

激光与光电子学进展

基于遮蔽函数修正的金属表面自发辐射偏振模型

朱达荣^{1,2,3}, 胡子粮^{1,2}, 汪方斌^{1,2,3*}, 金蓄^{1,2}, 何峰^{1,2}¹安徽建筑大学机械与电气工程学院, 安徽 合肥 230601;²安徽建筑大学建筑机械故障诊断与预警重点实验室, 安徽 合肥 230601;³安徽省工程机械智能制造重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 由于表面微细结构的随机分布, 实际使用的金属在光反射或热辐射时存在明显的遮蔽阴影效应。现有的双向反射分布函数模型采用分段型几何衰减因子进行表征, 难以获得较高的精度。首先, 分析了金属表面相邻微面元倾角差异对入射光与出射光产生的遮蔽与阴影效应。然后, 基于微面元倾斜角与光线的几何关系对现有积分型遮蔽函数进行修正, 用柯西分布表征金属表面微面元的分布, 并提出了一种基于遮蔽函数修正的金属表面自发辐射偏振模型。最后, 通过实验获取不同金属材料在加热条件下的自发辐射偏振度, 以验证修正模型的效果。结果表明, 相比现有模型, 基于遮蔽函数修正的自发辐射模型仿真结果与实验测量数据更吻合。

关键词 物理光学; 金属表面; 红外; 偏振; 自发辐射; 遮蔽函数

中图分类号 S973.1+3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1326002

Spontaneous Emission Polarization Model of Metal Surface Based on Masking Function Modification

Zhu Darong^{1,2,3}, Hu Ziliang^{1,2}, Wang Fangbin^{1,2,3*}, Jin Xu^{1,2}, He feng^{1,2}¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China;²Key Laboratory of Construction Machinery Fault Diagnosis and Early Warning, Technology, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China;³Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Construction Machinery in Anhui Province, Hefei 230031, Anhui, China

Abstract Due to the random distribution of micro-structure on the surface, the actual metal has obvious masking effect in light reflection or thermal radiation. The existing bidirectional reflection distribution function model using piecewise geometric attenuation factor is difficult to obtain high characterization accuracy. In this paper, first, the masking and shadowing effect of the inclination difference of adjacent micro-facet on the metal surface of the incident and outgoing light are analyzed. Then, the existing integral masking function is modified based on the geometric relationship between the inclination angle of micro-facet and light, the distribution of micro-facet on the metal surface is characterized by the Cauchy distribution, and a polarization model of spontaneous emission on the metal surface based on the masking function modification is proposed. Finally, the polarization degree of spontaneous emission of different metal materials under heating conditions is obtained through experiments to verify the effect of the modified model. The results show that the spontaneous emission model based on the masking function modification is more consistent with the experimental data than the existing model.

Key words physical optics; metal surface; infrared; polarization; spontaneous emission; masking function

1 引言

红外偏振探测技术是一种新型且有效的目标探测

技术, 在目标物体识别^[1]、海面场景探测^[2]等方面应用广泛。21世纪初, 人们便开始研究物体的红外偏振特性, 国外学者大多以分析目标的理化特性为基础展开

收稿日期: 2021-12-22; 修回日期: 2022-01-22; 录用日期: 2022-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(61871002)、安徽省自然科学基金(2008085UD09, 1808085ME125)、安徽省教育厅高校自然科学重点项目(KJ2020A0487, KJ2019A0795)

