

文章编号: 1001-4888(2024)01-0027-07

表面涂层半球全发射率的非接触测量探索^{*}

叶成炯¹, 董学金², 邵红亮², 李晓东², 张东升¹

(1. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200444; 2. 上海卫星装备研究所, 上海 200240)

摘要: 涂层表面发射率是飞行器表面涂层性能的关键指标之一。本文针对现有测量方法的局限性, 建立了非接触测量半球全发射率的数学模型, 应用红外相机作为探测器, 开发了涂层发射率的非接触测量装置, 该装置可实现原位、实时的测量; 通过实验分析了影响测量结果的多个因素, 利用搭建的非接触测量装置对多种涂层试样进行了标定和检测, 并将测试结果与某型辐射率仪的测量结果进行比较, 半球全发射率最大相对误差百分数小于 4.1%, 验证了该测量方法的有效性。

关键词: 非接触; 红外相机; 半球全发射率; 涂层

中图分类号: TN219

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-23-117

0 引言

在航空航天领域中, 材料的表面发射率是一个至关重要的参数。隐形飞机实现隐身的原理之一是降低辐射出的电磁波能量^[1], 而辐射能量的大小主要取决于结构表面的发射率, 为了保持其隐身性能, 需要对结构涂层表面进行日常检测和维护; 此外, 航天器在高速飞行时与大气摩擦, 产生的高温容易导致结构的破坏, 选用特定发射率的涂层, 可以有效地降低高温对飞行器结构的破坏^[2]。因此, 表面发射率的精确测量对于提升我国航空航天技术有着重大意义。对于实际的飞行器结构, 往往需要一种原位、非接触的发射率测量技术^[3-4]。然而, 现有的测量方法, 包括量热法、能量法、反射法和多波长法^[5-14], 都存在不足之处。量热法虽然测量精度高, 但需要在真空室内加热后测量, 容易对材料造成不可逆的损伤。能量法的测量装置简易, 操作过程简单, 具有广泛的适用性, 但测量精度易受到参考黑体的影响。虽然基于积分球的反射法可以实现宽波长范围下的在线实时测量, 但只能测量尺寸较小的试样且不能用于现场原位的测量。多波长法虽然可以现场直接测量, 而且测量速度较快, 但理论尚未完善, 目前还不能适用于所有材料。现有的检测方式主要为接触式测量和真空环境下测量, 而且检测设备体积大, 均无法实现结构表面半球全发射率的非接触原位测量。

本文基于能量守恒定律和基尔霍夫定律建立了非接触测量半球全发射率的数学模型, 通过搭建的由辐射源和红外相机组成的便携式测量装置, 对不同半球全发射率的涂层试样进行了测试, 测试结果验证了该测量方法的可行性以及较好的测量精度。

1 测量原理

物体表面受到外界的电磁辐射会存在吸收、反射和透射现象(图 1), 它们存在以下关系:

^{*} 收稿日期: 2023-06-05; 修回日期: 2023-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(12072184)

通信作者: 张东升(1967-), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 实验力学。Email: donzhang@staff.shu.edu.cn

$$\alpha = \frac{Q_\alpha}{Q} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{Q_\beta}{Q} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{Q_\tau}{Q} \quad (3)$$

$$\alpha + \beta + \tau = 1 \quad (4)$$

式中: α 、 β 、 τ 分别为吸收率、反射率和透射率; Q 为物体接收到的总辐射能量; Q_α 为吸收的能量; Q_β 为反射的能量; Q_τ 为透射的能量。

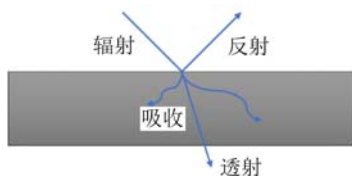


图 1 物体受到辐射时的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an object when it is exposed to radiation

