

涂层表面反射偏振建模及其特性分析方法

董祉序, 白鹏涛*, 徐威, 刘寅**, 孙兴伟***

沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870

摘要 为了研究涂层表面光反射偏振特性,提出了一种基于蒙特卡罗方法的偏振双向反射分布函数(PBRDF)建模方法。该方法先利用傅里叶变换完成对涂层-基底双层粗糙表面的三维重构,再根据微面元理论和菲涅耳方程求解单个面元上反射与折射的随机过程,最后应用偏振光线跟踪技术和蒙特卡罗方法对重构表面的偏振光散射过程进行统计求和,从而得到涂层表面的PBRDF。实验结果表明,所提方法建立的PBRDF正确,且相比于现有模型具有更高的精度。最后分析了入射角、表面粗糙度、基底材质及涂层光学厚度对涂层表面光反射偏振特性的影响规律,以为其表面的探测和测量提供理论依据。

关键词 表面光学; 涂层表面; 蒙特卡罗方法; 偏振双向反射分布函数; 偏振特性

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2224001

Modeling and Characteristic Analysis Methods for Reflection Polarization on Coated Surfaces

Dong Zhixu, Bai Pengtao*, Xu Wei, Liu Yin**, Sun Xingwei***

School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China

Abstract To study the polarization characteristics of light reflection from coated surfaces, this paper proposed a modeling method based on the Monte Carlo method for the polarized bidirectional reflectance distribution function (PBRDF). Specifically, Fourier transform was performed for the three-dimensional reconstruction of a coating-substrate double-layer rough surface. Then, the microfacet theory and the Fresnel equation were employed to solve the processes of stochastic reflection and refraction from a single facet, and the process of polarized light scattering on the reconstructed surface was statistically summated by the polarization ray tracing technique and the Monte Carlo method to obtain the PBRDF of the coated surface. Experimental results show that the PBRDF built by the proposed method is correct and the proposed model outperforms the existing models in accuracy. Finally, the effects of the incident angle, surface roughness, substrate material, and optical thickness of the coating on the polarization characteristics of light reflection from the coated surface are analyzed to provide a theoretical basis for the detection and measurement of coated surfaces.

Key words surface optics; coated surface; Monte Carlo method; polarized bidirectional reflectance distribution function; polarization characteristics

1 引言

高熵合金涂层^[1]、高分子涂层^[2]、复合涂层^[3]等材料具有防腐、耐磨、热障、伪装作用,广泛应用于增减材制造、航空航天、国防军事等重要领域。涂层材料的不同折射率、粗糙度、颜色等光学特性,使得目标表面光散射情况变得相对复杂,给其表面的探测与测量带来了极大困难^[4]。光与介质的相互作用会产生带有偏振的反射光,反射光偏振态与物体形状、粗糙度、材质等

多维信息密切相关^[5-6],因此,通过对光反射偏振过程进行模拟来建立偏振双向反射分布函数(PBRDF),对解决上述问题具有重要的理论意义。

近年来,为了描述物体表面的反射偏振特性,很多学者针对PBRDF的建立方法进行了大量研究。张焱等^[7]基于梯度下降和正交分解算法提出了一种光滑表面的偏振态表征模型。汪方斌等^[8]考虑镜面反射、漫反射和体散射三分量建立了金属表面PBRDF。章延隽等^[9]基于微面元理论,综合考虑微面元漫反射和镜

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2022-05-15; 录用日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(52005347, 52005346)、科技部中央引导地方科技发展资金(2022JH6/100300015)

通信作者: *pengtaobai@126.com; **liuyin_neu@163.com; ***sunxw@sut.edu.cn

面反射建立了粗糙表面 PBRDF, 并对其偏振特性进行了分析。Liu 等^[10]提出了一种基于微面元理论的随机表面改进 PBRDF, 推导了偏振度 (DOP) 和斯托克斯 (Stokes) 矢量的表达式, 测量了不同粗糙度下 ZnO 样品的 PBRDF, 讨论了粗糙度和入射角对 PBRDF 的影响。上述研究只关注了单层表面上的光反射偏振过程, 因此其建立的 PBRDF 并不适用于涂层表面。杨敏等^[11-12]提出了一种改进 PBRDF, 借助 Kubelka-Munk 模型描述了漫反射对非镜面涂层材料偏振特性的影响, 但未考虑多次反射情况。张颖等^[13]基于微面元理论提出了一种适用于涂层的双高斯 PBRDF 模型, 涂层中将有偏的漫反射现象分解为无偏的表面散射和有偏的体散射来描述。Yang 等^[14]综合考虑表面散射和体散射, 提出了一种改进的涂层表面 PBRDF, 并根据实验测量的 DOP 对所建模型进行优化。王凯等^[15-16]提出了一种基于主动偏振反射测量的复折射率估计方法, 通过测量两种涂层样品和两种金属样品在主动偏振反射中的 PBRDF 来验证估计方法的正确性。Zhang 等^[17]基于 Priest 模型构建了涂漆表面的 PBRDF, 采用成像旋光计测量涂漆表面 PBRDF, 并根据测量数据反演了涂漆表面的粗糙度和复折射率。Liu 等^[18]和 Zhan 等^[19]综合考虑镜面反射、多次散射以及体散射提出了一种涂层表面 PBRDF, 但两者在高反射角和高漫反射材料中会产生较大误差。上述 PBRDF 中, 有的仅适用于特殊材质和结构的涂层表面, 有的忽略了材料内部的光吸收以及光在涂层内部的多次反射过程, 导致模型精度欠佳。

本文针对双层粗糙表面 PBRDF 建模困难以及现有模型精度不足的问题, 从对光在涂层-基底构成的双层表面中传播物理过程的模拟和求解角度, 基于微面元理论、偏振光线跟踪技术、蒙特卡罗统计方法逐步构建了涂层表面的 PBRDF。首先, 利用傅里叶变换生成高斯随机粗糙表面以完成对涂层表面的三维重构。其次, 基于微面元理论随机采样各层中与散射光线相交的法向量, 再应用菲涅耳方程随机选择在涂层内部传播的反射或折射光线, 并收集离开涂层表面的出射光

线。最后, 使用偏振光线跟踪技术和蒙特卡罗方法对涂层表面的偏振光散射过程进行统计求和, 从而得到涂层表面上半球空间内反射光的 PBRDF。通过实验对比验证模型的正确性和精确性, 并分析多个因素对涂层表面光反射偏振特性的影响规律。

2 涂层表面 PBRDF 建模理论

2.1 高斯随机粗糙表面生成

在三维空间直角坐标系 $O-XYZ$ 中, 基于快速傅里叶变换生成一个由大量频率不同的谐波组成的高斯随机粗糙表面, 记为 $z=f(x, y)$, 该函数描述了表面的高度变化。则生成表面上相邻点的相关函数为

$$C(s) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{x^2}{c_{1,x}^2} - \frac{y^2}{c_{1,y}^2}\right), \quad (1)$$

