

doi:10.3788/gzxb20154403.1329002

# 基于表面生成法的粗糙基底上半透明涂层的光散射特性

吕奕,高隽,王玲妹,王驰

(合肥工业大学 计算机与信息学院 图像信息处理研究室,合肥 230009)

**摘要:**针对光在半透明涂层和粗糙基底构成的两层粗糙面的散射过程,采用表面生成法,考虑入射遮蔽以及多次散射效应,构建表面散射的蒙特卡罗模型,得到粗糙基底上半透明涂层的反射光的能量分布,研究涂层厚度、表面粗糙度、入射光波长等对双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)的影响.结果表明, BRDF 受表面的粗糙程度影响较大,其峰值随表面均方根斜率的增加线性递减;半透明涂层厚度影响 BRDF 峰值的大小,厚度为十分之一波长时, BRDF 达最小值;近红外光入射时镜反射方向附近 BRDF 的局部分布曲线相对于可见光入射时有展宽趋势,且方向半球反射率相对于可见光入射时更大.

**关键词:** 散射特性;粗糙基底;半透明涂层;双向反射分布函数;蒙特卡罗;表面生成法

中图分类号:O435

文献标识码:A

文章编号:1004-421(2015)03-1329002-7

## Light Scattering Properties of Semitransparent Coatings on Rough Substrate Based on Surface Generation Method

LÜ Yi, GAO Jun, WANG Ling-mei, WANG Chi

(Laboratory of Image Information Processing, School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** For the scattering process of light through the two rough surfaces consisted of semitransparent coatings and rough substrate, considering the shading effect and multiple scattering, Monte Carlo model of surface scattering was established based on surface generation method. The reflected light distribution of the semitransparent coatings on rough substrate was obtained. The effects of coatings thickness, surface roughness and incident light wavelength on Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) were studied. Simulation results show that BRDF is largely affected by surface roughness, and the reflection peak decreases linearly with the root-mean-square slope of the surface. The semitransparent coatings thickness changes the value of BRDF. When the thickness is equal to one-tenth of the wavelength, BRDF reaches the minimum value. The local distribution of BRDF in the specular reflection direction with near-infrared light illumination tends to broaden up in comparison with visible light illumination, and the directional hemispherical reflectance with near-infrared light illumination is also larger.

**Key words:** Scattering properties; Rough substrate; Semitransparent coatings; Bidirectional reflectance distribution function; Monte Carlo; Surface generation method

**OCIS Codes:** 290.5880; 160.3900; 290.1483; 080.0080

## 0 引言

随着航空航天技术的发展,空中目标飞行器种类逐渐增多,为了使其适应特殊的生存环境,以及改变目

标的反射辐射特性,需要对目标表面进行涂层处理,因此,研究含有涂层的实际表面材质在科学研究领域具有重要意义,如目标的探测与识别<sup>[1-2]</sup>、半导体工业<sup>[3]</sup>以及光学工程<sup>[4]</sup>等.

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 61271121)资助

**第一作者:**吕奕(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为粗糙面光散射以及偏振建模. Email: ylvstyle@gmail.com

**导师:**高隽(1963-),男,教授,博士,主要研究方向为偏振光导航和偏振信息获取. Email: gaojun@hfut.edu.cn

**通讯作者:**王玲妹(1984-),女,讲师,博士,主要研究方向为智能信息处理. Email: wanglingmei@hfut.edu.cn

**收稿日期:**2014-08-25; **录用日期:**2014-10-20

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

长期以来,国内外学者对粗糙表面的光散射特性进行了广泛的研究,主要的算法有时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)<sup>[5]</sup>、微扰法(Small Perturbation Method, SPM)<sup>[6]</sup>、基尔霍夫近似(Kirchhoff Approximation, KA)<sup>[7]</sup>、几何光学近似(Geometric Optics Approximation, GOA)<sup>[8-9]</sup>,前三种算法都是对表面散射场的麦克斯韦方程组直接进行求解,但是散射场的解析解很难得到,而几何光学近似是数值近似求解,采用蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)方法,直接模拟光束在表面的辐射传输过程,实践证明,MC方法能够得到与实验方法相吻合的结果,且其优点是能够处理具有任意形貌结构表面的光散射问题,也能对入射光为低频和高频时的问题进行求解。

