

红外隐身涂层光谱发射率测量定标研究

李 猛¹, 郭 娟¹, 季新杰¹, 陈立海², 李越峰³

(1. 空军工程大学航空机务士官学校, 河南 信阳 464000;

2. 河北石油职业技术大学, 河北 承德 067000; 3. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 成都 610500)

摘 要:受涂覆工艺、物理特性和气动应力等因素影响,飞机红外隐身涂层容易产生裂纹、剥落等损伤。监控涂层光谱发射率是红外隐身涂层状态监控的一种有效手段。光谱发射率监控设备的定标直接影响涂层光谱发射率测量结果的可信度,进而影响飞机红外隐身特性的评估结果。针对光谱发射率测量定标需求,研究了积分球定向积分反射比测量系统定标方法,并开展红外隐身涂层样品的测量校准和参考样品定标试验,结果表明:提出的定标方法能够缩小参考样品光谱发射率带来的误差,控制参考样品光谱发射率与标准黑体辐射源光谱发射率之间的误差小于0.02,涂层样品的光谱发射率测量示值误差控制在0.03以内,满足隐身飞机涂层监控测量和定标需求。

关键词:红外隐身涂层;光谱发射率;光谱反射比;测量;定标

中图分类号:TN206 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2022.03.012

Research on calibration of infrared stealth coating spectral emissivity measurement

LI Meng¹, GUO Juan¹, JI Xin-jie¹, CHEN Li-hai², LI Yue-feng³

(1. Aviation Maintenance NCO School of Air Force Engineering University, Xinyang 464000, China;

2. Hebei Petroleum University of Technology, Chengde 067000, China;

3. China Gas Turbine Research Institute of AECC, Chengdu 610500, China)

Abstract: Affected by factors such as coating process, physical characteristics and aerodynamic stress, aircraft infrared stealth coating is prone to cracks, peeling and other damage. Monitoring the spectral emissivity is an effective means of monitoring the state of the infrared stealth coating. The calibration method of the spectral emissivity monitoring equipment directly affects the credibility of the coating emissivity measurement results, and then affects the evaluation results of the aircraft's infrared stealth characteristics. Aiming at the calibration requirement of spectral emissivity measurement, the calibration method for the directional integral spectral reflectance measurement system is studied, and then the methods are applied to a certain coating sample measurement and calibration test. The result shows that the proposed calibration method can reduce the spectral emissivity error caused by the reference sample, and control the spectral emissivity error between the reference sample and the standard blackbody radiation source to be less than 0.02, and measurement indication error of the coating emissivity is also controlled within 0.03, which satisfies the measurement and calibration requirements of stealth coating monitoring.

Keywords: infrared stealth coating; spectral emissivity; spectral reflectance; measurement; calibration

1 引言

不断发展的红外探测、跟踪、制导技术推动武器系统目标红外探测距离大幅提高,严重威胁飞机的突防能力和战场生存能力^[1-3]。在飞机主要辐射源^[3-4]上涂覆红外隐身涂层可减弱红外辐射,降低飞机的可探测性,并提高其生存能力^[2]。

红外涂层隐身性能取决于发射率和温度两个因素^[5],涂覆能控制并降低发射率的涂层材料是提高飞机红外隐身能力的有效途径之一。但因高温、潮湿、气动应力等因素作用,涂层容易产生气泡、裂纹、剥落等损伤^[6-7],影响飞机的隐身能力。美军F-22、F-35隐身涂层就因涂层频繁剥落,给其监控和维护带来了巨大的挑战。国产隐身飞机也面临类似的保障问题。通过检测涂层光谱发射率,对其进行状态监控,及早发现涂层物性变化,是隐身飞机保障工作的一个重点研究方向。