式中: σ 为表面的均方根粗糙度; x, y 分别为表面上相邻两点在 X 和 Y 方向上的最短距离; $c_{1,x}$ 和 $c_{1,y}$ 分别为 X 和 Y 方向上的相关长度。当 $c_{1,x}=c_{1,y}$ 时, 粗糙表面为各向同性; 当 $c_{1,x} \neq c_{1,y}$ 时, 粗糙表面为各向异性。

对式 (1) 进行傅里叶变换, 获得粗糙表面的功率谱密度函数 $S(k_x, k_y)$ 为

$$S(k_x, k_y) = \frac{\alpha^2 c_{1,x} c_{1,y}}{4\pi} \exp\left(-\frac{k_x^2 c_{1,x} + k_y^2 c_{1,y}}{4}\right), \quad (2)$$

式中: k_x, k_y 分别为 X 和 Y 方向上的空间频域变量; α 为表面粗糙度, $\alpha = \sqrt{2}(\sigma/c_1)$ (c_1 为相关长度)。

高斯随机粗糙表面的高度函数 $f(x_m, y_n)$ 为

$$f(x_m, y_n) = \frac{1}{L_x L_y} \sum_{m_c=-M/2}^{M/2} F(k_{m_c}, k_{n_c}) \exp[i(k_{m_c} x_m + k_{n_c} y_n)], \quad (3)$$

式中: L_x, L_y 分别为表面在 X 和 Y 方向上的长度; (x_m, y_n) 为采样点坐标, $x_m = m\Delta x, y_n = n\Delta y, 1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N, M$ 和 N 分别为 X 和 Y 方向上的离散点采样数目, Δx 和 Δy 分别为 X 和 Y 方向上的相邻点的采样间隔; $F(k_{m_c}, k_{n_c})$ 为 $f(x_m, y_n)$ 的傅里叶变换。

当 $m_c \geq 0, n_c \geq 0$ 时, 有

$$F(k_{m_c}, k_{n_c}) = 2\pi \sqrt{L_x L_y} S(k_x, k_y) \begin{cases} \sqrt{2} [N(0, 1) + iN(0, 1)] & \text{for } m_c \neq 0, \frac{M}{2} \text{ and } n_c \neq 0, \frac{N}{2} \\ N(0, 1) & \text{for } m_c = 0, \frac{M}{2} \text{ and } n_c = 0, \frac{N}{2} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $N(0, 1)$ 表示均值为 0、方差为 1 的高斯分布随机数。

当 $m_c < 0, n_c < 0$ 时, 有

$$\begin{cases} F(k_{m_c}, k_{n_c}) = F^*(-k_{m_c}, -k_{n_c}) \\ F(k_{m_c}, -k_{n_c}) = F^*(-k_{m_c}, k_{n_c}) \end{cases}, \quad (5)$$

式中: F^* 代表对傅里叶变换函数 F 取复共轭, 可确保粗糙表面高度函数在实数范围内。

2.2 偏振光在镜面处的反射和折射

本节基于微面元理论建立涂层表面的 PBRDF, 即目标表面在宏观上是平坦的几何表面, 在微观上由多个粗糙微小面元组成。各微面元可近似为理想镜面, 因此可根据菲涅耳定律求解偏振光在镜面处的反射和折射过程。图 1 描述了光线以方向 ω_i 从折射率为 n_1 的介质入射到折射率为 $n_2 + ik_2$ 的介质, 其中, k_2 为吸收系数。根据光的偏振属性, 将光波的电场矢量在与传播方向垂直的平面中进行正交分解, 其中垂直于入射平

面的电场分量为 s , 平行于入射平面的电场分量为 p , 反射光和折射光的方向分别为 ω_r 和 ω_t , 入射角、反射角、折射角分别为 θ_i, θ_r 和 θ_t 。

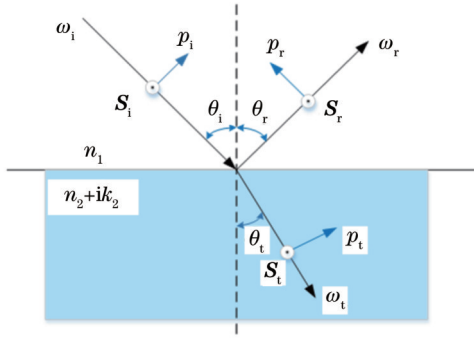


图 1 光在镜面处的反射和折射

Fig. 1 Reflection and refraction of light at mirror surface

根据菲涅耳定律, 计算得到反射光 s 分量和 p 分量的振幅反射系数 r_s 和 r_p 。

$$n = \frac{n_2 + ik_2}{n_1}, \quad (6)$$

$$\cos 2\theta = \cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\varphi_r - \varphi_i), \quad (7)$$

$$\begin{cases} r_s = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} - \cos \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} + \cos \theta} \\ r_p = \frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \end{cases}, \quad (8)$$

式中: θ 为微面元法线与表面几何法线间的夹角; φ_i 和 φ_r 分别为入射光线和反射光线的方位角。

反射光 s 分量和 p 分量的菲涅耳反射率 R_s 和 R_p 分别为

$$R_s = |r_s|^2, R_p = |r_p|^2. \quad (9)$$

当不考虑介质吸收时, 根据能量守恒关系 $R + T = 1$ (R 和 T 分别为反射率和折射率), 可得反射光 s 分量和 p 分量的菲涅耳折射率 T_s 和 T_p 分别为

$$T_s = 1 - R_s, T_p = 1 - R_p. \quad (10)$$

菲涅耳反射的穆勒矩阵 M_r 为

$$M_r = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} |r_s|^2 + |r_p|^2 & |r_s|^2 - |r_p|^2 & 0 & 0 \\ |r_s|^2 - |r_p|^2 & |r_s|^2 + |r_p|^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s r_p^* + r_s^* r_p & i(r_s r_p^* - r_s^* r_p) \\ 0 & 0 & -i(r_s r_p^* - r_s^* r_p) & r_s r_p^* + r_s^* r_p \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中: $r_{s/p}^*$ 代表对振幅反射系数 $r_{s/p}$ 取复共轭。

菲涅耳折射的穆勒矩阵 M_t 为

$$M_t = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} T_s + T_p & T_s - T_p & 0 & 0 \\ T_s - T_p & T_s + T_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2\sqrt{T_s T_p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2\sqrt{T_s T_p} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