通信作者: *wangfb@ahjzu.edu

研究^[3-4],国内学者则大多以双向反射函数为基础展开研究,从而识别目标与背景的偏振成像差异^[5-6]。

金属是一种常见的工业材料,被广泛应用于各种设备和器件上,研究表明,表面物理与几何特征是影响金属自发辐射偏振特性的重要因素。Wolff等^[7]将粗糙表面热辐射理解为大量光滑符合高斯分布微面元自发辐射的组合,通过T-S(Torrance-Sparrow)模型表征粗糙度及几何特征变化对金属表面自发辐射偏振特性的影响,并给出了粗糙金属表面偏振特性与表面特性参数之间的关系,但该模型采用分段式遮蔽函数(几何衰减函数)表征相邻微面元的遮蔽阴影效应。分段式遮蔽函数是Blinn^[8]以相邻微面元呈等腰V型为前提推导得出,没有考虑金属表面相邻微面元起伏高度不同引起的差异。吴振森等^[9]将粗糙表面起伏高度和斜率分布推广到一般情况的非高斯分布,并通过引入平面微观几何模型,即取微观法线平面投影,对双向反射分布函数(BRDF)进行简化和数学统计建模,提出了BRDF的五参量经验模型,该模型适用于工程应用领域,但没有考虑金属浅表层自由电子与进入浅表层的光碰撞后返回空气中产生的散射。Wang等^[10]假设金属表面的反射为镜面反射、定向漫反射和理想漫反射,并提出了一种三分量的偏振BRDF模型,提高了模型精度,但该模型的理想漫反射分量没有考虑入射与出射角度的影响,表征过于简单。刘宏等^[11]考虑了不同相邻微面元倾斜角度对几何衰减效应的影响,提出了一种积分型遮蔽函数的BRDF模型,但该模型采用高斯微面元倾角分布,不能很好地描述非镜面广角反射情形,且未推导至偏振化形式。

上述大部分模型认为粗糙物体表面空间反射特性近似满足理想朗伯体(入射能量在所有方向都均匀反射)和镜面反射的叠加^[12],因此,采用高斯函数表征微面元倾角的分布。实际上,当观测方向远离镜面反射方向时,柯西分布能更好地描述非镜面广角反射^[13]。因此,本文基于金属表面微细结构形貌分析,考虑了相邻微面元高度不同引起的遮蔽阴影效应,利用柯西分布表征微面元倾角分布,并借助微面元理论,提出了一种基于遮蔽函数修正的金属表面自发辐射偏振模型,然后通过实验对模型修正效果进行了验证。

2 粗糙金属表面的遮蔽函数修正

受铸造、挤压、冲压、切削等加工工艺的影响,实际使用的金属表面并非完全光滑的平面,表面微观结构呈凹凸不平的特性,通过三维轮廓仪获取的金属表面三维形貌如图1所示。可以发现,金属表面有许多波峰或波谷形成的微细结构。当光线入射到金属表面时,可能受到入射侧相邻波峰的遮挡而产生阴影(阴影效应),反射光线出射时也可能被相邻波峰遮蔽(遮蔽效应),导致出射光线的能量损失,统称为遮蔽阴影效应或几何衰减效应。

考虑到金属表面微细结构在微米量级且具有随机

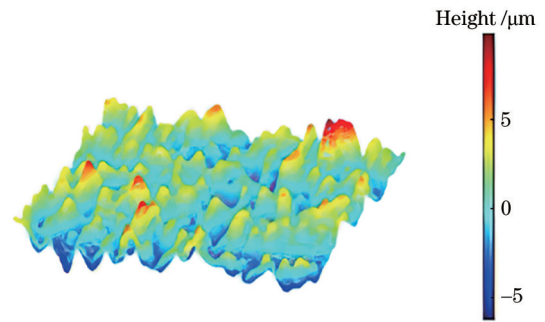


图1 金属表面的三维形貌图

Fig. 1 Three-dimensional morphology of the metal surface

分布特征,通常在表征材料散射与反射光学特性时,利用微面元理论建立BRDF模型描述粗糙表面的光学几何关系^[14],如图2所示。其中, α 为理想光滑表面法线 z 与微面元表面法线 n 的夹角, θ_i 、 φ_i 分别为入射光的入射角、方位角, θ_r 、 φ_r 分别为反射光的出射角、方位角, β 为入射方向与微面元表面法线 n 之间的夹角。