近年来,许多学者采用几何光学近似对粗糙表面的辐射特性进行了研究. Kakuen 等<sup>[10]</sup>采用表面生成法(Surface Generation Method, SGM),对一维不透明粗糙表面,与电磁理论近似解比较,验证了 SGM 的有效范围;2003年, P. Schott 等<sup>[11]</sup>利用 MC 方法研究了理想导体的反射特性;2005年, H. J. Lee 等<sup>[12]</sup>提出微面元斜率法(Microfacet Slope Method, MSM)计算粗糙表面的硅基片的折射和反射;夏新林等<sup>[13]</sup>对表面光滑、基底面漫反射的半透明介质层,采用 MC 方法,分析了介质吸收对表面反射特性的影响;2013年, B. J. Zhang 和 C. Y. Zhao<sup>[14]</sup>提出了包含干涉效应的光线追踪法,计算了不同均方根斜率的理想导体的双向反射分布函数;2012年陈学等<sup>[15]</sup>应用微面元斜率法研究了光滑镜反射基底上半透明介质层的光散射特性。

在实际情况下,目标表面都是不同程度的粗糙表面,文献<sup>[16]</sup>中的实验结果表明不同基底结构的表面的双向反射分布函数差异很大. 对粗糙基底上半透明涂层的光散射进行分析,关注空中飞行器的主要材质铝金属表面,从几何光学角度出发,采用表面生成法,考虑入射遮蔽以及多次散射效应,分析了铝金属基底上粗糙表面半透明涂层的光散射特性。

## 1 粗糙基底上半透明涂层的蒙特卡罗模型

为了构建粗糙基底上半透明涂层的蒙特卡罗模型,本文考虑如图 1 所示的光散射几何示意图,轮廓  $\sum_1 = f(x)$  是半透明涂层与粗糙基底的界面,轮廓  $\sum_2 = h + \Sigma_1$  是空气与半透明涂层的界面. 本文假定半透明涂层表面完全复现基底的形貌特征,  $h$  为涂层的厚度,空气的折射率  $n = 1$ ,涂层的折射率为  $n_i$ ,粗糙基底的复折射率为  $n_s + ik_s$ .

研究粗糙表面光散射特性的几何光学近似方法,包括表面生成法<sup>[10-11]</sup>和微面元斜率法<sup>[12]</sup>,其中,微面

元斜率法引入经验的遮蔽函数,对于每次入射光线,产生一个微面,通过遮蔽函数估计微面遮蔽概率,但未能根据表面的总体轮廓状况进行遮蔽效应和多次散射效应的处理. 表面生成法,则首先产生服从特定分布的表面轮廓,然后在入射方向上发射大量光线,根据表面的实际状况,将在微面上受到一次或多次反射,最后离开表面或者被表面吸收<sup>[17]</sup>.

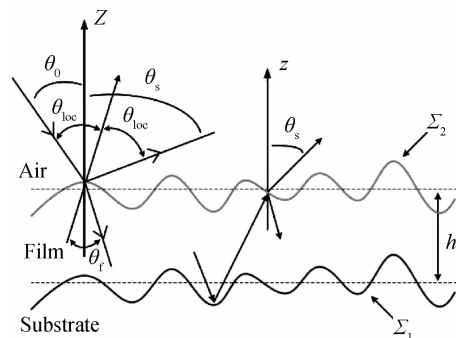


图 1 两层粗糙面光散射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of scattering between two rough surfaces

本文采用表面生成法,首先模拟生成一维高斯表面,然后对表面的多次散射进行分析,最后建立含有半透明涂层的粗糙表面的蒙特卡罗模型,通过对大量光线“行为”的跟踪,并进行统计得到粗糙基底上半透明涂层目标表面的散射能量分布。

### 1.1 一维高斯表面

为了研究实际目标表面的光散射特性,需要对表面结构建模,利用表面生成法,事先产生一个确定的表面轮廓。

通常,可以结合均方根粗糙度  $\sigma$  和相关长度  $\tau$  描述粗糙表面,研究表明,实际结构表面的高度分布多数服从高斯分布<sup>[18]</sup>,因此,仿真实验的表面为一维高斯表面,其函数表达式为  $z = f(x)$ 。