根据光线传输矩阵理论, 当用穆勒矩阵 M 表示 PBRDF 时, 可用 Stokes 矢量 S 描述光的偏振态变化^[20], 则有反射光 $S = [S_0, S_1, S_2, S_3]$ 的 DOP 为

$$D_{OP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}. \quad (13)$$

2.3 涂层表面 PBRDF 建立

为了通过建立涂层表面的 PBRDF 来获取光反射偏振信息, 本文采用蒙特卡罗方法对光线传播的过程进行跟踪和仿真。本文建立的 PBRDF 基于如下假设: 光线沿直线传播, 且不考虑衍射时出现的弯曲效应; 光线不受重力场、磁场等外部因素干扰; 目标表面的粗糙度大于入射波长; 基底为不透明材质, 即光线与基底相互作用时只发生反射现象。图 2 描述了涂层表面的光散射过程, 入射光线在涂层中随机选择反射和折射, 最终离开表面。

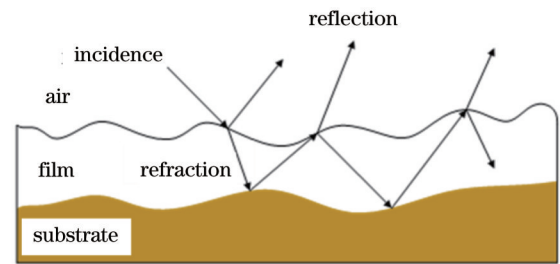


图 2 涂层表面的光散射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of light scattering on coating surface

在微面元理论中, 组成目标表面的微面元法向量具有一定的统计特性, 服从特定分布, 可使用特定分布参数来控制表面粗糙度。对于服从高斯分布的表面, 表面法向量的概率分布函数为

$$D = \frac{1}{\pi \cos^4 \gamma (\alpha^2 + \tan^2 \gamma)^2}, \quad (14)$$

式中: γ 为微面元法线与涂层表面法线间的夹角。则通过随机采样生成的且与入射光线相交的微面元法向量 ω_m 的高度角 θ_m 和方位角 φ_m 为

$$\theta_m = \arctan\left(\frac{\alpha \sqrt{\xi_1}}{\sqrt{1 - \xi_1}}\right), \varphi_m = 2\pi \xi_2, \quad (15)$$

式中: ξ_1 和 ξ_2 为 $(0, 1)$ 内均匀分布的随机数。

根据偏振光加法准则,只有传播方向相同且使用相同参考系分解的偏振光才能进行相加。因此,需要引入两种参考坐标系来求解不同仿真过程下的出射光 Stokes 矢量,即全局坐标系和局部坐标系。在仿真统计求和过程中,借助 Z 轴构建全局坐标系,即 $s_g = \omega_m z$ (ω_m 为微面元法向量的模), $p_g = s_g \omega_i$, 则 (ω_i, s_g, p_g) 构成了入射光的全局坐标系。在偏振光的计算中,借助与光线相交微面元的法向量 ω_m 的模 ω_m 构建局部坐标系,即 $s_1 = \omega_i \omega_m, p_1 = s_1 \omega_m$, 则 (ω_i, s_1, p_1) 构成了入射光的局部坐标系。

如图 3 所示,入射光线 ω_i 从全局坐标系转换到局部坐标系,由于两坐标系存在公共轴,因此 θ_{rot} 即 s_g 轴绕 ω_i 轴旋转至 s_1 轴的角度。则该旋转角 θ_{rot} 为

$$\theta_{rot} = \arccos \frac{s_g s_1}{|s_g| |s_1|} \quad (16)$$

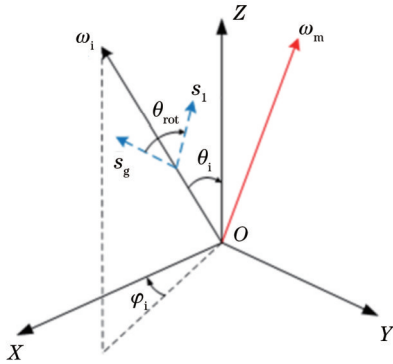


图 3 偏振光参考坐标系的旋转

Fig. 3 Rotation of polarized light reference coordinate

从而得到坐标系旋转的穆勒矩阵 M_{rot} 为

$$M_{rot}(\theta_{rot}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\theta_{rot}) & -\sin(2\theta_{rot}) & 0 \\ 0 & \sin(2\theta_{rot}) & \cos(2\theta_{rot}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

利用蒙特卡罗方法建立 PBRDF, 首先应设置输入参数:入射光方向、偏振态、样本数量、涂层粗糙度、折射率和法线概率分布函数。将入射光投射到涂层表面,其 PBRDF 建立过程如下:

1) 设定初始值。输入上述初始参数,入射光默认定义在全局坐标系下,其 Stokes 矢量为 $S_m = [S_0, S_1, S_2, S_3]$ 。

2) 采样微面元法向量。确定与光线发生散射作用的层,将空气设置为 0 层,根据与光线发生相互作用层的法向量概率分布函数进行微面元法向量采样。

3) 随机选择反射或折射。根据相交微面元的菲涅耳反射率 $F = (R_s + R_p)/2$,生成的随机数大于菲涅耳反射率的光线发生折射,否则光线发生反射。

4) 旋转入射光线。将入射光线从全局坐标系转到局部坐标系,旋转后的 Stokes 矢量为 $S = M_{rot}(\theta_{rot}) S_m$ 。

5) 计算出射光 Stokes 矢量。利用式(11)、(12)确定镜面反射和折射的穆勒矩阵,进而计算反射和折射形式出射光的 Stokes 矢量:

$$S_r = M_r M_{rot}(\theta_{rot}) S_m, S_t = M_t M_{rot}(\theta_{rot}) S_m \quad (18)$$

6) 确定出射光的旋转角 θ_{rot} 。通过旋转角将反射或折射形式的出射光从局部坐标系变换到全局坐标系下,以便于统计求和。

7) 检测出射光线是否离开涂层表面。如果出射光线离开涂层表面,则收集该束光线,否则重复执行步骤 1)~6),直到光线离开涂层表面为止。

基于蒙特卡罗方法的涂层表面 PBRDF 建立流程如上所述,当反射光或折射光的光强低于某一阈值 τ 时,其对表面散射作用结果的影响可认为光线被表面吸收,则丢弃该束光线。在全局坐标系下,统计涂层表面上半球空间内的反射光偏振分布信息。根据反射光的方位角和高度角,在涂层表面上半球空间内以 1° 为步长、 91×360 为密度来划分网格,对于落入同一网格的出射光线,将其偏振态进行相加,最终得到涂层表面上半球空间反射光的偏振信息,即 91×360 个网格里的 Stokes 矢量。

3 涂层表面 PBRDF 验证实验

本节采用实验方式来验证建立的 PBRDF 的正确性,并与现有文献进行模型精度对比分析。验证过程中定义:入射光波长为 λ ,表面粗糙度为 α ,入射角为 θ_i ,反射光高度角为 θ_r ,相对方位角为 φ 。实验验证流程如下:首先进行样品的制备,利用光学显微镜确定样品的 α ;其次通过本文建立的 PBRDF 和椭偏仪分别测量给定入射光下样品表面上半球空间的反射光 DOP;最后将 PBRDF 计算结果与椭偏仪实测结果进行对比,以验证模型的正确性。

