

# 空间相机用铝合金不同工艺表面双向反射分布函数的特性对比

李永强<sup>1,2</sup> 郭永祥<sup>2\*</sup> 廖志波<sup>2</sup> 王静怡<sup>2</sup> 杜建祥<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>西北工业大学航空学院, 陕西 西安 710072)  
(<sup>2</sup>北京空间机电研究所, 北京 100190)

**摘要** 阐述了双向反射分布函数(BRDF)的定义及其测量装置的工作原理,使用紧凑型 BRDF 测量装置分别对空间相机常用结构材料——铝合金在不同加工和表面处理工艺下的表面散射特性进行了测量和对比分析。分析了测量装置可能存在的各种误差源并采取了相应的控制措施。通过对不同加工工艺和表面处理工艺下铝合金样块 BRDF 测量数据的对比,为后期空间相机方案设计时加工工艺的选取提供了参考。

**关键词** 遥感;双向反射分布函数;表面散射;加工工艺;误差分析

**中图分类号** O436.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0512003

## Comparison of Bidirectional Reflectance Distribution Function of Aluminum Alloy with Different Processing Technologies in Space Camera

Li Yongqiang<sup>1,2</sup> Guo Yongxiang<sup>2</sup> Liao Zhibo<sup>2</sup> Wang Jingyi<sup>2</sup> Du Jianxiang<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)  
(<sup>2</sup>Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100190, China)

**Abstract** The definition of bidirectional reflectance distribution function (BRDF) and the principle of measurement apparatus are expounded. Aluminum alloy materials are widely used in space camera. The BRDF data of aluminum alloy samples dealt with different processing technologies are scaled by the compact BRDF measurement system. Every error source of compact BRDF measurement system is analyzed, and the methods to control and correct these errors are proposed. Comparison among BRDF data of aluminum alloy samples dealt with different processing technologies is significant for the conceptual design of space camera.

**Key words** remote sensing; bidirectional reflectance distribution function; surface scattering; processing condition; error analysis

**OCIS codes** 120.4800; 120.5820; 290.1483

## 1 引言

对于长焦距光学系统,从工程可行性角度考虑,很难通过基于积分球的面源法来测量得到光学系统的杂光系数,通过计算机仿真进行杂光分析是一种比较可行的方法。在使用光学仿真软件进行杂光分析时,为了提高光学仿真的精度,需要输入空间相机内部各种材料(如光学玻璃以及金属结构件等)表面散射特性的实测数据。

铝合金由于具有强度高、重量轻和耐腐蚀等优点而在航天遥感领域得到了广泛的使用。无论是用于航天器结构件还是光学相机镜筒,铝合金材料表面均需进行发黑处理,以减小结构漫反射杂散光对空间相机成像性能带来的影响。结构材料因表面纹理不同,其双向反射分布函数(BRDF)特性也会不同。本文测量了不同加工工艺下铝合金样块表面的BRDF,并进行了对比,为航天遥感领域铝合金的应

收稿日期: 2012-12-24; 收到修改稿日期: 2013-01-20

作者简介: 李永强(1979—),男,硕士,工程师,主要从事空间光学遥感器定标技术方面的研究。

E-mail: 99yongqiang@163.com

\* 通信联系人。E-mail: gyxllr605@163.com

用和杂光仿真分析提供了参考。

## 2 BRDF 及测量装置

### 2.1 BRDF 概念及定义

不同波长的光从某一入射角度入射到样品表面时,样品在不同空间方向上反射光的光谱辐射亮度与入射到样品表面的光谱辐照度之比称为该样品材料的 BRDF<sup>[1]</sup>,它是一个关于波长、入射方向、反射方向的函数,其空间表述示意图如图 1 所示。