高斯表面上相邻点的相关函数表示为

$$\rho(s) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{s^2}{\tau^2}\right) \quad (1)$$

式中  $s$  为表面上相邻两点的水平距离,  $\tau$  为相关长度. 对高斯相关函数进行傅里叶变换得到高斯谱密度函数,即<sup>[19]</sup>

$$W(k) = \frac{\sigma^2 \tau}{2\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{k^2 \tau^2}{4}\right) \quad (2)$$

长度为  $L$  的表面由式(3)计算

$$f(x_n) = \frac{1}{L} \sum_{j=-N/2}^{N/2-1} F(k_j) \exp(ik_j x_n) \quad (3)$$

式中  $x_n = n\Delta x (1 \leq n \leq N)$  是表面上离散采样点,相邻间隔为  $\Delta x$ ,对  $j \geq 0$

$$F(k_j) = \sqrt{2\pi L W(k_j)} \cdot$$

$$\begin{cases} (N(0,1) + iN(0,1))/\sqrt{2}, j \neq 0, N/2 \\ N(0,1), j = 0, N/2 \end{cases} \quad (4)$$

对于  $j < 0$ , 有  $F(k_j) = F(k_{-j})^*$ ,  $k_j = 2\pi j/L$ ,  $N(0,1)$  表示均值为 0, 方差为 1 的标准正态分布的随机数. 根据式(3), 利用快速傅里叶变换法<sup>[20]</sup> 生成一维高斯表面.

## 1.2 表面的多次散射

光束投射到目标表面上, 会受到“凹凸不平”的各微面的多次反射, 这些微面改变光束的传播方向, 利用几何光学近似, 从微观角度分析目标表面的多次散射过程. 图 2 为多次散射几何示意图, 图(b) 是图(a) 局部表面放大后的示意图, 其中黑色实心点为一阶反射点, 根据等步长选取, 即相邻点的水平距离相等,  $z$  轴定义为表面平均法向量, 虚线表示任一点处的局部法向量.

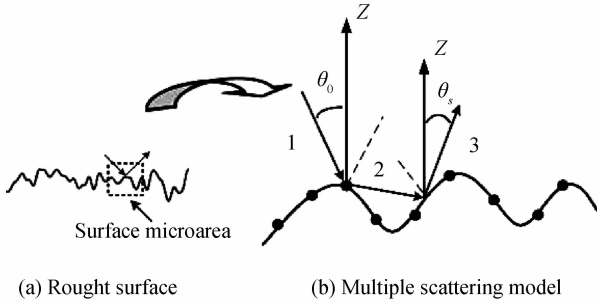


图 2 表面的多次散射几何示意

Fig. 2 Illustration of multiple scattering geometry

图 2 中 1 为入射光线, 3 为出射光线, 入射角为  $\theta_0$  (约定从左边入射时  $\theta_0$  取正), 方向矢量为  $\mathbf{k}_0$ , 利用不等式

$$\text{atan}(\Delta f/\Delta x) > (\pi/2 - \theta_0) \quad (5)$$

判断入射光线的遮蔽情况, 式中,  $\Delta f$ 、 $\Delta x$  分别为表面上任一点与一阶反射点的垂直距离和水平距离. 若该不等式不成立, 表明一阶反射点未被遮挡, 与表面作用后, 产生反射光线, 如图(b) 中光线 2, 反射方向为

$$\mathbf{k}_r = \mathbf{k}_0 - 2(\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} \quad (6)$$

式中  $\mathbf{n}$  为反射点的局部法向量, 反射率通过菲涅尔定律计算, 即

$$R_s = \left( \frac{\cos \theta - \sqrt{(n+ik)^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{(n+ik)^2 - \sin^2 \theta}} \right)^2 \quad (7)$$

$$R_p = \left( \frac{(n+ik)^2 \cos \theta - \sqrt{(n+ik)^2 - \sin^2 \theta}}{(n+ik)^2 \cos \theta + \sqrt{(n+ik)^2 - \sin^2 \theta}} \right)^2$$

式中,  $n+ik$  为目标表面的复折射率,  $\theta$  为局部入射角,  $R_s$  和  $R_p$  分别为 s 偏振光和 p 偏振光的反射率. 若不等式成立, 表明入射光线被微面遮挡, 该一阶反射点对总反射光没有贡献, 因此, 选择相邻的一阶反射点进行下一次模拟; 然后, 沿着  $\mathbf{k}_r$  方向跟踪一次反射光线, 若表面阻挡了光线的传播, 如图 2(b) 中的光线 2, 则认为发生二次反射, 计算二次反射后光线的方向和能量, 继续跟踪光线, 直到光线被表面吸收或者经多次反射后离开表面. 如图 2(b) 中的光线 3, 经二次反射后, 以反射角  $\theta_s$  离开表面; 再选择其他的一阶反射点, 与前述方法类似, 进行光线的入射遮蔽以及反射过程模拟.

