

文章编号: 0258-7025(2009)11-3026-05

# 光学传感器星上定标漫射板空间稳定性测试与分析

杨本永 张黎明 杨宝云 乔延利

(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** 对光学传感器星上定标漫射板进行了研究, 考查其在航天环境下的稳定性和适应性。漫射板经振动冲击、高低温循环、热真空和紫外辐照等系列环境模拟试验仍然保持良好的光学特性; 紫外辐照前后其在 350 nm 处的反射率衰变不超过 3%, 分析认为这种紫外辐照下的反射率衰变是由于污染所致, 通过改进工艺和环境控制是可以消除的; 同时, 漫射板通过了空间力学环境试验。研制的星上定标漫射板的空间稳定性能够满足航天应用要求。

**关键词** 遥感; 空间稳定性; 环境试验; 星上定标漫射板; 反射率

中图分类号 O435.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093611.3026

## Space Stability Measurement and Analysis of Diffuser Panel Used for On-Board Calibration for Satellite Optical Sensors

Yang Benyong Zhang Liming Yang Baoyun Qiao Yanli

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

**Abstract** This paper studied the diffuser panel used for onboard calibration for satellite optical sensors. In order to investigate its stability and the adaptability under spatial environment, a series of environment simulation tests such as vibration and shock, temperature cyclic, vacuum bakeout and UV/VUV were planned and implemented. The diffuser's optical properties were retentive after tests. The difference of reflectance at 350nm before and after UV/VUV test is within 3%. Analysis shows that some degradation of optical properties under UV radiation has been linked to degradation of contaminants, which can be prevented by improvement of production protocol and environment control. At the same time, the diffuser panel goes through space level mechanical environment tests. So, the space stability of the diffuser panel used for onboard calibration can satisfy the spatial application demand.

**Key words** remote sensing; space stability; environment simulation tests; diffuser panel used for on-board calibration; reflectivity

### 1 引 言

在空间遥感中, 辐射定标是遥感信息量化过程的关键技术之一<sup>[1~3]</sup>。其中星上定标通过星上定标器能够实时高效、周期性的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<sup>[4]</sup>。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 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 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, 被认为是一种较有应用和发展前景的定标方法<sup>[5,6]</sup>。国外水色卫星(SeaWiFS)、中等分辨率成像光谱仪(MERIS)、多角度成像光谱辐射计(MISR)、中分辨率成像光

收稿日期: 2009-03-16; 收到修改稿日期: 2009-05-19

基金项目: 国防科学技术工业委员会项目和十五国家民用航天重点预研项目资助课题。

作者简介: 杨本永(1976—), 男, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事卫星遥感器辐射定标方面的研究。

E-mail: byyang@aiofm.ac.cn

导师简介: 张黎明(1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事漫反射与光学辐射定标方面的研究。

E-mail: lmzhang@aiofm.ac.cn

谱仪(MODIS)等卫星遥感器相继采用这种星上定标方法<sup>[6]</sup>;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,中国科学院安徽光学精密机械研究所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<sup>[1]</sup>,并进行了星上漫射板和标准探测器等关键器件的研制<sup>[7,8]</sup>,希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。

聚四氟乙烯制作的漫射板具备高反射率、光谱平坦性、朗伯特性、面均匀性等漫反射参照特性<sup>[4,9]</sup>,已被作为漫反射参照标准广泛应用于遥感领域。但是作为航天级漫反射标准,空间稳定性是对漫射板进行应用平台升级的关键。空间稳定性是

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<sup>[10]</sup>,及其物理结构在航天发射和在轨飞行时的力学适应能力。本文模拟航天发射和太空运行环境设置了振动冲击、高低温循环、热真空、紫外辐照和粒子轰击试验,根据测量和试验结果,对研制漫射板的空间稳定性和适应性进行了分析,并给出初步的解决方案。

## 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。在制作漫射板表面时,取 4 个直径为 $\phi 50$  mm 的测试小样,用于半球反射比测量和环境适应性试验,如图 1 所示。

