

文章编号 1004-924X(2009)08-1851-08

光学传感器星上定标漫射板的特性测量

杨本永,张黎明,沈政国,乔延利

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室,安徽 合肥 230031)

摘要:为了考察星上定标漫射板的光学特性及其在航天环境下的稳定性,对其进行了方向半球反射比(DHR)、双向反射比因子(BRF)、双向反射分布函数(BRDF)等反射特性的测量;同时,进行了系列环境模拟试验。结果显示:星上定标漫射板反射率在可见近红外波段可达0.99,光谱差异 <0.01 ,在短波红外波段达0.95以上; $10\sim 60^\circ$ BRF变化低于0.1, $0\sim 60^\circ$ BRDF变化 <0.045 ,其方向特性与光谱、紫外辐照关系不大;漫射板350 nm反射率在120 h等效紫外辐照下的衰变 $<3\%$,其光学特性受原子氧、质子轰击影响甚微,并通过了航天级力学环境试验。试验研究表明:漫射板具备高反射率、光谱平坦性、朗伯性及其在航天环境下的稳定性,能够满足航天应用要求。

关键词:光学遥感;星上定标;漫射板;光学传感器;反射率

中图分类号:TP73;O436 文献标识码:A

Characteristic measurement of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors

YANG Ben-yong, ZHANG Li-ming, SHEN Zheng-guo, QIAO Yan-li

(1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to investigate the optical properties and the stability of a diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors under space environments, some reflective properties including the Directional/Hemisphere Reflectance (DHR), Bidirectional Reflectance Factor (BRF) and the Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) were measured, and a series of environment simulation tests were performed. Experimental results show that the reflectances achieve 0.99 at VNIR, 0.95 at SWIR; and the differences of the reflectances at VNIR are within 0.01; The variations of BRF($10\sim 60^\circ$) and BRDF ($0\sim 60^\circ$) are less than 0.1 and 0.045, respectively, and the Lambertian property of the diffuser panel is independence on the spectral band and UV radiation. Moreover, the degradation of reflectance at 350 nm is within 3% after 120 h equivalent solar UV radiation and the atomic oxygen exposure or proton bombardment has little effect on the optical properties of the diffuser panel. As characterized by above, the diffuser panel has gotten through on-orbit level mechanical environment tests. For its high reflectance, spectral flatness, Lambertian characteristics and stability in

收稿日期:2009-05-04;修订日期:2009-05-13.

基金项目:国防科学技术工业委员会资助项目,十五国家民用航天重点预研资助项目

orbit, the diffuser panel can satisfy the requirements for space applications.

Key words: optical remote sensing; diffuser panel; on-board calibration; optical sensor; reflectance

1 引言

近年来,世界各国相继开展空间对地观测计划,以便长期、实时和全面地观测地球资源、气候和环境的变化。而空间遥感的实现不仅取决于传感器的数量和性能,也决定于其观测数据的量化水平,即由原始数据产品反演地球物理参数的水平和不同平台传感器的数据比对与信息融合的能力^[1]。辐射定标将卫星遥感器的数字响应转化为绝对物理量(辐射亮度/反射率),是遥感信息量化过程的关键技术之一。

辐射定标用于建立传感器的输出与已知的、用 SI 单位表述的入射光辐射之间的定量关系。空间传感器的辐射定标一般有 3 个过程,即发射前定标、星上定标和在轨替代定标。卫星发射前,在实验室利用积分球和在外场基于太阳光源来确定遥感器绝对光谱辐射响应,但是其无法预知遥感器发射和在轨运行过程中的辐射响应变化;替代定标在卫星在轨飞行时,利用地面场景为参照,通过同步测量地表光谱和大气参数来获取卫星入瞳处辐射亮度,实现卫星遥感器绝对辐射定标。其定标过程条件严格、任务繁重、受大气和辐射传输精度的影响较大^[2]。星上定标通过星上定标器来实时高效、周期性地监测和确定卫星遥感器的辐射响应。早期的标准灯星上定标器,结构紧凑、输出稳定,但是其与实际遥感器对地观测状态、输出光谱、辐射基准等方面存在非一致性^[2]。太阳漫射板在遥感器光路最前端反射太阳光,通过已知的大气外太阳照度和漫射板双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)确立辐亮度标准。这种方法在整个光谱响应范围(太阳反射波段)能够以全光路、全孔径、全视场的方式实现卫星遥感器在整个动态范围的绝对辐射定标,被认为是一种最有应用和发展前景的定标方式^[3]。国外 SeaWiFS、MERIS、MISR、MODIS 等卫星遥感器相继采用这种星上定标方式^[4]。我国航天事业快速发展,“风云”系列气象卫星、中巴合作地球资源卫星以及海洋和环境卫星相继发射,星上定标也是我国提高卫