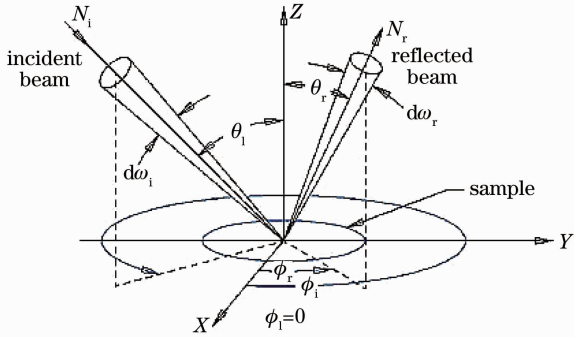


图 1 BRDF 的空间描述

Fig. 1 Spatial relationship of beams in BRDF

根据定义, BRDF 可用微分公式<sup>[2~4]</sup>表示:

$$f_r(\lambda, \theta_i, \varphi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\lambda, \theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)}{dE_i(\lambda, \theta_i, \phi_i)} = \frac{dL_r(\lambda, \theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)}{dL_i(\lambda, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega_i}, \quad (1)$$

也可以表示为

$$F_{\text{BRDF}} = \frac{L_e}{E_e} = \frac{P_s / \Omega A \cos \theta_s}{P_i / A} = \frac{P_s}{P_i \Omega \cos \theta_s}, \quad (2)$$

其中  $F_{\text{BRDF}}$  的单位为  $\text{sr}^{-1}$ ;  $\Omega = A_{\text{det}} / R^2$ , 是探测器相对于样品光斑中心所成的立体角;  $L_e$  是在特定方向上样品表面的反射辐射亮度;  $E_e$  是样品表面的辐照度;  $A$  是受照样品表面光斑面积;  $P_s$ 、 $P_i$  分别为反射辐射通量和入射辐射通量;  $\theta_s$  是反射观测方向与样品表面法线之间的夹角。

测量 BRDF<sup>[5,6]</sup> 可分为绝对测量和相对测量两种方法,绝对测量是直接测量目标表面的入射照度与反射亮度之比,相对测量是被测样品与已知 BRDF 数据的参考板做比较的测量。BRDF 测量过程比较复杂,测量条件和状态一旦偏离会引起很大的测量误差,因此在实际测量过程中需要分析测量误差的来源,并在测量过程中加以修正。本文的 BRDF 测量为相对测量。

### 2.2 BRDF 测试装置工作原理

紧凑型 BRDF 测量装置主要分为光源、探测器、转角系统和数据处理软件几个部分,如图 2 所

示。光源(见图 2 中部件 1)绕其旋转臂旋转角度为  $\theta_i$ ,探测器聚焦物镜(见图 2 中部件 2)绕高度角转动的角度记为  $\theta_a$ ,探测器聚焦物镜绕方位角转动的角度记为  $\varphi_a$ ,对应设置好这三个角度的变化范围即可完成对被测表面上方  $2\pi$  立体角内的 BRDF 测试。探测器聚焦物镜后方经过光纤将光信号引入探测器,探测器由两个雪崩光电二极管(APD)探测器模块和两个 PIN 探测器模块组成,依次对应目标由大到小不同亮度的工作范围,相邻的两个探测器在亮度响应范围的重叠区域可以进行相互标定,通过该方法实现  $10^9:1$  的动态范围,探测器可以进行调零和转换标定操作。

