学. 2021, 42(2): 310–316 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0203004>

结合环境参数修正的高温气体光谱检测系统设计

Design of high temperature gas spectrum detection system combined with environmental parameters modification

应用光学. 2018, 39(6): 809–814 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0603002>

基于超连续光源的InGaAs探测器相对光谱响应度定标技术

Relative spectral responsivity calibration technology of InGaAs photodetector based on super-continuum light source

应用光学. 2021, 42(4): 709–716 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403003>

滤光辐射计测量黑体的温度

Temperature measurement of blackbody using filter radiometer

应用光学. 2018, 39(6): 862–866 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0603002>

FBG传感器在空腔爆炸压力测量中的应用研究

Application research of FBG sensors used in cavity explosion for pressure measurement

应用光学. 2019, 40(2): 300–305 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0203004>

面向冰盖剖面的高空间分辨率分布式光纤测温系统设计

High spatial resolution distributed optical fiber temperature measurement system for ice cover profile

应用光学. 2021, 42(5): 941–948 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0508003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 03-0580-06

高温状态下的材料法向光谱发射率测量

袁良^{1,2}, 袁林光², 董再天², 李燕², 范纪红², 卢飞²,
赵俊成², 张灯², 尤越²

(1. 北京理工大学光电学院, 北京 100081; 2. 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: 为满足隐身材料、热防材料和隔热涂层等高温材料涂层的光谱发射率的高精度测量需求, 研究了在 1 273 K~3 100 K 条件下准确测量材料法向光谱发射率的方法。基于发射率定义, 建立了材料法向光谱发射率测量模型, 并在该基础上研建了光谱范围为 0.7 μm ~12 μm 的材料法向光谱发射率测量装置。为克服测量装置中样品高精度加热时伴随腔体效应的技术难点, 研制了具备可移动石墨坩埚的样品加热炉, 取得了良好的实验效果。使用发射率测量装置对 SiC 与低发射率涂层 2 种样品的法向光谱发射率进行实验测量。结果表明: 2 种样品的法向光谱发射率均随波长增加而降低, 随温度的升高而升高。最后对高温状态下材料法向光谱发射率测量不确定度进行了评定, 相对扩展不确定度为 3.6%。

关键词: 光谱发射率; 涂层; 腔体效应; 测量不确定度

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0303002

Measurement of normal spectral emissivity of materials at high temperature

YUAN Liang^{1,2}, YUAN Lin'guang², DONG Zaitian², LI Yan², FAN Jihong², LU Fei²,
ZHAO Juncheng², ZHANG Deng², YOU Yue²

(1. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. 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: In order to meet the high-precision measurement requirements of spectral emissivity of high-temperature material coating, including stealthy materials, thermal protection materials, heat insulating coat and so on, the measuring methods for normal spectral emissivity of materials at 1 273 K~3 100 K was explored. A measurement model of normal spectral emissivity of materials was established based on the emissivity definition. On this basis, the measurement facility of normal spectral emissivity of materials was built, and the wavelength range was 0.7 μm to 12 μm . In order to overcome the technical difficulties associated with cavity effect when the sample was heated with high precision in the measuring device, a sample heating furnace with a movable graphite crucible was developed, and the good experimental results were obtained. The normal spectral emissivity of two samples (SiC and low emissivity coating) was measured by this facility. The results show that the normal spectral emissivity of two samples reduces with the increase of wavelengths and rises with the increase of temperature. Finally, the measurement uncertainty of normal spectral emissivity of materials at high temperature was analyzed, and the relative expanded uncertainty is 3.6%.

Key words: spectral emissivity; coating; cavity effect; measurement uncertainty

引言

材料发射率是表征材料表面红外辐射特性的

物理量, 主要用于红外辐射特性测试、红外隐身评估等方面^[1-3]。随着以军事国防技术为代表的诸多

收稿日期: 2022-05-16; 修回日期: 2022-07-25

基金项目: 国防科技工业技术基础科研项目 (JSJL2019208A002)

作者简介: 袁良 (1977—), 男, 研究员, 主要从事红外计量测试技术研究。E-mail: yuanliang307@126.com

行业对材料发射率测量的高精度和宽温度范围需求,特别是高超声速飞行器、航天发动机在研制使用中迫切需要获取蒙皮、涂层等材料在高温状态下材料法向发射率数据,因此高温状态下材料法向光谱发射率测量技术具有重大的研究和应用价值^[4-7]。

