

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0146-03

双向反射分布函数的测试方法分析和实验研究

齐超, 杨茂华, 孙晓刚, 戴景民

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 双向反射分布函数(BRDF)有效地描述了材料表面的空间反射特性和光谱特性。分析了 BRDF 的不同测试方法。研制了双向反射率测试实验台。分别用 He-Ne 激光器和 YVO₄ 固体激光器,对 1500CCR/RC.S.G 防水研磨金刚砂在反射天顶角-15°~55°范围进行了测试研究。最后提到了要精确测量 BRDF 所面临的困难。

关键词 激光技术; 双向反射系数; 光谱特性; 爱里圆斑

中图分类号 TN248

文献标识码 A

Analysis and Experimental Study of BRDF Measuring

QI Chao, YANG Mao-hua, SUN Xiao-gang, DAI Jing-min

(Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The spatial reflected characteristic and spectral characteristic from optical material surfaces were effectively described by the BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function). The several measuring methods of the BRDF were analysed. A experimental table for the BRDF measuring was developed. With He-Ne laser and YVO₄ solid laser, the measurements on 1500 CCR/RC.S.G silicon carbide waterproof abrasive paper were made within the -15°~55° of reflectance zenith angle. Finally, some difficulties in measuring BRDF precisely were mentioned.

Key words laser technique; bi-directional reflectance factor; spectral characteristic; Airy disc

1 引言

现代战争首先是光、电高科技对抗,对激光隐身、目标光照反射特性及环境光谱特性的研究又是最主要的对抗领域之一。

随着环保、商业、国防特别是电磁波(光波)遥感等民用和军用技术的发展,研究目标材料对光照的空间反射特性和光谱辐射特性成为一项非常重要工作。尤其近年来,材料的辐射度和光度特性测量已成为光辐射测量的一个主要分支,材料对光辐射传输特性的测量技术也取得了可喜进展。国际上众多科研机构如芬兰技术研究中心、法国里尔科技大学、美国 USAF 飞利浦实验室^[1-3]等对 BRDF 测试都有所研究。我国在这方面起步较晚,今年初我们开始了 BRDF 理论和实验研究,这里给出所取得的初步结果。

2 双向反射分布函数

尽管美国学者 Nicodemus 最早提出 BRDF^[4],

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

式中 $dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 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,但由于这里使用微分量表示,不适于测量。

辐射度学和光度学中,用反射辐照度和入射辐照度的比值描述材料表面的反射特性,该比值即称为双向反射分布函数 BRDF^[5]

$$\text{BRDF}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{L_r(\theta_r, \varphi_r)}{E_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (2)$$

其量纲为球面度⁻¹(sr⁻¹)。它表示了不同入射角条件下物体表面在任意观测角的反射特性。它是入射角 (θ_i, φ_i) 、反射角 (θ_r, φ_r) 及波长 λ 的函数。当然它也受

基金项目: 哈尔滨工业大学跨学科交叉性研究基金(HIT.MD.2001.17)资助课题。

作者简介: 齐超(1970.12-),女,哈尔滨工业大学在职博士研究生,现主要从事目标材料空间反射特性的研究及电路基础的教学与科研工作。E-mail: qichao@up369.com

材料表面温度的影响。

以上两种双向反射分布函数的定义形式虽不同,但在描述空间反射分布特性和光谱特性的机理却相同,且(2)式可由(1)式推得。

3 BRDF 测试方法

测量 BRDF 可分绝对与相对测量。绝对测量在不使用任何参考标准的情况下进行;而相对测量则是利用已知反射比的参考标准与被测试样做比较的测量。

3.1 绝对测量

由上述双向反射率分布函数 BRDF 的定义式(2)可知,直接测定 BRDF 的方法是分别用照度计和亮度计测出入射光谱辐照度和反射光谱辐照度,两者之比即为 BRDF。这种测试方法虽简单,但误差很大。在辐射学中,照度的测量比其他光度量的测量用得更加广泛,通常测亮度是使用一台照度计,由测量辐射源像的照度来确定材料辐射的亮度^[6]。这样实现起来比较麻烦且精度也不高。