表 1 测试样品参数

Table 1 Description of test samples

Name	Number	Description
Diffuser panel for on-board calibration	XSMFB-M01	320 mm×230 mm×10 mm
Samples of diffuser panel	XSMFB-T01~04	$\phi$ : 50 mm, thickness: 10 mm

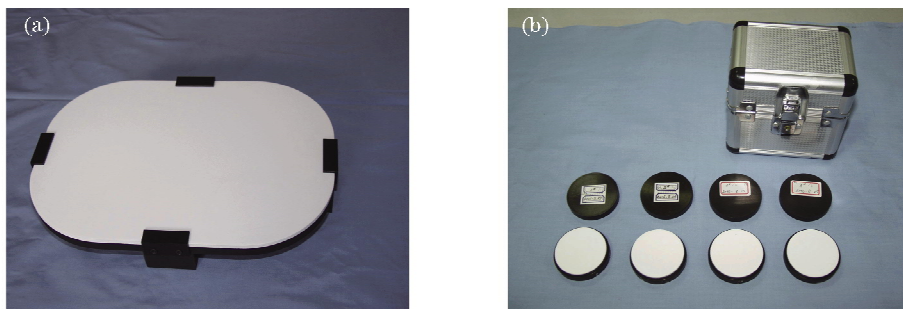


图 1 (a) 星上定标漫射板;(b) 测试小样

Fig. 1 (a) Diffuser panel for on-board calibration; (b) samples

## 3 测量与试验方法

### 3.1 方向半球反射率

采用双光路积分球测量装置,在相同入射观测条件下对漫射板小样与反射比参照进行比对测量来实现方向-半球反射率的标准传递。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率参照;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布亮度  $L_t(\lambda)$  和  $L_s(\lambda)$ ;则目标方向半球反射率<sup>[11]</sup>

$$\rho_t(\lambda) = \frac{L_t(\lambda)}{L_s(\lambda)} \cdot \rho_s(\lambda), \quad (1)$$

式中  $\rho_s(\lambda)$  为漫反射参照的方向半球反射率,由国家计量科学研究院标定给出。星上定标漫射板的方向

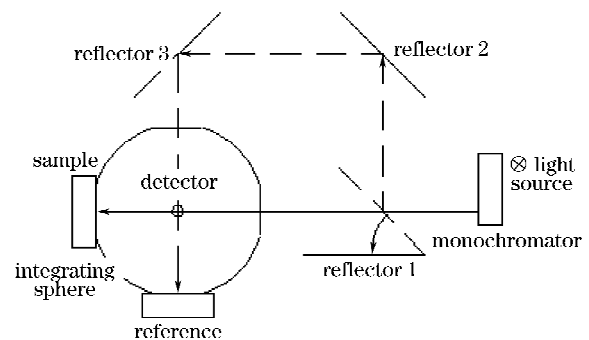


图 2 方向半球反射比测量系统

Fig. 2 Directional/hemisphere reflectance measurement system

向半球反射率是通过对小样的替代测量来获取的。

### 3.2 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<sup>[5]</sup>,而在真空及太阳紫外辐照下,漫射板光学特性会发生衰变<sup>[12,13]</sup>,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<sup>[14]</sup>。为了考察自主研制的漫射板在航天环境下的稳定性和适应性并消除污染引起的反射率衰变,发展了航天级漫射板制作与环境控制工艺,设置了热真空(Vacuum Bakeout)、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,试验流程为:

1) 4 块试验小样分别为同工艺同批次制作,存放在铝制消光盒内(如图 1(b)),试验前进行半球反

射率测量。

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(优于  $1 \times 10^{-3}$  Pa)暴露 40 h。试验后对 4 块小样进行半球反射率测量。

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  $1 \times 10^{-3}$  Pa,辐照强度(200~400 nm)为 3 倍太阳紫外辐照强度,各样品加速辐照时间如表 2 所示,试验后进行半球反射率测量。