材料发射率测量经历了几十年的发展过程,提出了量热法、反射法、能量比对法等多种测量方法,研制了种类繁多的测量设备,得到了大量发射率测量数据,测量的温度范围大多集中于中温段^[8-12]。目前西安应用光学研究所已成功研建 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温状态材料光谱发射率测量装置^[13]和 $50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 红外材料光谱发射率测量系统^[14],光谱发射率测量不确定度优于6%。航天科工207所等编制了材料涂层发射率测量标准,温度测量范围为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 427\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量不确定度为10%^[15]。国防科技工业光学一级计量站等编制了红外材料光谱发射率测量系统校准规范,温度测量范围为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量不确定度为6%^[16]。

本文从发射率定义出发,建立了材料法向光谱发射率测量模型,并研建了温度范围为 $1\,273\text{ K}\sim 3\,100\text{ K}$ 的材料法向光谱发射率测量装置。采用可移动石墨坩埚的样品加热炉,在满足样品高精度加热的同时,有效抑制腔体效应。实验测量了SiC与低发射率涂层2种样品的法向光谱发射率,对高温状态下材料法向光谱发射率测量不确定度进行了评定,结果表明相对扩展不确定度为3.6%。

1 高温状态下材料法向光谱发射率测量模型

法向光谱发射率定义为物体在法向的光谱辐射亮度与相同测量条件下黑体的法向光谱辐射亮度之比。在进行法向光谱发射率测量时,探测系统接收的材料样品(或标准黑体)辐射包括3部分:经大气吸收衰减的辐射源自身辐射、经大气吸收衰减的辐射源反射环境辐射、大气环境辐射。

当标准黑体辐射进入光路时,探测系统的输出信号:

$$V_i(\lambda, T) = K(\lambda) \{ \tau(\lambda) [\varepsilon_B(\lambda, T) L_b(\lambda, T) + [1 - \varepsilon_B(\lambda, T)] L_b(\lambda, T_a)] + (1 - \tau(\lambda)) L_b(\lambda, T_a) \} \quad (1)$$

式中: $V_i(\lambda, T)$ 为探测系统接收标准黑体辐射的输出信号; $\varepsilon_B(\lambda, T)$ 为标准黑体的光谱发射率; $L_b(\lambda, T)$ 是波长为 λ 和温度为 T 的情况下标准黑体的光谱

辐射亮度; $L_b(\lambda, T_a)$ 是波长为 λ 和温度为 T_a 的情况下标准黑体的光谱辐射亮度; $\tau(\lambda)$ 为大气透过率; $K(\lambda)$ 为探测系统响应度。

当被测样品辐射进入光路时,在与标准黑体相同温度、相同波长条件下,探测系统的输出信号:

$$V'_i(\lambda, T) = K(\lambda) \{ \tau(\lambda) [\varepsilon'_M(\lambda, T) L_b(\lambda, T) + [1 - \varepsilon'_M(\lambda, T)] L_b(\lambda, T_a)] + (1 - \tau(\lambda)) L_b(\lambda, T_a) \} \quad (2)$$

式中: $V'_i(\lambda, T)$ 为探测系统接收材料样品辐射的输出信号; $\varepsilon'_M(\lambda, T)$ 为材料样品光谱发射率。

在标准黑体与材料样品辐射口前端均安装液体循环式控温光阑,光阑表面温度与环境温度相同,关闭控温光阑,探测系统的输出信号:

$$\begin{aligned} V_0(\lambda, T) &= K(\lambda) \{ \tau(\lambda) [\varepsilon_0(\lambda, T) L_b(\lambda, T_a) + [1 - \varepsilon_0(\lambda, T)] L_b(\lambda, T_a)] + (1 - \tau(\lambda)) L_b(\lambda, T_a) \} \\ &= K(\lambda) \{ \tau(\lambda) L_b(\lambda, T_a) + (1 - \tau(\lambda)) L_b(\lambda, T_a) \} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $V_0(\lambda, T)$ 为背景信号; $\varepsilon_0(\lambda, T)$ 为控温光阑电控快门表面光谱发射率。