待测样品为涂有清漆的铜表面和铝表面。采用 BRUKER 公司的 Contour GT-K 型三维光学显微镜测量样品表面的微观形貌,测量结果如图 4 所示,其中图 4(a)为制备的待测样品,图 4(b)为涂漆铜表面的微观形貌,图 4(c)为涂漆铝表面的微观形貌。测量得到的涂漆铜表面和铝表面 α 分别为 $0.689 \mu\text{m}$ 和 $1.293 \mu\text{m}$ 。

使用 Accurion 公司的 Nanofilm_EP4 型成像椭偏仪测量不同入射角下待测样品涂层表面上半球空间内的反射光 DOP,如图 5 所示,其中图 5(a)为实验现场,图 5(b)为实验光路示意图。由图 5 可知,入射光偏振态由椭偏仪入射光路上的偏振片和 1/4 波片控制,散射光偏振态由椭偏仪探测光路上的偏振片进行分析,且光源入射角和探测器角度由椭偏仪独立控制。测量过程中,椭偏仪光源发出的光依次经过入射光路上的偏振片和 1/4 波片,与待测样品发生相互作用后经探测光路的偏振片到达 CCD。需要强调的是,CCD 记录了光线的相对强度而不是绝对强度,因此需要基于式(13)的相对数值来计算散射光 DOP。

实验过程中 PBRDF 参数设置如下:铝基底的复折射率为 $1.55 + i7.71$,铜基底的复折射率为



图 4 样品及其表面微面形貌的测量结果。(a)待测样品;(b)涂漆铜表面的微观形貌;(c)涂漆铝表面的微观形貌

Fig. 4 Measurement results of sample and its surface microfacet morphology. (a) Sample to be tested; (b) micromorphology of painted copper surface; (c) micromorphology of painted aluminum surface

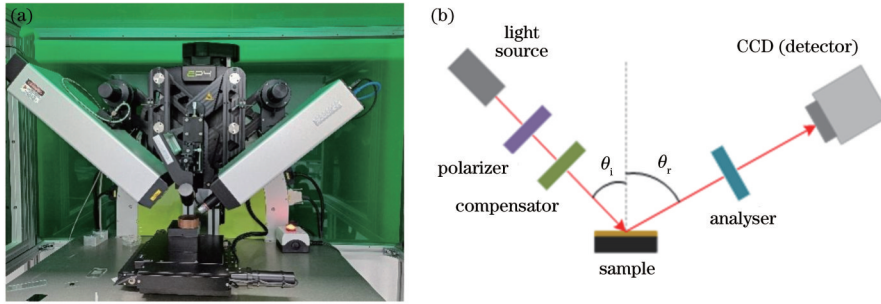


图 5 成像椭偏仪和实验光路示意图。(a)成像椭偏仪;(b)实验光路示意图

Fig. 5 Imaging ellipsometer and experimental optical path. (a) Imaging ellipsometer; (b) schematic diagram of experimental optical path

0.23+i3.63, 清漆涂层的折射率为 1.5, 入射光为自然光, 其 Stokes 矢量 $S_m = [1, 0, 0, 0]^T$, $\lambda = 650 \text{ nm}$, 入射光线样本数量为 2×10^5 , $\theta_i = 60^\circ$, $\varphi = 180^\circ$ 。DOP 实验对比结果如图 6 所示, 其中图 6(a) 为涂漆铜表面, 图 6(b) 为涂漆铝表面, 图 6 中数据为本文、文献 [15]、文献 [17]、文献 [18] 中 PBRDF 的 DOP 计算结果以及实验测量的 DOP 结果, 均为 10 次测量平均值。分析图 6 可得, 对于涂漆铜表面和涂漆铝表面, 当 $\theta_r = 60^\circ$ 时, 随着入射角的增大, 反射光 DOP 增大。PBRDF 计算结果忽略了物体表面漫反射, 漫反射具有一定的去偏效果, 从而导致 DOP 的计算结果均略低于实测值, 本文模型结果与对比文献的结果趋势相同, 且更贴近于实测值, 其与实测值的偏差是由蒙特卡罗方法基于统计采样和实测表面并非理想高斯表面造成的。表 1 为涂漆铜表

面和涂漆铝表面在不同 PBRDF 下的 DOP 均方根误差, 其中 X_{RMSE1} 为本文 PBRDF 计算结果与实测数据的 DOP 均方根误差, X_{RMSE2} 为文献 [15] 中 PBRDF 计算结果与实测数据的 DOP 均方根误差, X_{RMSE3} 为文献 [17] 中 PBRDF 计算结果与实测数据的 DOP 均方根误差, X_{RMSE4} 为文献 [18] 中 PBRDF 计算结果与实测数据的 DOP 均方根误差。针对涂漆铜表面和涂漆铝表面, 本文 PBRDF 的计算结果相较于文献 [15] 的 DOP 均方根误差分别减小了 61.42% 和 89.02%, 本文 PBRDF 相较于文献 [17] 的 DOP 均方根误差分别减小了 76.10% 和 77.55%, 本文 PBRDF 相较于文献 [18] 的 DOP 均方根误差分别减小了 76.72% 和 59.85%。综上, 实验对比验证结果说明了本文建立的 PBRDF 具有较高的正确性和精确性。

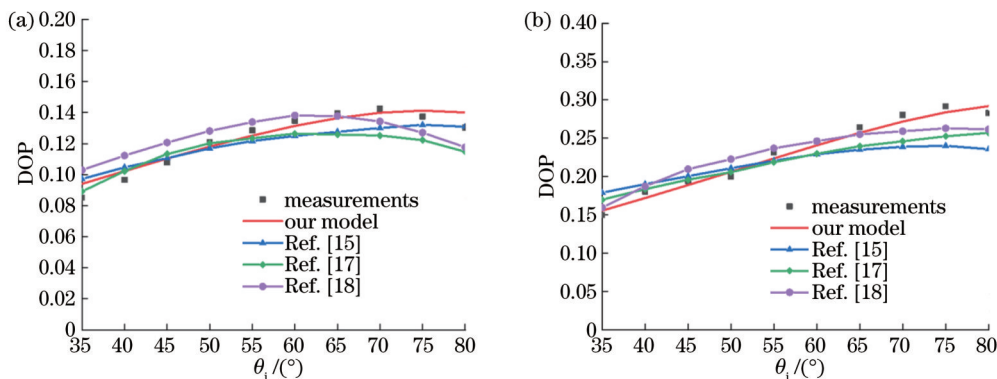


图 6 不同入射角下 DOP 实验测量值与 PBRDF 模型计算值对比图。(a)涂漆铜表面;(b)涂漆铝表面

Fig. 6 Comparison of experimentally measured values of DOP with PBRDF calculated values at different incident angles. (a) Painted copper surface; (b) painted aluminum surface

