

粗糙表面光散射特性研究与光学常数反演*

王明军^{1,2}, 董雁冰², 吴振森¹, 邓 蓉², 王云强²

(1. 西安电子科技大学 理学院, 陕西 西安 710071;

2. 目标与环境光学特征国防科技重点实验室, 北京 100854)

摘 要: 测量了特殊的镀金聚酯薄膜、镀铝绝热材料和硅化合物材料表面的激光(1.06 μm)双向反射分布函数、光镜反射率谱、总体反射率谱以及等效光学常数, 利用多参数优化的遗传算法, 建立了材料表面的 BRDF 统计模型。并采用 Powell 算法反演了铝基绝热材料在不同波段上、某一波长的光学常数。

关键词: 粗糙表面; 双向反射分布函数; 半球反射率谱; 等效光学常数

中图分类号: O436.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)05-0549-04

Research on light scattering characteristics of rough surface and optical constants deduction*

WANG Ming-jun^{1,2}, DONG Yan-bing², WU Zhen-sen¹, DENG Rong², WANG Yun-qiang²

(1. School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Optical Signature of Targets and Environments Key Laboratory of National Defence Science and Technology, Beijing 100854, China)

Abstract: The LBRDF(1.06 μm), equivalent optical constant dispersion, specular reflectivity spectrum and total hemisphere reflectivity spectrum of gilded film, plating aluminous adiabatic material and silicic compound for rough surfaces are measured. The methods of specular reflective intensity are utilized to calculate the root mean square of the gilded film and adiabatic material surface roughness. Based on measured data of LBRDF, the poly-parameter genetic optimized algorithms are utilized to create statistical BRDF model of above-mentioned material. According to the ellipsometry measuring the optical constants, the Powell optimum method is used to deduce these data with certain wavelength for adiabatic material in different waveband.

Key words: Rough surface; BRDF; Hemisphere reflectivity spectrum; Equivalent optical constant

收稿日期: 2003-11-08; 修订日期: 2003-12-01

* 基金项目: 国家高科技 863 资助项目(2002AA731190)

作者简介: 王明军(1979-), 男, 陕西旬阳人, 硕士生, 主要研究方向为光散射特性建模及光信号处理。

0 引言

粗糙材料表面光散射测量与理论计算^[1,2]是光散射特性研究的基础。这些光学特性在目标探测、识别和特征提取中起着举足轻重的作用^[3,4]。由于不同材料表面的物理特性,例如表面粗糙度、介电常数和波长^[5,6]等不同,其光学特征也相差甚远。在材料的粗糙表面光散射研究中,表面双向反射分布函数(BRDF)、光学反射率谱和光学常数的测量以及理论建模是研究材料表面光学散射特性的主要技术途径。本文利用两种特殊材料表面的光学散射特性测量数据,建立了材料表面的 BRDF 模型,反演材料光学常数,并对材料的光学特性进行了分析,认为可满足工程上的需求。

1 粗糙材料表面的光散射特性

采用比较测量法得到样品的双向反射分布函数,即在相同的几何条件下,被测样品和标准板的 BRDF 满足如下关系:

$$\frac{BRDF_s}{BRDF_r} = \frac{V_s(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)}{V_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)} \quad (1)$$

式中 $BRDF_s$ 为与样品有相同入射角和散射角时标准板的 BRDF; $V_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)$ 为标准板的输出电压; $V_s(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)$ 为样品的输出电压。

实际测量用的聚四乙烯压制的标准白板近似为朗伯面,其在 $1.06 \mu\text{m}$ 激光照射下的方向半球反射率为 95.4%,其在天顶方向的反射率为 ρ_0/π , ρ_0 为标准板的方向半球反射率。测量的材料是镀金聚酯薄膜和镀铝绝热材料。由公式(1)有:

$$R_s = f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \cos \theta_r = \frac{V_s(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)}{V_r(0, 0; 0, 0)} \frac{\rho_0}{\pi} \cos \theta_r \quad (2)$$