较好的绝对测量方法是引入双向反射系数 β ,它与双向反射分布函数间的关系

$$\beta(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \pi(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \quad (3)$$

中国科学院安徽光学精密机械研究所研制了一套全自动测量几乎所有可能几何条件下的绝对双向反射系数测定仪,由此确定双向反射分布函数^[6]。

3.2 相对测量

应用比较广泛的还是借助参考试样对 BRDF 做相对测量,如图 1 所示。汇聚光束照到试样上直径大约为 1~3 cm,使得测量探测器接收的光斑直径近似为爱里圆

$$d = 2.44\lambda f/D \quad (4)$$

式中 λ 为入射光波长。

相对测量又可分为比对测试法和单一参考标

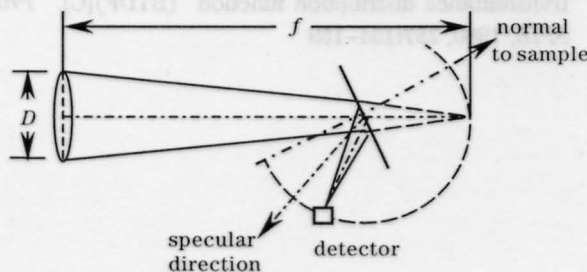


图 1 BRDF 测试图

Fig.1 BRDF measuring geometry

准测试法。

3.2.1 比对测试法

因方位上反射特性的变化甚小,常将(3)式中 $\beta(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 写成 $\beta(\theta_i, \theta_r)$ 。反射系数的测量用比对的方法来实现,即在同一个变角测试装置上对于待测样品和标准样品,光束入射和出射方式均相同,从而有^[6]

$$\beta_s(\theta_i, \theta_r) = \frac{V_s(\theta_i, \theta_r)}{V_r(\theta_i, \theta_r)} \beta_R(\theta_i, \theta_r) \quad (5)$$

式中 V_s, V_r 分别为测试样品和标准样品由探测器得到的输出电压,如果知道标准样品的反射系数 $\beta_R(\theta_i, \theta_r)$,待测样品的反射系数 $\beta_s(\theta_i, \theta_r)$ 可以计算出来。

具有较好朗伯漫射特性的标准样品反射系数 $\beta_R(\theta_i, \theta_r)$ 可由已知的半球反射率 $\rho(0/d)$ 或 $\rho(6^\circ/d)$ 得出。此方法得到的反射系数的误差小于 0.5%。中国科学院长春光机所基于上述测试原理,设计了紫外-真空紫外变角测试系统^[7]。

国外比对法测试直接由公式(6)得待测样品的双向发射分布函数^[8]

$$\rho_s = \rho_r \cdot V_s / V_r \quad (6)$$

这里需要标准试样 ρ_r 的所有数据,但测近似朗伯面的参考试样与未知试样相比,还是容易得多。

3.2.2 单一参考标准测试法

采用单一参考测试法,如下式^[9],即对参考试样只在某一特定角度测量一次。

$$\rho_s = \rho_r \cdot \frac{V_s \cos \theta_r}{V_r \cos \theta_s} \quad (7)$$

式中 θ_r, θ_s 分别为标准样品和待测样品的反射天顶角。当然该测试法有零漂,需预先对探测器依照 $\cos \theta_r$ 进行标定的缺点。

4 实验

利用可见光 0.6328 μm He-Ne 激光器、近红外 1.34 μm YVO₄ 固体激光器,对 1500CCR/RC.S.G 防水研磨金刚砂在正入射情况下,进行了反射天顶角 $-15^\circ \sim 55^\circ$ 范围的测量,实验流程如图 2 所示,所测数据见表 1 和表 2。