表 1 DOP 均方根误差
Table 1 DOP root mean square error

Sample	Painted copper surface	Painted aluminum surface
x_{RMSE1}	0.00027	0.00055
x_{RMSE2}	0.00070	0.00501
x_{RMSE3}	0.00113	0.00245
x_{RMSE4}	0.00116	0.00137

4 涂层表面 PBRDF 特性分析

本节考虑入射角、表面粗糙度、基底材质及涂层光

学厚度 4 个因素,对验证后的涂层表面进行光反射偏振特性分析。在特性分析中定义:光强为 S_0 ,反射光方位角为 φ_r ,涂层光学厚度为 d_e ,其余变量符号与第 3 节相同。

4.1 θ_i 对光反射偏振特性的影响

针对涂有清漆铝表面,研究不同 θ_i 下涂层表面的光反射偏振特性。PBRDF 参数设置如下:入射光是 650 nm 的自然光,此波长下铝基底复折射率为 $1.55+i7.71$,清漆涂层折射率为 1.5, $d_e=\lambda/4$,两者 α 均为 0.2。当 θ_i 为 30° 、 45° 、 60° 时,本文建立的 PBRDF 模型输出结果如图 7 和图 8 所示。

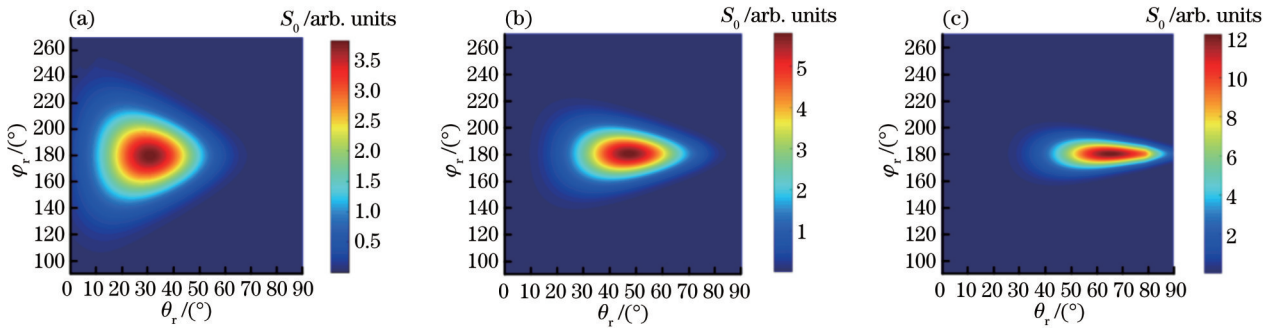


图 7 入射角对 S_0 的影响。(a) $\theta_i=30^\circ$; (b) $\theta_i=45^\circ$; (c) $\theta_i=60^\circ$
Fig. 7 Influence of incident angle on S_0 . (a) $\theta_i=30^\circ$; (b) $\theta_i=45^\circ$; (c) $\theta_i=60^\circ$

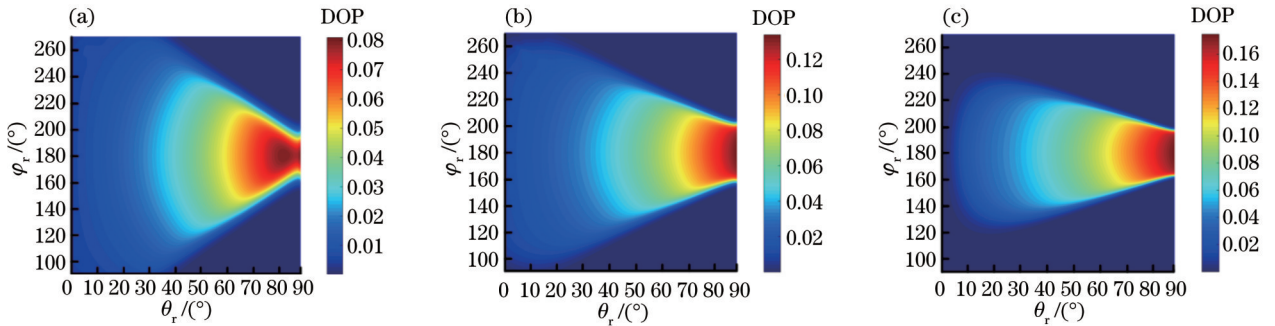


图 8 入射角对 DOP 的影响。(a) $\theta_i=30^\circ$; (b) $\theta_i=45^\circ$; (c) $\theta_i=60^\circ$
Fig. 8 Influence of incident angle on DOP. (a) $\theta_i=30^\circ$; (b) $\theta_i=45^\circ$; (c) $\theta_i=60^\circ$

图 7 和图 8 分别描述了不同 θ_i 下,涂有清漆铝的表面在上半球空间内反射光的 S_0 和 DOP 分布情况。分析图 7 可得:不同 θ_i 下 S_0 均关于 $\varphi_r=180^\circ$ 对称,且在 $\theta_i=\theta_r$ 处取得最大值;在 S_0 的光场分布中,随着 θ_i 的增大, S_0 的光斑分布范围减小,光斑中心强度增大,峰值增大。分析图 8 可得:不同 θ_i 下 DOP 均关于 $\varphi_r=180^\circ$ 对称,且在天顶位置 ($\theta_r=90^\circ, \varphi_r=180^\circ$) 取得最大值;在 DOP 的光场分布中,随着入射角的增大, DOP 的光斑分布范围减小,光斑中心强度增大,峰值增大。综上,随着 θ_i 的增大,反射光 S_0 和 DOP 的光斑中心位置均向着 θ_r 增大的方向移动,偏振现象也变得更加明显。

4.2 涂层 α 对光反射偏振特性的影响

针对涂有清漆的铝表面,研究不同 α 下涂层表面的光反射偏振特性。PBRDF 参数设置如下:入射光是

650 nm 的自然光,此波长下铝基底的复折射率为 $1.55+i7.71$,清漆涂层的折射率为 1.5, $d_e=\lambda/4$, $\theta_i=45^\circ$,清漆涂层和铝基底 α 保持一致,当 α 为 0.2、0.4、0.6 时,本文建立的 PBRDF 模型输出结果如图 9 和图 10 所示。

图 9 和图 10 分别描述了不同 α 下,涂有清漆铝表面在上半球空间内反射光的 S_0 和 DOP 分布情况。分析图 9 可得,随着 α 的增大,上半球空间内 S_0 的光斑分布范围增大,光斑中心强度减小。在 S_0 光场分布中,当 $\varphi_r=180^\circ$ 时, S_0 随着 θ_r 的增大先增大后减小,且在 $\theta_r=\theta_i=45^\circ$ 时, S_0 取得最大值。分析图 10 可得, DOP 关于 $\varphi_r=180^\circ$ 对称,随着 α 的增大,上半球空间内 DOP 的光斑分布范围增大,光斑中心强度也随之增大。综上,当 α 较小时,涂层表面的镜面反射较为强烈,随着 α 增大,