星遥感器定标精度和遥感定量化水平急需发展的一种技术。中科院安光所在多年漫反射标准和辐射定标技术研究的基础上进行了预先研究,提出了漫射板和标准辐亮度计组合建立辐亮度标准的星上定标方案^[1],该方案集成了漫射板优越的标准复现特性和 TRAP 探测器高精度标准传递能力,有望在航天环境下实现基于标准探测器的卫星遥感器绝对辐射定标。

太阳漫射板作为航天级漫反射标准,应具备优越的漫反射参照特性,包括高反射率、光谱平坦性、朗伯特性、面均匀性及在轨稳定性等。在轨稳定性是指漫射板在太空环境下受真空紫外辐照、原子氧剥蚀、质子轰击和太空污染等因素影响时的标准量值保持能力^[5]及其物理结构在航天发射和在轨飞行时的力学适应能力。本文采用标准传递和转化的方法对研制漫射板的方向半球反射比(Directional Hemisphere Reflectance, DHR)、双向反射比因子(Bidirectional Reflectance Factor, BRF)、双向反射分布函数(BRDF)等光学特性进行了测量和标定,并模拟航天发射和太空运行环境设置了热真空、紫外辐照、粒子轰击、力学和温度循环试验,根据测量和试验结果,对研制漫射板的光学性能及其在空间环境下的稳定性和适应性进行了分析。

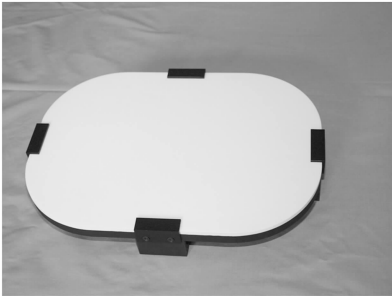
2 星上定标漫射板描述

漫射板光学表面由聚四氟乙烯材料经特殊工艺制作而成,其外形参数如表 1 所示。为了测量需要,在制作漫射板表面时,取 4 个 $\Phi 50$ mm 的测试小样,用于半球反射比和环境适应性试验。星上漫射板及其测量小样实物如图 1 所示。

表 1 测试样品

Tab. 1 Description of test samples

名称	编号	描述
星上定标漫射板	XSMFB-M01	320 mm×230 mm×10 mm
漫射板小样	XSMFB-T01~04	$\Phi 50$ mm、厚 10 mm、漫射板取样



(a) 星上定标漫射板

(a) Diffuser panel for on-board calibration



(b) 漫射板小样

(b) Little samples of diffuser panel

图 1 测试样品

Fig. 1 Test samples

3 测量与试验方法

3.1 方向半球反射比(DHR)

采用双光路积分球测量装置,在相同入射观测条件下对样品(XSMFB-T01)与反射比参照进行比对测量来实现方向-半球反射比的标准传递。双光路积分球系统如图 2 所示,参照和样品分别放置在积分球侧面的开口位置,反射镜 1 水平放置时,单色光按实线所示光路垂直照射样品;反射镜 1 切换至 45°位置时,单色光经虚线所示光路垂直照射反射比参照;探测器从积分球顶部观测样品和参照反射在半球空间内的均匀亮度 $L_r(\lambda)$ 和 $L_s(\lambda)$ 。则目标方向半球反射比:

$$R_r^h(\lambda) = b(\lambda) \cdot \frac{L_r(\lambda)}{L_s(\lambda)} \cdot R_r^h(\lambda), \quad (1)$$

式中 $R_r^h(\lambda)$ 为漫反射参照的方向半球反射比,可溯源至国家计量科学研究所; $b(\lambda)$ 为双光路校正系数。星上定标漫射板的方向半球反射比是通过

