

引用格式: WANG Kai, LIU Hong, ZHANG Xiu-xing. Study on Polarized Reflection Characteristics of Space Object Thermal Control Coatings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12):1229003

王凯,刘宏,张修兴.空间目标热控涂层材料偏振反射特性研究[J].光子学报,2020,49(12):1229003

空间目标热控涂层材料偏振反射特性研究

王凯¹,刘宏²,张修兴¹

(1 渭南师范学院 物理与电气工程学院,陕西 渭南 714000)

(2 宇航动力学国家重点实验室,西安 710043)

摘要:针对空间目标偏振探测识别的需求,基于三分量偏振二向反射分布函数模型对空间目标热控涂层材料的偏振特性进行了仿真,给出了被动照射条件下的反射光 Stokes 矢量和线偏振度,以及主动偏振探测条件下偏振二向反射分布函数矩阵元素的空间分布.搭建实验平台对两种典型空间目标热控涂层材料 SR107 和 S781 样品的偏振特性进行了测量,测量结果显示偏振二向反射分布函数模型具有较高的仿真精度,最后根据仿真和实测结果对空间目标热控涂层偏振特性规律进行了分析.本文研究对空间目标偏振探测应用具有重要的指导意义.

关键词:偏振;偏振特性;偏振二向反射分布函数;建模仿真;空间目标;热控涂层

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204912.1229003

Study on Polarized Reflection Characteristics of Space Object Thermal Control Coatings

WANG Kai¹, LIU Hong², ZHANG Xiu-xing¹

(1 School of Physics and Electrical Engineering, Weinan Normal University, Weinan, Shaanxi 714000, China)

(2 State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an 710043, China)

Abstract: Focusing on the demand of polarized detection for space objects, the polarized characteristics of space object thermal control coatings are simulated based on three-component polarized Bidirectional Reflection Distribution Function (pBRDF) model, the reflected Stokes vector and Degree of Linear Polarization(DOLP) in passive illustration condition are given, and the pBRDF matrix in active polarized detection is presented. The simulation and measurement of polarized characteristics of two typical space object thermal control coatings SR107 and S781 show the accuracy of three-component pBRDF model. The polarized properties of space object thermal coatings are analyzed with simulated and measured data. The conclusion of this paper presents important references for space object polarized detection applications.

Key words: Polarization; Polarized characteristics; Polarized bidirectional reflection distribution function; Modeling and simulation; Space object; Thermal coatings

OCIS Codes: 290.1483; 290.5855; 120.5700

0 引言

偏振探测技术是当今目标光学探测技术发展的前沿,由于其具有巨大的价值而受到了各国的广泛重视^[1-4].将偏振感知的新兴技术与空间态势感知的重大需求相结合,用偏振探测的手段对航天器、空间碎片等空间目标进行监测和识别已引起了研究者的强烈兴趣,美国等利用地基观测系统对空间目标的偏振特性

基金项目:国家自然科学基金(No.11304230),陕西省教育厅专项科研计划(No.20JK0632)

第一作者:王凯(1986-),男,讲师,博士,主要研究方向为目标材料偏振反射特性.Email:haimo409@163.com

收稿日期:2020-06-15;录用日期:2020-09-08

<http://www.photon.ac.cn>

进行了观测实验,获得了很好的效果. STEAD R P等测量到卫星的偏振度最大达39%^[5]; KISSEL K E等^[6]和 BEAVERS W I等^[7]的研究结果表明长期处于太空环境中的卫星铝质材料和太阳能板表面的偏振特性发生了变化,表明偏振特性可以用于研究空间环境对航天器材料造成的损伤影响; JORGENSEN K等发现空间目标的偏振特性与光辐射特性明显不同,在黎明光度特性弱时偏振度甚至能达到40%,即使有卷云存在的情况下也能探测到^[8]; TIPPETS R对国际空间站ISS的地基偏振成像试验结果表明偏振度比强度成像具有更好的目标细节分辨能力^[9]; PESSES M等对空间目标长波红外偏振成像效果进行了仿真,结果显示偏振特性比高光谱特性的空间目标识别效果更好^[10]. 大量空间目标偏振探测研究结果表明,偏振探测技术在提升暗弱空间目标探测识别能力、诊断目标在空间环境中的状态、减小大气效应对空间观测的影响等方面具有强度、光谱等传统光学探测方法无法比拟的优势,极有可能成为未来航天器、空间碎片进行有效监视识别的新手段.

空间目标的偏振散射特性是空间目标偏振监测系统设计与运用,以及开展空间目标特性分析与构建特性数据库的基础,也是利用偏振信息进行空间目标的侦查、监视、跟踪、识别等系统进行论证、设计、仿真和试验的需要.

热控涂层材料是人造航天器表面的重要材料,偏振特性是其重要的固有物理属性,掌握其偏振特性对于空间目标偏振探测与识别十分重要,而热控涂层一般是漫反射材料,其偏振特性空间分布比较复杂,是空间目标材料特性分析的难点. 虽然已有研究给出了一些涂层材料的偏振反射模型和规律^[11-14],但偏振反射模型只是从理论上给出了偏振指标在空间分布上的数学表达,无法直接体现材料的偏振特性规律特点,且现有的涂层材料偏振反射规律研究的结论主要是验证数学模型的正确性和合理性,用于模型校验和改进,对规律特点的分析过于简单且未与实际应用相结合,缺乏对不同偏振探测模式下的偏振特性规律分析以及偏振探测方式的优选分析,对空间目标偏振探测的指导意义有限. 针对现有研究中存在的不足,本文对空间目标热控涂层材料偏振反射特性规律进行了分析和研究.

1 偏振反射特性基础

偏振是光波电矢量振动方向的特征,是独立于强度、光谱的特征维度. 偏振特性与目标表面特征和材料理化特性密切相关,因此探测获取目标反射光的偏振特征,能够得到不同于强度、光谱的光学信息维度,使获取的目标光学信息量和信息维度得到扩展,大大提高目标探测识别能力. 偏振反射特性与目标材料理化特征和空间角度相关,要全面而准确地掌握目标的偏振反射特性,必须掌握偏振反射特性与入射角、反射角、材料理化参数等各个影响因素之间的定量关系.