4) 测试小样在原子氧、粒子环境下暴露 40 h;试验前后进行半球反射率的测量。

5) 按照航天环境条件要求对星上漫射板进行了振动冲击(如图 3)及高低温循环试验(如图 4(a)),振动与高低温循环试验条件分别如表 3,表 4 所示。其中振动试验时,安装夹具(如图 3(b))起到一定放大振动的作用。

试验中样品制作、反射率测试和原子氧试验在

表 2 真空紫外辐照试验参数

Table 2 Parameters of UV/VUV test

Sample number	Vacuum degree /Pa	UV (200~400 nm) radiation density	Radiation time /h
XMFB-T01	Excel $1 \times 10^{-3}$	3 times of solar UV radiation density	40
XMFB-T02	Excel $1 \times 10^{-3}$	3 times of solar UV radiation density	30
XMFB-T03	Excel $1 \times 10^{-3}$	3 times of solar UV radiation density	7
XMFB-T04	Excel $1 \times 10^{-3}$	3 times of solar UV radiation density	14

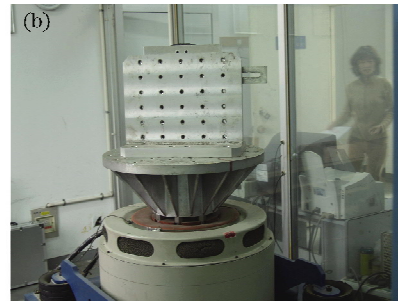


图 3 振动试验。(a) 漫射板状态;(b) 安装夹具

Fig. 3 Vibration test. (a) diffuser panel state; (b) jig used for Vibration test

表 3 振动试验条件

Table 3 Conditions of vibration test

Frequency range /Hz	Pow spectral density	Total RMS acceleration	Time	Direction
20~80	+3 dB/oct	$6 g_{RMS}$	4~5 min/axis direction	$x, y, z$ axis direction
80~350	$0.04 g^2/Hz$			
350~2000	-3 dB/oct			

表 4 高低温循环试验条件

Table 4 Test conditions of high-low temperature

Temperature range /°C	Temperature changing rate /(°C/min)	Number of circlation	Temperature control error /°C	Settle time under high and low temperature /h
-44~61	3~5	12	High temperature: $\pm 2$ Low temperature: $\pm 3$	High temperature: 1.5 Low temperature: 2

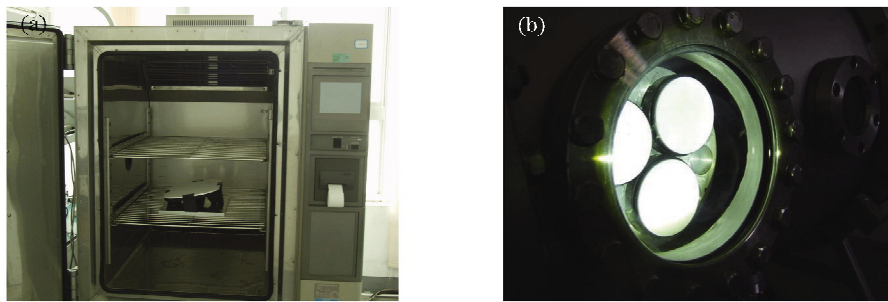


图 4 (a) 高低温试验; (b) 紫外辐照试验

Fig. 4 (a) High-low temperature test; (b) UV/VUV test

中国科学院安徽光学精密机械研究所进行,热真空、真空紫外辐照、力学(振动冲击和高低温循环)试验分别在中国科学院上海技术物理研究所(上海)、航天集团公司五院五一零研究所(兰州)、电子集团公司第三十八研究所(合肥)进行。试验过程中,样品 XMF B-T01, XMF B-T02, XMF B-T04 的包装、储存和运输按航天级工艺控制,而样品 XMF B-T03 按常规工艺进行。