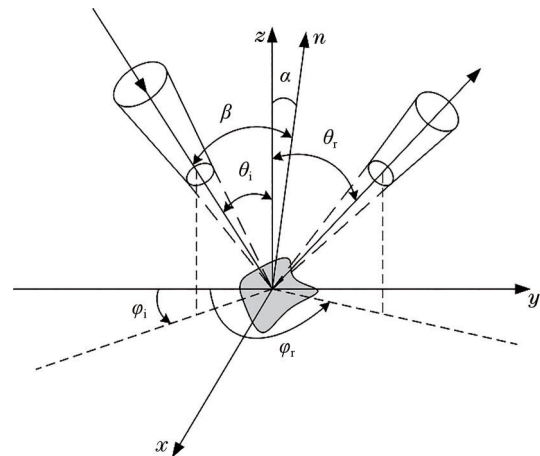


图2 微面元的几何示意图

Fig. 2 Geometric schematic diagram of the micro-facet

BRDF模型在反映入射光经过金属表面作用后出射时大部分采用Blinn几何衰减因子描述微细结构产生的遮蔽阴影效应,并假定相邻微面元之间呈等腰V型结构^[11],如图3所示。

基于图3中V型结构的几何关系,Blinn^[8]利用分段函数给出的几何衰减因子为

$$G(\theta_i, \theta_r) = \min\left(1; \frac{\cos \alpha \cos \theta_r}{\cos \beta}; \frac{\cos \alpha \cos \theta_i}{\cos \beta}\right). \quad (1)$$

由式(1)可以发现,Blinn几何衰减因子只是简单地通过分段函数表示粗糙表面的几何衰减效应,没有考虑金属表面微细结构相邻起伏高度随机分布的实际情况。实际金属表面可能存在左边微面元起伏高度小于、等于或大于右边微面元三种情况。因此,根据微面元倾斜角与入射、出射光线的几何关系将遮蔽阴影效应分为完全通过、完全遮蔽/阴影、半通过半遮蔽/阴影三种情况^[11]。遮蔽效应下的三种模型如图4所示。

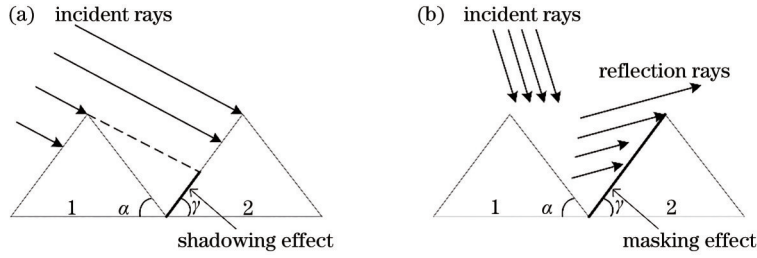


图 3 Blinn 模型的遮蔽和阴影效应。(a) 阴影效应; (b) 遮蔽效应

Fig. 3 Masking and shadowing effects of the Blinn model. (a) Shadowing effect; (b) masking effect

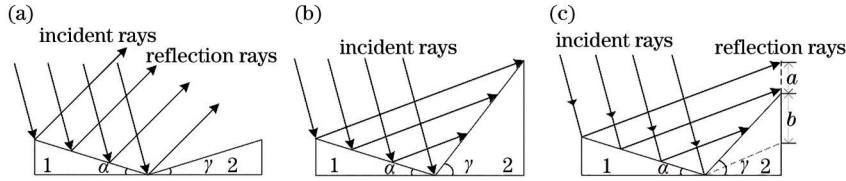


图 4 遮蔽效应下的三种模型。(a) 完全通过模型; (b) 完全遮蔽模型; (c) 半遮蔽半通过模型

Fig. 4 Three models under masking effect (a) Complete passing model; (b) complete masking model; (c) semi-masking and semi-passing model

在入射角和反射角确定的情况下,由几何关系可知,反射面的倾斜角度 $\alpha = (\theta_r - \theta_i) / 2$ 。研究表明,当观测角在镜面反射角附近时,利用柯西函数或高斯函数描述反射面倾角分布的 BRDF 模型具有相近的拟合效果;当观测角远离镜面反射角时,BRDF 模型利用柯西函数表征反射面倾角比高斯函数的拟合效果更好^[12]。考虑到实际金属表面微细结构高度起伏不定,采用柯西分布表征微面元反射面的倾角分布,可表示为

$$P(\sigma, q) = \frac{(q-1)(\sqrt{2}\sigma)^{2q-2}}{\pi \cos^3 \alpha (\tan^2 \alpha + 2\sigma^2)^q}, \quad (2)$$