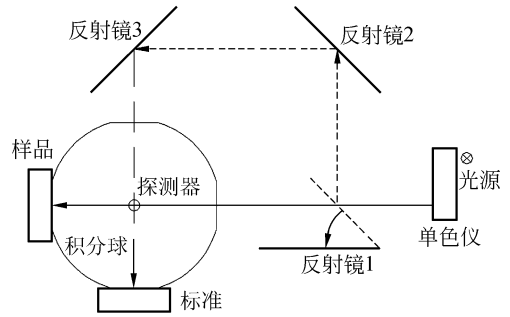


图 2 方向半球反射比(DHR)测量系统

Fig. 2 Measurement system for DHR

对小样的替代测量来获取的。

3.2 双向反射比因子(BRF)

双向反射比因子是指在相同的照明与观测几何条件下,样品的表面反射通量与理想郎伯体表面(全反射的理想漫射体)反射通量之比^[6]。根据 Hisa 和 Weidner 的理论与实验结果^[7],聚四氟乙烯漫射板在方位上均匀,其方向半球反射比因子 R_r^h 与双向反射比因子 $R_r(0, \theta)$ 关系如下:

$$R_r^h = 2 \int_0^{\pi/2} R_r(0, \theta) \cos \theta \sin \theta d\theta, \quad (2)$$

Jackson 根据此理论发展了漫射板 BRF 野外测量方法^[8-9], Biggar 将这种方法引入实验室^[10]。本文采取此方法进行星上定标漫射板 BRF 的实验室测量,如图 3 所示,平行光照射漫射板中心,旋转台转动漫射板,其与光谱辐射计固定而与光源分离,从而使照明角 θ 变化,而观测角(0°)恒定。因此,光谱辐射计测量值 $V(0, \theta)$ 可表示为:

$$V(0, \theta) = E \cdot \cos \theta \cdot R_r(0, \theta) \cdot A, \quad (3)$$

E 为入射照度, A 为辐射计的辐亮度响应系数, $\cos \theta$ 为对漫射板接收照度的余弦修正。

对各角度测量值进行多项式拟合可得:

$$V(0, \theta) / \cos \theta = \sum_{i=0}^n b_i \theta^i, \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)可得:

$$R_r(0, \theta) = \frac{1}{A \cdot E} \cdot \sum_{i=0}^n b_i \theta^i, \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)可得:

$$R_r^h = 2 \cdot \frac{1}{A \cdot E} \cdot \sum_{i=0}^n b_i \cdot I_i, \quad (6)$$

其中: $I_i = \int_0^{\pi/2} \theta^i \cos \theta \sin \theta d\theta$ 可以通过逐步积分计

算得出。

求出 $A \cdot E$ 后,根据式(5)求得各角度下的双向反射比因子 $R_r(0, \theta)$ 。

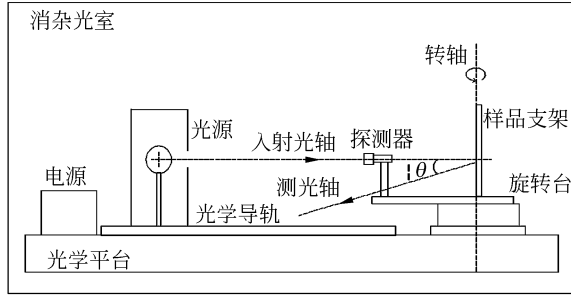


图 3 双向反射比因子(BRF)测量系统

Fig. 3 Measurement system for BRF

在我国绝对双向反射比因子尚无建标情况下,这种基于方向半球反射比标准,通过测量方向反射相对分布确定反演 BRDF 的方法是一种获取双向反射比因子,进行物质表面特性研究的实用方法。

3.3 双向反射分布函数(BRDF)

双向反射分布函数 BRDF 指:半球空间内,某一方向入射到物质表面的平行光束在另一方向的散射特性^[11];其描述了物质表面对入射光束的反射能力和在半球空间的散射分布情况,表征物质表面的本质属性。对于理想朗伯体,双向反射分布函数为 $1/\pi$,BRDF 作为一个无限小的量无法直接测量^[12],其一般表达式为:

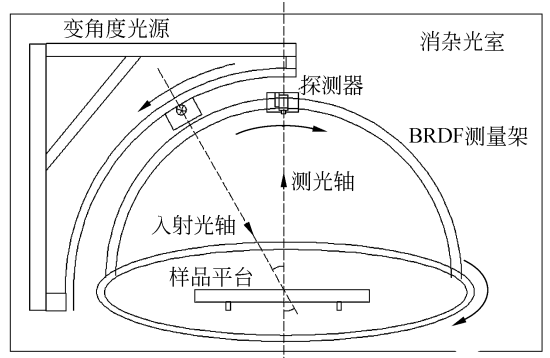
$$BRDF = f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r; \theta_i, \phi_i)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} [sr^{-1}], \quad (7)$$

根据理论推导:其与双向反射比因子 $R_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)$ 之间存在如下关系:

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = R_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) / \pi. \quad (8)$$

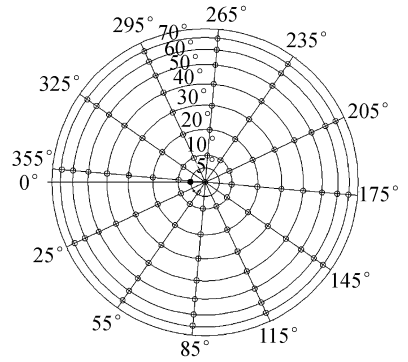
根据上述理论,这里可以通过测量物质表面的 BRF 求其双向反射分布函数。如图 4 所示:测量装置由光源系统、观测系统和样品平台 3 部分组成,光源可以在光源架立置弧形轨道上运动改变照明角度,光谱辐射计在 BRDF 测量架的天顶弧轨道上运动改变观测天顶角,天顶弧轨道在方位圆轨道上旋转改变观测方位角^[13];调节样品平台使样品表面垂直于主平面并通过入射光轴和测光轴交点。本次测量照明和观测几何示意图如图 4,5°照明 0°观测(0°/5°)的双向反射比因子

$R_r(0^\circ/5^\circ)$ 由 3.2 测量确定,全半球空间 BRF 通过与(0°/5°)状态时反射亮度的比对测量来实现标准传递,然后由式(8)求得 BRDF。



(a)照明观测几何示意图

(a)Geometric scheme of illuminating and viewing



(b)实心点为照明位置,空心点为观测位置

(b)Solid points note illuminating positions and empty points note view positions

图 4 双向反射分布函数(BRDF)测量系统

Fig. 4 Measurement system for BRDF

3.4 环境试验

国外研究与试验表明太空环境下的原子氧剥蚀、质子撞击对聚四氟乙烯材料光学特性影响甚微,而一般的商用漫射板在真空及太阳紫外辐照下,漫射板光学特性会发生衰变^[5,16],这种衰变不是源于聚四氟乙烯本身,而是由于制作、储存、运输过程中的有机物污染在紫外辐照条件下发生光化学反应所致^[14]。为了消除这种污染引起的衰变现象,研究了航天级漫射板制作工艺;同时为了考察漫射板在航天环境下的稳定性和适应性,设置了热真空(VUB)、真空紫外辐照(UV/VUV)、原子氧粒子轰击、振动冲击和高低温循环

等环境模拟试验,试验流程如下:

(1) 4 块试验小样为同工艺同批次制作,存放在铝制消光盒内(如图 1),试验前进行半球反射比测量。

(2) 4 块小样首先放在真空装置内,在 105 °C 高温和高真空条件下暴露 40 h,热真空试验的试验过程参数如表 2 所示;试验后立即对 4 块小样进行方向半球反射率测量。

(3) 经过热真空试验后的样品放在真空紫外辐照装置内,真空度优于 1×10^{-3} Pa,辐照强度(200~400 nm)为 3 倍太阳紫外辐照强度,各样品等效辐照时间见表 3,试验后立即进行半球反射比测量。