#### 4 试验结果与分析

1) 热真空试验后,样品(除 XSMFB-T03)的半球反射率特别是红外光谱区有明显升高(如图 5),可见近红外波段反射率在 0.95 以上,可见近红外光谱区可达 0.99,反射率的光谱变化小于 0.01。40 h 的热真空处理,使漫射板加工制作、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可能是漫射板反射率提高的主要原因。样品 XSMFB-T03 短波红外光谱区反射率升高,而可见近红外光谱区反射率却显著降低,这是由于其经热真空除污净化后,在包装、运输过程中没有进行严格防污控制又被二次污染所致。

2) 样品经真空紫外辐照后反射率如图 6 所示,其紫外光谱区反射率的衰变随着辐照总量的逐渐增加而增大;受到污染的 XSMFB-T03 样品受 7 h 紫外辐照后,其反射率衰变程度比 XSMFB-T01 样品 40 h 紫外辐照后的衰变还要大。这些现象说明,漫射板反射率的衰变不是由于其自身材料造成,而是由于漫射板在制作、存放、运输过程中受到污染,这种污染物在辐照环境中发生衰变所致。进行航天级防污控制的漫射板样品,经历 40 h 3 倍太阳紫外辐照,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 15%<sup>[10]</sup>。

3) 聚四氟乙烯材料是一种非吸收的多孔结构,大部分的光到达板面后,透入板面内然后又以二次

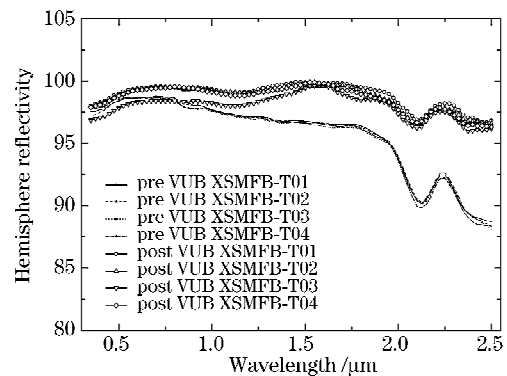


图 5 热真空试验(VUB)前后半球反射率

Fig. 5 Hemisphere reflectivity before and post H/VUV test

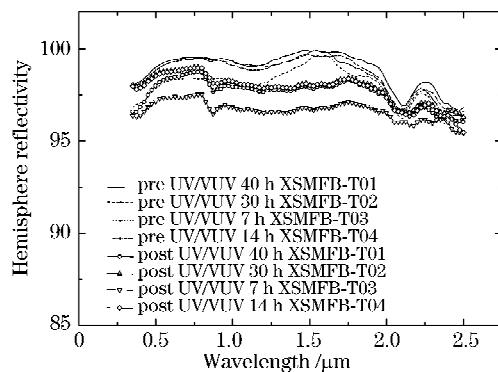


图 6 真空紫外辐照试验(UV/VUV)前后半球反射率

Fig. 6 Hemisphere reflectivity before and post UV/VUV test

和多次散射的方式反射到板面的半球空间。因此,一定厚度和密度的聚四氟乙烯板可以达到很高的反射率,多次散射能量的随机分布,使其具有良好的朗伯性。而当其受到污染后,污染物对入射光进行一定的吸收,这种吸收一定程度上打破了光在材料中的散射机理,造成其反射率降低。同时,聚四氟乙烯材料极具化学惰性,其自身对光辐射是不敏感的,而当其中混有杂质等污染物后,这些污染物在太阳紫外照射下可能发生光化学反应而使漫射板表面和内

部物质状态发生变化,使其反射特性衰变<sup>[12]</sup>。漫射板反射率及紫外衰变与污染的直接关系有待进一步试验验证。

4) 漫射板的污染问题是可以改进工艺和环境控制来解决的,从制作到应用全过程的防污控制是改善漫射板抗衰变特性的有效措施。国外同种材料漫射板已较广泛地应用于星上定标,如MODIS, MISR等,该类产品是能够满足航天下的环境要求的。