式中, q 为散射包容性, σ 为金属表面粗糙度的斜度方差。在遮蔽效应作用下,反射光通过的概率应为完全通过、完全遮蔽、半通过半遮蔽三种情况通过的概率之

和,则遮蔽衰减因子可表示为

$$G_1(\theta_i, \theta_r) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2} - \theta_i} 1 \cdot P(\sigma, q) d\gamma + \int_{\pi - 2\theta_r + \alpha}^{\frac{\pi}{2}} 0 \cdot P(\sigma, q) d\gamma + \int_{\frac{\pi}{2} - \theta_i}^{\pi - 2\theta_r + \alpha} \frac{a}{a+b} \cdot P(\sigma, q) d\gamma, \quad (3)$$

式中, a 和 b 为图 4 中对应标线的长度, α 和 γ 为微面元的倾斜角度, $a, b, \alpha, \gamma, \theta_r$ 各参量之间满足

$$\frac{a}{a+b} = \frac{\sin \alpha \tan \theta_r + \cos \alpha + \cos \gamma - \sin \gamma \tan \theta_r}{\cos \alpha + \sin \alpha \tan \theta_r}. \quad (4)$$

阴影效应的三种情况可类比于遮蔽效应,如图 5 所示。

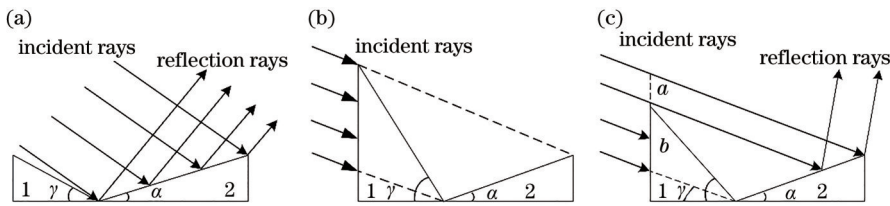


图 5 阴影效应下的三种模型。(a) 完全通过模型; (b) 完全阴影模型; (c) 半阴影半通过模型

Fig. 5 Three models under shadowing effect (a) Complete passing model; (b) complete shadowing model; (c) semi-shadowing semi-passing model

入射光通过的概率为三种情况概率之和,即阴影衰减因子

$$G_2(\theta_i, \theta_r) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2} - \theta_i} 1 \cdot P(\sigma, q) d\gamma + \int_{\pi - 2\theta_r + \alpha}^{\frac{\pi}{2}} 0 \cdot P(\sigma, q) d\gamma + \int_{\frac{\pi}{2} - \theta_i}^{\pi - 2\theta_r + \alpha} \frac{a}{a+b} \cdot P(\sigma, q) d\gamma, \quad (5)$$

其中, $a, b, \alpha, \gamma, \theta_i$ 各参量之间满足

$$\frac{a}{a+b} = \frac{\cos \alpha \cot \theta_i + \cos \gamma \cot \theta_i + \sin \alpha - \sin \gamma}{\cos \alpha \cot \theta_i + \sin \alpha}. \quad (6)$$

通过上述分析可以发现,遮蔽效应一般在反射角较大的情况下出现,阴影效应在入射角较大的情况下出现,且计算时入射角和反射角的取值相互独立,遮蔽

效应和阴影效应也相互独立^[11]。此外,无论遮蔽效应还是阴影效应都会对反射能量产生衰减。总衰减因子应取遮蔽/阴影因子的最小值,可表示为

$$G \min(\theta_i, \theta_r) = \min(G_1, G_2). \quad (7)$$

3 粗糙金属表面的自发辐射偏振模型

金属表面散射包含镜面反射、漫反射和体散射三部分^[13]。镜面反射是入射光入射到金属表面的微面元被一次反射出来形成的,包含金属表面出射光的大部分偏振信息;体散射是入射光入射到金属表面后,由于粗糙金属表面存在微细结构分布,出射光线在不同微面元之间多次无规则反射形成的,不具有偏振特性;漫反射是入射光进入金属浅表层,光子与金属浅表层的电子发生碰撞后,被反弹回空气中形成的,也不具有偏振特性。镜面反射部分^[13]可表示为

$$F_s(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{P(\sigma, q)}{4 \cos \alpha \cos \theta_i \cos \theta_r} G(\theta_i, \theta_r), \quad (8)$$