(4) 测试小样在原子氧、粒子环境下暴露 40 h;试验前后进行方向半球反射比的测量。

(5) 按照航天标准对星上漫射板进行了振动冲击及高低温循环试验,考察星上漫射板在航天发射及在轨运行时对力学环境的适应性。

表 2 材料小样热真空试验

Tab. 2 Parameters of vacuum bakeout test

日期、时间	温度/°C	真空度/Pa	备注
2006-9-18 14:00			开始试验
2006-9-18 16:45	103	2.0×10^{-2}	
2006-9-18 20:15	105	/	
2006-9-19 4:00	105	/	
2006-9-19 8:00	105	3.9×10^{-3}	
2006-9-19 14:00	105	3.7×10^{-3}	
2006-9-19 17:00	105	4.7×10^{-3}	
2006-9-19 21:30	105	2.3×10^{-3}	
2006-9-20 8:00	105	1.7×10^{-3}	
2006-9-20 14:10	105	1.6×10^{-3}	试验结束

表 3 真空紫外辐照试验参数

Tab. 3 Parameters of UV/VUV test

样品编号	真空度	紫外(200~400 nm)	等效辐照时间/h
	/Pa	辐照强度	
XMFB-T01	优于 1×10^{-3}	3 倍太阳紫外辐照强度	120
XMFB-T02	优于 1×10^{-3}	3 倍太阳紫外辐照强度	90
XMFB-T03	优于 1×10^{-3}	3 倍太阳紫外辐照强度	20
XMFB-T04	优于 1×10^{-3}	3 倍太阳紫外辐照强度	40

4 试验结果与分析

(1) 漫射板的 DHR(如图 5)在整个太阳反射波段都在 0.9 以上,在可见近红外波段为 0.97、光谱反射率差异 < 0.01 , 300~1 800 nm 光谱区反射比不低于 0.95。说明漫射板具有高反射特性和光谱平坦性。

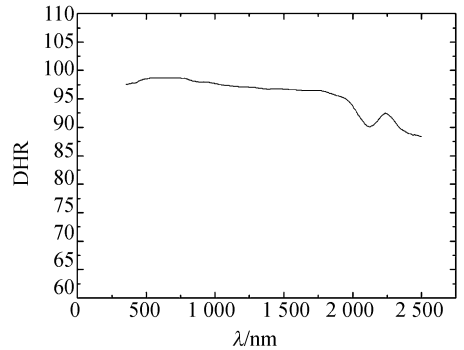


图 5 方向半球反射比

Fig. 5 DHR

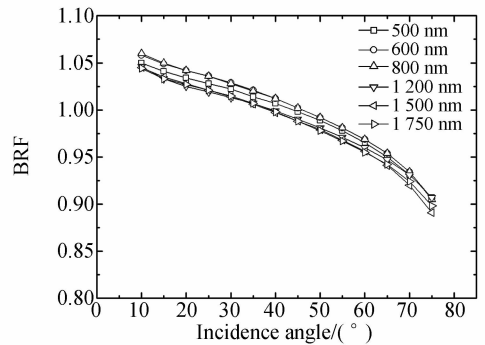


图 6 双向反射比因子

Fig. 6 BRF

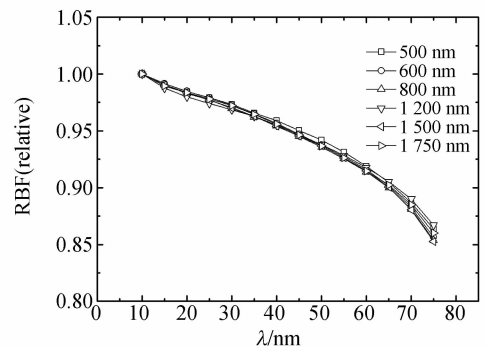


图 7 归一化后的双向反射比因子

Fig. 7 Relative(normalized by 10°) BRF

(2)从 BRDF 测量结果可以看出(图 6):漫射板在 $10\sim 60^\circ$ 照明、垂直观测条件下,双向反射比因子变化低于 0.1;大角度入射时($60\sim 75^\circ$)BRDF 变化为 5%。在可见、近红外至短波红外光谱区, BRDF 随光谱半球反射率的变化在量值上有一定差异。为进一步分析 BRDF 特性的光谱变化,对各波长下的 BRDF 相对于 10° 入射值进行了归一化(如图 7),可以看出:相同角度下,各波长的 BRDF 相对差异较小, $10\sim 60^\circ$ 时 $<1\%$, 75° 时也在 2% 之内。因此,漫射板在 $10\sim 60^\circ$ 有较好的朗伯性,而且这种朗伯特特性在整个太阳反射波段保持不变。