对于不透明的物体而言,其透射率 $\tau \approx 0$,则式(4)变为

$$\alpha + \beta = 1 \quad (5)$$

由基尔霍夫定律可知:物体在发出辐射能量的同时,也会不断吸收周围物体发出的辐射能量,当物体处于热平衡状态时,其发射率等于吸收率,即

$$\epsilon = \alpha \quad (6)$$

发射率是物体辐射出射度,即结构表面单位表面积在单位时间内向外辐射出的能量与同温度下黑体辐射出射度的比值,其数值越大,表示向外辐射能量的能力越强。根据式(5)和式(6)可以得到不透明物体的发射率为

$$\epsilon = 1 - \beta = 1 - \frac{Q_\beta}{Q} \quad (7)$$

因此,可以依据式(7),通过测定物体表面反射的能量确定结构表面的发射率。

理想情况下,绝对黑体在所有方向上的发射率是各向同性的,但实际物体表面的方向光谱发射率与发射方向有关。在二维空间内,方向光谱发射率与发射方向和结构表面的法向夹角 θ 有关,但在三维空间内可能还会与方位角 φ 有关,如图 2 所示。因此,方向光谱发射率 $\epsilon(\theta, \varphi, \lambda, T)$ (λ 为波长, T 为温度)和半球全发射率 $\epsilon_h(T)$ 两者之间存在以下关系^[15]:

$$\epsilon_h(T) = \int_0^{+\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \epsilon(\theta, \varphi, \lambda, T) d\theta d\varphi d\lambda \quad (8)$$

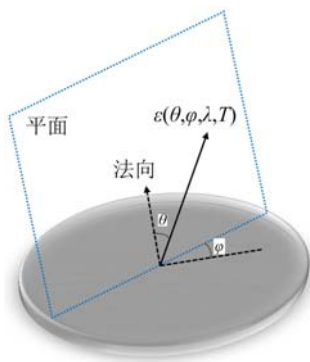


图 2 方向光谱发射率在三维空间内的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of directional spectral emissivity in three-dimensional space

在一般情况下,式(8)中半球全发射率与方向光谱发射率的积分关系可以简化为如下形式:

$$\epsilon_h(T) = k\epsilon(\theta, \varphi, \lambda, T) \quad (9)$$

式中, k 为比例常数。当 $\theta=0$ 时, 法向光谱发射率与 φ 无关, 它与半球全发射率之间的关系简化为

$$\epsilon_h(T) = k\epsilon(0, \lambda, T) \quad (10)$$

由于热辐射的波长大部分位于 $0.76\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$ 的红外波段内^[16], 在现有的发射率测量装置中一般选用 $1\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$ 波长内的傅里叶红外光谱仪^[6, 17-18]、响应波长为 $2\mu\text{m}\sim 16\mu\text{m}$ 的红外热敏电阻^[19-20], 或者波长为 $8\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$ 的辐射温度计^[21]作为探测器, 用于测量半球全发射率, 或者法向光谱发射率。考虑到非接触、原位、便携等测量需求, 本文选用红外相机作为探测器。

如果忽略周围环境辐射的干扰, 被测试样表面只辐射因受到外界辐射而产生的能量。当辐射源沿结构表面法向辐射时, 探测器只接收试样法向的反射能量和试样自身的辐射能量, 如图 3 所示。

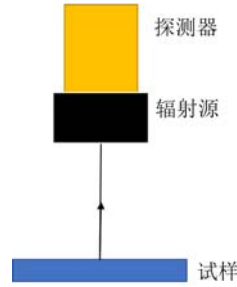


图 3 测量示意图

Fig. 3 Measurement schematic

对于已知半球全发射率 $\epsilon_{h1}(T)$ 的标准试样, 探测器接收到的法向辐射能量为

$$Q_1 = (1 - \epsilon_1(0, \lambda, T))Q + \epsilon_1(0, \lambda, T)Q_s = (1 - \frac{\epsilon_{h1}(T)}{k})Q + \frac{\epsilon_{h1}(T)}{k}Q_s \quad (11)$$

式中, Q 为试样本身所具有的能量, 只与温度有关。

对于未知半球全发射率 $\epsilon_{h2}(T)$ 的待测试样, 探测器接收到的法向辐射能量为

$$Q_2 = (1 - \epsilon_2(0, \lambda, T))Q + \epsilon_2(0, \lambda, T)Q_s = (1 - \frac{\epsilon_{h2}(T)}{k})Q + \frac{\epsilon_{h2}(T)}{k}Q_s \quad (12)$$

如果辐射源和试样的温度不变, 则辐射源辐射到试样表面的能量 Q 和试样本身所具有的能量 Q_s 恒定不变, 联立式(11)和式(12), 可以解得 $\epsilon_{h2}(T)$:

$$\epsilon_{h2}(T) = \frac{\epsilon_{h1}(T)(Q_2 - Q)}{Q_1 - Q} \quad (13)$$

由式(13)可知, 试样表面的半球全发射率与探测器接收的能量呈线性关系。在通常情况下, 假定辐射源的温度高于结构表面的温度时, 探测器接收的能量越小, 半球全发射率越大。基于以上推论, 我们设计了非接触的测量装置, 包含一个辐射源和一个探测器, 测量装置沿结构表面法向进行探测。