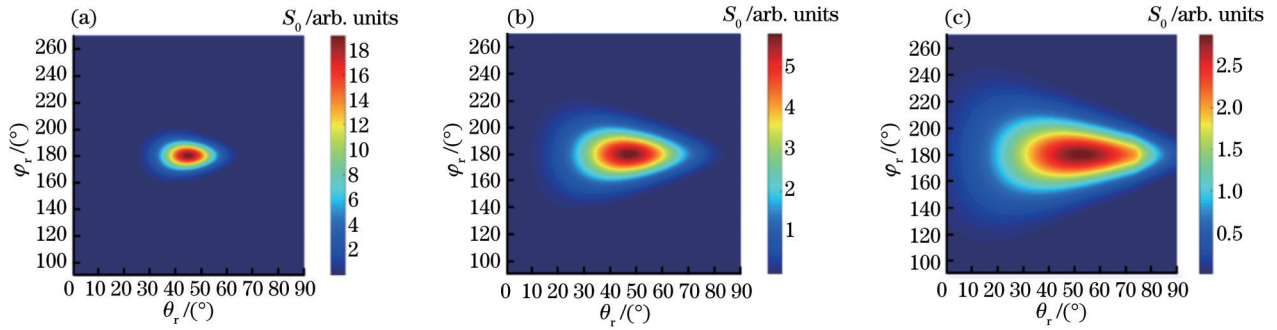


图 9 表面粗糙度对 S_0 的影响。(a) $\alpha=0.2$; (b) $\alpha=0.4$; (c) $\alpha=0.6$

Fig. 9 Influence of surface roughness α on S_0 . (a) $\alpha=0.2$; (b) $\alpha=0.4$; (c) $\alpha=0.6$

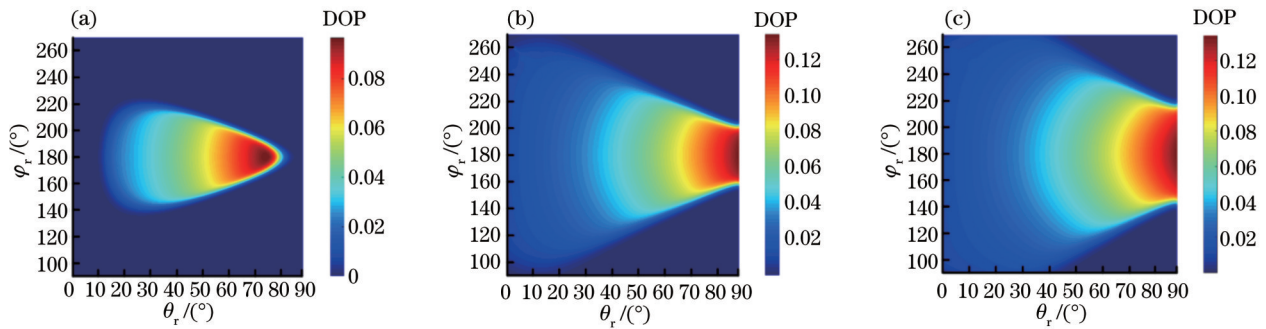


图 10 表面粗糙度对 DOP 的影响。(a) $\alpha=0.2$; (b) $\alpha=0.4$; (c) $\alpha=0.6$

Fig. 10 Influence of surface roughness α on DOP. (a) $\alpha=0.2$; (b) $\alpha=0.4$; (c) $\alpha=0.6$

漫反射分量在增强,光斑分布范围增大,DOP 峰值也随之增大,而 S_0 峰值减小。因此,光反射偏振特性受 α 影响,即 α 越大,反射光中的镜面反射分量越小,漫反射分量越大,偏振现象越明显。

4.3 基底材质对光反射偏振特性的影响

针对不同基底材料的涂漆表面,分析了自然光入

射下的反射偏振特性。PBRDF 参数设置如下: $\lambda=650\text{ nm}$,铜基底复折射率为 $0.23+i3.63$,铝基底复折射率为 $1.55+i7.71$,镍铁合金复折射率为 $2.43+i4.00$,清漆涂层的折射率为 1.5 , $d_c=\lambda/4$, $\theta_i=45^\circ$,清漆涂层和基底材料 α 均为 0.2 ,本文建立的 PBRDF 模型输出结果如图 11 和图 12 所示。

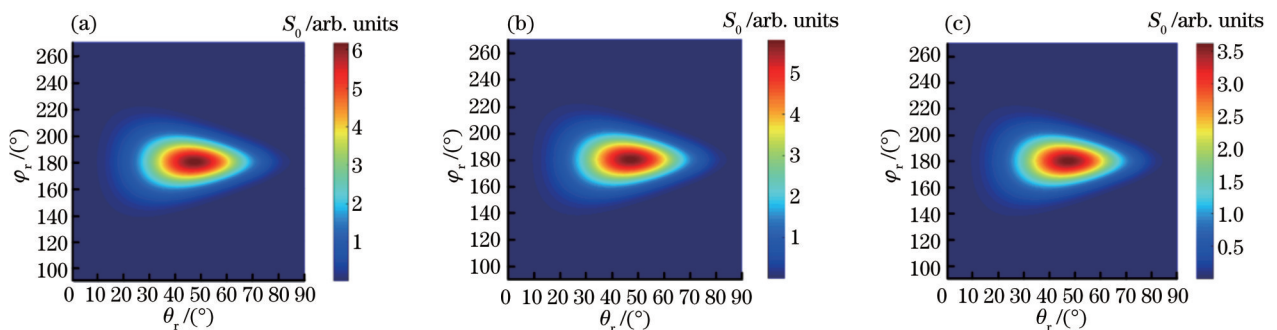


图 11 表面材质对 S_0 的影响。(a)铜;(b)铝;(c)镍铁合金

Fig. 11 Influence of basal material on S_0 . (a) Copper; (b) aluminum; (c) nickel-iron alloy

图 11 和图 12 分别描述了不同基底涂漆表面在上半球空间内反射光的 S_0 和 DOP 的分布情况。由于不同材料具有的复折射率不同,且材料复折射率决定菲涅耳反射率,因此光反射偏振特性与基底材料相关。分析图 11 可得,铜、铝和镍铁合金的 η/k (η 为材料复折射率,有 $\eta=n+ik$) 比值依次增大,随着 η/k 比值的增大,上半球空间内 S_0 的光斑中心强度逐渐减小,

