文章编号:1002-2082(2010)04-0597-05

固体材料定向光谱发射率测量装置研究及误差分析

吴江辉，高教波，李建军
(西安应用光学研究所，陕西 西安 710065)

摘　要：针对红外隐身材料光谱发射率测评的需要，提出一种基于能量法的发射率测量模型，并建立起固体材料定向光谱发射率测量装置，能实现温度范围50℃～300℃与光谱范围1.3 μm～14.5 μm的固体材料定向光谱发射率测量。通过对试样进行实测，得到不同样品在150℃和同一样品在不同温度下的光谱发射率曲线，得出该材料发射率随温度变化的结论。最后分析了样品同黑体温度不等引起的误差，给出温差为1℃和2℃时，发射率相对误差随温度与波长的分布曲线，以及不同黑体温度下3 μm～5 μm和8 μm～14 μm的平均相对误差值。

关键词：定向光谱发射率；光谱辐射计；相对误差
中图分类号：TN206　　**文献标志码**：A

Directional spectral emissivity measurement of solid materials and its error analysis

WU Jiang-hui, GAO Jiao-bo, LI Jian-jun
(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to meet the spectral emissivity test and evaluation of infrared materials, a directional spectral emissivity measurement apparatus based on a solid material emissivity testing model was developed. Solid materials can be measured in the temperature range of 50℃ to 300℃ and in the spectral range of 1.3 μm to 14.5 μm. Some experiments were done under different conditions, spectral emissivity graphs were given. Final errors caused by the difference between sample surface temperature and blackbody cavity temperature were analyzed and error graphs changing with temperature and wavelength were shown when temperature differences were 1℃ and 2℃.

Key words: directional spectral emissivity; IR spectral radiometer; relative error

引言

物体表面的发射率(也称辐射系数)是表征物体表面辐射特性的物理量,是一项重要的红外物理参数,在军事目标红外隐身、探测与制导、红外遥感遥测、红外测温等领域中具有重要作用及意义[1]。研究坦克、飞机、舰船蒙皮、导弹尾焰等军事目标的发射率特性,是实现红外隐身、红外探测制导的前提和关键。对地物表面发射率的获得则是遥测遥感和红外测温的基础,直接影响测量结果[2]。因此,对物体发射率的研究具有重要意义和应用价值。

通常采用的发射率测量方法主要有:量热法、反射率法、能量法及新提出的多波长法等,它们又通过不同的方法来实现。能量法是一种应用比较广泛,被公认较其他方法更为准确的测量方法[3]。但

收稿日期:2009-11-22;　**修回日期**:2010-01-07
作者简介:吴江辉(1983—),男,陕西富平人,硕士研究生,主要从事目标特性及半实物仿真技术研究工作。
E-mail:jhwu613@sina.com

保持样品同比对黑体温度相同是关键,实际中较难做到,且未曾见到相关误差分析,本文将对此进行分析。

本文通过对进入测试系统辐射能量的分析,提出一种新测量模型,建立相应发射率测量装置,对某研究所提供的样品进行不同条件下的实测。最后,对能量法中样品同黑体温度不等产生的误差进行研究,给出定量结果。

1　测试基本原理

物体表面定向光谱发射率定义为:某一温度下,沿物体辐射表面法向成θ角的辐亮度与等温黑体的相同方向、相同波长处的辐亮度之比,即

$$\varepsilon(\theta,\lambda,T)=\frac{L_S(\theta,\lambda,T)}{L_B(\lambda,T)} \tag{1}$$

式中:$\varepsilon(\theta,\lambda,T)$为样品体在$\theta$方向上,温度$T$和波长$\lambda$处的发射率;$L_S(\theta,\lambda,T)$表示待测样品在$\theta$方向的辐亮度;$L_B(\lambda,T)$为黑体的辐亮度,当$\theta=0$时,为法向光谱发射率。

测试时,假定样品发射率不变,表面温度恒等于黑体温度,采用环形渐变滤光器型光谱辐射计测量,通过实时反映环境温度的高精度内置黑体进行光谱响应函数标定,过程如下:

在实验室环境下,将温度为T的黑体出瞳充满辐射计视场,输出信号为

$$V(\lambda)=K(\lambda)(\tau(\lambda)L(\lambda,T)+[1-\tau(\lambda)]L_{\mathrm{at}}(\lambda,T_a)-L(\lambda,T_0) \tag{2}$$