式中, λ 为入射光波长, $G(\theta_i, \theta_r)$ 为分段式几何衰减函数。采用修正几何衰减函数建立的镜面反射分量可表示为

$$F_s(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{(q-1)(\sqrt{2}\sigma)^{(2q-2)}}{(\tan^2\alpha + 2\sigma^2)^q 4\pi \cos \theta_i \cos \theta_r \cos^4\alpha} G \min(\theta_i, \theta_r), \quad (9)$$

$$F_{i,j} = k_s \frac{(q-1)(\sqrt{2}\sigma)^{(2q-2)}}{(\tan^2\alpha + 2\sigma^2)^q 4\pi \cos \theta_i \cos \theta_r \cos^4\alpha} G \min(\theta_i, \theta_r) \cdot \mathbf{M}_{i,j}^s + k_d \frac{(\cos \theta_i \cos \theta_r)^k}{\pi} \cdot \mathbf{M}_{i,j}^d + k_v \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \exp\left(\frac{-\theta_r^2}{2\sigma_v^2}\right) \cdot \mathbf{M}_{i,j}^v, \quad (13)$$

式中, k_s, k_d, k_v 为镜面反射、漫反射和体散射系数, i, j 为 Mueller 矩阵系数, 取值范围为 0~3, $\mathbf{M}_{i,j}^s, \mathbf{M}_{i,j}^d, \mathbf{M}_{i,j}^v$ 分别为镜面反射、漫反射和体散射 Mueller 矩阵, 镜面反射 Mueller 矩阵中的元素可通过菲涅耳反射定律求得。漫反射和体散射不具有偏振特性, 故其 Mueller 矩阵中的第一个元素为 1, 其余元素皆为 0。

入射光在物体表面会产生吸收、反射和透射, 根据能量守恒定律可知三分量的和为 1。对于不透明金属而言, 其透射率 $\tau = 0$, 则

$$\alpha_a(\lambda, T, \theta) + \rho(\lambda, T, \theta) = 1, \quad (14)$$

式中, α_a 为金属的吸收率, ρ 为金属反射率, θ 为观测角, T 为温度。根据基尔霍夫定律和发射率的定义可知, 物体在同一温度下光谱发射率 ϵ 与吸收率 α_a 是相同的, 则金属的发射率可表示为

$$\epsilon = \alpha_a = 1 - \rho. \quad (15)$$

对 BRDF 在半球空间内积分可得方向半球反射率, 将其推广到偏振形式, 得到方向半球的发射率 ϵ_{DE} 为

其中, $\alpha, \beta, \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r$ 各参量之间满足

$$\begin{cases} \cos \alpha = \frac{\cos \theta_i + \cos \theta_r}{2 \cos \beta} \\ \cos(2\beta) = \cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\varphi_r - \varphi_i) \end{cases}. \quad (10)$$

对于漫反射部分, Minnaert 模型能够很好地模拟漫反射强度随角度的变化情况且符合互易性原理^[15]。因此, 采用 Minnaert 模型表征金属表面漫反射成分^[16], 可表示为

$$F_d(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{(\cos \theta_i \cos \theta_r)^k}{\pi}, \quad (11)$$

式中, k 为待定系数, 取值范围为 (-1, 0)。

材料粗糙表面体散射形成的反射光在空间分布并不均匀, 其大小与反射角相关, 服从正态分布^[13], 则体散射分量可表示为

$$F_v = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \exp\left(\frac{-\theta_r^2}{2\sigma_v^2}\right), \quad (12)$$