## 1.3 蒙特卡罗建模

对于含有半透明涂层的目标表面, 当入射光照射到表面时, 一部分被涂层反射, 一部分会进入半透明涂层内部, 传播到基底表面, 在基底的微面上发生镜面反射, 此时, 模拟过程需要考虑光在涂层内部的多次散射, 以及反射光的干涉效应. 本文中假定, 半透明涂层表面与基底表面的形态特征完全相同, 可知, 基底微面与垂直距离为  $h$  的涂层微面的斜率相同, 因此, 半透明涂层的作用是改变了基底表面的微面反射率, 结合薄膜光学理论, 得出反射光的振幅表达式为<sup>[21]</sup>

$$r_{\text{film}} = \frac{r_{0,f} + r_{f,s}e^{-i2\beta}}{1 + r_{0,f}r_{f,s}e^{-i2\beta}} \quad (8)$$

式中,  $r_{0,f}$  为空气与涂层界面上的菲涅尔反射系数,  $r_{f,s}$  为涂层与基底界面上的菲涅尔反射系数,  $\beta$  为光经涂层薄膜折射后的位相差, 即

$$\beta = \frac{2\pi n_f d \cos \theta_f}{\lambda} \quad (9)$$

式中  $n_f$  为涂层的折射率,  $d$  为涂层微面元的厚度,  $\theta_f$  为折射角,  $\lambda$  为光的波长. 利用式(8) 可以分别计算出目标表面的微面发生镜面反射后 s 偏振光和 p 偏振光的反射率, 取平均值即可得到自然光入射时的微面反射率.

模拟入射光在粗糙基底上半透明涂层目标表面的散射过程, 最后, 对大量光线的跟踪记录进行统计得到表面上半空间的散射能量分布. 统计上半空间  $[0, \pi]$  范围内的反射光信息, 计算双向反射分布函数的表达式为<sup>[22]</sup>

$$f_r(\Omega_0, \Omega_s) = \frac{\pi}{\cos(\theta_s)} \left( \frac{d\Phi_s}{d\Omega_s} / \frac{d\Phi_0}{d\Omega_0} \right) \quad (10)$$

式中,  $\theta_s$  为反射角,  $\Phi_0$ 、 $\Phi_s$  分别为入射光能量和反射光能量,  $\Omega_0$ 、 $\Omega_s$  分别为入射光立体角和反射光立体角.

对式(10) 在表面上半球空间积分, 得到入射角一定时的方向半球反射率 (Directional Hemispherical Reflectance, DHR), 即<sup>[22]</sup>

$$\rho_t = \frac{1}{\pi} \int_{2\pi} f_r(\Omega_0, \Omega_s) \cos(\theta_s) d\Omega_s \quad (11)$$

## 2 仿真实验与结果分析

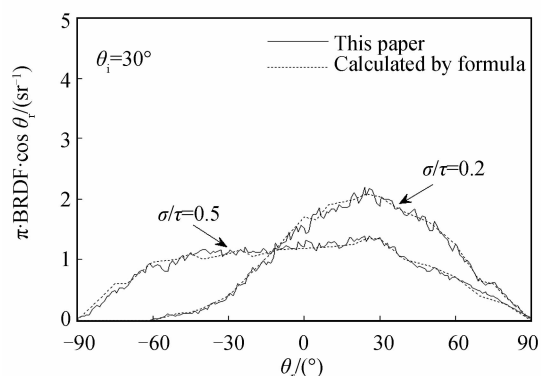
### 2.1 模型可靠性验证

为了验证本文模型的可靠性, 采用计算机仿真分别对半透明涂层厚度为 0 的理想导体的 BRDF 以及光滑硅片上半透明涂层的方向半球反射率进行计算, 实验中粗糙表面大小为  $50\lambda$ , 计算结果取 60 个表面样本的平均值, 并与文献[23] 中的结果进行对比.