2 实验与结果

2.1 测量装置

半球全发射率测量装置如图 4 所示, 它包含了一个圆形稳定的辐射源, 功率 10W, 一台高精度红外相机, 波长范围为 $8\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$, 图像分辨率为 640×480 , 热灵敏度小于 20mK, 红外图像经过 USB 接口读入计算机, 并实时显示被测物体表面的温度场。

2.2 试样

选用了 9 种表面涂层材料, 每种试样均为正方形, 边长为 9mm, 涂层厚度约为 0.2mm, 如图 5 所示。为了与实验结果进行对比, 各试样的半球全发射率首先通过 AE1/RD1 发射率测量仪测量得到, 半球全发射率的测量结果见表 1。



图 4 实验装置

Fig. 4 Experimental setup

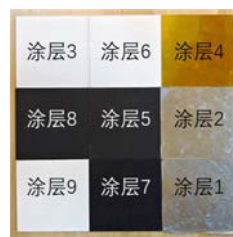


图 5 不同涂层的试样实物图

Fig. 5 Physical drawings of samples with different coatings

表 1 各试样的实验数据

Tab. 1 Experimental data of each specimen

试样名称	半球全发射率 (AE1/RD1 发射率测量仪)	温度数据/℃	半球全发射率 (本文所提出方法)	误差	相对误差百分数/%
涂层 1	≤ 0.04	35.525	—	—	—
涂层 2	0.67 ± 0.03	26.438	—	—	—
涂层 3	0.92 ± 0.02	23.490	—	—	—
涂层 4	0.69 ± 0.03	26.558	0.683	-0.007	1.0
涂层 5	0.87 ± 0.02	23.473	0.906	0.036	4.1
涂层 6	0.87 ± 0.02	23.601	0.897	0.027	3.1
涂层 7	0.87 ± 0.02	23.911	0.874	0.004	0.5
涂层 8	0.88 ± 0.02	23.838	0.880	0	0
涂层 9	0.90 ± 0.02	23.479	0.906	0.006	0.7

2.3 实验过程与结果

先将所有试样放置在约为 20℃ 环境温度中 20min 以达到热平衡状态,并将测量装置进行预热以达到热平衡稳定,将测量装置放置在试样正前方大约 500mm 处,保持其法向与测量装置的光轴方向一致。在辐照条件下,利用红外相机测量试样表面温度信息,采集频率为 1Hz,采集时间为 600s,在测量对象的图像中选取一个尺寸约 5pixel×5pixel 的子区,测量其温度的平均值。测量装置对 9 种试样检测后获得的温度信息见表 1。

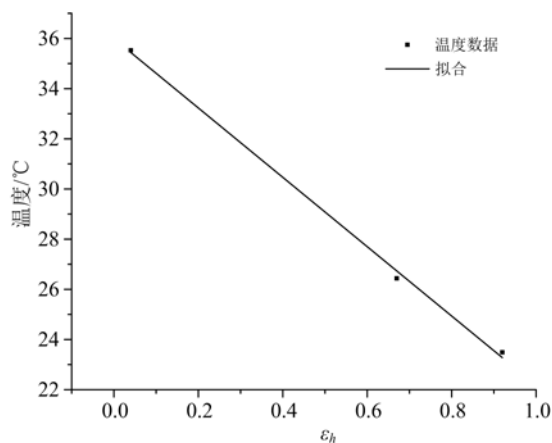


图 6 拟合结果

Fig. 6 Fitting results

选取涂层 1、涂层 2 和涂层 3 作为参比试样,其余的试块作为待测试样。将参比试样的温度数据和半球全发射率进行拟合,可以得到半球全发射率和温度之间的拟合函数。在图 6 中,黑点为温度数据的散点,实线为拟合的结果。拟合的函数表达式见式(14),使用拟合优度 R^2 来评估拟合程度, R^2 越接近于 1,拟合效果越好,在本拟合方程中, $R^2=0.998$ 。

$$T = 35.995 - 13.822\varepsilon \quad (14)$$

结合式(14)确定的拟合方程,对其余的试样半球全发射率进行了测试,并与 AE1/RD1 发射率测量仪测得的结果进行比较,由表 1 可知,最大误差小于 0.04,最大相对误差百分数为