红外发射率测量设备的误差将直接影响监测结果的准确度,为控制测量误差,确保量值一致,需要对其定标开展研究。文献[8]设计了积分球定向——半球反射比(也叫反射率,本文统称为反射比)测量系统,研究了反射比随波长的变化趋势和系统误差。文献[9]针对红外隐身材料光谱发射率测评,建立固体材料定向光谱发射率测量装置,分析了系统测量误差。文献[10]研究了红外发射率测量技术的不确定度分析方法。文献[11]研究了红外光谱发射率测量校准发展趋势,指出采用反射比法测量,通常溯源到美国国家标准与技术研究院(NIST)。

在军用隐身飞机领域,开展红外隐身涂层测量定标研究的文献较少。本文研究发射率测量原理、方法和误差构成,确定定标基准和校准方法,并开展定标和校准试验,为红外隐身涂层状态监控提供了可靠、可溯源的定标方法。

2 测量系统组成及原理^[8,12-14]

2.1 定向积分反射比法系统结构

测量采用定向半球积分反射比法,系统(如图1所示)由高稳定型光源、高反射率漫射内表面积分球、探测器、标准样品构成。测量对象为待测样品。

2.2 测量原理

如图1所示,样品置于积分球样品架,一定能量入射光条件下,探测器输出相应的电压信号 V 。

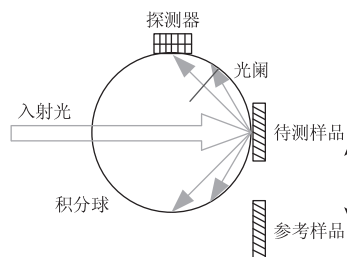


图1 定向积分反射比法系统结构示意图

Fig. 1 Diagram of directional integral reflectance method

待测样品对应的输出电压 $V_s(\theta, \lambda)$ 为:

$$V_s(\theta, \lambda) = K(R, \rho_\lambda) L_{rs}(\theta, \lambda) \quad (1)$$

其中, $K(R, \rho_\lambda)$ 是与积分球半径、内壁发射率和探测器相关的系统相应输出函数; $L_{rs}(\theta, \lambda)$ 是待测样品反射的辐射亮度。

参考样品对应的输出电压 $V_b(\theta, \lambda)$ 为:

$$V_b(\theta, \lambda) = K(R, \rho_\lambda) L_{rb}(\theta, \lambda) \quad (2)$$

式中, $L_{rb}(\theta, \lambda)$ 是参考样品的反射辐射亮度。

根据能量守恒原理,非透明材料光谱吸收率 $\alpha(\theta, \lambda)$ 可表示为:

$$\alpha(\theta, \lambda) = 1 - \rho(\theta, \lambda) \quad (3)$$

其中, $\rho(\theta, \lambda)$ 为光谱反射比(反射率)。

如果材料表面温度稳定,则光谱发射率与光谱吸收率相等。则有发射率 $\varepsilon(\theta, \lambda)$:

$$\varepsilon(\theta, \lambda) = 1 - \rho(\theta, \lambda) \quad (4)$$

公式(4)表明,将已知的辐射能量投射到被测的不透明样品表面,并用积分球反射计测出表面反射能量,计算出反射比 $\rho(\theta, \lambda)$,即可求得样品的反射率^[8,12,15]。

含有参考样品的反射比测量系统,分别测量参考样品和被测样品的探测器信号。假设探测器、光学系统相应函数稳定,则被测样品的反射比可按下式计算:

$$\rho_x(\theta, \lambda) = \frac{V_x(\theta, \lambda) - V_0(\theta, \lambda)}{V_b(\theta, \lambda) - V_0(\theta, \lambda)} \rho_b(\theta, \lambda) \quad (5)$$

其中, $\rho_x(\theta, \lambda)$ 为被测样品的反射比; $\rho_b(\theta, \lambda)$ 为参考样品的反射比; $V_x(\theta, \lambda)$ 为被测样品对应的探测器信号; $V_b(\theta, \lambda)$ 为参考样品时的探测器信号; $V_0(\theta, \lambda)$ 为无样品状态下的探测器信号。