Stokes 矢量是最常用的光波偏振态描述方式,可以准确而简洁地表示完全偏振光、部分偏振光和自然光;线偏振度(Degree of Linear Polarization, DOLP)表示光波中线偏振光分量在总光强中所占的比例,可由Stokes 矢量元素表示为

$$\mathbf{S} = (S_0 \quad S_1 \quad S_2 \quad S_3)^T \quad (1)$$

$$\text{DOLP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (2)$$

偏振反射特性的空间分布可用偏振二向反射分布函数(polarized Bidirectional Reflection Distribution Function, pBRDF)来表示,pBRDF是一个 4×4 的矩阵,其矩阵元素用 f_{ij} 表示($i, j=0, 1, 2, 3$),pBRDF 矩阵完整地描述了反射过程中入射光偏振态 \mathbf{S}^i 与反射光偏振态 \mathbf{S}^r 之间的转换关系为

$$\mathbf{S}^r = \mathbf{f}_{\text{pBRDF}} \cdot \mathbf{S}^i \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} S_0^r \\ S_1^r \\ S_2^r \\ S_3^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{00} & f_{01} & f_{02} & f_{03} \\ f_{10} & f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{20} & f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{30} & f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_0^i \\ S_1^i \\ S_2^i \\ S_3^i \end{pmatrix} \quad (4)$$

偏振反射过程中的几何关系如图1所示, θ_i 和 θ_r 分别为入射和反射俯仰角, Φ_i 和 Φ_r 分别为入射和反射方位角, $\Phi = \Phi_i - \Phi_r$, β 为微面入射角,即入射光与反射光夹角的一半, α 为宏观表面法线 \mathbf{z} 与微面元法线 \mathbf{n} 的夹角.

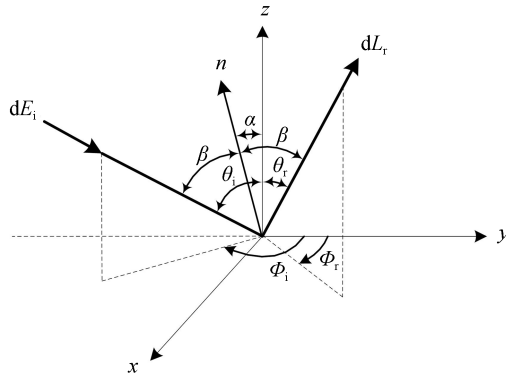


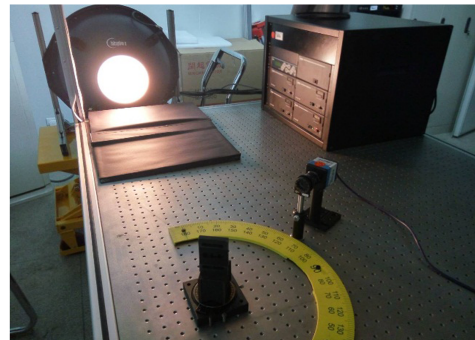
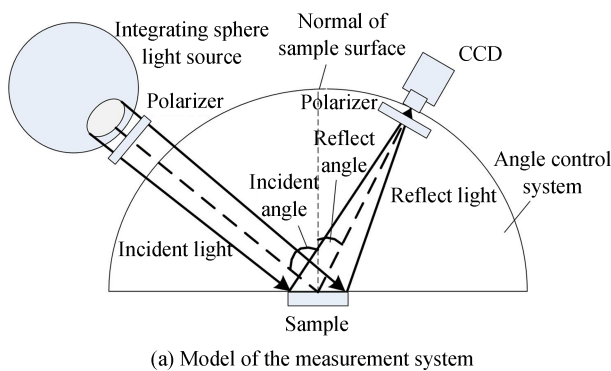
图1 BRDF 几何关系图
Fig. 1 Geometry of BRDF

根据探测模式的不同,目标偏振特性可分为被动偏振特性和主动偏振特性.被动偏振特性是指入射光为随机偏振光(如太阳光照射)条件下入射光与目标反射光偏振态的变化规律;主动偏振特性是指入射光为任意偏振态(如线偏振光)条件下入射光和反射光偏振态的变化规律,经过多次不同偏振态入射光的反射实验可以确定目标的pBRDF矩阵,即在任何偏振态入射光条件下的偏振反射特性,也称全偏振特性.

2 偏振特性测量系统

2.1 被动偏振特性测量系统

被动偏振特性测量系统由积分球光源、CCD成像单元、计算机、偏振片、半圆量角器和圆形转台等构成,如图2所示.



(a) Model of the measurement system

(b) Picture of the measurement system

图2 被动偏振特性测量系统
Fig. 2 The measurement system for passive polarization characteristic

积分球光源的输出在可见光及近红外波段近似为均匀分布,为随机偏振光,非常适合作为模拟太阳光源进行被动光照探测实验.在进行目标被动偏振特性测量时,调整积分球光源入射方向与样品表面法线的夹角(即入射角 θ_i),在CCD探测器与样品距离不变条件下调整探测器位置,并调整CCD探测器前偏振片的偏振光通过方向,可以测量各个反射角 θ_r 条件下的反射光偏振态,可计算得出不同入射角和反射角条件下的反射光的Stokes矢量和线偏振度DOLP.

2.2 主动偏振特性测量系统

主动偏振特性测量系统由MELLES GRIOT 633 nm激光光源、LM-5硅探头激光功率计、起偏器、检偏器、圆形转台和半圆量角器等构成,如图3所示.

测量系统采用的激光光源输出为线偏振光,通过旋转调整激光器装置方向可以控制输出激光的偏振方向,分别产生 0° 、 45° 、 90° 、 135° 方向的线偏振入射光.调整激光器位置可以控制样品的光源入射角 θ_i ,在探测器与样品距离不变的条件下调整探测器位置,并调整探测器前检偏器的角度,可以测量获取各个反射角 θ_r 条