式中, σ_v 为待定系数。

式(9)、式(11)、式(12)适用于标量 BRDF 模型, 为表征光线出射后的偏振特性, 还需利用 Mueller 矩阵表征出射光与入射光之间的偏振传输关系。Mueller 矩阵是一组 4×4 的系数矩阵, 修正后的偏振双向反射分布函数(pBRDF)模型可表示为

$$\epsilon_{DE}(\theta_i, \lambda) = \mathbf{1} - \boldsymbol{\rho}_{DHR}(\theta_i, \lambda) = 1 - \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \mathbf{F}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \sin \theta_r \cos \theta_r d\theta_r d\varphi_r, \quad (16)$$

式中, $\boldsymbol{\rho}_{DHR}$ 为方向半球反射率, 物体发射率 ϵ_{sur} 与理想黑体发射率 ϵ_{bb} 满足

$$\epsilon_{sur}(\theta_i, \lambda) = \epsilon_{DE} \cdot \epsilon_{bb}. \quad (17)$$

理想黑体辐射不具有偏振性, 其斯托克斯矢量 $\epsilon_{bb} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 由式(16)进一步推导得到红外辐射率斯托克斯矢量

$$\epsilon_{sur}(\theta_i, \lambda) = \begin{bmatrix} 1 - \iint_{\Omega_r} F_{00}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r \\ - \iint_{\Omega_r} F_{10}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r \\ - \iint_{\Omega_r} F_{20}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r \\ - \iint_{\Omega_r} F_{30}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r \end{bmatrix}. \quad (18)$$

目标自发辐射的斯托克斯矢量 $S = \epsilon_{\text{surf}} I_{\text{obj}}$, 其中, I_{obj} 为目标的辐射强度, 则目标表面的自发辐射斯托克斯矢量为

$$S = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \epsilon_{\text{surf}} I_{\text{obj}} = \begin{pmatrix} I_{\text{obj}} - I_{\text{obj}} \iint_{\Omega_r} F_{00} \cos \theta_r d\Omega_r \\ -I_{\text{obj}} \iint_{\Omega_r} F_{10} \cos \theta_r d\Omega_r \\ -I_{\text{obj}} \iint_{\Omega_r} F_{20} \cos \theta_r d\Omega_r \\ -I_{\text{obj}} \iint_{\Omega_r} F_{30} \cos \theta_r d\Omega_r \end{pmatrix} \quad (19)$$

忽略圆偏振分量^[17]后得到

$$S = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{\text{obj}} - I_{\text{obj}} \iint_{\Omega_r} F_{00} \cos \theta_r d\Omega_r \\ -I_{\text{obj}} \iint_{\Omega_r} F_{10} \cos \theta_r d\Omega_r \\ -I_{\text{obj}} \iint_{\Omega_r} F_{20} \cos \theta_r d\Omega_r \end{pmatrix} \quad (20)$$

目标表面自发辐射偏振度 D_{DoP} 可表示为

$$D_{\text{DoP}} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (21)$$

4 实验验证

为了验证基于遮蔽函数修正的金属表面自发辐射偏振模型拟合效果, 选用 2 块不同粗糙度的 45 号钢以

及铜、铝各 1 块试样作为实验材料, 通过 VR-3000 型三维轮廓仪测得 2 块不同粗糙度的 45 号钢以及铜、铝表面的粗糙度分别为 $0.4 \mu\text{m}$ 、 $0.67 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $0.56 \mu\text{m}$; 然后用 PolarCamera-IR-640 型热红外偏振相机获取目标自发辐射热成像, 利用上位机对获取的数据进行处理, 实验原理图如图 6 所示。为减少外界环境杂散光对实验结果的影响, 实验均在暗室内进行。

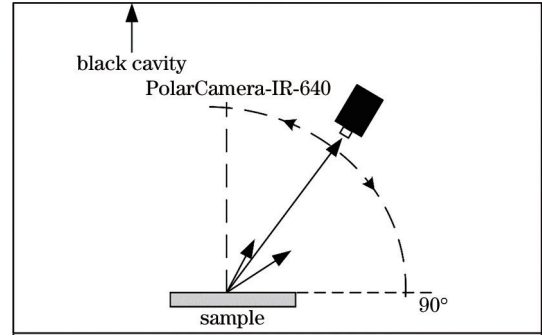


图 6 实验测量装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the experimental measuring device