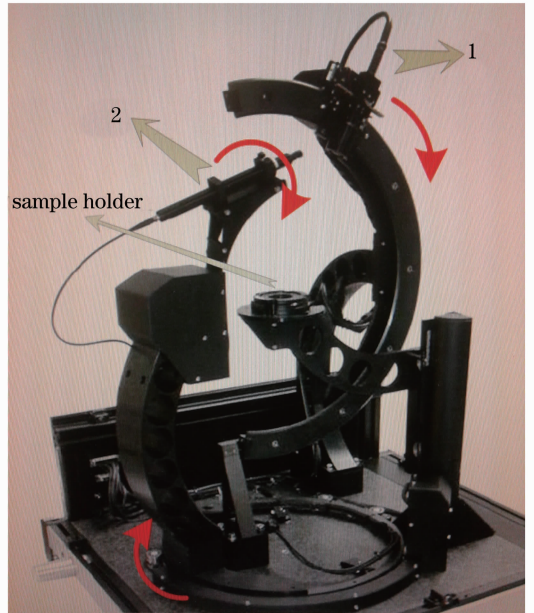


图 2 紧凑型 BRDF 测量装置示意图

Fig. 2 Schematic of compact BRDF measurement system

测量时,需要先用参考标准白板进行归一化操作,再放上被测样块,调整样块位置后即可进行 BRDF 测试。通过光源、探测器物镜的转动,可以实现对不同方向上散射光能量的测量,结合参考板的归一化标定结果就能解出被测样品的 BRDF。光源为 100W 卤素灯,可测谱段范围为 450~900 nm,但本文测试方式选择的是强度测量方式;设备自带的参考标准白板,可以溯源到美国国家标准与技术研究院(NIST);仪器角分辨率 0.1°,角度定位精度为 0.3°。

## 3 空间相机用铝合金不同工艺处理后表面 BRDF 对比测试

### 3.1 工艺样块测试状态

共对数十块工艺样块进行了加工和相应的表面

处理,样块材料为铝合金,加工工艺选取了刨削、车削、端面铣和侧面铣四种,并分别在发黑处理前后对这四种加工工艺样块进行了 BRDF 测量。选取不同加工工艺下的四个样块(发黑处理后)对其各自表

面纹路进行拍照如图 3 所示。材料表面的 BRDF 与材料表面粗糙度有关,因此在分析 BRDF 前,于发黑处理前后都对铝合金样块表面的粗糙度进行了测试。

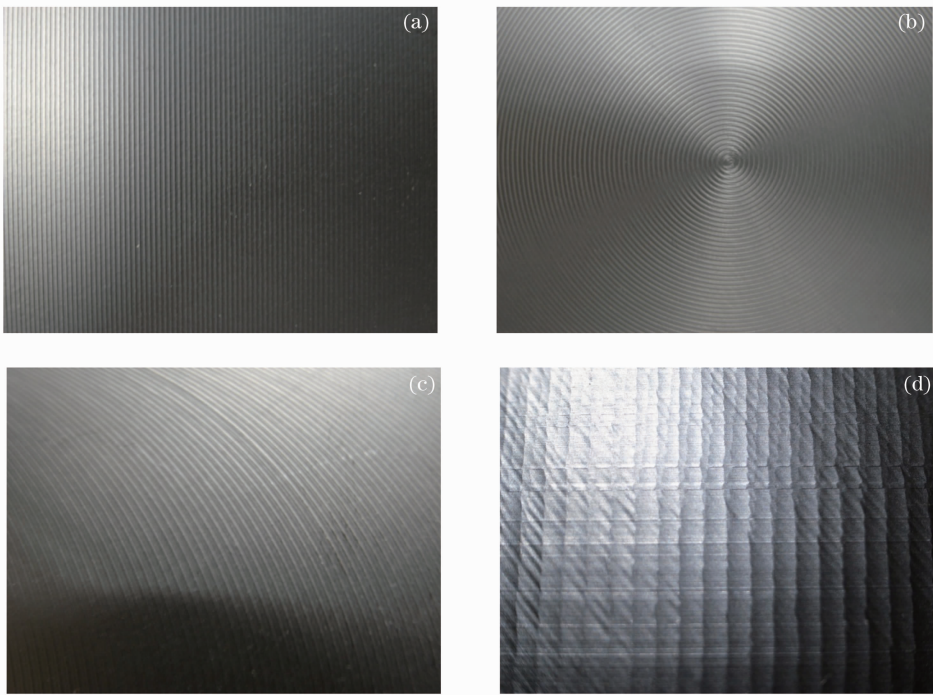


图 3 不同加工工艺下样块表面纹路情况。(a)刨削;(b)车削;(c)端面铣;(d)侧面铣

Fig. 3 Lines on surface of samples after different processing condition. (a) Planing; (b) turning; (c) faces milling; (d) side milling