当 $\varphi_r=180^\circ$ 时, S_0 随着 θ_r 的增大先增大后减小,且在 $\theta_r=\theta_i=45^\circ$ 时, S_0 取得最大值。分析图 12 可得, DOP 关于 $\varphi_r=180^\circ$ 对称,随着基底材料 η/k 比值的增大,上半球空间内 DOP 的光斑分布范围减小,但光斑的中心强度随之增大。综上,不同的材料具有不同的复折射率,由菲涅耳定律可知,材料的复折射率影响着菲涅耳反射率和折射率,当光线照射到不同基底材料涂漆表面

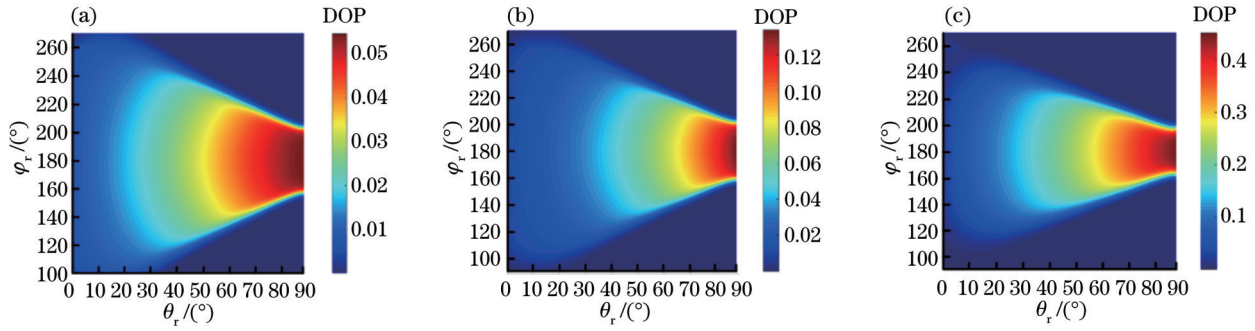


图 12 表面材质对 DOP 的影响。(a)铜;(b)铝;(c)镍铁合金

Fig. 12 Influence of basal material on DOP. (a) Copper; (b) aluminum; (c) nickel-iron alloy

时,反射光的偏振特性有着明显的差异,且有 η/k 比值越大、反射光偏振现象越明显的规律,因此可以借用反射光的偏振特性来提高目标探测的准确性。

4.4 d_c 对光反射偏振特性的影响

针对涂有清漆的铝表面,研究不同 d_c 下涂层表面的

光反射偏振特性。PBRDF 参数设置如下:入射光是 $\lambda=650\text{ nm}$ 的自然光,此波长下铝基底的复折射率为 $1.55+i7.71$,清漆涂层的折射率为 1.5 , d_c 分别取为 $\lambda/8, \lambda/4, \lambda/2, \theta_i=45^\circ$,清漆涂层和基底材料 α 均为 0.2 ,本文建立的 PBRDF 模型输出结果如图 13 和图 14 所示。

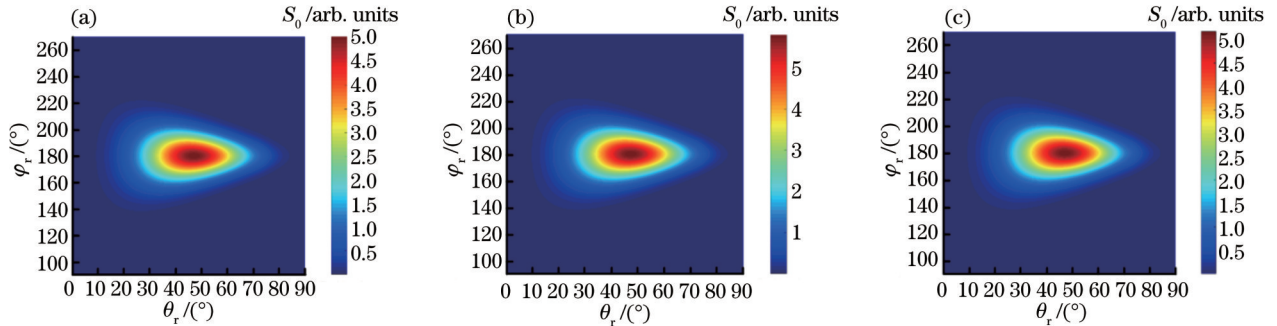


图 13 涂层光学厚度对 S_0 的影响。(a) $d_c=\lambda/8$;(b) $d_c=\lambda/4$;(c) $d_c=\lambda/2$

Fig. 13 Influence of coating optical thickness on S_0 . (a) $d_c=\lambda/8$; (b) $d_c=\lambda/4$; (c) $d_c=\lambda/2$

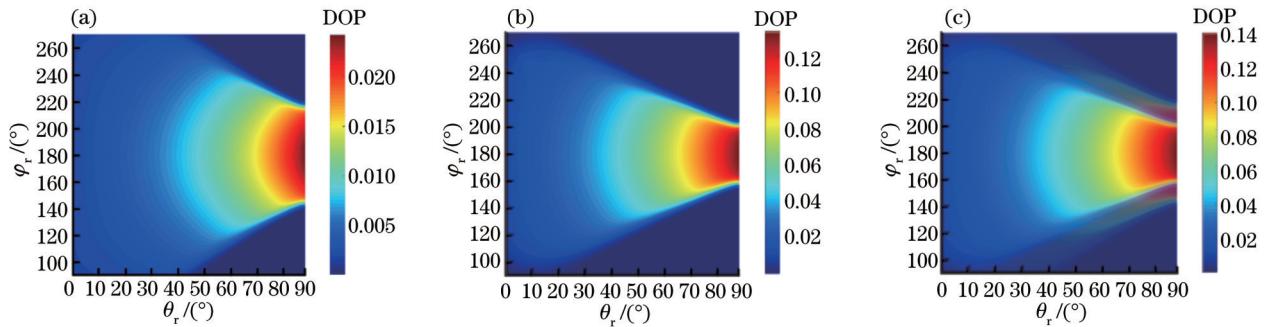


图 14 涂层光学厚度对 DOP 的影响。(a) $d_c=\lambda/8$;(b) $d_c=\lambda/4$;(c) $d_c=\lambda/2$

Fig. 14 Influence of coating optical thickness on DOP. (a) $d_c=\lambda/8$; (b) $d_c=\lambda/4$; (c) $d_c=\lambda/2$

图 13 和图 14 分别描述了不同 d_c 下涂有清漆的铝表面在上半球空间内反射光的 S_0 和 DOP 分布情况。分析图 13 可得:不同 d_c 下 S_0 均关于 $\varphi_r=180^\circ$ 对称,且在 $\theta_i=\theta_r$ 处取得最大值;在 S_0 的光场分布中,随着 d_c 的增大,光斑中心强度先增大后减小, d_c 为 $\lambda/8, \lambda/2$ 的涂层光斑中心强度几乎相同, d_c 为 $\lambda/4$ 的目标涂层光斑中心强度最大。因此,大多数高反射镀膜靶材选择 d_c 为 $\lambda/4$ 的镀膜来提高靶材的反射率, d_c 偏离 $\lambda/4$ 越远,反

