

可变温条件下材料表面的双向反射分布函数测量

戴景民¹, 赵忠义¹, 李颖²

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化控制学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 基于双向反射分布函数单一参考测量法的测量原理, 研制了一套测量温度最高可达 500 ℃ 的双向反射分布函数测量系统。系统利用转角装置来实现不同角度位置的变换, 用加热炉对试样进行加热, 采用模糊 PID 控制器进行温度的控制。在 25 ℃~500 ℃ 的温度范围内, 对铜表面的双向反射分布函数进行了测量实验, 光源采用可见光波长 0.6328 μm, 功率约 8 mW 的 He-Ne 激光器, 选用 Si1336-5BK 光电探测器。实验表明: 随着试样表面温度的升高, 铜表面的 BRDF 测量值发生了改变; 在温度上升或下降到同一温度时, 铜表面的 BRDF 测量值不同。最后, 对实验现象的形成机理进行了深入分析。上述实验结论对材料表面空间反射特性的研究具有重要意义。

关键词: 双向反射分布函数; 材料表面温度; 探测器

中图分类号: O552.5

文献标志码: A

BRDF measurement of material surface at variable temperatures

DAI Jing-min¹, ZHAO Zhong-yi¹, LI Ying²

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Energy Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A measurement system of bidirectional reflectance distribution function (BRDF) was developed based on the BRDF measurement principle of single reference measurement method, and it works at up to 500 ℃. Different angle position transfer was realized by a turntable device. The sample was heated by a furnace and the temperature was controlled by a fuzzy PID controller. The BRDF on a Cu surface was measured at the temperature of 25 ℃~500 ℃ by using a He-Ne laser as the light source whose wavelength was 0.6328 μm and power was 8 mW. The Si1336-5BK photoelectric detector was selected for the measurement. The experiment shows that the measured value of BRDF on the Cu surface changes when the temperature on the sample surface is rising, and the BRDF value on the Cu surface is different when it increases or decreases to the same temperature. The forming mechanism of the phenomenon was analyzed. The conclusions can be used for further study on spatial reflectance characteristics of material surfaces.

Key words: BRDF; temperature of material surface; detector

引言

双向反射分布函数(BRDF)是用于描述材料表面空间反射特性的基本物理量, 广泛应用于国防

军事、环保商贸、遥感遥测、科学实验和目标渲染^[1-6]等各领域。测量双向反射率也是取得许多目标材料或涂层发射率和吸收率的重要方法^[7]。此

收稿日期: 2007-02-20; 修回日期: 2007-07-30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(5033601)

作者简介: 赵忠义(1971-), 男, 辽宁锦州人, 博士研究生, 主要从事目标材料空间反射特性的研究工作。

E-mail: zhongyi_zhao@hit.edu.cn

外,测量材料表面双向反射率对发射率建模和热传导分析^[8]等也很重要。总之,材料表面双向反射特性研究的重要性,使得各国学者相继对BRDF测量理论、测量装置进行了大量的研究和探索。

目前,由于实验技术的原因,对目标材料表面的BRDF研究主要局限在室温下,现有的实验装置也只能用来测量室温下材料表面的BRDF。然而,许多空间飞行器的外部负荷都对由外部热控表面引起的聚焦太阳热敏感,并且随着隐形飞机、导弹制导、伪目标的识别等技术发展,迫切需要人们对各种材料尤其航空热控材料在空间的散射特性进行研究。因此,提供不同温度下的材料表面BRDF测量数据库,对国防建设中激光制导、隐形飞机的制造,反侦察、反导弹以及太空船的空间反射特性研究等具有现实的重要意义。

1 测量原理

双向反射率分布函数(BRDF)定义为表面反射在指定方向上的亮度与某一入射该表面的辐照度比值^[9]。它完整地描述了不透明材料在表面上一个小面元的反射光空间分布,即

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (1)$$

式中: θ 和 φ 分别为天顶角和方位角,下标 i 和 r 分别代表入射量和反射量; $dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 为 (θ_r, φ_r) 方向的反射亮度; $dE_i(\theta_i, \varphi_i)$ 为方向 (θ_i, φ_i) 上的入射照度; $dL_i(\theta_i, \varphi_i)$ 为方向 (θ_i, φ_i) 上的入射亮度;

$d\omega_i$ 是 $dL_i(\theta_i, \varphi_i)$ 的辐射立体角。 f 在 $0 \sim \infty$ 之间变化,其量纲为球面度⁻¹(即 sr^{-1})。