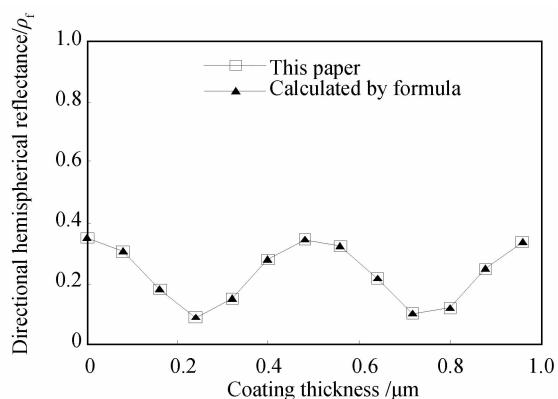
图 3(a) 为不同粗糙度的理想导体粗糙表面的 BRDF 分布, 表面均方根斜率分别为  $\sigma/\tau = 0.2$ 、 $\sigma/\tau = 0.5$ , 入射角为  $30^\circ$ , 半透明涂层厚度为 0. 由图 3 可以看出, 本文方法的仿真结果与文献[23] 中的计算结果相符, BRDF 分布形态一致, 但由于 MC 法基于统计的特性, 结果统计上存在一定的误差.

图 3(b) 为光滑硅片上半透明涂层的方向半球反射率随涂层厚度的变化曲线, 入射光波长  $\lambda = 0.632 \mu\text{m}$ , 硅片的折射率为  $3.882 + 0.019i$ , 半透明涂

层折射率  $n_i = 1.457$ , 由图 3(b) 可以看出, 本文模型计算的结果与理论值吻合的较好, 从而验证了模型的可靠性.



(a) BRDF for different surface roughness of perfect conductor



(b) DHF at different coatings thickness

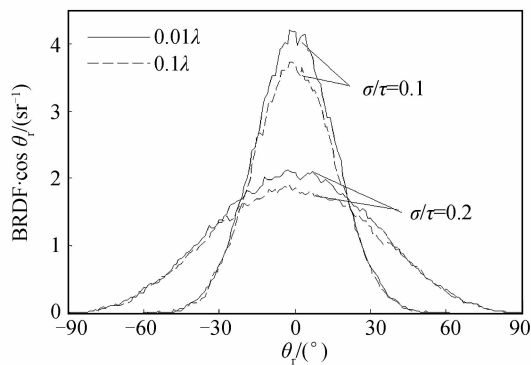
图 3 散射特性曲线对比图

Fig. 3 Comparison graphs of scattering properties

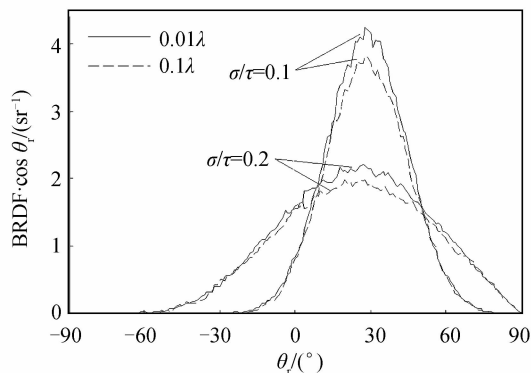
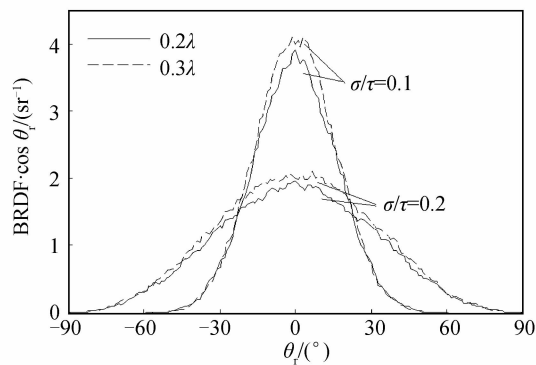
## 2.2 半透明涂层厚度对 BRDF 的影响