式中:$V(\lambda)$为黑体对应的电压信号;$K(\lambda)$为光谱响应函数(综合了光学及电路因素);$\tau(\lambda)$为测试光路的大气光谱透过率;$L_{\mathrm{at}}(\lambda,T_a)$为测试环境光谱辐亮度;$L(\lambda,T)$为$T$时标定黑体光谱辐亮度;$L(\lambda,T_0)$为$T_0$时内置黑体光谱辐亮度,二者可由普朗克公式得到。近距离(约3米)标定时,在大气窗口大气透过率约为1,于是

$$K(\lambda)=V(\lambda)/[L(\lambda,T)-L(\lambda,T_0)] \tag{3}$$

这样可得到系统的光谱响应函数$K(\lambda)$。下面具体进行分析,建立测量模型。

实验室环境下,样品充满视场时,进入辐射计的辐射有:样品辐射、样品所反射的环境杂散辐射、环境辐射、辐射计内部辐射(通过辐射计内部黑体进行消除)。即

$$V_s=K(\lambda)\{\tau(\lambda)[\varepsilon(\lambda,\theta,T)L(\lambda,T)+[1-\varepsilon(\lambda,\theta,T)]L_{\mathrm{atm}}]+[1-\tau(\lambda)]L(\lambda,T_{\mathrm{at}})-L(\lambda,T_0)\} \tag{4}$$

式中:V_s为样品电压信号;$K(\lambda)$为光谱响应函数;$\tau(\lambda)$为测量光路上的大气光谱透过率;$\varepsilon(\lambda,\theta,T)$表示样品温度$T$和$\theta$方向的光谱发射率;$L(\lambda,T_0)$表示由普朗克公式计算的辐亮度;$L_{\mathrm{atm}}$为实验室杂散辐射;$L(\lambda,T_{\mathrm{at}})$表示环境温度$T_{\mathrm{at}}$下的普朗克辐亮度,$L(\lambda,T_0)$为内置标定黑体辐射。红外信号易受环境辐射影响,为消除杂散辐射影响,分别将漫反射系数恒为ρ_0的漫反射板与光谱发射率恒为ε_B的黑体置入同一测量光路测量,得到

$$V_0=K(\lambda)\{\tau(\lambda)[\rho_0L_{\mathrm{atm}}+(1-\rho_0)L(T_{\mathrm{at}})]+[1-\tau(\lambda)]L(\lambda,T_{\mathrm{at}})-L(\lambda,T_0)\} \tag{5}$$

$$V_B=K(\lambda)\{\tau(\lambda)[\varepsilon_BL_(\lambda,T)+(1-\varepsilon_B)L_{\mathrm{atm}}]+[1-\tau(\lambda)]L(\lambda,T_{\mathrm{at}})-L(\lambda,T_0)\} \tag{6}$$

式中:V_0和V_B表示测量漫反射板和黑体所对应输出的电压。记漫射板室温下发射率为ε_0,$(V_S-V_0)/(V_B-V_0)$,结合$\rho_0=1-\varepsilon_0$,整理得

$$\frac{V_S-V_0}{V_B-V_0}=\frac{\varepsilon_S-\varepsilon_0M}{\varepsilon_B-\varepsilon_0M} \tag{7}$$

式中:$M=\dfrac{L(T_{at})-L_{atm}}{L(T)-L_{atm}}$,采用$\rho_0\approx1$漫射板和$\varepsilon_B=0.99$的标准黑体,(7)式变为

$$\varepsilon_S(\lambda,\theta,T)=\frac{V_S-V_0}{V_B-V_0} \tag{8}$$

(8)式为定向光谱发射率测量公式。在充满视场时,测量样品和黑体同温下的信号为V_S和V_B,标准漫反射板信号为V_0,代入(8)式计算即得到发射率值。

2　测量装置

测量系统由环形渐变滤光器型光谱辐射计SR5000、SR20标准腔黑体、样品加热室、刻度旋转台、平移导轨及采集计算机等组成。系统构成如图1所示,光谱辐射计采用全反射式光学系统,消除光学系统对信号的衰减,无视差,平移导轨实现测量中黑体和样品间切换,刻度旋转台确定样品测试方向。参数如下:波长范围1.3 μm～14.5 μm,光谱分辨率1.5%,可重复性1%,相对不确定度0.5%,SR20腔黑体温度范围25℃～1 200℃,温度不确定度1℃,发射率恒为0.99±0.01,样品加热室温度范围50℃～300℃,不确定度1℃。