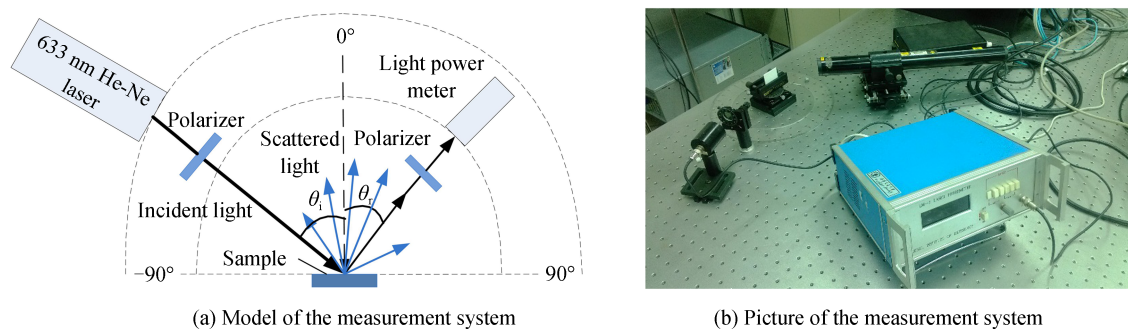


图3 主动偏振特性测量系统

Fig. 3 The measurement system for active polarization characteristic,

件下的反射光偏振态,进而够获得不同线偏振方向入射光条件下的反射光 Stokes 矢量、DOLP 以及各个入射反射角度条件下的 pBRDF 矩阵元素值。

3 偏振特性仿真与校验

3.1 三分量 pBRDF 模型

为了准确地描述和预测目标反射过程中的偏振特性,研究者们根据不同方法建立了多种偏振二向反射分布函数 pBRDF 模型,给出了特定材料的偏振反射特性在反射半球空间内的分布情况。一般地,除了入射角和反射角之外,pBRDF 模型还与反射目标材料的粗糙度、折射率等参数相关。2000年 PRIEST R G 和 GERMER T A^[15]对基于分析方法的几何光学二向反射分布函数 BRDF 模型进行扩展,建立了首个全偏振形式的 pBRDF 模型;2002年 PRIEST R G 和 MEYERS S R^[16]给出了镜面反射与漫反射结合的 pBRDF 模型并应用于 DIRSIG 数字成像和遥感图像生成仿真系统;2009年 HYDE M W^[17]等在之前 pBRDF 模型基础上引入了几何衰减效应函数 G ,并推导出了漫反射分量的表达式,使 pBRDF 模型的完整性得到了改善。然而传统的 pBRDF 模型大都是二分量模型,即假设反射光能量是由镜面反射和漫反射两部分组成,这种假设适用于大多数表面比较致密的材料。然而空间目标热控涂层材料往往是粗糙度较大的疏松多孔结构,二分量 pBRDF 模型对其偏振反射特性的仿真误差较大,如 Hyde pBRDF 模型对热控涂层材料偏振反射特性模拟时就存在明显误差,在大反射角条件下对的 pBRDF 矩阵元素 f_{00} 的模拟误差甚至超过了 100%^[18];而三分量 pBRDF 模型在二分量模型的基础上进行了细化和优化,能够更加准确地表征热控涂层材料的偏振反射特性规律,因此本文采用三分量 pBRDF 模型对热控涂层材料进行仿真分析。

三分量 pBRDF 模型^[18]对于镜面反射光的假设不变,将漫反射光又分为在表面经反复多次反射之后形成的多次反射光,以及进入材料内部又透射出表面的体散射光,其中镜面反射光的偏振态由菲涅尔定律推导给出,多次反射光和体散射光被认为是随机偏振光。反射光的二向反射分布函数 BRDF 为三种反射分量的加权和,可表示为

$$f = k_s \cdot f_s + k_m \cdot f_m + k_v \cdot f_v \quad (5)$$

式中, f_s 、 f_m 和 f_v 分别为镜面反射、多次反射和体散射分量的 BRDF, k_s 、 k_m 和 k_v 分别为镜面反射、多次反射和体散射分量的比例系数。

镜面反射分量 f_s 是基于几何光学方法和微面元理论计算的,微面元理论认为材料表面可以看作由大量微小的平面组成的,每个微面元都满足 Snell 反射定律,其倾斜角满足随机高斯分布,设 σ 为表面粗糙度, G 是几何衰减因子, $M_{jk}(j, k=0, 1, 2, 3)$ 为 Mueller 矩阵元素,可得 pBRDF 矩阵元素 f_{jk} , 其表达式为

$$f_{jk}(\theta_i, \theta_r, \phi) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{1}{\cos^4 \alpha} \frac{\exp\left(-\frac{\tan^2 \alpha}{2\sigma^2}\right)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} G(\theta_i, \theta_r, \phi) M_{jk}(\theta_i, \theta_r, \phi) \quad (6)$$

多次反射分量 f_m 和体散射分量 f_v 的表达式分别为

$$f_m = \cos^n \theta_r \quad (7)$$

$$f_v = 1 \quad (8)$$

加入考虑多次反射分量和体散射分量,可以得到全部反射光的 Stokes 矢量 \mathbf{S}^r ,其表达式为

$$\mathbf{S}^r = \mathbf{S}_s^r + \mathbf{S}_m^r + \mathbf{S}_v^r = \begin{pmatrix} k_s \cdot \sum_{i=0}^3 f_{0i} S_i + k_m \cdot f_m + k_v \cdot f_v \\ k_s \cdot \sum_{i=0}^3 f_{1i} S_i \\ k_s \cdot \sum_{i=0}^3 f_{2i} S_i \\ k_s \cdot \sum_{i=0}^3 f_{3i} S_i \end{pmatrix} \quad (9)$$

通过入射光 Stokes 矢量 \mathbf{S}^i 和反射光 Stokes 矢量 \mathbf{S}^r 可以计算得到完整的 pBRDF 矩阵表达式 f_{pBRDF} 为

$$f_{\text{pBRDF}} = \begin{pmatrix} k_s f_{00} + k_m f_m + k_v f_v & k_s f_{01} & k_s f_{02} & k_s f_{03} \\ k_s f_{10} & k_s f_{11} & k_s f_{12} & k_s f_{13} \\ k_s f_{20} & k_s f_{21} & k_s f_{22} & k_s f_{23} \\ k_s f_{30} & k_s f_{31} & k_s f_{32} & k_s f_{33} \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中, pBRDF 矩阵元素中的 f_{jk} 由式(6)给出,系数 k_s 、 k_m 和 k_v 由实验测量给出.