4.1%，实验结果验证了本文提出的测量方法可以有效地在非接触条件下测量结构表面涂层的半球全发射率，证明了该装置可以实现原位检测。

值得注意的是，涂层5、涂层6和涂层7试样的半球全发射率均为0.87，但却存在0.032的偏差。考虑到AE1/RD1发射率测量仪本身存在 ± 0.02 的测量误差，因此，这个偏差在合理范围内。

在实验中还发现了一些有趣的现象：(1)涂层5和涂层7的颜色均为黑色，涂层6的颜色为白色，实验结果表明，半球全发射率与涂层的颜色无关。(2)试样表面的粗糙度会影响半球全发射率的测量。实验表明，涂层7相较于涂层5和涂层6更加光洁，其半球全发射率的测量值更低。这是由于表面光洁度会影响结构表面反射电磁波的方向所致。粗糙度高的表面更容易引起能量的漫反射，从而降低法向的辐射能力，使得法向光谱发射率升高。(3)在涂层1、涂层2和涂层4试样表面存在气泡，气泡会增加漫反射程度，使探测器接收的反射能量变少，从而导致测量的半球全发射率偏大。

3 分析与讨论

本文对影响测量结果的几个因素进行了实验和讨论，总误差为所有待测试样的相对误差百分数之和。

测量时间的影响：由图7(a)可以发现，随着测试时间延长，试样趋于热平衡状态，温度数据的波动量会越来越小，这有助于提高半球全发射率测量的精度，从实验结果发现，测量时间为600s时总误差最小，温度变化趋于稳定。

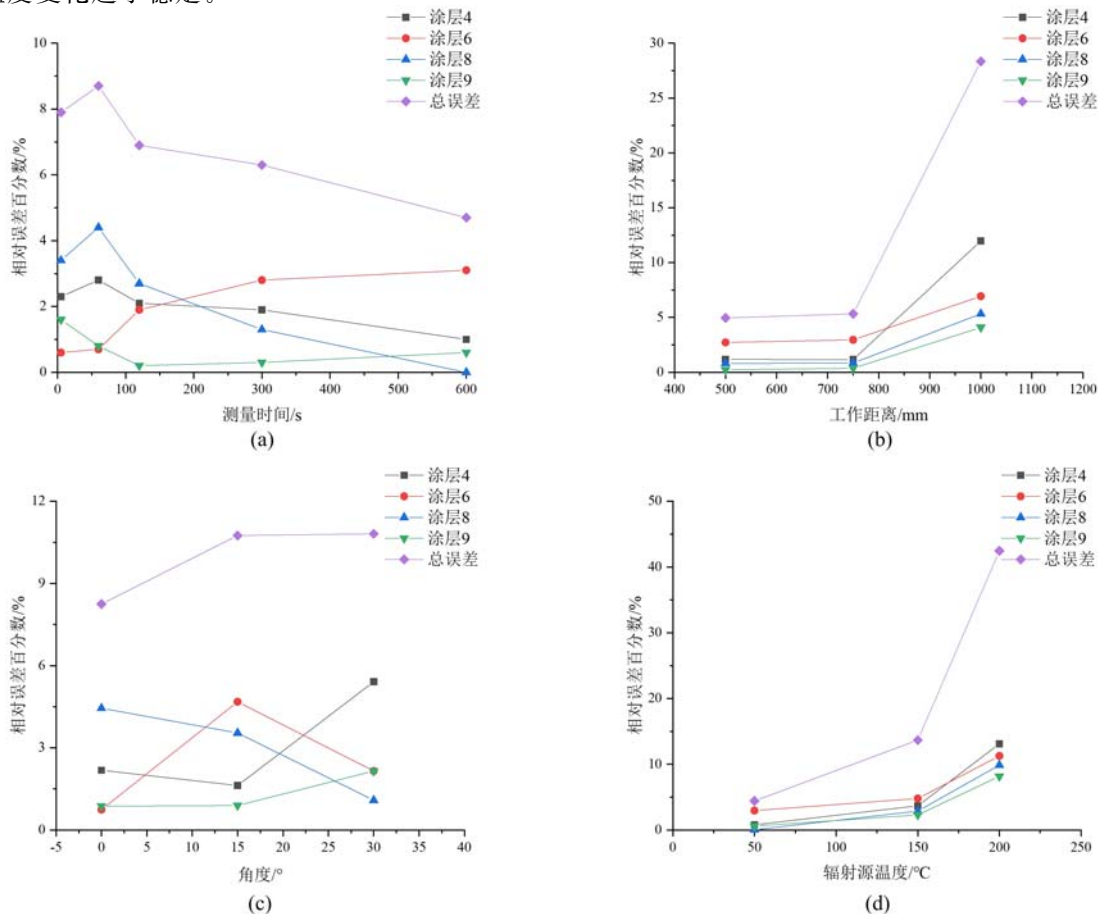


图7 不同条件下各试样的半球全发射率相对误差百分数：(a)不同测量时间；

(b)不同工作距离；(c)辐射源与探测器之间的不同夹角；(d)不同辐射源温度

Fig. 7 Relative percent error of hemispherical full emissivity for each sample under different conditions:

(a) different measurement times; (b) different working distances;

(c) different angles between the radiation source and the detector; (d) different radiation source temperatures

工作距离的影响:当工作距离过大时,辐射源所发出的辐射能量并不能完全投射到被测试样的表面,由图 7(b)可以发现,工作距离为 1000mm 时总误差最大,当工作距离为 500mm 和 750mm 时,总误差较小且较为接近,所以本测量装置的最佳工作距离为 500mm~750mm。

辐射源与探测器之间夹角的影响:由图 7(c)可以发现,不同夹角下的总误差是十分接近的,但夹角为 0° 时最小。随着夹角的增大,总误差存在逐渐变大的趋势,所以在测量过程中需要保证测量装置的光轴方向与试样的平面相垂直。

辐射源温度的影响:当辐射源温度升高时,被测物体达到热平衡的时间会变长,从而会增加测量时间。同时,对于半球全发射率较低的试样,其法向反射的能量更多,探测器测得的温度更高,但对于半球全发射率较高的试样,其法向反射的能量几乎不受到辐射源温度的影响,探测器测量得到的温度变化较小,这会导致拟合程度变差,由图 7(d)可以发现,辐射源的温度越高,总误差越大。

4 结论

本文基于反射法建立了非接触测量半球全发射率的数学模型,采用红外相机作为探测器设计了半球全发射率的非接触测量装置,该装置可实现实际结构的原位发射率检测。本文分析了影响测量结果的多个因素,确定了最佳的测量方案。采用自己开发的测量装置对多种试样半球全发射率进行测试,并与某型辐射率仪的测量值进行对比,结果证实了本文提出的方法可实现结构表面半球全发射率的快速、非接触和原位测量。

参考文献:

- [1] 宋兴华, 於定华, 马新胜, 等. 涂料型红外隐身材料研究进展[J]. 红外技术, 2004(2): 9—12 (SONG Xinghua, YU Dinghua, MA Xinsheng, et al. The development of infrared stealthy coatings and their future prospects[J]. Infrared Technology, 2004(2): 9—12 (in Chinese))
- [2] 江伟辉, 肖兴成, 胡行方, 等. 烧蚀材料光谱发射率测量及高温总发射率计算[J]. 中国空间科学技术, 1999(4): 51—55 (JIANG Weihui, XIAO Xingcheng, HU Xingfang, et al. Measurement of spectral emissivity of ablators and calculation of total high temperature emissivity[J]. Chinese Space Science and Technology, 1999(4): 51—55 (in Chinese))
- [3] 王镇, 周海洋, 罗蛟. 反射隔热涂层半球发射率的影响因素[J]. 上海涂料, 2021, 59(2): 14—16 (WANG Zhen, ZHOU Haiyang, LUO Jiao. Influencing factors of hemispherical emissivity of reflective thermal insulation coatings [J]. Shanghai Coatings, 2021, 59(2): 14—16 (in Chinese))
- [4] 熊磊, 曾鸣, 周波, 等. 涂层半球发射率影响因素的研究[J]. 节能技术, 2021, 39(5): 426—431 (XIONG Lei, ZENG Ming, ZHOU Bo, et al. Influence factors of hemispherical emissivity of coatings[J]. Energy Conservation Technology, 2021, 39(5): 426—431 (in Chinese))
- [5] KRÁLÍK T, MUSILOVÁ V, HANZELKA P, et al. Method for measurement of emissivity and absorptivity of highly reflective surfaces from 20K to room temperatures[J]. Metrologia, 2016, 53(2): 743—753.
- [6] MONCHAU J-P, HAMEURY J, AUSSET P, et al. Comparative study of radiometric and calorimetric methods for total hemispherical emissivity measurements[J]. Heat and Mass Transfer, 2017, 54(5): 1415—1425.
- [7] RIOU O, GUIHENEUF V, DELALEUX F, et al. Accurate methods for single-band apparent emissivity measurement of opaque materials[J]. Measurement, 2016, 89: 239—251.
- [8] RUBIN M. Optical properties of soda lime silica glasses[J]. Solar Energy Materials, 1985, 12(4): 275—288.
- [9] 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(3): 232—236 (DAI Jingmin, WANG Xinbei. Review of emissivity measurement and its applications[J]. Acta Metrologica Sinica, 2007(3): 232—236 (in Chinese))
- [10] 戴景民, 杨茂华, 褚载祥. 多波长辐射测温仪及其应用[J]. 红外与毫米波学报, 1995(6): 461—466 (DAI Jingmin, YANG Maohua, CHU Zaixiang. Multi-wavelength pyrometer and its applications [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1995(6): 461—466 (in Chinese))
- [11] ZUBAIDI F N, WALTON K L, TOMPSON R V, et al. Measurements of total hemispherical emissivity of A508/