为了研究半透明涂层厚度对 BRDF 的影响, 设定入射波长  $\lambda = 0.632 \mu\text{m}$ , 基底为铝金属, 涂层的折射率设  $n_i = 2$ , 厚度分别取为  $0.01\lambda, 0.1\lambda, 0.2\lambda, 0.3\lambda$ . 图 4(a) 入射角为  $0^\circ$ , (b) 入射角为  $30^\circ$  时 BRDF 随散射角的变化曲线, 从图 4 曲线的起伏上来看, 不同均方根斜率表面的 BRDF 随涂层厚度的变化趋势基本一致, 表

面均方根斜率一定, 在厚度较小时 BRDF 较大, 随着厚度的增加, BRDF 先减小后增大, 但变化的幅度不大, 这是由于铝金属具有高反射特性, 一定程度上减弱了涂层厚度对 BRDF 的影响. 从图 4 可以看出, 散射光在镜反射方向存在峰值, 厚度为  $0.1\lambda$  时, 镜反射峰值最小, 增大或减小涂层厚度, 镜反射峰值都将增加.



(a) Incident angle  $\theta_i = 0^\circ$



(b) Incident angle  $\theta_i = 30^\circ$

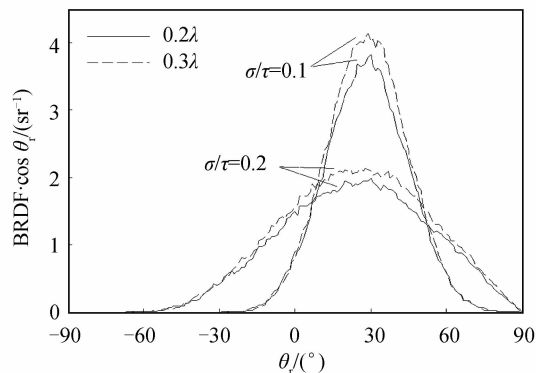


图 4 厚度对 BRDF 的影响

Fig. 4 Effects of coatings thicknesses on BRDF

### 2.3 入射角对 BRDF 的影响

研究不同入射角时 BRDF 的分布规律,图 5 为涂层厚度一定,不同入射角的 BRDF 分布曲线.从图中可以看出,BRDF 的分布形态基本一致,随着入射角的增大整体向右移动.当表面粗糙度较小时( $\sigma/\tau = 0.1$ ),入射

角增大,BRDF 峰值降低,半球反射率减小,这是由于光线进入涂层后的折射角变大,微面反射率降低,导致反射光能量减少.表面粗糙度增大( $\sigma/\tau = 0.2$ ),BRDF 分布曲线随入射角的变化规律与  $\sigma/\tau = 0.1$  情形一致,但 BRDF 峰值几乎保持不变.

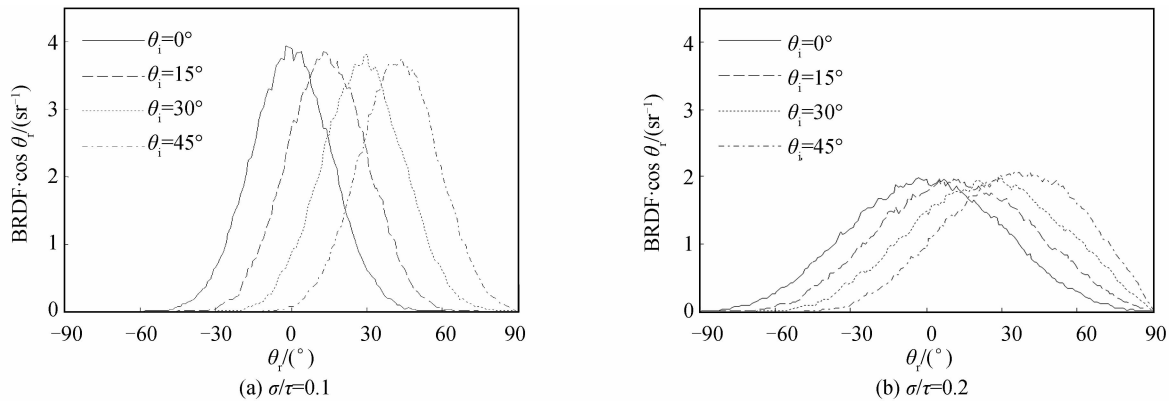


图 5 BRDF 随入射角的变化  
Fig. 5 BRDF at different incident angles

### 2.4 表面粗糙度对 BRDF 的影响

分析不同粗糙度的表面下的散射光能量分布,入射角选取为  $0^\circ$  和  $30^\circ$ ,涂层厚度  $h = 0.2\lambda$ ,结果如图 6,从图中可以看出,两种入射角下的 BRDF 变化趋势基本一致,随着粗糙程度的增加,镜反射峰值降低,漫反射分量增强,散射光在上半球空间分布范围变大.当