测量过程应做到:通过控制器观察,待黑体及样品温度相同且稳定后才能测量;调整光路时应做

到样品表面法向与辐射计光轴平行;通过调整辐射计视场角、增益、采样速率、光谱采集条数等参数,使样品及黑体出瞳充满辐射计视场,输出信号达到最大。对于法向发射率测量,调整平移导轨,使待测样品法向与辐射计光轴重合。对于定向发射率测量,通过调整转台改变样品测量方向即可。

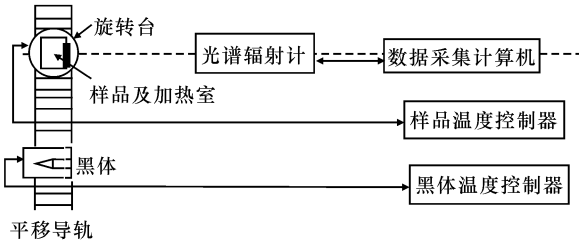

图1　发射率测量系统构成图

Fig. 1　Diagram of emissivity measurement system

3　实验结果及误差分析

3.1　试验结果及分析

在实验室利用所建立的测量系统对某研究所提供的材料进行实测,测量时辐射计参数设置为:增益100;采样频率4 s/条;视场角4 mrad;辐射计入瞳距样品表面3 m;样板尺寸120 mm×80 mm;厚度2 mm;标准黑体出瞳直径22.2 mm。实验室温度23℃,相对湿度30%。结果如图2和图3所示。

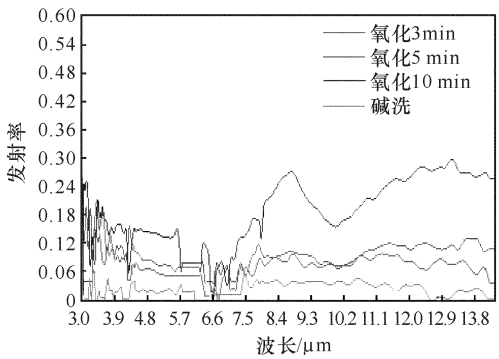

图2　表面经不同处理的铝板150℃法向光谱发射率测量曲线

Fig. 2　Normal spectral emissivity measurement graphs of aluminum board surfaces processed with different methods at 150℃

可以看出,漫射铝表面发射率随氧化时间增加而升高,在波长8 μm以后更明显,由于表面氧化时形成氧化铝膜层,膜层随氧化时间增加而增厚,使得发射率提高。可以看出,通过碱洗处理的发射率最低。

从图3测量曲线可见,该材料发射率随温度升高有所增加,测试温度为50℃时,3.9 μm以前波长的测量结果噪声严重;随着测试温度的升高,发射率基本趋于稳定,测量结果受噪声影响小。

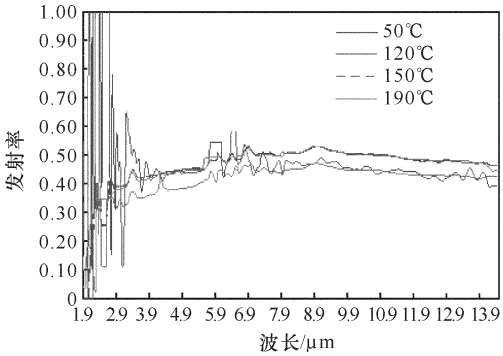

图3　某红外材料不同温度下法向光谱发射率测量曲线

Fig. 3　Normal spectral emissivity measurement graphs of one material at different temperatures

3.2　误差分析

3.2.1　样品同黑体温差造成的误差

(8)式假定了样品表面温度同黑体温度相同,实际中这一点很难做到,下面对此进行分析。实际中,标准黑体温度较精准。假设样品表面真实温度为$T+\Delta T$,黑体温度为T,由普朗克公式,在T处展开取温差的一阶近似[5],结合发射率定义得

$$\varepsilon_{\text{test}}=\frac{\varepsilon_{\text{real}}L(T+\Delta T)}{L(T)}=\frac{\varepsilon_{\text{real}}[L(T)+\Delta L]}{L(T)}=\varepsilon_{\text{real}}(1+\Delta L/L) \tag{9}$$

上式中,下标test和real分别表示测量值和理论值。由普朗克公式,温度相对变化量$\Delta T/T$与辐亮度相对改变量$\Delta L/L$满足关系

$$\frac{\Delta L}{L}=\frac{c_2}{\lambda T}\frac{\exp(c_2/\lambda T)}{\exp[c^2/\lambda T]-1}\frac{\Delta T}{T}=f(\lambda,T)\frac{\Delta T}{T} \tag{10}$$