### 3.2 工艺样块测试

以粗糙度相同( $Ra=3.2$ )但加工工艺不同的发黑处理后铝合金样块的 BRDF 测量结果为例,简要说明不同工艺下 BRDF 之间的差异,如图 4 所示,光源入射天顶角均为  $30^\circ$ 。图 4 中的曲面及表 1 中的俯视图均为将实测的不同方向 BRDF 值进行了拟合后生成的曲面。

分析图 4 可知,由于不同的加工工艺、不同的材料表面纹路等因素影响,在相同入射角下,不同样块表面的 BRDF 数据有较大差异。

不同粗糙度不同表面加工工艺的铝合金样块(表面发黑处理)在入射光天顶角分别为  $10^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $70^\circ$ 情况下的 BRDF 分布俯视图如表 1 所示。

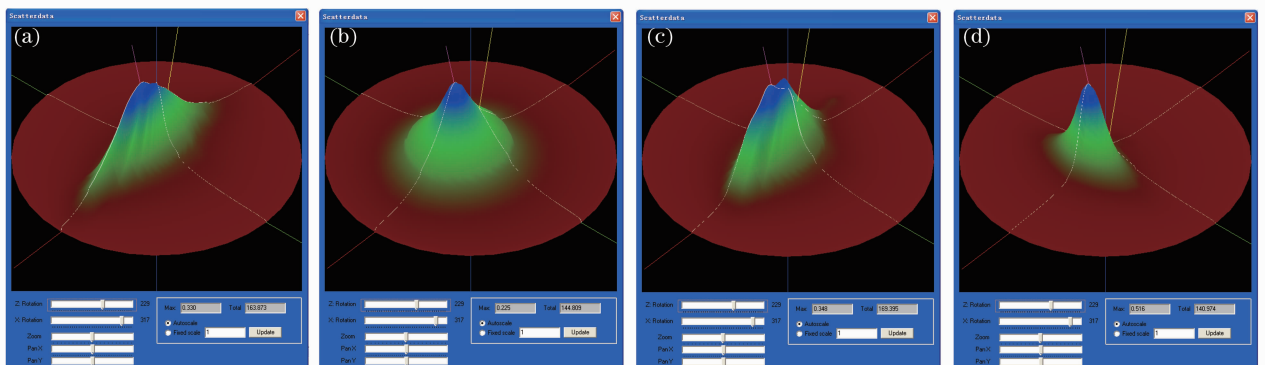


图 4 样块( $Ra=3.2$ )BRDF 测试结果。(a)刨削;(b)车削;(c)端面铣;(d)侧面铣

Fig. 4 BRDF data of sample ( $Ra=3.2$ ). (a) Planing; (b) turning; (c) faces milling; (d) side milling

表 1 不同表面粗糙度,不同加工工艺的样块在不同入射天顶角的 BRDF 测量结果

Table 1 BRDF measurement results of samples with different processing conditions, different surface roughnesses and different incidence zenith angles

Processing condition on samples' surface	Roughness of samples' surface	Vertical view of BRDF distribution (different incidence zenith angles)			
		10°	20°	50°	70°
Planing	1.6				
	3.2				
	6.3				
Turning	1.6				
	3.2				
	6.3				
Faces milling	1.6				
	3.2				
	6.3				
Side milling	1.6				
	3.2				
	6.3				

通过对比分析表 1 所列不同情形下 BRDF 测量结果,可得如下结论:

1)当样块加工工艺相同、光源入射天顶角一定时,样块表面反射的方向性随样块粗糙度的增大而

减弱;