5) 粒子轰击对漫射板光学性能没有明显影响,与国外对类似材料的研究结果相符<sup>[8,10]</sup>。

6) 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

研制的聚四氟乙烯漫射板具有较高的反射率和光谱平坦性,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,反射率的光谱变化小于0.01。漫射板光学特性受氧原子剥蚀、质子轰击影响较小,在紫外辐照时的衰变认为是由于其在制作、储存、运输过程中受到污染所致,通过严格控制工艺能够消除这种污染。研究表明研制的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,可以满足未来卫星传感器星上定标应用要求。

**致谢** 中国科学院上海技术物理研究所陈福春博士进行了漫射板热真空和紫外辐照试验工作,在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- Zheng Xiaobin. Advanced radiometric calibration techniques for optical remote sensing [J]. *Advances in Marine Science*, 2004, **22**(21):16~22  
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
- Wang Xianhua, Qiao Yanli, Philippe Goloub *et al.*. Radiometric calibration of sunphotometer system applied to aerosol robotic network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 87~91  
王先华,乔延利,Philippe Goloub等. 应用于全球气溶胶测量网的太阳辐射计辐射定标系统[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):87~91
- Jia Hui, Li Futian. Analysis of factors affecting spectral radiance calibration by applying a diffuse plane [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3):383~387  
贾辉,李福田. 影响光谱辐亮度标定因素的分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3):383~387
- M. Dinguirard, P. N. Slater. Calibration of space-multispectral imaging sensors: a review [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **68**:194~205
- Philip N. Slater, James M. Palmer. Solar-diffuser panel and ratioing radiometer approach to satellite sensor on-board calibration [C]. *SPIE*, 1991, **1493**:100~105
- Carol J. Bruegge, Albert E. Stiegman, Richard A. Rainen *et al.*. Use of Spectralon as a diffuse reflectance standard for in-flight calibration of earth-orbiting sensors [J]. *Opt. Eng.*, 1993, **32**:805~814
- Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, Zhang Junping *et al.*. Highly accurate spectral radiant power standards with uncertainty < 0.03% [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6):749~752  
郑小兵,吴浩宇,章骏平等. 不确定度<0.03%的高精度光谱辐射功率标准[J]. *光学学报*, 2001, **21**(6):749~752
- Li Shuang, Wu Haoyu, Li Zhaozhou *et al.*. Highly accurate calibration of optical radiation detectors at near infrared spectrum [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(4):498~501  
李双,吴浩宇,李照洲等. 近红外高精度光辐射标准探测器的试验研究[J]. *光学技术*, 2004, **30**(4):498~501
- R. D. Jackson, T. R. Clarke, M. S. Moran. Bidirectional calibration results for 11 Spectralon and 16 BaSO<sub>4</sub> reference reflectance panels [J]. *Rem. Sens. Environ*, 1992, **40**:231~239
- Carol J. Bruegge, Albert E. Stiegman, Daniel R. Coulter *et al.*. Reflectance stability analysis of spectralon diffuse calibration panels [C]. *SPIE*, 1991, **1493**:132~142
- G. Schaepman-Strub, M. E. Schaepman, T. H. Painter *et al.*. Reflectance quantities in optical remote sensing — definitions and case studies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **103**:27~42
- S. B. Petroy, J. E. Leland, B. Chommeloux *et al.*. Phase 1. analysis of SPECTRALON® material for use in on-board calibration systems for the medium resolution imaging spectrometer [C]. *SPIE*, 1994, **2210**:616~624
- X. Xiong, X. Xieb. Characterization of MODIS solar diffuser on-orbit degradation [C]. *SPIE*, 2007, **6677**:1~10
- J. E. Leland, A. V. Arecchi. Phase 2. analysis of SPECTRALON® material for use in on-board calibration systems for the medium resolution imaging spectrometer [C]. *SPIE*, 1995, **2475**:384~392