射强度越低。分析图 14 可得:不同 d_c 下 DOP 均关于 $\varphi_r=180^\circ$ 对称,且在天顶位置 ($\theta_r=90^\circ, \varphi_r=180^\circ$) 取得最大值;在 DOP 的光场分布中,随着 d_c 的增大,DOP 的光斑分布范围减小,光斑中心强度增大,峰值增大。因此,光反射偏振特性受 d_c 的影响,在 $d_c=\lambda/4$ 附近,反射光 S_0 取得峰值,且随着 d_c 的增大,DOP 的峰值增大,偏振现象也变得更加明显。

5 结 论

为了研究涂层表面光反射偏振特性,本文提出了一种双层粗糙表面PBRDF建模方法。该方法对光在涂层-基底构成的双层表面中传播的物理过程进行模拟和角度求解,基于微面元理论、偏振光线跟踪技术、蒙特卡罗统计方法逐步完成了涂层表面PBRDF的构建。利用实测数据、文献参考模型和本文模型进行对比验证。实验结果表明,本文方法所建立的涂层表面PBRDF正确,且相较于对比参考文献中模型的计算结果,本文PBRDF计算结果与成像椭偏仪实测数据的吻合度更高,精度更高。本文获得了入射角、表面粗糙度、基底材质及涂层光学厚度对涂层表面光反射偏振特性的影响规律:光反射偏振现象的明显程度与入射角、涂层表面粗糙度、基底材质 η/k 、光学厚度成正比。因此,上述影响因素越大,反射光的偏振现象越明显。以上规律可为涂层表面目标偏振特征的识别与提取提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] 崔洪芝, 姜迪. 高熵合金涂层研究进展[J]. 金属学报, 2022, 58(1): 17-27.
Cui H Z, Jiang D. Research progress of high-entropy alloy coatings[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58(1): 17-27.
- [2] 丰玉强, 杜泽旭, 胡正飞. 镍含量对激光熔覆镍钛合金涂层组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2022, 49(8): 0802022.
Feng Y Q, Du Z X, Hu Z F. Influence of Ni content on microstructure and properties of NiTi alloy coatings fabricated by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(8): 0802022.
- [3] 李桂花, 冶银平, 马彦军, 等. 聚酰胺酰亚胺/聚四氟乙烯复合涂层的制备及其摩擦学性能和耐腐蚀性能[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(4): 455-466.
Li G H, Ye Y P, Ma Y J, et al. Preparation of polyamideimide/polytetrafluoroethylene composite coatings and its tribological and anti-corrosion properties [J]. Tribology, 2021, 41(4): 455-466.
- [4] 蔡玉栋, 韩平丽, 刘飞, 等. 基于光场偏振特性的目标表面漫反射分量获取技术[J]. 物理学报, 2020, 69(23): 234201.
Cai Y D, Han P L, Liu F, et al. Polarization-based extracting diffuse reflection from light-field of object surface[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(23): 234201.
- [5] 祝振敏, 裴爽, 陈世明, 等. 基于偏振信息的强反射工件高光去除及视觉测量方法[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1112005.
Zhu Z M, Pei S, Chen S M, et al. Highlight removal of high reflectivity workpiece and vision measurement based on polarization information[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1112005.
- [6] 王维, 王杰, 黄易杨, 等. 基于偏振透射结构光的透明物体表面缺陷检测方法[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 1812002.
Wang W, Wang J, Huang Y Y, et al. Surface defect detection in transparent objects using polarized transmission structured light[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1812002.
- [7] 张焱, 张景华, 石志广, 等. 光滑物体表面反射光偏振特征分析及反射光分离技术[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(6): 135-144.
Zhang Y, Zhang J H, Shi Z G, et al. Analysis of polarization characteristics of reflected lights on smooth object surface and separation of reflected lights[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(6): 135-144.
- [8] 汪方斌, 伊龙, 王峰, 等. 基于漫反射优化的金属表面偏振双向反射分布函数[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1129002.
Wang F B, Yi L, Wang F, et al. Polarization bidirectional reflection distribution function of metal surfaces based on diffuse reflection optimization[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1129002.
- [9] 章延隽, 王霞, 贺思. 基于偏振双向反射分布函数的粗糙表面偏振特性[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0329002.
Zhang Y J, Wang X, He S. Polarization properties of rough surfaces based on polarized bi-directional reflectance distribution function[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0329002.
- [10] Liu H, Zhu J P, Wang K. Modified polarized geometrical attenuation model for bidirectional reflection distribution function based on random surface microfacet theory[J]. Optics Express, 2015, 23(17): 22788-22799.
- [11] 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): 0126002.
Yang M, Fang Y H, Wu J, 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): 0126002.
- [12] Yang M, Xu W B, Sun Z Y, et al. Degree of polarization modeling based on modified microfacet pBRDF model for material surface[J]. Optics Communications, 2019, 453: 124390.
- [13] 张颖, 宋平, 赵慧洁. 一种适用于涂层的双高斯偏振BRDF模型[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(11): 1117002.
Zhang Y, Song P, Zhao H J. Double-Gauss polarimetric BRDF model of painted surfaces[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(11): 1117002.
- [14] Yang M, Xu W B, Li J W, et al. Measurement and modeling of polarized reflectance factor on rough coating materials using a goniometer instrument[J]. Optik, 2019, 182: 766-773.
- [15] 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): 205-215.
Wang K, Liu H, Zhang X X. Study on polarized reflection characteristics of space object thermal control coatings[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(12): 205-215.
- [16] Wang K, Liu H, Zhong W J, et al. An estimation for complex index of refraction based on active polarized

- reflection measurement[J]. Optics Communications, 2021, 497: 127170.
- [17] Zhang Y, Zhang Y, Zhao H J, et al. Improved atmospheric effects elimination method for pBRDF models of painted surfaces[J]. Optics Express, 2017, 25(14): 16458-16475.
- [18] Liu H, Zhu J P, Wang K, et al. Polarized BRDF for coatings based on three-component assumption[J]. Optics Communications, 2017, 384: 118-124.
- [19] Zhan H Y, Voelz D G, Cho S Y, et al. Complex index of refraction estimation from degree of polarization with diffuse scattering consideration[J]. Applied Optics, 2015, 54(33): 9889-9895.
- [20] 陈伟力, 李军伟, 孙仲秋, 等. 典型卫星表面材料可见光偏振特性分析[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1026001.
- Chen W L, Li J W, Sun Z Q, et al. Analysis of visible polarization characteristics of typical satellite surface materials[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1026001.