实验过程中, 将试样加热到 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 并保持恒温后, 通过热红外偏振相机采集不同发射角下试样的热红外偏振图像。为了减少误差, 对每个角度采集 5 张图像并取其平均值作为该角度的测量值。利用获取的偏振度 (DoP) 分别对 Blinn 遮蔽函数和修正遮蔽函数建立的金属自发辐射偏振度模型进行仿真, 结果如图 7 所示。可

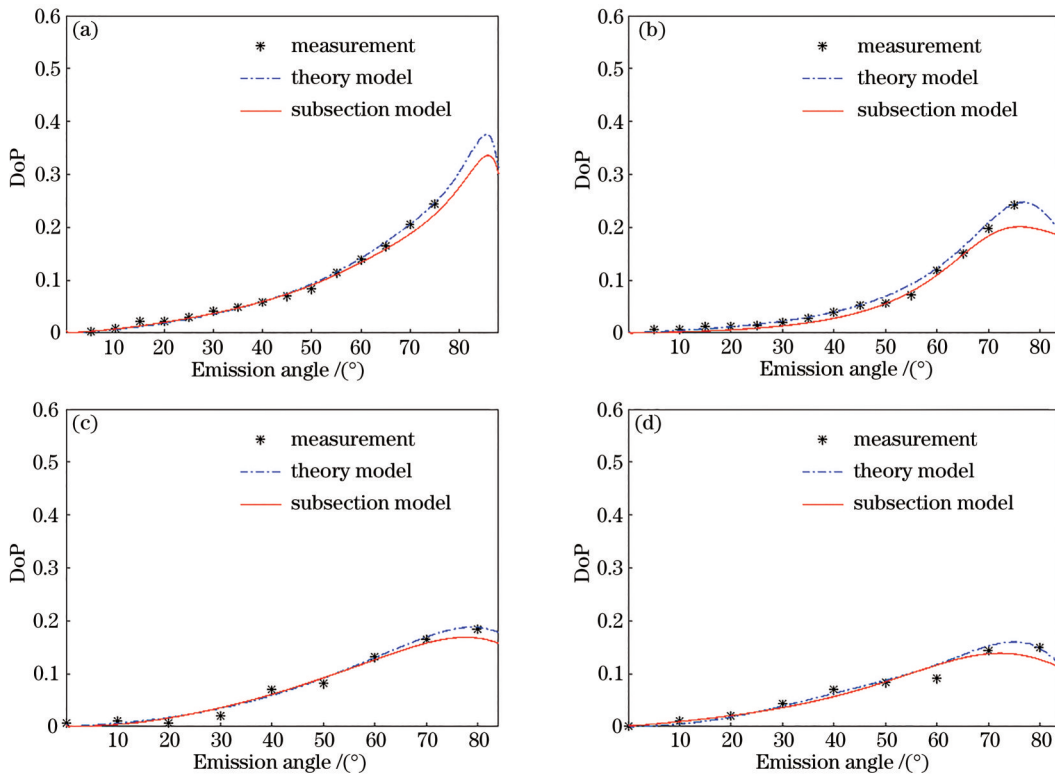


图 7 不同材料 DoP 的测量与仿真结果。(a) 粗糙度为 $0.40 \mu\text{m}$ 的钢; (b) 粗糙度为 $0.67 \mu\text{m}$ 的钢; (c) 铜; (d) 铝

Fig. 7 Measured and simulated results of DoP for different materials. (a) Steel with a roughness of $0.40 \mu\text{m}$; (b) steel with a roughness of $0.67 \mu\text{m}$; (c) copper; (d) aluminum

以发现,随着发射角度的增大,金属表面的偏振度逐渐增大。基于遮蔽函数修正的金属自发辐射偏振度模型仿真值与实测结果的吻合度更高。原因是金属表面微细结构存在很多起伏高度不同的凸起和凹陷,使其相邻微面元之间的几何衰减效应存在差异,采用柯西分布修正的积分型遮蔽函数可以表征金属表面不同微细结构下的几何衰减效应以及大发射角度下的情形。