根据公式(4)、(5),待测样品的发射率为:

$$\varepsilon_x(\theta, \lambda) = 1 - \frac{V_x(\theta, \lambda) - V_0(\theta, \lambda)}{V_b(\theta, \lambda) - V_0(\theta, \lambda)} \rho_b(\theta, \lambda) \quad (6)$$

式中, $\varepsilon_x(\theta, \lambda)$ 为被测样品的发射率; $\varepsilon_b(\theta, \lambda)$ 为参考样品的发射率。

考虑到系统 $V_x(\theta, \lambda) \gg V_0(\theta, \lambda)$ 、 $V_b(\theta, \lambda) \gg V_0(\theta, \lambda)$, 反射比和发射率计算公式分别简化为(7)和(8):

$$\rho_x(\theta, \lambda) = \frac{V_x(\theta, \lambda)}{V_b(\theta, \lambda)} \rho_b(\theta, \lambda) \quad (7)$$

$$\varepsilon_x(\theta, \lambda) = 1 - \frac{V_x(\theta, \lambda)}{V_b(\theta, \lambda)} \rho_b(\theta, \lambda) \quad (8)$$

公式(8)就是采用反射比测量系统测量涂层发射率的最终计算公式。

3 系统校准及定标方法

3.1 发射率测量方法

本文采用的测量流程如图 2 所示。

①黑体辐射源通电, 设定黑体温度 T 。

②用参考样品校准设备, 找到输出信号与参考样品表面发射率的线性关系, 即满足公式(9)的系数 k :

$$k = \varepsilon_1 / V_1 = \varepsilon_2 / V_2 = \varepsilon_3 / V_3 \quad (9)$$

式中, k 是探测器输出电压与被测物体表面的发射率的比率; ε_i 是第 i 块参考样品的发射率; V_i 是第 i 块参考样品对应的输出电压。

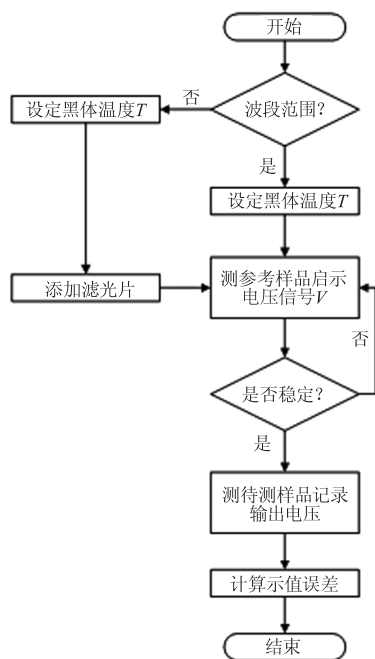


图 2 光谱发射率测量流程

Fig. 2 Spectral emissivity measurement process

③把待测样品置于样品架上进行测量, 读取并记录样品对应的输出信号电压 V_{xi} ;

④重复②、③的操作 3 次。输出不稳定时, 重复该步骤。

记录的待测样品测量数据, 按下式计算样品的发射率:

$$\varepsilon_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k V_{xi} \quad (10)$$

式中, ε_k 为样品发射率; n 为测量次数; i 为测量序号, $i = 1, 2, 3$; V_{xi} 为第 i 次测量时的输出信号电压。

3.2 误差分析

定向半球积分发射比测量系统中, 光路系统和探测器相对稳定, 可忽略其对测量示值误差的影响。在测量过程中, 黑体作为辐射源, 其温度稳定性将带给测量结果一定的误差。同时, 参考样品的光谱分析仪器进行定标给出, 因此其发射率数据误差也是一个误差源。

黑体辐射能量受温度变化范围的影响归结为下式:

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{4\Delta T}{T} \quad (11)$$

式中, W 为黑体辐射照度的数值。

控制黑体辐射源温度 T 稳定度为 $\pm T'$, 则 T 的最大变化为 $\Delta T = 2 T'$ 。控制目标为 $T' = \pm 0.25$ K, 则 T 的最大变化为 $\Delta T = 0.5$ K, 同时, 黑体温度设定为 $T = 500$ K。根据公式(11)得到 $\Delta W / W = 0.004$, 即黑体辐射源温度稳定性引起的最大误差为 0.004。