3.2 被动偏振反射特性仿真与校验

选用两种常见的航天器热控涂层材料 SR107 和 S781 作为实验研究样品,这两种热控涂层材料的折射率均为 1.998,表面粗糙度分别为 $\sigma_{\text{SR107}}=0.216 \mu\text{m}$, $\sigma_{\text{S781}}=0.112 \mu\text{m}$. 在被动照射条件下,入射光为随机偏振光,其 Stokes 矢量为

$$\mathbf{S}_{\text{unpol}} = (1 \ 0 \ 0 \ 0)^T \quad (11)$$

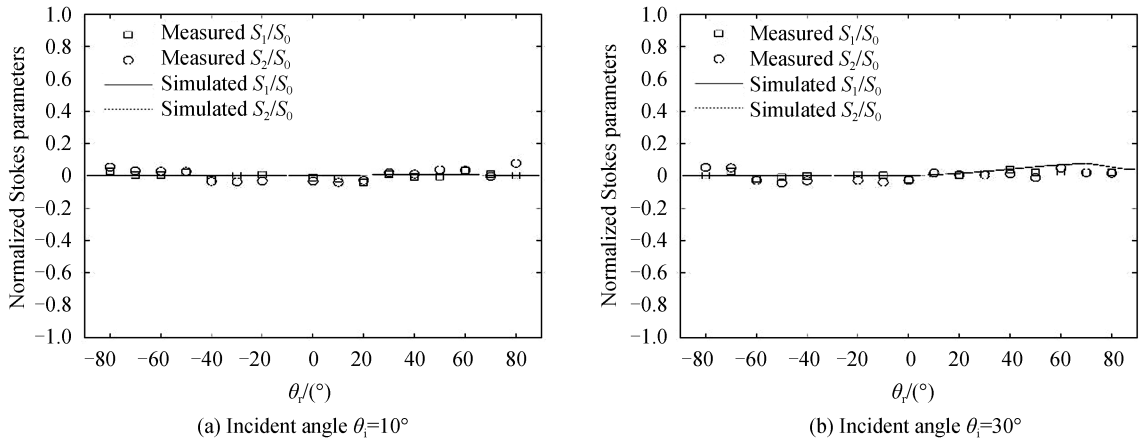
根据三分量 pBRDF 模型可得被动照射条件下的反射光 Stokes 矢量和 DOLP,其表达式分别为

$$\mathbf{S}_{\text{passive}}^{\text{out}} = \begin{pmatrix} S_{0\text{passive}}^{\text{out}} \\ S_{1\text{passive}}^{\text{out}} \\ S_{2\text{passive}}^{\text{out}} \\ S_{3\text{passive}}^{\text{out}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_s f_{00} + k_m f_m + k_v f_v & k_s f_{01} & k_s f_{02} & k_s f_{03} \\ k_s f_{10} & k_s f_{11} & k_s f_{12} & k_s f_{13} \\ k_s f_{20} & k_s f_{21} & k_s f_{22} & k_s f_{23} \\ k_s f_{30} & k_s f_{31} & k_s f_{32} & k_s f_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_s f_{00} + k_m f_m + k_v f_v \\ k_s f_{10} \\ k_s f_{20} \\ k_s f_{30} \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\text{DOLP}_{\text{passive}}^{\text{out}} = \frac{\sqrt{(S_{1\text{passive}}^{\text{out}})^2 + (S_{2\text{passive}}^{\text{out}})^2 + (S_{3\text{passive}}^{\text{out}})^2}}{S_{0\text{passive}}^{\text{out}}} = \frac{k_s \sqrt{f_{10}^2 + f_{20}^2 + f_{30}^2}}{k_s f_{00} + k_m f_m + k_v f_v} \quad (13)$$

由于被动照射条件下的圆偏振效应可以忽略不计,故仿真分析中将 Stokes 矢量中的 S_3 忽略; Stokes 矢量中的 S_0 表示光强度,实际上与材料的偏振反射特性无关,因此研究分析归一化的 Stokes 矢量 S_1/S_0 和 S_2/S_0 . 对不同入射角条件下, SR107 和 S781 涂层样品在被动照射条件下的反射光归一化 Stokes 矢量的模型仿真和实测结果如图 4~7 所示.

由图 4~7 可知模型仿真结果能够较好地符合实验测量数据,被动照射条件下 SR107 和 S781 所体现出



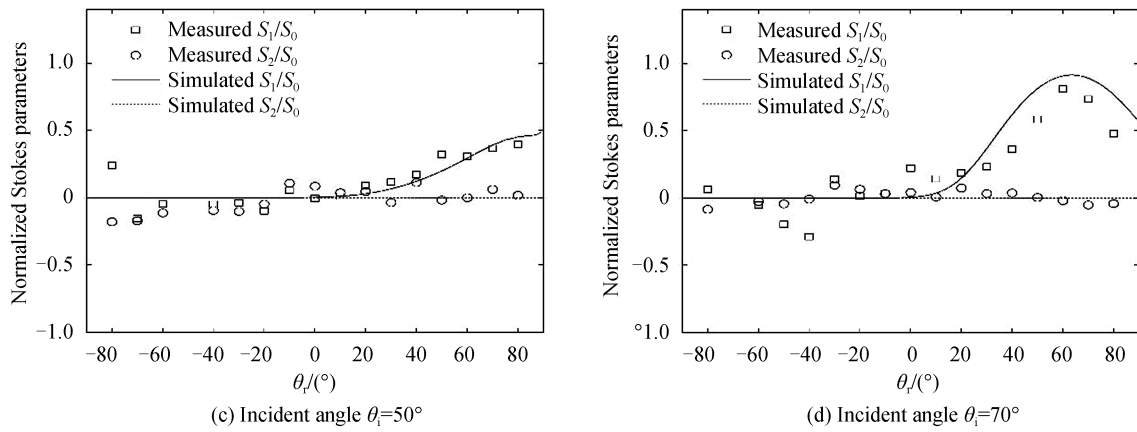


图4 被动照射条件下SR107反射光归一化 Stokes 矢量仿真与测量结果

Fig.4 The normalized Stokes vector simulation and measurement results of SR107 under passive irradiation