(3)漫射板 5° 照明,天顶角 $0\sim 60^\circ$ 、方位角 $0\sim 360^\circ$ 观测条件下的 BRDF 如图 8(600 nm),可以看出:漫射板略微有些后向散射,但整体呈比较均匀的漫反射, BRDF 变化 <0.048 。如果扣除在

测量过程中测量架遮挡、几何观测以及光源稳定性等引入的影响漫射板角度均匀性的因素,根据(2)中漫射板角度均匀性随波段保持不变的分析,漫射板在太阳反射波段 BRDF 变化 <0.045 。

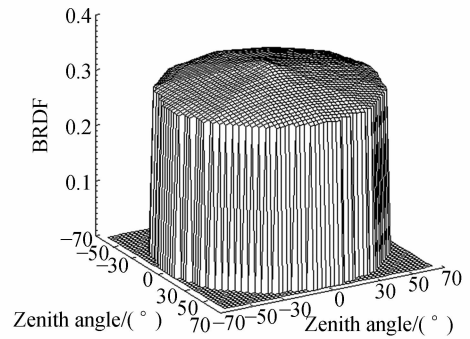


图 8 双向反射分布函数/600 nm

Fig. 8 BRDF at 600 nm

表 4 600 nm 处双向反射分布函数(BRDF)

Tab. 4 Data of BRDF at 600 nm

方位角 天顶角	25°	55°	85°	115°	145°	175°	205°	235°	265°	295°	325°	355°
0°	0.339	0.34	0.342	0.342	0.342	0.34	0.339	0.34	0.342	0.342	0.342	0.34
5°	0.336	0.339	0.339	0.339	0.338	0.338	0.336	0.337	0.339	0.341	0.339	0.338
10°	0.333	0.333	0.335	0.336	0.335	0.335	0.333	0.334	0.336	0.337	0.336	0.334
15°	0.328	0.329	0.33	0.332	0.333	0.332	0.33	0.33	0.333	0.333	0.333	0.331
20°	0.325	0.326	0.327	0.329	0.329	0.329	0.328	0.328	0.329	0.33	0.33	0.329
25°	0.322	0.322	0.323	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.327	0.326	0.327	0.327
30°	0.32	0.32	0.321	0.322	0.325	0.323	0.322	0.323	0.323	0.323	0.325	0.324
35°	0.317	0.317	0.318	0.319	0.322	0.321	0.319	0.32	0.32	0.321	0.322	0.321
40°	0.313	0.314	0.315	0.316	0.319	0.318	0.316	0.317	0.317	0.318	0.318	0.317
45°	0.309	0.31	0.312	0.313	0.315	0.314	0.313	0.314	0.314	0.316	0.315	0.314
50°	0.307	0.307	0.309	0.309	0.312	0.312	0.31	0.311	0.31	0.312	0.311	0.309
55°	0.302	0.303	0.302	0.304	0.306	0.307	0.306	0.307	0.307	0.308	0.307	0.306
60°	0.296	0.298	0.299	0.3	0.301	0.303	0.302	0.302	0.301	0.303	0.302	0.301
65°	0.289	0.291	0.292	0.293	0.294	0.297	0.297	0.296	0.295	0.296	0.295	0.295

(4)聚四氟乙烯材料在 $0.35\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 是一种几乎无吸收的多孔结构,大部分的光到达板面后,透入板面内然后又以二次和多次散射的方式反射到板面的半球空间,多次散射能量的随机分布,造成了漫射板良好的朗伯性^[5]。同时,光辐射透入板面的深度与波长有关,波长越长,透入深度越大;在厚度较小时,反射率会随着波长的升高而降低;而当其达到一定厚度,在较宽的光谱区,入射光辐射透入板面后又几乎全部随机散射回去。

这种传输机理决定了一定密度和厚度的聚四氟乙烯板具有高反射率、光谱平坦性、朗伯性和空间均匀性,这是聚四氟乙烯板具有优良光学特性而作为漫反射参照的物理依据。

(5)热真空试验后,样品(除 XSMFB-T03)的半球反射比在红外光谱区明显升高(如图 9),在太阳反射波段反射率高于 0.95 以上,在可见近红外光谱区可达 0.99。热真空处理使漫射板原材料中的挥发性杂质以及加工制作、储存运输过程