对(3)式整理,则由光谱发射率定义计算材料样品光谱发射率:

$$V'_i(\lambda, T) - V_0(\lambda, T) = K(\lambda) \tau(\lambda) \varepsilon'_M(\lambda, T) [L_b(\lambda, T) - L_b(\lambda, T_a)] \quad (4)$$

$$V_i(\lambda, T) - V_0(\lambda, T) = K(\lambda) \tau(\lambda) \varepsilon_B(\lambda, T) [L_b(\lambda, T) - L_b(\lambda, T_a)] \quad (5)$$

$$\varepsilon'_M(\lambda, T) = \varepsilon_B(\lambda, T) \frac{\sum_{i=1}^n [V'_i(\lambda, T) - V_0(\lambda, T)]}{\sum_{i=1}^n [V_i(\lambda, T) - V_0(\lambda, T)]} \quad (6)$$

由(6)式可得,从发射率定义出发,采用液体循环式控温光阑,使光阑表面温度与环境温度相同,在法向光谱发射率测量时无需引入反射率近似为1的漫反射板,也无须真空恒温系统,即可消除环境辐射及大气透过率影响,提高了光谱发射率测量精度。

2 高温状态下材料法向光谱发射率测量装置

高温状态下材料法向光谱发射率测量装置主要由 $1\,273\text{ K}\sim 3\,100\text{ K}$ 高温黑体、 $1\,273\text{ K}\sim 3\,100\text{ K}$ 样品炉、控温光阑、光学成像系统、光谱分光系统、红外探测系统、锁相放大器与数据采集系统以及计算机测量控制部分等组成,测量装置组成图及实物如图1、图2所示。

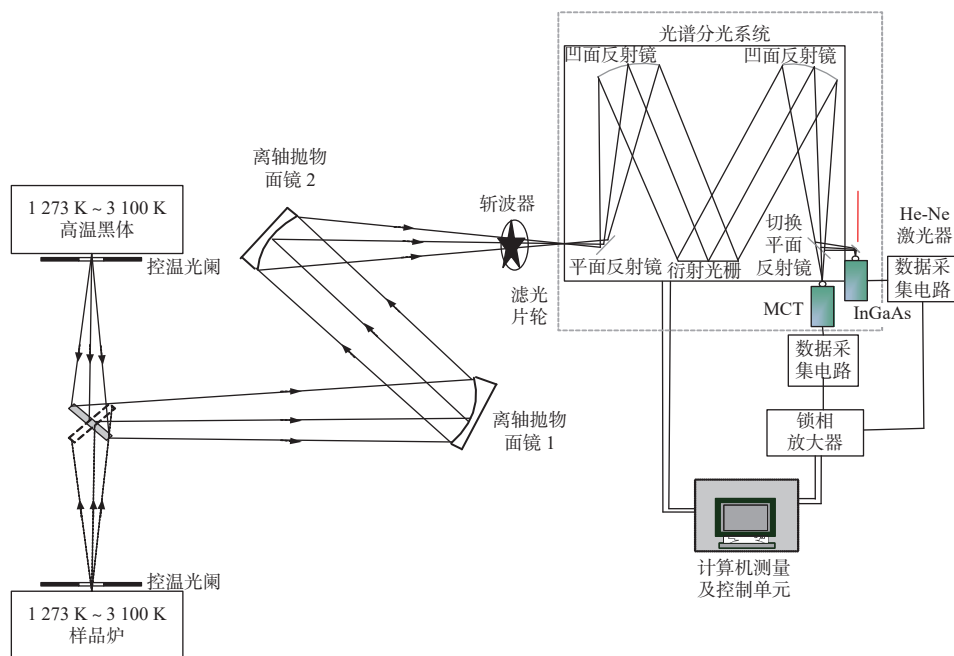


图 1 高温状态下材料法向发射率测量装置组成图

Fig. 1 Composition diagram of measurement device of normal emissivity of materials at high temperature



图 2 高温状态下材料法向发射率测量装置实物图

Fig. 2 Physical picture for measurement device of normal emissivity of materials at high temperature

其中高温黑体提供 1 273 K~3 100 K 的标准辐射信号,根据普朗克公式复现光谱辐射亮度;样品炉用于材料样品的加热,同时有效抑制腔体效应;控温光阑采用液体循环温控方式,使光阑表面温度与环境温度相同;光学成像系统主要由一组离轴抛物镜、电控旋转反射镜以及精密调整机构组成,用于将高温黑体及被测材料样品的光谱辐射信号清晰成像在光谱分光系统的入射狭缝;光谱分光系统采用光栅分光模式,将连续的红外信号分解为系列离散的光谱信号提供给红外探测器(InGaAs 探测器和 MCT 探测器),由红外探测器及锁相放大器与数据处理系统完成红外信号的采集与处理。