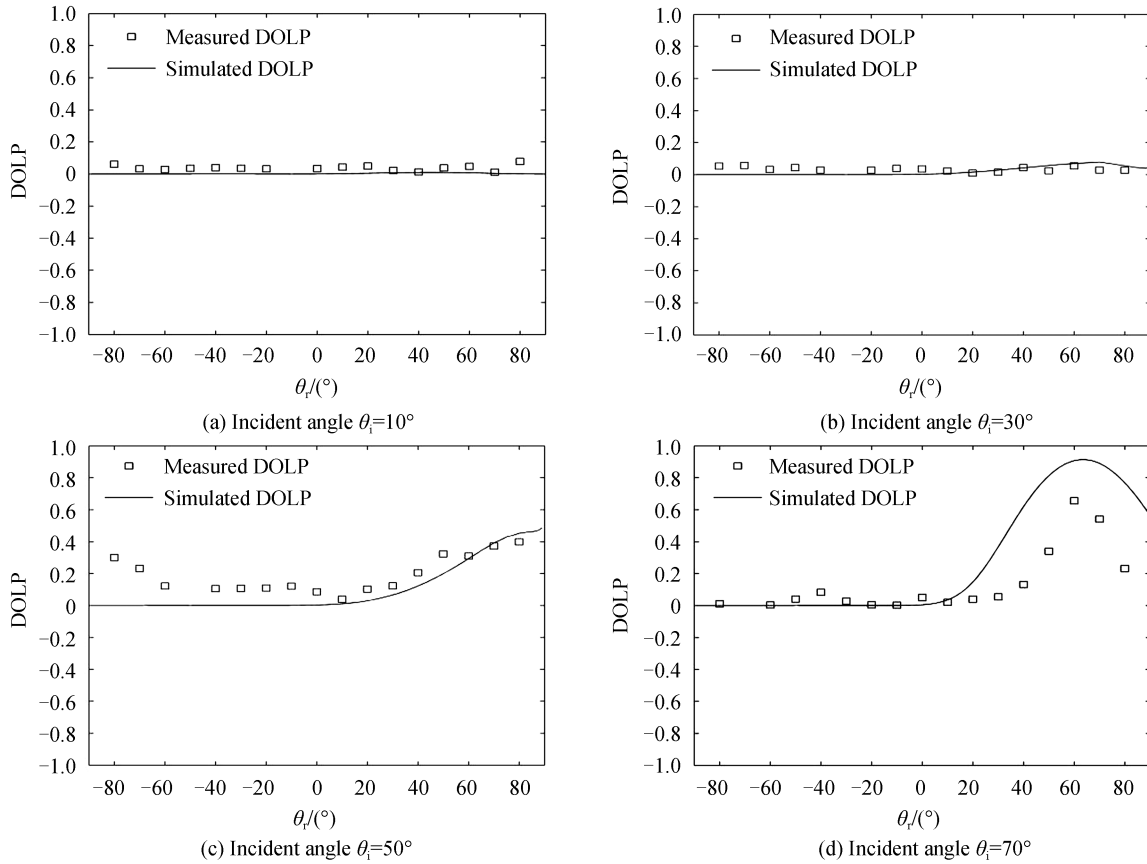


图5 被动照射条件下SR107反射光DOLP仿真与测量结果

Fig.5 The DOLP simulation and measurement results of SR107 under passive irradiation

的偏振特性十分相似： S_2/S_0 的值始终接近于零； S_1/S_0 值在不同入射角条件下呈现不同的空间分布，入射角较小时 S_1/S_0 的值接近于零，入射角较大时 S_1/S_0 曲线在镜面反射方向达到峰值，且峰值随入射角的增大而增大，在其他方向的值接近于零；DOLP分布规律与 S_1/S_0 相似，DOLP曲线峰值随反射角的增大而增大。

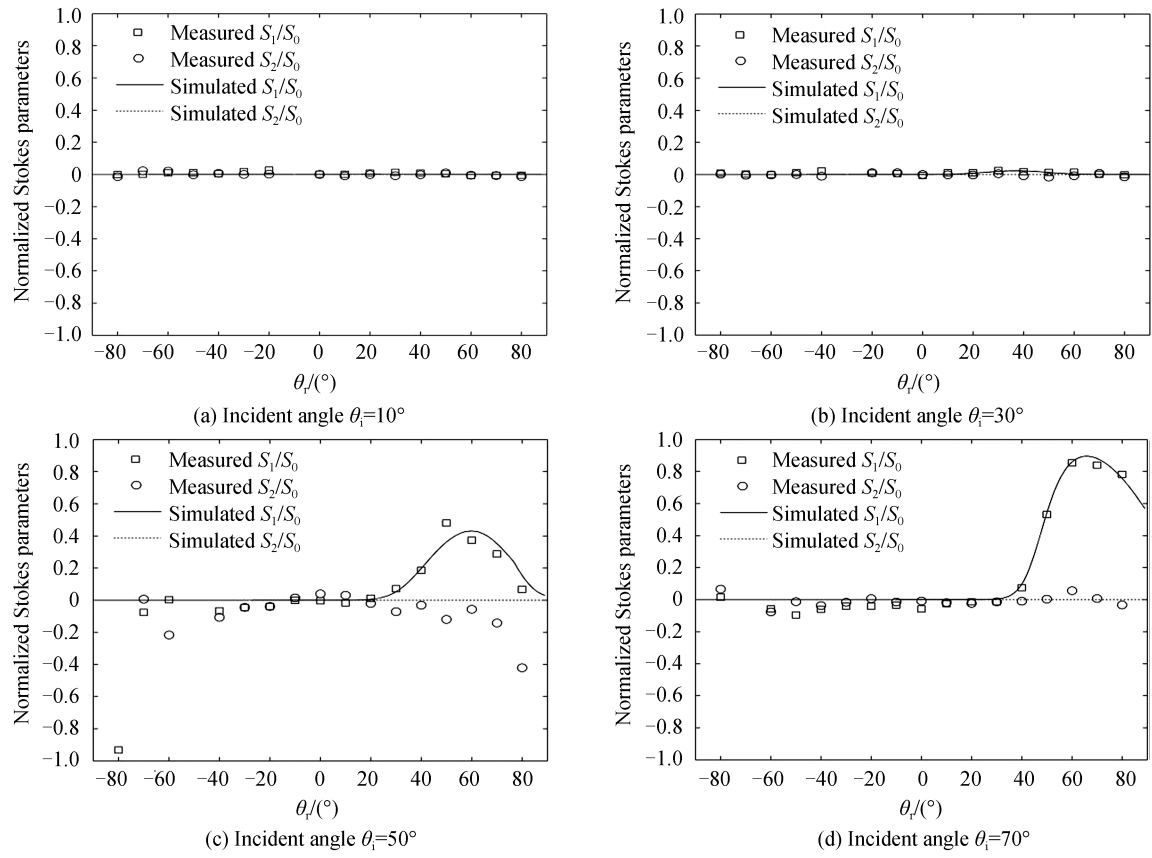
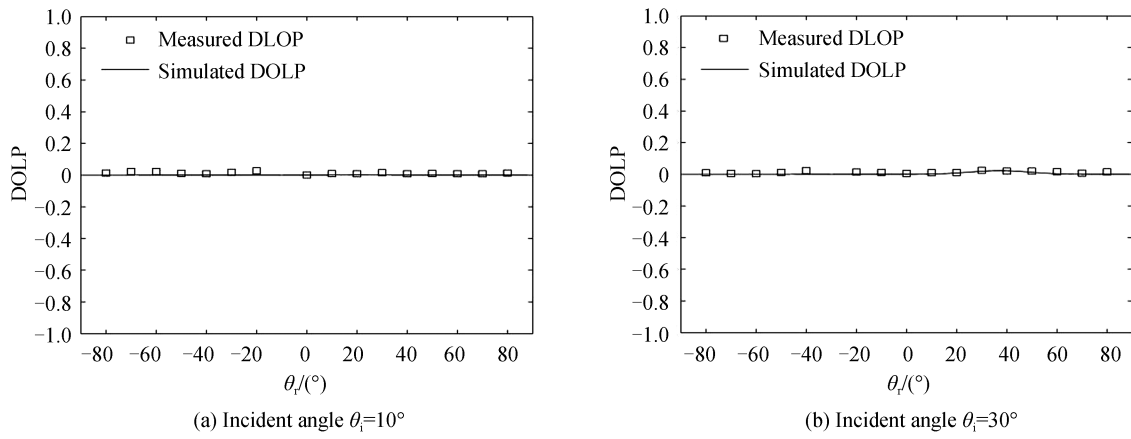