2)当样块加工工艺相同、粗糙度一定时,随着光源入射天顶角的增大,在镜面反射附近一定立体角范围内 BRDF 分布对方位角分量的敏感程度减小,

而对天顶角分量的敏感程度变化不明显；

3)当样块粗糙度相同、光源入射天顶角一定时,样块表面 BRDF 分布与加工工艺密切相关,不同加工工艺对应的表面 BRDF 分布差异较大,这主要是由于不同加工工艺对应的表面纹路不同造成的；

4)不同加工工艺的样块表面纹路不同,但是针对同一个样块来说,光源入射光束在样块表面的投影方向与样块表面纹路方向的夹角不同也会造成到表面 BRDF 分布的不同。样块表面垂直于纹路反射的方向性较强,而平行于纹路反射的方向性较弱。刨削、车削和端面铣三种加工工艺的纹路较为清晰,所以这种分布较为明显。

## 4 误差源分析与控制

测量装置误差主要有标准板的误差、探测器非线性误差、探测器模块间标定误差、光源偏振引起的误差、样品倾斜误差、样品高度调整误差、光源转角误差、探测器聚焦物镜对准误差等,因此在测量中应对这几种误差分别采取控制措施。

标准板的误差需通过标定进行校准以保证归一化结果可以转化为绝对测量结果;探测器的非线性误差和探测器模块切换误差,需通过使用不同反射率的样板使两个探测器在可同时工作的亮度范围内来完成标定,样品倾斜误差通过高反射率的反射镜进行样品法线校准,样品高度通过高度调整杆进行精密高度调整,光源和探测器转角误差通过角度标定系统进行标定。

## 5 结 论

通过使用紧凑型 BRDF 测量装置分别对空间相机常用结构材料——铝合金在不同加工和表面处

理工艺下的表面散射特性进行了测试研究和对比分析。用经过校准的参考白板对此测试方法进行了验证,BRDF 测量结果与标定结果有很好的 consistency,测量过程中的测试重复性可达  $0.001 \text{ sr}^{-1}$ 。为航天遥感领域铝合金应用的深入研究和杂光仿真分析提供了参考,对后期空间相机设计时加工工艺的选取有指导作用。

## 参 考 文 献

- 1 Cao Yunhua, Wu Zhensen, Zhang Hanlu *et al.*. Experimental measurement and statistical modeling of spectral bidirectional reflectance distribution function of rough target samples [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 792~798  
曹运华, 吴振森, 张涵璐等. 粗糙目标样片光谱双向反射分布函数的实验测量及其建模[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 792~798
- 2 Li Xin, Zheng Xiaobing, Xun Li'na *et al.*. Realization of field BRDF acquisition by multiangular measurement system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(1): 66~70  
李 新, 郑小兵, 寻丽娜等. 多角度测量系统实现室外 BRDF 测量[J]. *光电工程*, 2008, **35**(1): 66~70
- 3 Yang Yufeng, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Scattering characteristics of complex background infrared radiation from a non-lambertian target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(5): 800~804  
杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 非朗伯面目标对复杂背景红外辐射的散射特性[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(5): 800~804
- 4 Wu Zhensen, Xie Donghui, Xie Pinhua *et al.*. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 897~901  
吴振森, 谢东辉, 谢品华等. 粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 897~901
- 5 Jia Hui, Li Futian. Bidirectional reflectance distribution function of aluminum diffuser at UV spectral band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 230~234  
贾 辉, 李福田. 铝漫反射板 200~300 nm 相对双向反射分布函数的实验研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 230~234
- 6 Feng Weiwei, Wei Qingnong, Wang Shimei *et al.*. Study of polarized bidirectional reflectance distribution function model for painted surfaces [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 290~294  
冯巍巍, 魏庆农, 汪世美等. 涂层表面偏振双向反射分布函数的模型研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 290~294

栏目编辑: 李文誌