5 结 论

受加工切割等工艺的影响,金属表面并不是完全光滑的理想表面,具有一定随机分布的微细结构,存在明显的遮蔽阴影效应。由于金属表面微面元不同起伏高度下的遮蔽阴影效应不同,分段式几何衰减函数不能完全反映金属不同微面元倾角情况下的遮蔽阴影效应。因此,对现有积分型遮蔽函数进行修正,并基于修正后的遮蔽函数建立金属表面自发辐射偏振模型。实验结果表明,相比现有模型,本模型的拟合结果与实验数据的吻合度更高,更适合表征粗糙金属表面的自发辐射偏振特性。

参 考 文 献

- [1] Björkert S, Renhorn I G E. Efficient polarimetric BRDF transformations[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9820: 98200D.
- [2] 韩平丽, 刘飞, 魏雅喆, 等. 用于海面目标探测的中波红外实时偏振成像系统研究[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(6): 746-752, 760.
Han P L, Liu F, Wei Y Z, et al. Real-time mid-infrared polarization imaging system design for marine targets detection[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(6): 746-752, 760.
- [3] Cremer F, de Jong W, Schutte K. Infrared polarization measurements of surface and buried antipersonnel landmines[C]//Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VI. SPIE, 2001, 4394: 164-175.
- [4] Nee T W, Nee S M F. Infrared polarization signatures for targets[J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2469: 231-241.
- [5] 柳祎, 史浩东, 姜会林, 等. 粗糙目标表面红外偏振特性研究[J]. 中国光学, 2020, 13(3): 459-471.
Liu Y, Shi H D, Jiang H L, et al. Infrared polarization properties of targets with rough surface[J]. Chinese Optics, 2020, 13(3): 459-471.
- [6] 张景华, 张焱, 石志广. 基于长波红外的海面场景偏振特性分析与建模[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(5): 586-594.
Zhang J H, Zhang Y, Shi Z G. Study and modeling of infrared polarization characteristics based on sea scene in long wave band[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(5): 586-594.
- [7] Wolff L B, Lundberg A, Tang R. Image understanding from thermal emission polarization[C]//Proceedings of 1998 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 25, 1998, Santa Barbara, CA, USA. New York: IEEE Press, 1998: 625-631.
- [8] Blinn J F. Models of light reflection for computer synthesized pictures[C]//Proceedings of the 4th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques-SIGGRAPH '77, July 20-22, 1977. San Jose, California. New York: ACM Press, 1977: 192-198.
- [9] 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.
Wu Z S, Xie D H, Xie P H, et al. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(8): 897-901.
- [10] Wang K, Zhu J P, Liu H. Degree of polarization based on the three-component pBRDF model for metallic materials[J]. Chinese Physics B, 2017, 26(2): 024210.
- [11] 刘宏, 朱京平, 王凯. 基于随机表面微面元理论的二向反射分布函数几何衰减因子修正[J]. 物理学报, 2015, 64(18): 184213.
Liu H, Zhu J P, Wang K. Modification of geometrical attenuation factor of bidirectional reflection distribution function based on random surface microfacet theory[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(18): 184213.
- [12] 杨博文, 马王杰慧, 刘彦磊, 等. 紫铜粗糙表面的光谱双向反射分布函数测量研究[J]. 中国光学, 2019, 12(6): 1385-1394.
Yang B W, Ma W J H, Liu Y L, et al. A study on the spectral BRDF measurement of red copper rough surfaces [J]. Chinese Optics, 2019, 12(6): 1385-1394.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 一种实用型粗糙面六参数双向反射分布函数模型[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0229001.
Yang Y F, Wu Z S, Cao Y H. Practical six-parameter bidirectional reflectance distribution function model for rough surface[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0229001.
- [16] Minnaert M. The reciprocity principle in lunar photometry [J]. The Astrophysical Journal Letters, 1941, 93: 403-410.
- [17] 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.