$\sigma/\tau = 0.05$  时,表面接近光滑,镜面反射强烈,但仍有少量漫反射光存在,这与涂层产生的折射有关;表面均方根斜率  $\sigma/\tau$  每增大一倍,BRDF 的峰值降低为原来的一半,当增大到  $\sigma/\tau = 0.5$ ,镜反射分量降到最低,且斜入射时,在  $-30^\circ$  方向存在后向反射峰值.

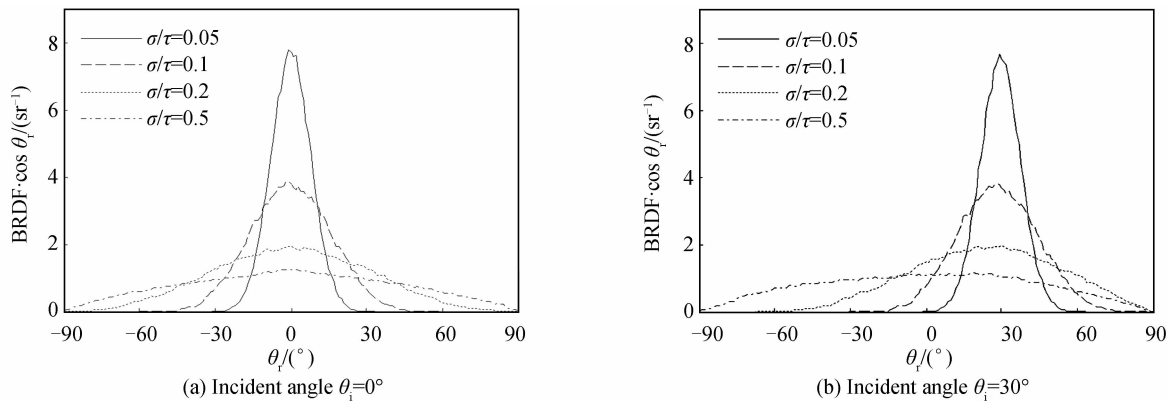


图 6 表面粗糙度对 BRDF 的影响  
Fig. 6 Effects of rms slopes on BRDF

### 2.5 入射光波长对 BRDF 的影响

为了分析不同入射光波长对反射光 BRDF 的影响,找出对于一定粗糙程度的表面,哪个波长的反射特性最强.选取了可见光和近红外的 3 种入射光,波长分别为  $0.539 \mu\text{m}$ 、 $0.632 \mu\text{m}$  和  $1 \mu\text{m}$ ,涂层厚度  $h = 0.1 \mu\text{m}$ ,表面粗糙度参数  $\sigma/\lambda = 0.2$ 、 $\tau/\lambda = 1$ ,均方根斜率为 0.2.如图 7 所示,不同波长下 BRDF 的数值变化明显,当入射光波长为  $0.632 \mu\text{m}$  时,BRDF 最小,入射

光波长为  $1 \mu\text{m}$  时,反射峰值最大,方向半球反射率也达到最大值,这是由于入射光不同,基底的折射率发生变化,导致基底的微面反射率变化.不同入射光波长下的 BRDF 在镜反射方向附近的分布形态差异较大,当入射光为近红外光时,BRDF 分布曲线在镜反射方向附近是由镜反射角处向两侧扩展,曲线变宽,当入射光为可见光时,BRDF 曲线在镜反射方向附近的变化趋势正好相反.