测量双向反射分布函数可分绝对测量和相对测量^[10-11]。绝对测量是在不使用任何参考标准的情况下进行的测量;而相对测量则是利用已知反射比的参考标准与样品做比较的测量。相对测量又可分为比对测试法和单一参考标准测试法。采用相对测量方法不但可以减小系统误差,同时对杂散光也能起到较好的抑制作用^[12-14]。理论上相对测量是在每一方位的不同入射角时对参考试样和待测试样进行2次测量,而实际上很少进行参考试样的逐点测量,采用单一参考测试法即对参考试样只在某一特定角度测量1次。待测试样的BRDF由输出电压表示的表达式为

$$f_s = f_B \cdot \frac{V_s}{V_B} \cdot \frac{\cos\theta_B}{\cos\theta_s} \quad (2)$$

式中: V_s 和 V_B 分别为由探测器得到的待测试样和标准板的输出电压; θ_s 和 θ_B 分别为待测试样和标准板的反射天顶角; f_B 为标准板的BRDF值。

2 实验装置

在室温和 500 ℃ 温度下,BRDF 测量装置的主要组成(如图 1 所示)为:光源(激光器)、探测器、转角装置、加热炉及温控装置和一套数据接收处理系统。加热过程中试样表面将产生大量的发射辐射热,综合使用下面几种方法可以产生好的信噪比:高强度的调制激光器,安置在探测器前的窄带滤波

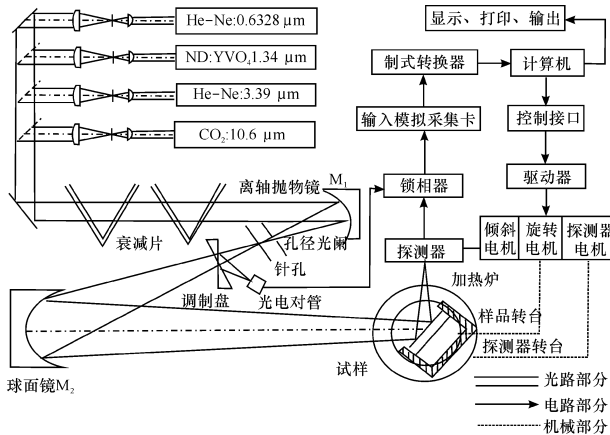


图 1 可控温双向反射分布函数测量系统

Fig. 1 Controllable temperature measuring system for BRDF

器,以及对来自探测器信号进行同步放大的装置。

利用加热炉及温控装置可实现试样表面温度的

变化,在加热过程中,使用数字式温控仪来保持加热炉温度的控制精度在 $\pm 1\text{℃}$ 以内。通电后,整个温度

控制装置开始工作,置于加热炉腔内的热电偶将被加热试样的热信号转变为电信号传递给温控表,温控表将接收到的电信号与控制指令相比较,当满足要求时温控表内的接触器不动作,当信号超出所要求的范围时,接触器动作,从而给加热炉内的电阻丝通电或断电,使得被加热试样温度升高或降低。

加热炉覆盖的温度范围从室温到 500 °C,为提高加热炉的控温精度和利用率,采用如图 2 所示的加热圆筒炉结构。

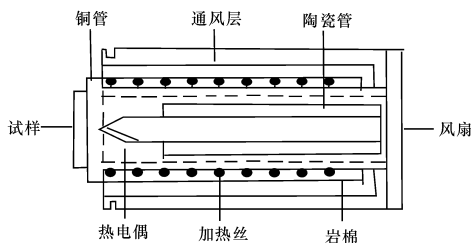


图 2 加热炉结构示意图

Fig. 2 Sketch of heating-furnace

利用绕制在腔体上的电阻丝进行加热,用陶瓷粉和高温胶固定住电阻丝,并可起到防止电阻丝氧化以及绝缘隔热的作用。空腔呈圆筒形结构,腔底采用的是高温耐火材料。陶瓷外层是一层较厚的岩棉,可以起到保温隔热的作用。在腔底背面用 K 型热电偶测温,采用 K 型热电偶,其测量的最高温度随热电偶的直径不同而不同,在低温范围内灵敏度较高。热电偶是应用导体或半导体材料的热效应原理进行测温的。为更好地对炉体温度进行控制,在炉体外层设计了通风孔,用于形成冷却时的风路。

在试样温度接近室温时,环境的影响会很大,为了最大地消除环境辐射影响,整个实验在暗室中进行。

3 实验结果

本文采用由中国计量科学研究院制作的聚四氟乙烯标准白板作为标准试样。测量标准样片所采用的方法也是相对测量法。测量采用的仪器是光谱反射比测量装置(CARY-5E 型,不稳定性为 0.011 (K=2))。该装置光源为普通的钨丝灯,光垂直入射到标准白板表面,在半球空间接收其表面反射光通量。利用分光单色仪,由棱镜和光栅形成多光谱的单色光,通过棱镜的旋转,对样片进行扫描,给出标准白板不同波长的表面反射比。仪器零漂(未开启光源而探测器工作时仪器的电压示值)的电压示