参考样品光谱发射率误差的控制目标为 ≤ 0.02 。测量三块参考样品发射率并拟合发射率直线, 则可控制该项误差符合要求 (≤ 0.02)。

测量系统总的示值误差为: $0.004 + 0.02 = 0.024 < 0.03$ 。所以, 定向半球积分反射比法测量系统的误差为: ± 0.03 。参考样品发射率误差占比 $0.02 / 0.024 = 83.3\%$, 为主要误差。因此, 系统定标的主要任务就是缩小参考样品的发射率误差。

3.3 参考样品定标方法

为降低参考样品的发射率误差, 保持量值统一和溯源性, 设计并加工三块反射比溯源至 NIST^[11] 的参考样品。参考样品反射比定标基准选择有效发射率在 0.9897 ~ 0.992 之间黑体腔, 因此黑体腔的发射率为 0.991 ± 0.0023 。

定标方法: 在一定温、湿度条件下, 采用傅里叶

变换红外光谱仪对参考样品反射比进行测量。

4 定标及校准试验

4.1 参考样品光谱发射率定标试验

将傅里叶变换红外光谱仪波数设置为 $2.5 \sim 15 \mu\text{m}$, 反射比测量范围设置为 $0.1 \sim 1.0$ 。在环境温度 $(22.0 \pm 2.0)^\circ\text{C}$, 湿度为 $(20.0 \pm 5.0)\% \text{RH}$ 条件下, 对三块参考样品反射比进行定标 (如图 3 所示)。

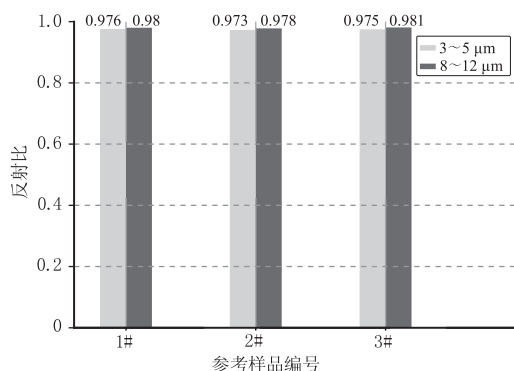


图3 参考样品光谱反射比定标结果

Fig. 3 Spectral reflectance calibration result of the reference sample

从图 3 可以看出, 同一块参考样品反射比在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段内稍有变化, $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段内的反射比要大一些。2# 参考样品反射比与标准黑体辐射源反射比的误差最大, 达到 $|0.991 - 0.973| = 0.018 < 0.002$, 符合参考样品误差控制标准。因此, 三块参考样品符合定标要求。

已知参考样品反射比, 根据公式(4)计算出各参考样品的发射率 (如图 4 所示)。可以看出, 三块样品发射率之间的发射率一致性较好, 表明参考样品制造工艺满足要求, 为控制示值误差奠定了基础。

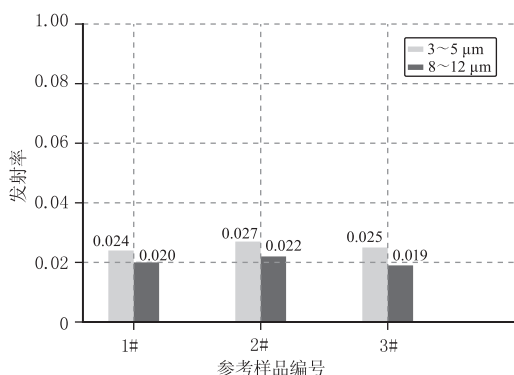


图4 参考样品光谱发射率定标结果

Fig. 4 Spectral emissivity calibration result of the standard sample

4.2 示值误差校准试验

按照反射比测量方法, 在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段测量三块参考样品的发射率与测量系统输出电压关系如图 5 所示。