- A533B alloy steel[J]. Nuclear Technology, 2019, 205(7):951—963.
- [12] BALAT-PICHELIN M, SANS J L, BECHE E. Spectral directional and total hemispherical emissivity of virgin and oxidized 316L stainless steel from 1000 to 1650K[J]. Infrared Physics and Technology, 2022,123:104156.
- [13] WALTON K L, MAYNARD R K, GHOSH T K, et al. Total hemispherical emissivity of potential structural materials for very high temperature reactor systems: alloy 617[J]. Nuclear Technology, 2019, 205(5):684—693.
- [14] KING J L, JO H, LOYALKA S K, et al. Computation of total hemispherical emissivity from directional spectral models[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 109:894—906.
- [15] 李龙飞. 方向极化光谱发射率测量技术及其在辐射测温中的应用研究[D]. 新乡:河南师范大学, 2021 (LI Longfei. Research on the measurement technology of directional polarized spectral emissivity and its application in radiation thermometry[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2021 (in Chinese))
- [16] 朱志星. 发射率原位在体测量系统与校准方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2020 (ZHU Zhixing. Research on emissivity in-situ measurement system and calibration method[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020 (in Chinese))
- [17] YU K, ZHANG H, LIU Y, et al. Study of normal spectral emissivity of copper during thermal oxidation at different temperatures and heating times[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 129:1066—1074.
- [18] ZHANG R H, SU H B, TIAN J, et al. Non-contact measurement of the spectral emissivity through active/passive synergy of CO₂ laser at 10.6 μ m and 102F FTIR (Fourier Transform Infrared) spectrometer[J]. Sensors, 2016, 16(7):970.
- [19] 吉珊珊. 基于能量法的发射率在线测量系统的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2017 (JI Shanshan. The research of emissivity online measurement system based on energy method[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017 (in Chinese))
- [20] 朱志星, 叶林, 任宏宇, 等. 基于 RM-6A 红外热敏电阻的发射率在线测量系统研究[J]. 仪表技术与传感器, 2020(11):74—78, 90 (ZHU Zhixing, YE Lin, REN Hongyu, et al. Research on on-line emissivity measurement system based on RM-6A infrared thermistor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(11):74—78, 90 (in Chinese))
- [21] 李希明. 中低温下材料发射率测量方法的研究[D]. 杭州:中国计量学院, 2014 (LI Ximing. Research on method of measurement of emissivity of material at medium and low temperatures [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2014(in Chinese))

Study on non-contact measurement of total hemispherical emissivity of surface coatings

YE Chengjiong¹, DONG Xuejin², SHAO Hongliang², LI Xiaodong², ZHANG Dongsheng¹

(1. School of Mechanics and Engineering Sciences, Shanghai University, Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai 200444, China; 2. Shanghai Institute of Spacecraft Equipment, Shanghai 200240, China)

Abstract: Emissivity of coating surface is one of the key parameters of aircraft performance. Due to the limitations of existing measurement methods, this paper establishes a mathematical model for non-contact measurement of total hemispherical emissivity, and develops a non-contact measurement device for coating emissivity which enables in-situ, real-time measurements, by means of an infrared camera. Some key factors that affect measurement results are discussed. After the developed non-contact measurement setup was constructed, it was utilized to calibrate and measure a variety of coating specimens. The measurement results were compared with the existing device, and it was found that the maximum relative error percentage of total hemispherical emissivity was less than 4.1%, which verified the validity of the measurement method.

Keywords: non-contact; infrared camera; total hemispherical emissivity; coating