值为:(0.632 8 V)。标准白板的 BRDF 值可由反射比与的比值得到。把标准白板的 BRDF 值以及所测试样和标准白板的输出电压值代入公式(2)即可求出试样的 BRDF。

当入射角和方位角都为 0 度时,在 25 °C 至 500 °C 的温度范围内,对试样铜进行了半球空间的双向反射测量实验研究。在图 3 和图 4 的实验中,光源采用波长 0.632 8 μm 、功率约 8 mW 的 He-Ne 激光器,选用 Si1336-5BK 光电探测器。

在波长和入射角不变时(反射天顶角取 45°)测 2 组反射数据,一组是在试样温度升高时,另一组是在试样温度降低时(如图 3 所示)。

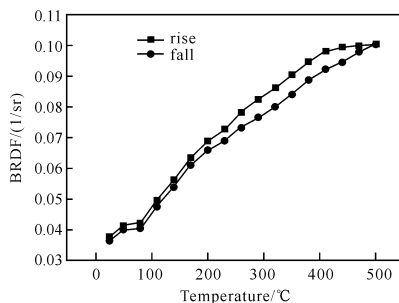


图 3 升温和降温时 BRDF 值的比较

Fig. 3 Comparison of BRDF values while temperature is rising up and falling down

从图 3 中可以发现:温度降低时铜表面的双向反射率通常比温度升高时的双向反射率低 0% 到 7%。双向反射率测量值的这些变化可归因于测量装置的固有误差(不确定度)和加热过程中加热炉的热辐射以及试样表面氧化的缘故。

在 3 个不同温度(50 °C, 140 °C 和 380 °C)时不同散射天顶角下铜表面 BRDF 测量值的变化情况如图 4 所示。

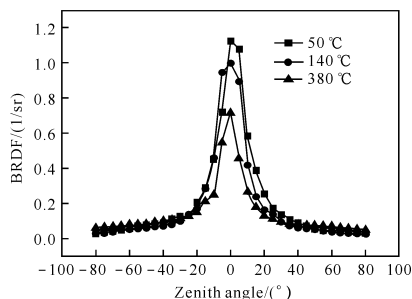


图 4 不同温度下的 BRDF 测量值

Fig. 4 BRDF values at different temperature

从图4中可看出:在50℃时,铜表面有比较强的镜反射,且镜像有尖锐的峰值,其两侧的散射强度迅速下降,并且随着表面温度的升高峰值变小。试样表面温度的升高导致表面变粗糙,散射场仍然有比较明显的峰值,但其强度逐渐下降,峰宽加大,并且逐渐地偏向镜像,向表面法线方向(天顶角为零)移动。表面的光滑程度越大,越接近镜反射表面,镜反射性也就越强,所以镜反射方向上能量就越大,其峰值也就越大。表面越粗糙其远离镜反射方向的值越大。此外,从图4中还可以看出,随着温度的增加,镜像的最大值位置分布在0°左右,与理论符合。这是因为实验只是改变温度,并未改变入射角和方位角,如果改变这2个角度,峰值的位置将会改变。

在前面的实验中,温度升高时和常温下的铜表面BRDF曲线分布是一致的。随着试样表面温度的升高,在反射天顶角-25°~+25°的范围内,由于受镜像作用的影响较强,铜表面的BRDF测量值降低;而在其他反射角范围内,铜表面的BRDF测量值升高并呈逐渐减缓趋势。其形成机理主要有以下几个方面:1)随着表面温度的升高,材料的红外辐射增强,根据Stanfen-Boltzman定律,物体表面的红外辐射能与其物理温度的四次方和发射率成正比。2)随着温度的升高,铜表面生成了氧化铜,表面成分的变化引起了表面形貌特征的改变,表面颗粒的变大使表面粗糙度变大且变得不均匀,这有利于入射光的吸收和漫反射的增强,导致了镜反射减弱,光强降低及能量减弱。3)当光照到粗糙表面时,表面上一般会存在阴影区,相对于某一观测角方向,也有某些被粗糙面遮挡住的散射波不能到达观测点,并且随着表面粗糙度的增加,粗糙面的遮蔽效应和掩饰效应就会越来越明显,这种效应会影响表面的散射情况。4)物质的分子都是由构成化学键的原子组成,这些化学键的原子经常发生伸缩和变角振动,这是产生红外线电磁辐射能量的基础,辐射能量的大小与原子半径大小的平方成反比,所以原子半径越大,材料的辐射能越小,发射率越小,反射率也就越大。5)掺杂效应或称杂质效应:根据红外光学理论,引入杂质会破坏晶格振动的周期性,使晶格振动增大,提高材料的吸收系数,杂质还可能产生比热激发更多的载流子,从而增加自由载流子的吸收。6)高温下,晶格中的原子或离子振动的能量及振幅都增大,离子的移动会形成空格点及间隙原子,引起新的缺位等晶格缺陷,晶