图 1 和图 2 分别给出了入射天顶角 θ_i 为 0° 、 15° 、 30° 、 45° ,接收方位角为 0° 时,镀铝绝热材料和入射天顶角 θ_i 为 15° 、 30° 、 45° 、 60° ,接收方位角 ϕ_i 为 0° 时,镀

金聚酯薄膜表面的双向反射分布函数角分布。从图中可以看出,两者均存在较强的相干散射(镜反射),非相干散射(漫反射)较弱。镀铝绝热材料表面双向反射分布函数随接收天顶角的峰值变化比镀金聚酯薄膜表面的双向反射分布函数显著,一方面说明镀铝绝热材料对于不同的入射角均有很强散射特性,便于隔绝目标能量消耗;另一方面镀铝绝热材料较镀金聚酯薄膜表面光滑,镜反射峰值与分布随入射角度改变镜向反射变化相当明显。

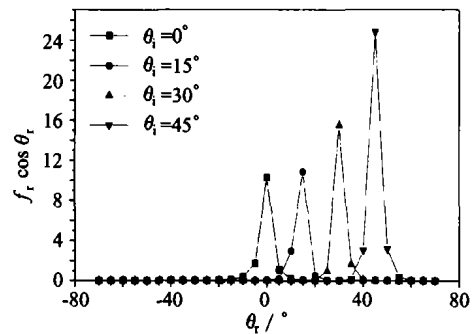


图 1 镀铝绝热表面 BRDF 试验测量值($\phi_r=0^\circ$)

Fig. 1 The experimental result of BRDF plating aluminum adiabatic material ($\phi_r=0^\circ$)

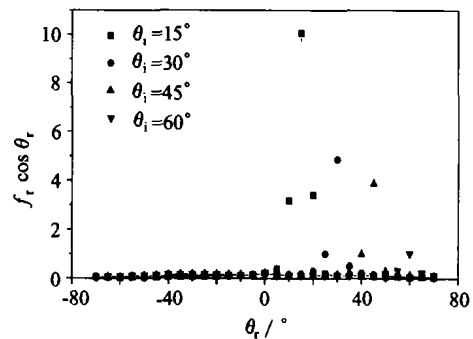


图 2 镀金聚酯薄膜表面 BRDF 试验测量值($\phi_r=0^\circ$)

Fig. 2 The experimental result of BRDF gilded film material ($\phi_r=0^\circ$)

采用日本分光公司 V-570 型分光光度计测量镀金聚酯薄膜表面和镀铝绝热材料的相对反射率谱,光栅采样间隔为 1 nm。镜反射光谱测量入射光线相对于样品表面法线夹角为 45° 。图 3 给出了这些材料的总体反射率和镜反射率谱,其中 WT 表示镀金聚酯薄膜总体反射率谱,WS 表示镀金聚酯薄膜镜反射率谱,AT 表示镀铝绝热材料总体反射率谱,AS 表示镀铝绝热镜反射率谱。从图 3 可以看出绝热材料是由

镀铝聚酯薄膜构成,表面相当光滑,在透过率不太高的情况下,在可见、近红外波段上具有较高的反射率和吸收率,减少了目标热量的损失。镀金聚酯薄膜反射率较高。

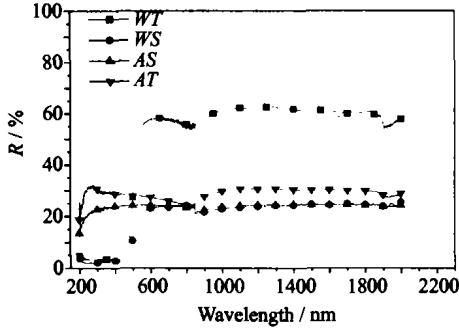


图 3 镀铝绝热材料和镀金薄膜材料的总体和镜反射率谱
Fig. 3 Experimental results of reflectivity spectrum for plating aluminous adiabatic material and gilded film