当测量材料样品法向光谱发射率时,首先将该材料样品安装在高温样品炉进行加热,待到设定的温度并稳定后开始测试,其红外辐射信号和高

温黑体辐射信号分别经光学成像系统后聚焦在分光系统的入口处,经光栅分光后成像在探测器的接收面上,由探测器及数据采集部分进行信号的采集和处理,得到测量结果。

3 腔体效应抑制

由于样品加热炉的炉腔具有一定深度,在进行发射率测量时会产生腔体效应,影响最终测试结果的准确性。为抑制腔体效应,研制了由炉体、控温辐射温度计和温控器组成的样品加热炉,如图 3 所示。炉体采用电加热的方式,由石墨加热板、水冷电极、石墨坩埚、高速线性执行器和石墨管组成。其中石墨管中央装夹石墨加热板,把石

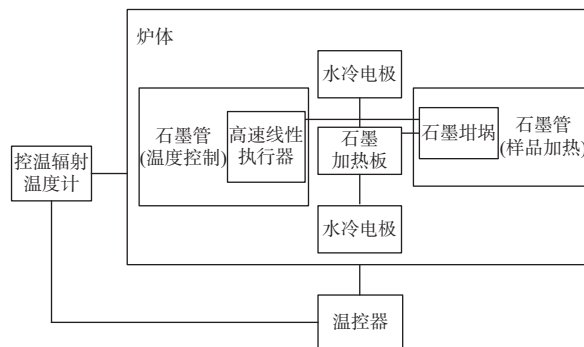


图 3 样品加热炉组成图

Fig. 3 Composition diagram of sample heating furnace

墨管分成2个对称的涂黑腔体,两侧腔体温度相同,一侧用于温度控制,另一侧作为样品加热腔。石墨管采用锥形设计,优化加工不等厚管壁,石墨管内部温差小于0.1℃,采用石墨板热传导和石墨管腔体热辐射共同加热方式对样品进行加热,实现样品快速均匀加热。

在发射率测量时,通过楔形石墨压紧片将样品固定在石墨坩埚内,可实现样品加热与辐射测试2种模式的快速切换:样品加热时,石墨坩埚紧贴在石墨加热板表面,通过辐射传热实现样品加热;样品辐射测量时,采用高速线性执行器将位于石墨坩埚内的样品快速推到炉口处,在满足样品高精度加热的同时有效抑制腔体效应。

4 高温状态下材料法向发射率测量实验与不确定度评定

在实验室条件(温度23℃±5℃,相对湿度20%~70%)下,实验测量了不同材料样品的法向光谱发射率,分析材料法向发射率随波长、温度变化情况。本实验分别测量了2种样品:一种为SiC样品,另一种为低发射率涂层样品。

4.1 SiC样品法向发射率测量结果

在高温状态下材料法向发射率测量装置上分别测量1273 K~2473 K温度范围内,每隔300 K不同温度点对应SiC样品、高温黑体和背景辐射的电压信号,各波长点测量6次取平均值,由公式(6)计算得到SiC样品法向光谱发射率,结果如图4所示。

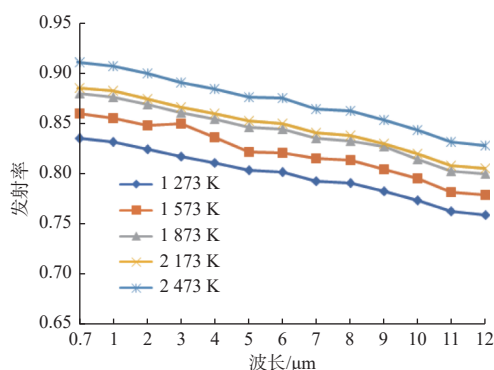


图4 SiC样品法向光谱发射率测量结果

Fig. 4 Measuring results of normal spectral emissivity of SiC sample

由测量结果可以看出, SiC材料法向光谱发射率最小值为0.759,最大值为0.909,且随温度升高而增加,随波长增加整体呈下降趋势,部分存在向

上波动现象。这与已有理论“在可见光下呈现黑色的非金属表面,其发射率会随温度升高而增加”相吻合。

4.2 低发射率涂层样品法向发射率测量结果

将低发射率涂层均匀喷涂在直径Φ40 mm、厚度20 mm的高熔点金属基底上,在高温状态下材料法向发射率测量装置上测量低发射率涂层在1473 K、1673 K和1873 K三个温度点的法向光谱发射率,结果如图5所示。