体点阵会发生畸变引起极化,发生晶格的扭曲(旋转)与振动,导致能量状态的改变,从而引起辐射特性的改变。

在可见光波段,通过在BRDF实验台上对3块标准白板的反射比进行相互比较的测量方法来标定实验台的误差,利用实验标定方法得出该实验台的测量误差小于15%。

4 结论

我们研制了用于在不同温度下测量材料表面双向反射分布函数的装置。在25℃~500℃的温度范围内,利用该装置对试样铜进行了双向反射分布函数的测量实验。实验发现:0.6328μm波长下,随着试样表面温度的升高,在散射天顶角-25°~+25°范围内,由于受镜像作用的影响较强,铜表面的BRDF测量值降低;而在其他角度范围内,铜表面的BRDF测量值升高并呈逐渐减缓趋势。从高温到低温下降的过程中,在同一温度下试样表面的BRDF测量值与上升时的测量值不同,这归因于试样表面氧化等缘故。该实验对可变温条件下材料表面空间反射特性的研究具有重要意义。

参考文献:

- [1] 吴振森, 奚玉红. 空间目标的可见光散射与红外辐射[J]. 应用光学, 2004, 25(1): 1-4.
WU Zhen-sen, DOU Yu-hong. Visible-light scattering and infrared radiation from spatial object [J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(1): 1-4 (in Chinese)
- [2] 李旭东, 杨鸿儒, 张郁, 等. 大气泡散射的几何物理模型数值计算[J]. 应用光学, 2006, 27(6): 539-542.
LI Xu-dong, YANG Hong-ru, ZHANG Yu, et al. Numerical calculation of light scattering caused by large spherical bubbles with geometrical-physical model [J]. Applied Optics, 2006, 27(6): 539-542. (in Chinese)
- [3] MARC L. Anisotropy-corrected vegetation indexes derived from POLDER/ADEOS [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(3): 1698-1708.
- [4] SEBASTIEN A. Improvement of a vegetation index using directional measurements from POLDER/ADEOS [J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 1998, 5: 2547-2549.
- [5] LEEUWEN J D, HUETE R, LAING W. MODIS

vegetation index compositing approach; a prototype with AVHRR data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999,69:264-280.

- [6] BLODGETT D W, WEBB S C. Optical BRDF and BSDF measurements of human incisors from visible to mid-infrared wavelengths[J]. *SPIE*, 2001, 4257: 448-454.
- [7] 谢品华, 魏庆农, 刘建国. 用双向反射法测量漆层的红外发射率[J]. *激光与红外*, 1999,29(1):43-45.
XIE Pin-hua, WEI Qing-nong, LIU Jian-guo. A method of measuring infrared emissivity of paint coatings by bidirectional reflectance [J]. *Laser & Infrared*, 1999,29(1):43-45. (in Chinese)
- [8] SIEGEL R, HOWELL J. Thermal radiation heat transfer. 4th d., Taylor & Francis[C]. New York: 缺出版社名称, 2002.
- [9] KALE B M. In situbidirectional reflectance distribution function (BRDF) measurement facility[J]. *SPIE*, 1979, 171: 177-180.
- [10] BARTELL F O, DERENIAK E L, WOLFE W L. The theory and measurement of bidirectional reflectance distribution function (BRDF) and bidirectional transmittance distribution function (BTDF)[J]. *SPIE*, 1980, 257: 154-159.
- [11] 魏庆农, 刘建国, 江荣熙. 双向反射分布函数的绝对测量方法[J]. *光学学报*, 1996, 16(10): 1425-1430.
WEI Qing-nong, LIU Jian-guo, JIANG Rong-xi. Measurement method of absolute bidirectional reflectance distribution function [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(10): 1425-1430. (in Chinese)
- [12] LEE W W, SCHERR L M, BARSH M K, Stray light analysis and suppression in small angle BRDF/BTDF measurement [J]. *SPIE*, 1986, 675: 207-216.
- [13] CEN Zhao-feng, LI Xiao-tong, HE Zhi-ping, et al. Stray light analysis of basic model Gaussian beam [J]. *SPIE*, 2002, 4914: 230-233.
- [14] CHAO Qi, YANG Chun-ling, LI Wen-juan, et al. Stray light suppression in BRDF measurement infrared optical system[J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, 1(7): 398-400.