图 4 给出了根据测量得到的半球漫、镜反射率谱,利用镜向反射光强法^[7]计算出来的镀金聚酯薄膜(WM)表面和镀铝绝热材料(AM)表面粗糙高度起伏均方根。从图中可以看出,镀金聚酯薄膜表面的高度起伏比镀铝绝热材料表面的大。用镜向反射光强法计算出来的高度起伏均方根满足的条件为波长 $\lambda > \sigma/4$,当波长 λ 和 σ 相比拟时,表面高度均方根起伏变化较快,随着波长的增大,镀金聚酯薄膜和太阳能帆板表面高度起伏不再随入射波长的变化而明显变化。

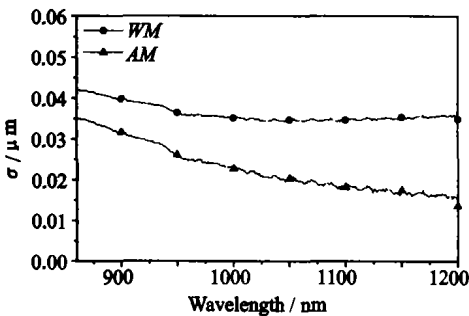


图 4 镀铝绝热材料和镀金薄膜表面高度起伏均方根
Fig. 4 The root mean square for plating aluminous adiabatic material and gilded film

依照多参数优化遗传算法建立了 BRDF 理论模型^[8],为:

$$R_s(\theta_i, \theta_r, 0) = \frac{a \exp[-b(\theta_i - \theta_r)^2] + d \cos \theta_r}{\cos^c \theta_r} \quad (3)$$

式中 第一项对应于相干散射(镜反射)分量;第二项对应于漫射分量。对于镀金聚酯薄膜,参数 $a = 10.30099, b = 98, c = 1, d = 0.0799$,误差 $E = 0.75\%$;对于镀铝绝热材料, $a = 10.2899, b = 98, c = 1, d = 0.0799$,误差 $E = 0.54\%$ 。图 5 给出了镀金聚酯薄膜入射天顶角 θ_i 为 0° 、接收方位角 φ_r 为 0° 、镀铝绝热材料入射天顶角 θ_i 为 15° 、接收方位角 φ_r 为 15° 的理论计算和试验测量值的比较,两者吻合很好。图 5 中 ATM、AE 分别表示镀铝绝热材料的计算值和测量值,WTM、WE 分别表示镀金聚酯薄膜模型计算值和试验测量值。

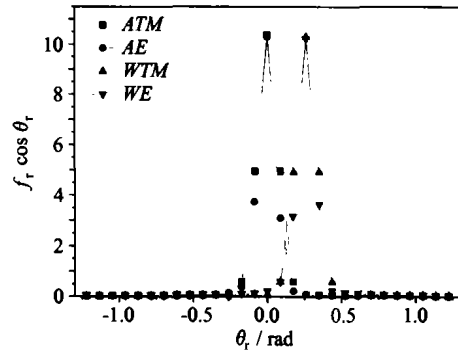


图 5 镀铝绝热材料和镀金聚酯薄膜的 BRDF 理论计算值和试验值比较
Fig. 5 Comparison of theoretical and experimental results of plating aluminous adiabatic material and gilded film

2 等效光学常数测量及其反演

图 6 给出了根据德国 Sentech Instruments 公司 M-2000UI 型椭偏仪测量上述两种材料样片光学常数的色散曲线,最小分度值为 0.01° ,图中 WM 表示镀铝绝热材料,SB 表示硅合物。

表 1 给出的是依据 Powell 优化算法^[9]计算镀铝绝热材料光学常数理论反演值和其试验测量值的比较结果。Powell 是一种尺度法,也是一种共轭方向法,是解决最优化问题的有效方法。金属材料介电常数满足 Drude 模式^[10],B,C 是 Powell 优化算法的初