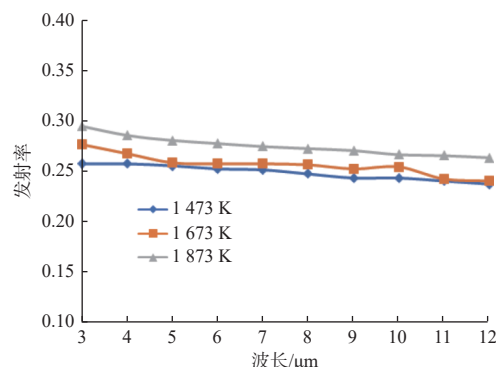


图5 低发射率涂层法向光谱发射率测量结果

Fig. 5 Measuring results of normal spectral emissivity of low emissivity coating

由测量结果可以看出,低发射率涂层样品材料光谱发射率最小值为0.238,最大值为0.295,且随温度升高呈现升高的趋势,随波长增加而降低。

4.3 材料法向光谱发射率测量不确定度评定

由于 $V_i(\lambda, T)$ 、 $V'_i(\lambda, T)$ 与 $V_0(\lambda, T)$ 输入量相关,

记 $M = \frac{\sum_{i=1}^n [V_i(\lambda, T) - V_0(\lambda, T)]}{\sum_{i=1}^n [V'_i(\lambda, T) - V_0(\lambda, T)]}$,则由公式(6),根据

不确定度传播率, $\varepsilon_B(\lambda, T)$ 与 M 两个输入量彼此不相关,灵敏系数均为1,可得材料法向光谱发射率测量不确定度 $u_c(\varepsilon'_M)$ 满足(7)式关系:

$$\frac{u_c^2(\varepsilon'_M)}{\varepsilon'^2_M} = \frac{u_c^2(\varepsilon_B)}{\varepsilon_B^2} + \frac{u_c^2(M)}{M^2} \quad (7)$$

式中:高温黑体发射率 $\varepsilon_B(\lambda, T)$ 测量不确定度由计量证书可得,为0.05%。

影响 M 的不确定度因素主要包括高温黑体温度、样品材料温度、红外探测系统与光谱分光系统波长,且各输入量互不相关,均按照B类不确定度进行评定,由计量校准证书获得。经过大量的实验得到测量重复性引入的测量不确定度均优于1.0%,则材料法向光谱发射率测量不确定分析详见表1。

表 1 法向光谱发射率测量不确定度分析

Table 1 Measurement uncertainty analysis of normal spectral emissivity

不确定度分量	标准不确定度/%
高温黑体发射率	0.05
高温黑体温度测量	0.6
样品材料温度测量	0.6
红外探测系统测量	1.1
光谱分光系统波长测量	0.5
测量重复性	1.0
相对合成标准不确定度	1.8
相对扩展不确定度($k=2$)	3.6

5 结论

本文通过采用具备可移动石墨坩埚的样品加热炉抑制腔体效应的方法,建立了 1 273 K~3 100 K 温度范围材料法向光谱发射率测量模型,并搭建了高温状态下材料发射率测量装置。在装置上测量得到样品法向光谱发射率随温度、波长变化情况,并对材料法向光谱发射率进行了不确定度评定,测量结果相对扩展不确定度小于 3.6%,实现了高温状态下材料法向发射率的精确测量。

参考文献:

- [1] HANSSEN L M, KAPIAN S G, MEKHONTSEV S N, et al. Fourier transform system for characterization of infrared spectral emittance[J]. *Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science*. Berlin, 2001, 6: 212-221.
- [2] HANSSEN L, MEKHONTSEV S. Infrared spectral emissivity characterization facility at NIST[J]. *Radiation Thermometry and Calibration*, 2004, 10: 1117-1124.
- [3] SAUNDERS P, WHITE D R. “Disappearing Object” radiation thermometer for low-emissivity process control[J]. *Int. J. Thermophys*, 2010, 31: 1583-1598.
- [4] 李亨, 李劲东, 王玉莹, 等. 中段飞行弹道导弹表面温度与辐射特性计算[J]. *红外技术*, 2022, 44(2): 134-139.
LI Heng, LI Jindong, WANG Yuying, et al. Calculation of temperature and radiation characteristics of midcourse ballistic missiles[J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(2): 134-139.
- [5] 梁伟, 金华, 孟松鹤, 等. 高超声速飞行器新型热防护机制研究进展[J]. *宇航学报*, 2021, 42(4): 409-424.
LIANG Wei, JIN Hua, MENG Songhe, et al. Research

progress on new thermal protection mechanism of hypersonic vehicles[J]. *Journal of Astronautics*, 2021, 42(4): 409-424.

- [6] 刘鹏, 殷举航, 罗雄光, 等. 高温红外隐身涂层材料研究进展[J]. *材料研究与应用*, 2022, 16(1): 57-67.
LIU Peng, YIN Juhang, LUO Xionggang, et al. Research progress of high temperature infrared stealth coating materials[J]. *Materials Research and Application*, 2022, 16(1): 57-67.
- [7] 杨明, 李玉花, 李明. 热障涂层制备方法的研究现状[J]. *湖北理工学院学报*, 2021, 37(3): 33-38.
YANG Ming, LI Yuhua, LI Ming. Research review of thermal barrier coatings preparation methods[J]. *Journal of Hubei Polytechnic University*, 2021, 37(3): 33-38.
- [8] 李猛, 郭娟, 季新杰, 等. 红外隐身涂层光谱发射率测量定标研究[J]. *激光与红外*, 2022, 52(3): 382-387.
LI Meng, GUO Juan, JI Xinjie, et al. Research on calibration of infrared stealth coating spectral emissivity measurement[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(3): 382-387.
- [9] 刘波, 郑伟, 李海洋. 材料表面发射率测量技术研究进展[J]. *红外技术*, 2018, 40(8): 725-732.
LIU Bo, ZHENG Wei, LI Haiyang. Research and progress on material surface emissivity measurement[J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(8): 725-732.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 于坤, 石瑞涛, 张会燕, 等. 纯钨红外光谱发射率特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(1): 107-112.
YU Kun, SHI Ruitao, ZHANG Huiyan, et al. Experimental investigation of infrared spectral emissivity of pure tungsten[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(1): 107-112.
- [13] 袁林光, 薛战理, 李宏光, 等. 低温状态下的材料法向发射率测量[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(1): 59-64.

- YUAN Linguang, XUE Zhanli, LI Hongguang, et al. Measurement of normal emissivity of materials at low temperature[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(1): 59-64.
- [14] 袁良, 占春连, 李燕, 等. 红外目标光谱辐射亮度测试技术[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(12): 3807-3811.
- YUAN Liang, ZHAN Chunlian, LI Yan, et al. Testing technology of spectral radiance of infrared target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3807-3811.
- [15] 中国人民解放军总装备部电子信息基础部. 材料涂层反射率和发射率测试方法第2部分: 发射率: GJB5023.2-2003 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2003.
- Department of Electronic Information, General Equipment Department, PLA. Materials coatings - test methods for reflectivity and emissivity - part 2: emissivity GJB5023.2-2003 [S]. Beijing: General Armament Department Military logo Publishing and Distribution Department, 2003.
- [16] 国防科技工业一级计量站. 红外材料光谱发射率测量系统校准规范: JJF (军工) 150-2017 [S]. 北京: 国家国防科技工业局, 2018.
- National Defense Science, Technology and Industry Level I Metering Station. Calibration specification for infrared material spectral emissivity measurement system: JJF150-2017 [S]. Beijing: State Administration of Science, Technology and Industry for National Defence, 2018.
-
- (上接第 522 页)
- [17] 黑沫, 鲁亚飞, 张智永, 等. 基于动力学模型快速反射镜设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1): 53-61.
- HEI Mo, LU Yafei, ZHANG Zhiyong, et al. Design of fast steering mirror based on dynamic model[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(1): 53-61.
- [18] 鲁亚飞. 快速反射镜机械结构特性设计问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- LU Yafei. Research on fast/fine steering mirror system[D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2009.