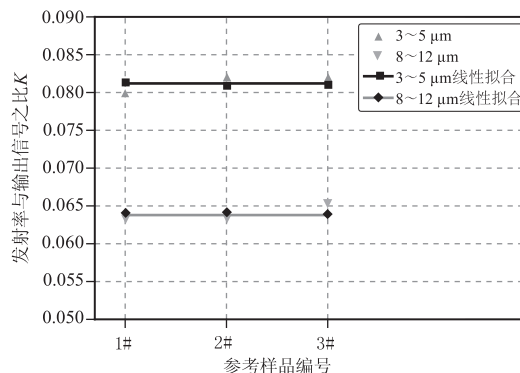


图5 参考样品光谱发射率与输出信号的关系

Fig. 5 Relationship between the spectral emissivity of the standard sample and the output signal

图 5 表明, 在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 、 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段内, 参考样品的光谱发射率与输出电压比非常稳定, 测量系统稳定可靠。同时, 参考样品的发射率与输出信号比率拟合曲线可以看出, 在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段 $k = 0.0812$, 在 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段 $k = 0.0638$ 。通过校准试验确定的系数 k , 可以用于待测样品的测量。

4.3 涂层样品发射率测量试验

经过定标的测量设备对红外隐身涂层样品发射率开展测量, 得到不同红外波段的测量结果如图 6、图 7 所示。

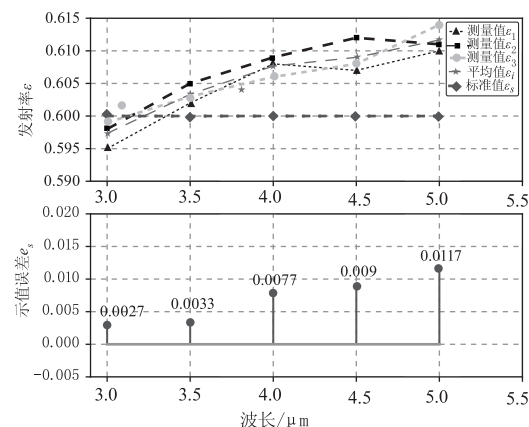


图6 3~5 μm 波段涂层光谱发射率测量结果

Fig. 6 Spectral emissivity measurement results for the infrared stealth coating within $3 \sim 5 \mu\text{m}$ band

从图 6 可以看出, 在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段, 红外隐身涂层样品的发射率逐渐增大。测量结果的示值误差

最大值为 $0.0117 < 0.03$, 符合标准要求。

图7表明,在 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段,红外隐身涂层样品的发射率也是逐渐增大的趋势。最大测量误差约在 $8 \mu\text{m}$ 波长处,误差值为 $0.0083 < 0.03$, 结果也符合标准要求。

此外,图6、图7也表明,涂层样品的光谱发射率在整个光谱范围内,随着波长增加而逐渐减小。

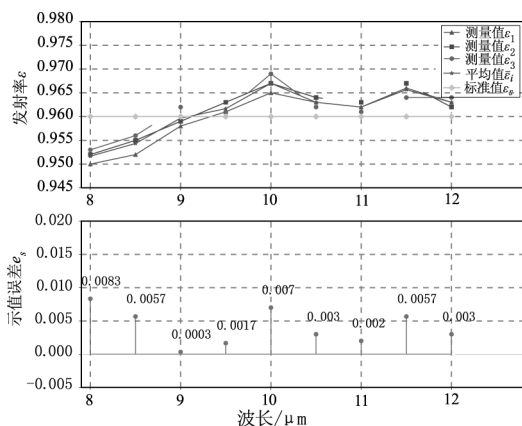


图7 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段涂层发射率测量结果

Fig. 7 Spectral emissivity measurement results for the infrared stealth coating within $8 \sim 12 \mu\text{m}$ band