图6 被动照射条件下S781反射光归一化 Stokes 矢量仿真与测量结果

Fig.6 The normalized Stokes vector simulation and measurement results of S781 under passive irradiation



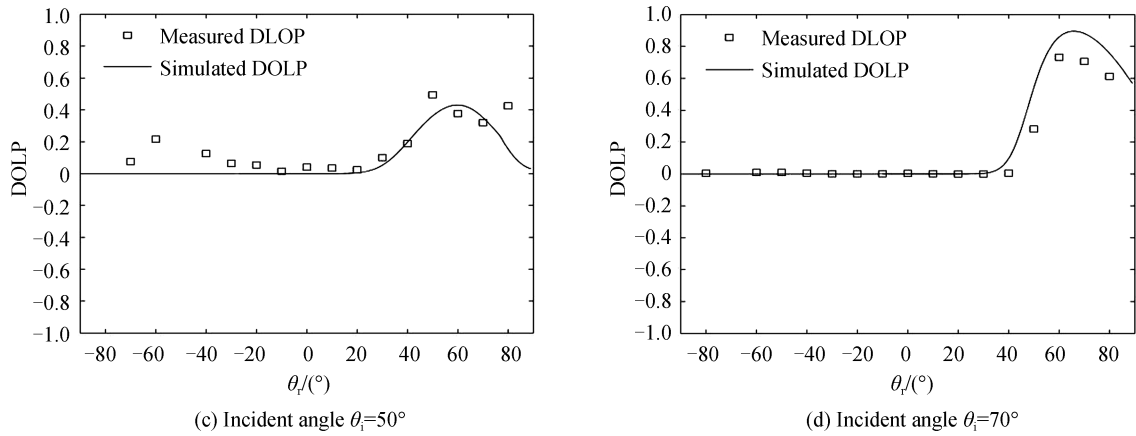


图7 被动照射条件下S781反射光DOLP仿真与测量结果
Fig.7 The DOLP simulation and measurement results of S781 under passive irradiation

3.3 主动偏振反射特性仿真与校验

材料主动偏振反射特性可由pBRDF矩阵完全表示.在不考虑圆偏振效应以及共面测量($\Phi=\pi$)条件下,pBRDF由 4×4 的矩阵退化为 3×3 的矩阵,且pBRDF矩阵元素中 $f_{10}=f_{01},f_{02}=f_{20}=f_{12}=f_{21}=0$,可表示为

$$f_{\text{pBRDF}} = \begin{pmatrix} f_{00} & f_{10} & 0 \\ f_{10} & f_{11} & 0 \\ 0 & 0 & f_{22} \end{pmatrix} \quad (14)$$

由于pBRDF矩阵元素的绝对值与材料反射率相关,为了消除反射率影响,只关注偏振特性,对归一化pBRDF矩阵元素 $f_{jk}/\max(f_{00})$ 进行研究分析.通过在不同偏振态入射光条件下的多次测量,给出了不同入射