式中:$c_2=(1.438\ 8\times10^4)\mu\text{m}$,为普朗克第二辐射常数,$f(\lambda,T)>0$恒成立。综上,有

$$\varepsilon_{\text{test}}=\varepsilon_{\text{real}}(1+f(\lambda,T)\frac{\Delta T}{T}=\varepsilon_{\text{real}}+\Delta\varepsilon \tag{11}$$

由(11)式可见,样品温度偏低时,即$\Delta T<0$,测量值较真值偏小;温度偏高时,即$\Delta T>0$,测量值较真值偏大。通过Matlab编程计算得到,温度相差1℃时,发射率相对误差在不同温度下随波长分布曲线如图4所示,温差1℃引起的误差随测试温度升高而减小;在某一测试温度下,波长越长,相对误差越小。通过计算,温差1℃时,3 μm～5 μm和8 μm～14 μm波段平均发射率相对误差如表1所示。

不同温差下,发射率相对误差随温度、波长变化曲线如图5所示。

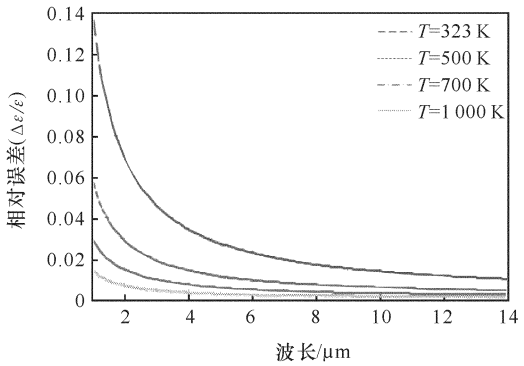

图4　不同温度下温差引起的发射率相对误差随波长变化曲线

Fig. 4　Graphs of Emissivity relative error caused by Temperature differences at different temperatures

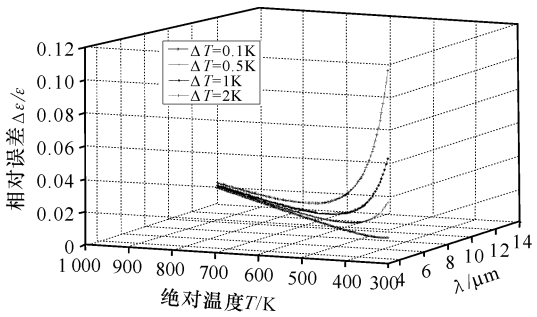

图5　不同温差下发射率相对误差随波长、温度变化曲线

Fig. 5　Emissivity relative error graphs caused by temperature difference with different temperatures and wavelengths

显然,温差越小,相对误差越小;同一温差下,沿波长增加方向误差减小,沿温度升高方向误差减小。因此,对待测样高温、长波处测量值更接近于真实值,而对于低温、短波区,测量误差较大。图3中,50℃时测量结果表现出,波长小于3.9 μm时,测量结果明显受噪声影响严重,这与上述分析一致。测量装置黑体温度不确定度1℃,加热室不确定度1℃时,计算得测量中温差引入的相对误差如表2所示。

3.2.2　其他因素造成的误差

测量中漫射板反射率、黑体发射率等带来的误差在此仅作定性分析,将在以后工作中进行研究。这些因素引入的误差可通过(7)式中M说明。结合测试结果图2和图3可得出:样品测试温度越高,测量曲线越平滑,毛刺越小,这由于M值高温时趋于0,使得引入的误差也小。因此,温度高时,测量结果更接近于真值。

表1　不同温度下温差1℃时中长波段平均发射率相对误差值

Table 1　Average emissivity relative error changes withtemperature when difference temperature is 1℃

温度/℃	(3～5)μm 相对误差/%	(8～14)μm 相对误差/%
50	3.41	1.30
100	2.56	0.98
127	2.23	0.86
227	1.43	0.57
427	0.73	0.32
727	0.37	0.18

表2　不同测量温度下温差2℃时波段积分相对误差值

Table 2　Average emissivity relative error changes with temperature when difference temperature is 2℃

温度/℃	(3～5)μm 相对误差/%	(8～14)μm 相对误差/%
50	7	2.6
120	4.7	1.8
150	4.1	1.6
190	3.4	1.3

4　结论

提出了发射率测量模型,建立相应发射率测量装置,对某材料进行了法向光谱发射率测量,得到了测量结果,分析了样品表面温度同黑体温度不等产生的误差,并给出发射率相对误差在不同测试温度、不同温差下随波长分布,以及中长波处的相对误差值,利用建立的测量装置测得较好的结果。

参考文献:

[1]　PIETER A, JACOBS. 地面目标和背景的热红外特性[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
PIETER A, JACOBS. Thermal infrared characterization of ground targets and backgrounds[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)

[2]　WAN Z, DNG J. Dozier spectral emissivity measurements of land-surface materials and related radiative transfer simulations[J]. Adv. Space Res, 1994, 14(3): 91-94.