5 结论

对红外隐身涂层发射率测量系统定标方法开展了研究,主要结论如下。

(1) 定向积分反射比法中,黑体温度稳定性和参考样品的光谱发射率误差是主要误差源,参考样品的光谱发射率误差占支配地位。

(2) 对参考样品开展可溯源的定标测量,参考样品反射比与参考黑体发射比之间的误差 < 0.02 , 能够控制系统总的示值误差 < 0.03 。

(3) 参考样品与输出信号比拟合系数 k , 能有效控制测量误差。

参考文献:

- [1] Zhang Li. Several problems of IR imaging simulation of air-defense missile[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(3): 378–381. (in Chinese)
张励. 防空导弹红外成像仿真中若干问题探讨[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 378–381.
- [2] Ji Xinjie, Chen Shiguo, Jiang Bingkun. Numerical simulation of infrared radiation for cruise missile exhaust system[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(7): 828–832. (in Chinese)
季新杰, 陈世国, 姜丙坤. 巡航导弹排气系统红外辐射数值模拟[J]. 激光与红外, 2017, 47(7): 828–832.
- [3] Song Xinbo, Lü Xueyan, Zhang Jianjun. Study on the infrared stealth technology of plane[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(1): 3–7. (in Chinese)
宋新波, 吕雪艳, 章建军. 飞机红外隐身技术研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(1): 3–7.
- [4] Song Jianhua, Zhang Yong. Infrared stealth technology of air vehicles[J]. Aeronautical Science and Technology, 2011, (5): 5–7. (in Chinese)
桑建华, 张勇. 飞行器红外隐身技术[J]. 航空科学技术, 2011, (5): 5–7.
- [5] Wei Disheng, Wang Xiaoqun, Du Shanyi. Engineering evaluation method for infrared camouflage efficiency of aircraft[J]. Acta Aerospaciale Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1592–1597. (in Chinese)
韦第升, 王小群, 杜善义. 飞行器红外隐身效能工程评价方法[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1592–1597.
- [6] Gao Guangrui, Li Ying, Hu Dan, et al. A review on the high infrared emissivity coatings[J]. Materials Review, 2018, 32(A1): 238–241. (in Chinese)
高广睿, 厉英, 呼丹, 等. 红外高发射率涂层的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(A1): 238–241.
- [7] Yang Qi. The application of infrared spectrum analysis in coating failure mechanism[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2015, 294(12): 84–87. (in Chinese)
杨起. 红外光谱分析方法在涂层失效分析中的应用[J]. 航空维修与工程, 2015, 294(12): 84–87.
- [8] Xu Dandan, Lou Chun, Cheng Qiang. Measurement and analysis of directional-hemispherical spectral reflectance[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(4): 807–811. (in Chinese)
许丹丹, 娄春, 程强. 定向—半球光谱反射比的测量与分析[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(4): 807–811.
- [9] 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. (in Chinese)
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(4): 597-601.
- [10] Duan Minghao, Fu Tairan. Uncertainty analysis of spectral emissivity measurement method[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(12): 2684-2689. (in Chinese)
- 段明皓, 符泰然. 光谱发射率测试方法的不确定度分析[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(12): 2684-2689.
- [11] 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. (in Chinese)
- 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.
- [12] Dai Jingmin, Wang Xinbei. Review of emissivity measurement and its applications [J]. Acta Metrologica Sinica, 2007, 28(3): 232-236. (in Chinese)
- 戴景民, 王新北. 材料发射率测量技术及其应用[J]. 计量学报, 2007, 28(3): 232-236.
- [13] Zhagn 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. (in Chinese)
- 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.
- [14] Chalmers J, Griffiths P R, et al. Handbook of vibrational spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part A Molecular & Biomolecular Spectroscopy, 2003, 59(2).
- [15] Guan Wei, Liu Jianmei, Wang Qi, et al. Measurement of spectral emissivity of object based on infrared radiometer [J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(11): 163-166, 170. (in Chinese)
- 关威, 刘建梅, 王琦, 等. 基于红外辐射计的物体光谱发射率测量方法[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(11): 163-166, 170.