中的有机物污染得到了较大程度的清除,这种提纯和净化过程是漫射板反射率提高的主要原因。而 XSMFB-T03 样品在可见近红外光谱反射率显著降低是由于其净化后又受到颗粒物污染所致。

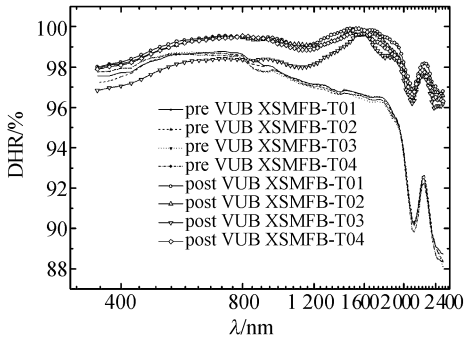


图9 热真空试验(VUB)前后半球反射率

Fig. 9 DHR factor before and after H/VUV test

(6)漫射板真空紫外辐照试验过程中(如图10),真空度逐渐加大、辐照强度逐渐增加,辐照时间越来越长,而反射比的衰变率却逐渐变小;热真空后受到污染的 XSMFB-T03 样品经 20 h 等效辐照后衰变程度与 120 h 等效辐照衰变相当;在 3 倍太阳紫外辐照条件下,漫射板经历 120 h 等效太阳紫外辐照,350 nm 处反射率衰变不超过 3%,而同条件下一般商用漫射板的衰变可达 20% 以上^[14]。这些试验现象说明:经过航天级工艺控制的星上漫射板在紫外辐照下反射率的紫外衰变较小,紫外辐照不一定是漫射板反射率紫外衰变的直接原因。根据受污后的样品紫外衰变程度较大,并参照国外相关资料分析^[13],认为漫射板紫外衰变可能与有机物污染有关,这有待进一步试验验证。另外,研究资料表明紫外辐照对漫射板方向特性影响较小^[14]。

(7)漫射板材料在氧原子和质子轰击环境下没有发现明显光学性能的衰变,符合国外对类似

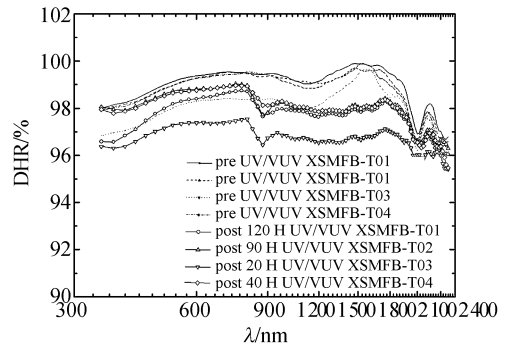


图10 真空紫外辐照试验(UV/VUV)前后半球反射率

Fig. 10 DHR factor before and after UV/VUV test

材料的研究结果^[6,14]。

(8)星上定标漫射板在航天级振动冲击和温度循环试验后,结构完好,功能正常。

5 结论

聚四氟乙烯漫射板具有高反射率、光谱平坦性和近似郎伯性,经热真空处理,太阳反射波段的反射率在 0.95 以上,可见近红外波段可达 0.99;漫射板在 10~60°照明、垂直观测条件下,BRF 变化低于 0.1;5°照明,天顶角 0~60°、方位角 0~360°观测时,BRDF 变化 < 0.045;这种近似郎伯性与光谱的相关性不大,而且不受紫外辐照的影响。漫射板光学特性受氧原子剥蚀、质子轰击影响很小,真空紫外辐照不一定是漫射板紫外衰变的直接原因;同时,漫射板能够经受航天发射、在轨飞行时的振动冲击和温度变化环境的考验。因此,研制的航天级漫射板具备优良的光学参照特性,并在航天模拟环境下保持其稳定性和适应性,能够满足未来卫星传感器星上定标应用要求。

致谢:中科院技术物理研究所陈福春博士组织进行了漫射板环境适应性试验工作,在此表示感谢。

参考文献:

[1] 郑小兵. 面向光学遥感的先进光谱辐射定标技术[J]. 海洋科学与进展, 2004, 22(21): 16-22.
ZHENG X B. Advanced radiometric calibration techniques for optical remote sensing[J]. *Advances in Marine Science*, 2004, 22(21): 16-22. (in Chinese)

[2] DINGUIRARD M, SLATER P N. Calibration of space-multispectral imaging sensors: a review[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 68: 194-205.
[3] SLATER P N, JAMES M P. Solar-diffuser panel and ratioing radiometer approach to satellite sensor on-board calibration[J]. *SPIE*, 1991, 1493: 100-105.