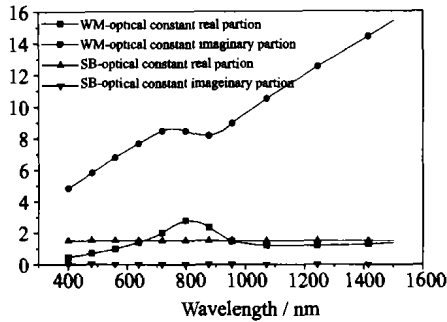


图 6 测量硅合物和镀铝绝热材料的光学常数实部和虚部
Fig. 6 Measuring real and imaginary partion of optical constant of plating aluminous adiabatic material and silicic compound

值,与入射光波长、金属介电常数有关系,其值对反演精度和反演时间有较大的影响,由于在紫外、可见、近红外波段上实现对光学常数的反演受计算时间和计算精度的限制,所以将波段划分为三部分,表 1 给出的 B, C 值为 Powell 优化算法在不同波段上反演计算的初值。

表 1 不同波段、某一波长试验测量和反演结果比较
Tab. 1 Comparison of experimental measurement and deduction results of optical constants with certain wavelength in different waveband

The optical constants of plating aluminous adiabatic material						
	Experimental result	Theoretical result	Experimental result	Theoretical result	Experimental result	Theoretical result
Band / μm	0.25~0.50		0.60~0.80		0.90~1.80	
$B/\mu\text{m}$	99		133		99.8	
$C/\mu\text{m}$	0.608		0.648		0.7985	
$\lambda/\mu\text{m}$	0.360		0.630		1.06	
n	0.39975	0.3968	1.3631	1.2582	1.2278	2.015
k	4.3751	4.2259	7.598	7.5988	10.377	10.3318

3 结 论

测量了镀金聚酯薄膜表面和镀铝绝热材料的镜反射率谱和总体反射率谱、 $1.06 \mu\text{m}$ 激光双向反射分布函数和等效光学常数的色散特性,利用镜向反射光强法计算了它们表面高度起伏均方根,测量结果说明

粗糙材料表面高度均方根越小,镜反射率谱越高,材料的双向反射分布率的镜反射分量越强。依据多参数优化遗传算法对镀金聚酯薄膜和镀铝绝热材料双向反射分布函数统计工程模型,给出满足工程要求的计算参数,并将理论模型计算与试验测量数据进行了比较,结果相符。结合其可见光谱色散曲线,应用一维尺度 Powell 优化算法,反演了镀铝涂层目标粗糙表面不同波段上的等效光学常数,其结果是,紫外、可见波段上吻合较好,而在近红外大波长情况下,光学常数的实部有一点起伏,主要是由数值计算的敛散性造成的,在误差允许的范围,能够满足工程计算的要求。

参 考 文 献:

- [1] 姚连兴,仇维礼,王福恒. 目标和环境的光学特性[M]. 北京:宇航出版社,1995. 128-144.
- [2] 吴振森,刘文清,王亚萍,等. 铝基漆层光散射特性研究[J]. 武汉大学学报(电波增刊),1991,172-177.
- [3] 路远,时家明,凌永顺,等. 红外被动定位研究[J]. 红外与激光工程,2001,30(6):406-409.
- [4] 王日,徐玉滨,孙宝举,等. 激光探测目标仿真算法研究[J]. 红外与激光工程,1999,28(3):55-58.
- [5] Wu Zhensen. IR laser backscattering by arbitrarily shaped dielectric object with rough face[J]. Journal of Electronics, 1993, 10(4):298-306.
- [6] Tomiyaasu K. Relationship between and measurement of diffraction scattering coefficient and bi-directional reflectance distribution function (BRDF)[J]. IEEE,1998,GE-26(5):660-665.
- [7] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave remote sensing. Vol. 2 [M]. Massachusetts: Addison-Wesley publishing company, 1982. 922-991.
- [8] Wu Zhensen, Xie Donghui, Wei Qinlong, et al. Modeling reflectance function from rough surface and algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(8): 897-901.
- [9] 韩香娥,威力彦,吴振森. 金属基和涂层光学常数的测量[J]. 光子学报,1995,24(2):17-22.
- [10] Vorburger T V, Ludema K C. Ellipsometry of rough surfaces [J]. Applied Optics, 1980, 19(4):561-573.