实验数据由相应波长的对应光电探测器接收,经锁相器、数据采集模块进入计算机显示的结果。从所测数据可见,靠近正入射光附近反射较强,在 1.34 μm 波段, PbS 探测稳定性较好。整体看,金刚砂在前向、后向反射天顶角小于 60° 时,可近似为一朗伯漫射余弦体。

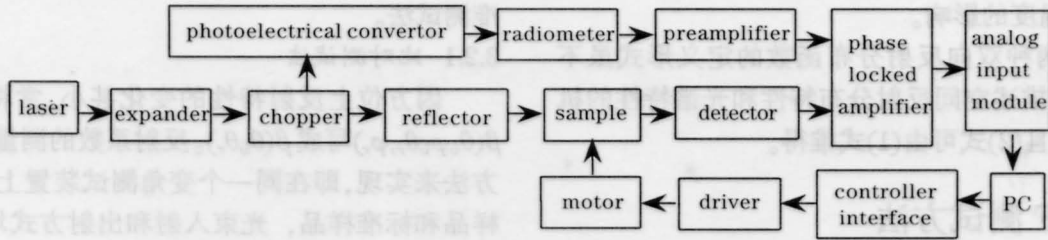


图2 BRDF 测量实验流程图

Fig.2 Block diagram of BRDF measuring experiment

表1 可见光实验结果

Table 1 Experimental results of the visible light

0.6328 μm / (Si detector)			
θ_s	V_s /mV	θ_s	V_s /mV
-15°	175±5	15°	180±10
-25°	170±15	25°	170±15
-35°	160±10	35°	160±15
-45°	153±9	45°	166±10
-55°	142±5	55°	160±10

表2 近红外实验结果

Table 2 Experimental results of the infrared ray

1.34 μm / (PbS detector)			
θ_s	V_s /mV	θ_s	V_s /mV
-20°	1272±5	25°	1265±5
-30°	1268±2	35°	1262±2
-40°	1270±3	45°	1263±2
-50°	1265±3	55°	1260±6

*注: 以上是两次测量, 探测器每转一角度稳定 1 min 后, 测量 2 min 的平均结果

5 结论

不管采用哪种方法测量 BRDF 都是一项长期、乏味的工作, 辐射计、测角仪的精度, 光源、测量平

台的标准, 光干涉程度, 测量过程中偶然误差的出现等等, 要高精度测试很困难。随着科学技术和测试方法的不断进步, 高精度、多波长 BRDF 测试系统将会更广泛地应用于各种光学材料和航天热控材料的空间反射特性研究中。

参考文献

- 1 J. Miettinen, A. Harkonen. An optical scattering measurement instrument for the design of machine vision illumination[C]. *Proc SPIE*, 1991, **1614**:45-56
- 2 M. A. Culpepper. Empirical bi-directional reflectivity model[C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2469**:208-219
- 3 J. Descloitres, J. C. Buriez. About cloud reflectances as measured from polder during cleopatra astex and eucrex[C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2582**:253-263
- 4 F. E. Nicodemus. Reflectance, nomenclature and directional reflectance and emissivity [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(6):1474-1475
- 5 车念曾, 闫达远. 辐射度学和光度学[M]北京: 北京理工大学出版社, 1990. 35-72
- 6 Wei Qingnong, Liu Jianguo, Jiang Rongxi. Measurement method of absolute bidirectional reflectance-distribution function[J]. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1996, **16**(10):1425-1430 (in Chinese)
- 7 Tang Yuguo, Qi Wenzong, Li Futian. Study of diffuser in UV and VUV range[J]. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 2000, **20**(2):267-271 (in Chinese)
- 8 F. O. Bartell, E. L. Dereniak, W. L. Wolfe. The theory and measurement of bi-directional reflectance distribution function (BRDF) and bi-directional transmittance distribution function (BTDF)[C]. *Proc. SPIE*, 1980, **257**:154-159



图1 BRDF 测量几何示意图