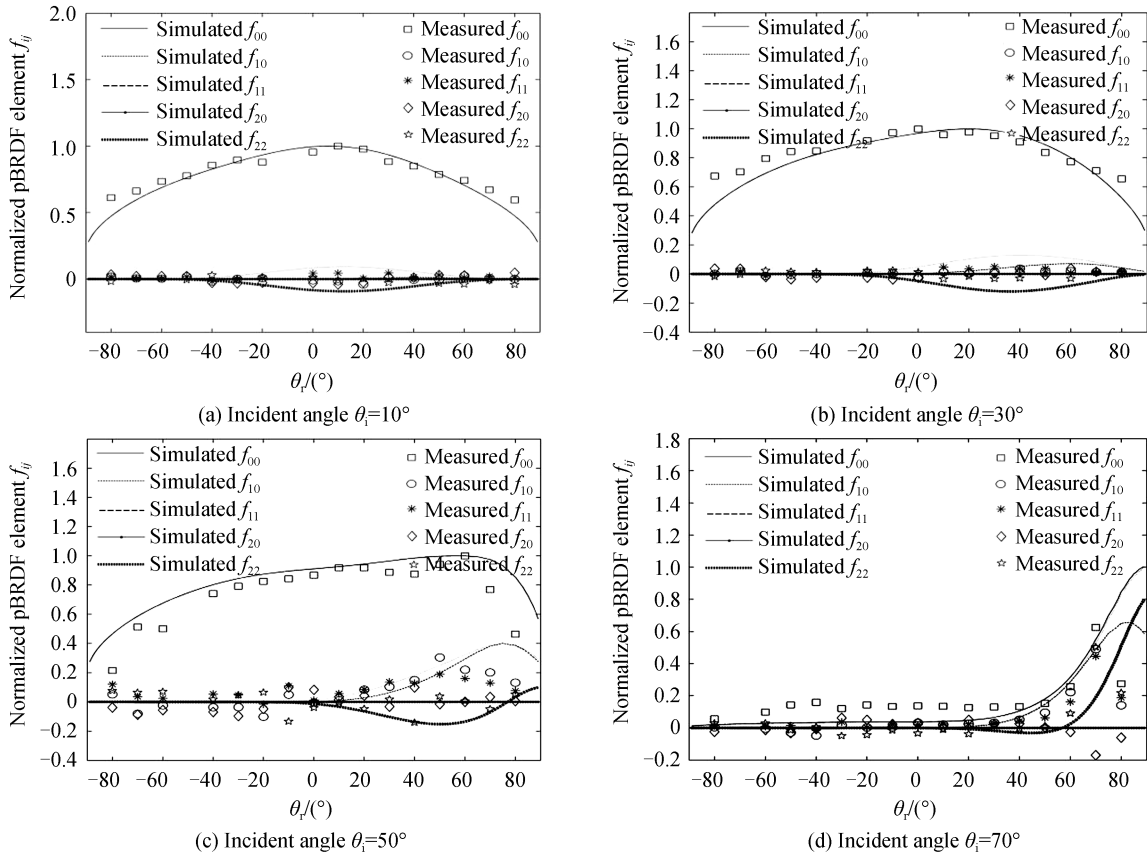


图8 SR107归一化pBRDF矩阵元素仿真与测量结果
Fig.8 The normalized pBRDF matrix elements simulation and measurement results of SR107

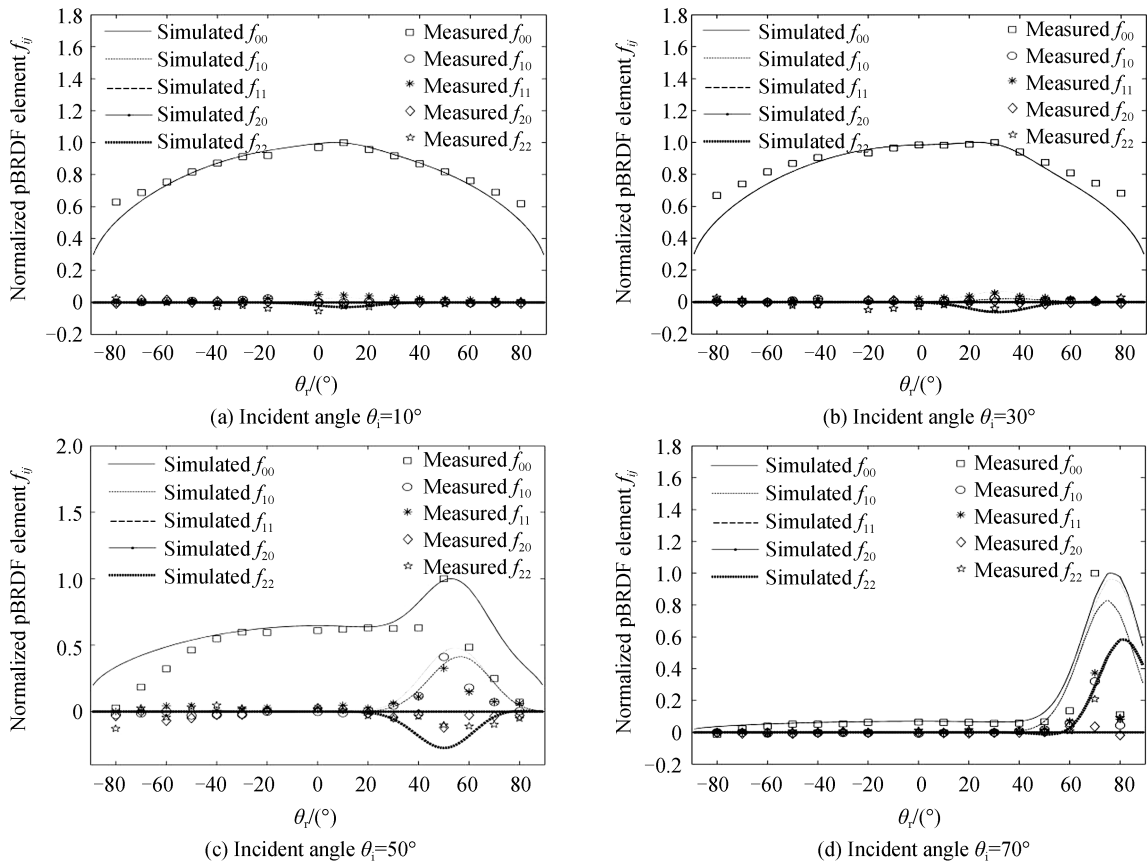


图9 S781 归一化 pBRDF 矩阵元素仿真与测量结果

Fig.9 The normalized pBRDF matrix elements simulation and measurement results of S781

角条件下 SR107 和 S781 涂层样品的归一化 pBRDF 矩阵元素模型仿真和实测数据,如图 8 和图 9 所示。

由图 8 和图 9 可知,模型仿真和实验测量的 pBRDF 矩阵元素符合得较好;在入射角较小时, pBRDF 矩阵元素 f_{00} 的值明显大于其他元素;在入射角较大时, f_{00} 、 f_{10} 、 f_{11} 、 f_{20} 、 f_{22} 均在镜面反射方向达到峰值,且 f_{00} 值仍大于其他元素值,且入射角越大 pBRDF 矩阵元素曲线峰越明显。

4 偏振特性规律分析

由 SR107 和 S781 热控涂层材料偏振反射特性仿真与实测结果可知,空间目标热控涂层材料的偏振反射特性具有以下规律:1)在随机偏振光照射的被动探测条件下,两种热控涂层材料样品的强度归一化 Stokes 矢量 S_1/S_0 与 S_2/S_0 差异明显: S_2/S_0 值始终趋于零; S_1/S_0 值在小反射角条件下很小,但在反射角较大时在镜面反射方向出现峰值,且峰值随入射角增大而增大;2)在随机偏振光照射的被动探测条件下,两种热控涂层材料样品的反射光 DOLP 值在镜面反射方向达到峰值,且峰值随入射角的增大而增大,反射光在非镜面反射方向的 DOLP 值很小;3)在主动偏振探测条件下,两种热控涂层材料在不同反射角方向的归一化 pBRDF 矩阵元素分布曲线比较相似,在入射角较小时,除 f_{00} 外的 pBRDF 矩阵元素值都很小;入射角越大, pBRDF 矩阵元素在镜面反射方向的起伏特征越明显;4)对于粗糙度较大的 SR107 热控涂层样品,被动偏振探测条件下的反射光 S_1/S_0 曲线和 DOLP 曲线峰起伏较为平缓,主动偏振探测条件下的归一化 pBRDF 元素曲线峰起伏也较为平缓;而对于粗糙度比较大的 S781 热控涂层样品,被动偏振探测条件下的反射光 S_1/S_0 曲线和 DOLP 曲线峰比较尖锐,主动偏振探测条件下的归一化 pBRDF 元素曲线峰也比较尖锐。