[3]　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):232-235.
DAI Jing-min, WANG Xin-bei. Review of emissivity measurement and its applications[J]. Acta Metrologica Sinica, 2007, 28(3): 232-235. (in

Chinese with an English abstract)

[4] 成娟,高教波,尹涛.室温下低温背景红外场景生成方法实验研究[J].应用光学,2009,30(5):845.
CHENG Juan, GAO Jiao-bo, YIN Tao. Un-cooled cold background infrared scene emitters[J]. Journal of Applied Optics, 2009,30(5):845. (in Chinese with an English abstract)

[5] WOOD B E, PIPES J G, SMITH A M, et al. Hemi-ellipsoidal mirror infrared reflectmeter: Development and operation[J]. Applied Optics, 1976,15(4):656.

“尖兵之翼——第三届中国无人机大会暨展览会”开幕
本年度唯一无人机盛会再掀无人机发展热潮

2010年6月9日上午和10日上午,“尖兵之翼——第三届中国无人机大会暨展览会”分别在中国人民革命军事博物馆和北京铁道大厦隆重开幕。本届大会紧密围绕着“无人机的创新与发展”这一主题,针对无人机技术发展以及实际应用中的热点问题进行研讨,同时展览展示了我国最新无人机技术和产品,构筑起我国无人机科研、生产、使用、管理、商贸交流的平台。

“尖兵之翼——第三届中国无人机大会暨展览会”由中国航空学会与空军装备部、中国航空工业集团公司、国家测绘局、中国航天科工集团公司、中国兵器工业集团公司、中国航天科技集团公司联合主办,是集学术论坛、展览展示、商业洽谈于一体的高层次、大规模的综合性专业活动。

首次移师军博的无人机展览会是本年度国内唯一大型无人机展会,展览占地面积3000平方米,70余家企业展出了无人机整机及相关配套产品。本届展会得到了无人机重点企业的高度重视,中国航空工业集团公司、兵器工业集团公司等国内无人机生产的主流企业组织旗下相关单位集体亮相本届展览会。国家测绘局、总参60所、南京航空航天大学、北京科源、桂林鑫鹰、北京天途、北京必威易、郑州劲旋风、无锡汉和、深圳大疆等单位都携其最新无人机整机参展,总计有52架的无人机整机在本届展览中展出。来自军队、军工、高校、测绘、气象、电力、林业、地震、水利等用户部门和单位的约3万专业观众参观了本届展览会。

作为国内无人机行业中规模最大、最具权威性的学术会议,“尖兵之翼——第三届中国无人机大会”6月10日在北京铁道大厦开幕。大会邀请了国内有关行业和单位的领导和知名专家,就无人机的发展与应用、无人机关键技术等作综述性报告。6月11日大会还举办了“民用无人机发展论坛”的分组交流活动,论坛邀请民政部国家减灾中心、测绘、国家电网、水利、地震等单位和部门的领导和专家,与部分无人机科研生产单位专家和管理人员共聚一堂,对我国民用无人机的发展进行研讨。本论坛还就若干无人机技术专题进行分组讨论,本届大会共吸引了无人机及相关领域的代表500余人参会,征集论文200余篇,收录190篇,并由航空工业出版社正式出版。

“尖兵之翼——中国无人机大会暨展览会”自2006年举办以来,以其权威性和专业性获得了业内人士的一致认可和支持。本次活动得到了各有关单位的大力支持,中国气象局作为支持单位,南京航空航天大学、西北工业大学、北京航空航天大学、总参60所、中国航空博物馆、火力控制技术国防科技重点实验室作为协办单位都对本届大会暨展览会的成功举办给予了大力支持。本次活动由中国航空学会无人机及微型飞行器分会和北京高博特广告有限公司承办。

更多会议信息可登陆中国航空学会网站(www.csaa.org.cn)或高博特军工网(www.gobetter.com.cn)了解。

新闻联络人:刘志果　010-88587506/07-810　13811952582
祁玉霞　010-88587506/07-813　13401165937