- [4] BRUEGGE C J, STIEGMEN, ALBERT E, *et al.*. Use of Spectralon as a diffuse reflectance standard for in-flight calibration of earth-orbiting sensors [J]. *Optical Engineering*, 1993, 32: 805-814.
- [5] BRUEGGE C J, ALBERT E, STIEGMAN, *et al.*. Reflectance stability analysis of Spectralon diffuse calibration panels [J]. *SPIE*, 1991, 1493: 132-142.
- [6] SCHAEPMAN-STRUB G, SCHAEPMAN M E. Reflectance quantities in optical remote sensing—definitions and case studies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103: 27-42.
- [7] HSIA J J, WEIDNER V R. NBS 45° normal reflectometer for absolute reflectance factors [J]. *Metro*, 1981, 17: 97-102.
- [8] JACKSON R D, MORAN M S, SLATER P N, *et al.*. Field calibration of reference panels [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 22: 145-158.
- [9] JACKSON, R D, CLARKE T R, MORAN M S. Bi-directional calibration results for 11 Spectralon and 16 BaSO₄ reference reflectance panels [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 40: 231-239.
- [10] BIGGAR S F, LABED J, SANTER R P, *et al.*. Laboratory calibration of field reflectance panels [J]. *SPIE*, 1988, 924: 232-240.
- [11] NICODEMUS, F E. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface [J]. *Applied Optics*, 1965(4): 767-773.
- [12] NICODEMUS F E. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. Washington, DC: National Bureau of Standards, US Department of Commerce [N/OL]. URL: <http://physics.nist.gov/Divisions/Div844/facilities/specphoto/pdf/geoConsid.pdf>
- [13] 李新, 郑小兵. 多角度测量系统实现室外 BRDF 测量 [J]. *光电工程*, 2008, 35(1): 66-70.
- LI X, ZHENG X B. Realization of field BRDF acquisition by multiangular measurement system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(1): 66-70. (in Chinese)
- [14] PETROY S B, LELAND J E, CHOMMELOUX B, *et al.*. Phase 1. analysis of SPECTRALON material for use in on-board calibration systems for the Medium Resolution Imaging Spectrometer [J]. *SPIE*, 1994, 2210: 616-624.
- [15] LELAND J E, ARECCHI A V. Phase 2 analysis of Spectralon material for Use in on-board calibration systems for the medium-resolution imaging spectrometer [J]. *SPIE*, 1995, 2475: 384-392.
- [16] XIONG X X. Characterization of MODIS solar diffuser on-orbit degradation [J]. *SPIE*, 2007, 6677: 1-10.

作者简介:



杨本永(1976—),男,安徽萧县人,博士研究生,助理研究员,2004年于中科院安徽光学精密机械研究所获得硕士学位,现为中科院安徽光学精密机械研究所助理研究员,主要从事光学遥感器辐射定标、在轨检测与成像光谱数据反射率反演等方面研究。E-mail: byyang@aiofm.ac.cn

张黎明(1958—),男,浙江杭州人,博士生导师,研究员,1982年毕业于中国科技大学,主要从事光学遥感器辐射定标与辐射标准传递方面的研究。E-mail: lmzhang@aiofm.ac.cn

沈政国(1954—),男,安徽合肥人,高级工程师,主要从事遥感试验技术研究。E-mail: zgshen@aiofm.ac.cn

乔延利(1958—),男,河南洛阳人,博士生导师,研究员,1982年毕业于北京邮电大学计算机通讯专业,1984年在中科院安徽光学精密机械研究所获硕士学位,目前主要从事光学辐射定标、大气校正及地物波谱特性方面的研究。E-mail: yljiao@aiofm.ac.cn