对仿真和实测得出的空间目标热控涂层材料偏振特性规律进行分析可知:在太阳光照射下,空间目标热控涂层材料在镜面反射方向存在较强的起偏振能力,将随机偏振光转化为线偏振光的能力较强;在线偏振光照射下,空间目标热控涂层材料在镜面反射方向能够体现出较强的反射偏振转换能力;入射和探测角度越大,空间目标热控涂层材料的偏振特性越强烈;材料表面越光滑,材料的偏振特性变化越显著。因此,在

开展空间目标观测时,可在较大的太阳光照角和探测器接收角条件下进行偏振探测,利用热控涂层材料反射光 Stokes 矢量、DOLP 和 pBRDF 矩阵元素等显著的偏振特性进行空间目标材料和部件分析识别。

5 结论

本文首先基于三分量 pBRDF 模型对空间目标热控涂层材料的偏振特性进行了仿真,给出了被动偏振探测条件下的反射光归一化 Stokes 矢量和 DOLP,以及主动偏振探测条件下归一化 pBRDF 矩阵元素的分布曲线;利用被动探测和主动探测两种偏振特性实验测量平台和探测模式,对 SR107 和 S781 热控涂层材料样品的偏振特性进行了测量,结果显示测量结果与模型仿真结果符合较好。根据仿真数据和实测结果分析给出了空间目标热控涂层材料在主动和被动探测方式下的偏振反射分布规律:在太阳光照射下,空间目标热控涂层材料在镜面反射方向存在较强的起偏振能力;在线偏振光照射下,空间目标热控涂层材料在镜面反射方向能够体现出较强的反射偏振转换能力;入射和探测角度越大,空间目标热控涂层材料的偏振特性越强烈;材料表面越光滑,材料的偏振特性变化越显著。利用空间目标热控涂层材料的偏振特性规律,分析给出了空间目标偏振探测和分析识别的优选方案:在太阳光照角和探测器接收角较大的条件下进行空间目标偏振探测和偏振特性分析,可以在空间目标材料和部件分析识别等方面达到较好的效果。

参考文献

- [1] REN Kan, LV Yan-yao, GU Guo-hua, *et al.* Calculation method of multiangle polarization measurement for oil spill detection[J]. *Applied Optics*, 2019, **58**(12): 3317-3324.
- [2] LÜ Xiao-ning, LIU Yang-yang, TAN Zheng, *et al.* A polarizing universal multi-scale and real-time image defogging algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(8): 0810003.
吕晓宁,刘扬阳,谭政,等.一种偏振普适性多尺度实时的图像去雾算法[J].光子学报,2019,**48**(8):0810003.
- [3] CHUN C S L, SADJADI F A. Polarimetric laser radar target classification [J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(14):1806-1808.
- [4] CHU Jin-kui, WANG Hong-qing, RONG Wen-jing, *et al.* The performance test of a novel polarization sensor for navigation system[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, **32**(3): 489-494.
褚金奎,王洪青,戎成功,等.基于偏振光传感器的导航系统实验测试[J].宇航学报,2011,**32**(3):489-494.
- [5] STEAD R P. An investigation of polarization phenomena produced by space objects[D]. State of Ohio: Air Force Institute of Technology, 1967.
- [6] KISSEL K E. Polarization effects in the observation of artificial satellites [J]. *Planets, Stars and Nebulae Studied with Photopolarimetry*, 1974: 371-380.
- [7] BEAVERS W I, TAPIA S, CHO J Y K. Photopolarimetric studies of resident space objects[C]. Abstracts of Lunar and Planetary Science Conference, 1991, **6**(22): 67-68.
- [8] JORGENSEN K, AFRICANO J L, STANSBERRY E G, *et al.* Determining the material type of man-made orbiting objects using low-resolution reflectance spectroscopy[C]. SPIE, 2001, **4490**: 237-246.
- [9] TIPPETS R. Polarimetric imaging of artificial satellites [M]. State of Ohio: Union Institute and University Cincinnati, 2005.
- [10] PESSES M, TAN J, HASH R, *et al.* Simulation of LWIR polarimetric observations of space objects[C]. Applied Imagery Pattern Recognition Workshop, 2002: 164-170.
- [11] CAO Hui. Modeling and simulation research on polarization properties of coating object surface [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
曹慧.涂层目标表面偏振特性建模仿真研究[D].合肥:合肥工业大学,2015.
- [12] YANG Min, FANG Yong-hua, WU Jun, *et al.* Multiple-component polarized bidirectional reflectance distribution function model for painted surfaces based on kubelka-munk theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018,**38**(1): 298-305.
杨敏,方勇华,吴军,等.基于 Kubelka-Munk 理论的涂层表面多参量偏振双向反射分布函数模型[J].光学学报,2018,**38**(1):298-305.
- [13] CAO Hui, GAO Jun, WANG Ling-mei, *et al.* Polarization modeling and analysis of light scattering properties of multilayer films on slightly rough substrate[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(3): 640-647.
曹慧,高隽,王玲妹,等.微粗糙基底上多层涂层光散射偏振建模与特性研究[J].光谱学与光谱分析,2016,**36**(3): 640-647.
- [14] FENG Wei-wei, WEI Qing-nong, WANG Shi-mei, *et al.* A hybrid model of polarized BRDF for painted surfaces[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 962-966.
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多参量混合模型[J].光子学报,2009,**38**(4): 962-966.

- [15] PRIEST R G, GERMER T A. Polarimetric BRDF in the microfacet model: theory and measurements [C]. Naval Research Laboratory, Published in Proceedings of the 2000 Meeting of the Military Sensing Symposia Specialty Group on Passive Sensors, 2000, **1**: 169-181.
- [16] PRIEST R G, MEIER S R. Polarimetric microfacet scattering theory with applications to absorptive and reflective surfaces [J]. *Optical Engineering*, 2002, **41**(5): 988-993.
- [17] HYDE M W, SCHMIDT J D, HAVRILLA M J. A geometrical optics polarimetric bidirectional reflectance distribution function for dielectric and metallic surfaces [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(24): 22138-22153.
- [18] LIU Hong, ZHU Jing-ping, WANG Kai, *et al.* Polarized BRDF for coatings based on three-component assumption [J]. *Optics Communications*, 2017, **384**: 118-124.