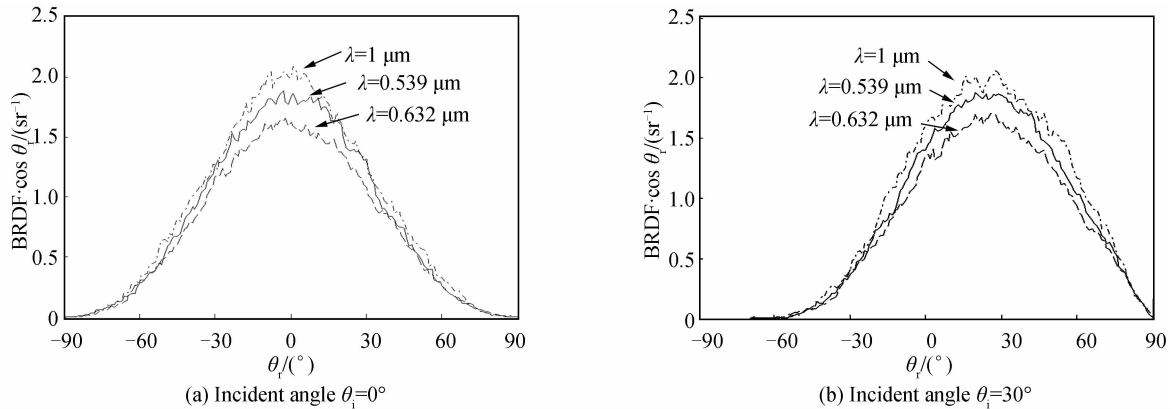


图7 不同入射光波长下的 BRDF 曲线  
Fig. 7 BRDF at different incident light

### 3 结论

基于几何光学近似,采用表面生成法,考虑散射过程中的入射遮蔽以及多次散射效应,以铝金属为例,分析了半透明涂层厚度、表面粗糙度、入射光波长对粗糙基底上半透明涂层的双向反射分布函数的影响.结果表明:半透明涂层厚度影响 BRDF 的镜反射峰值,但峰值变化的幅度较小.涂层厚度为  $0.1\lambda$  时,镜反射峰值最小,其他涂层厚度时,目标表面的反射峰值都比涂层厚度为  $0.1\lambda$  时的反射峰值大;不同入射角下,散射光能量的峰值都在镜反射位置出现,BRDF 的分布形态基本一致.但随着入射角的增大,曲线整体向右移动;随着表面均方根斜率的增大,BRDF 的峰值呈线性递减的变化规律,当增大到  $\sigma/\tau = 0.5$  时,目标表面的后向增强效应明显;不同入射光波长下的 BRDF 在镜反射方向附近的局部分布形态有较大差异,相比于可见光入射的情形,近红外时目标表面的方向半球反射率更大,具有更强的反射辐射特性.可为红外波段进行空中目标探测提供参考.

#### 参考文献

- [1] LI Ya-nan, SUN Xiao-bing, QIAO Yan-li. Waveband selection for space target detection and identification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 67-71.  
李雅男,孙晓兵,乔延利.空间目标探测与识别的波段选择[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 67-71.
- [2] HAN Yi, SUN Hua-yan. Advances in space target optical scattering character research [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(3): 758-766.  
韩意,孙华燕.空间目标光学散射特性研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(3): 758-766.
- [3] GONG Lei, WU Zhen-sen. Analysis of light scattering about slightly non-spherical nanoparticles on wafers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(1): 237-241.  
巩蕾,吴振森.基片表面微球体纳米级缺陷的光散射分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 237-241.
- [4] PAN Yong-qiang, WU Zhen-sen, HANG Ling-xia. Influence of Ag thin films on surface roughness and light scattering of optical substrate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1197-1201.

潘永强,吴振森,杭凌侠.银薄膜对光学基底表面粗糙度及光散射的影响[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1197-1201.

- [5] CHAN C H, LOU S H, TSANG L, *et al.* Electromagnetic scattering of waves by random rough surface: A finite-difference time-domain approach[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1991, **4**(9): 355-359.
- [6] GONG Lei, WU Zhen-sen. Different films influence on polarized light scattering of slightly rough substrate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 251-255.  
巩蕾,吴振森.不同涂层对微粗糙基底的极化光散射影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 251-255.
- [7] KE Xi-zheng, GUO Li-xin, WU Zhen-sen. A study of backscattering enhancement of one dimension random surface by using monte-carlo method[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(4): 491-496.  
柯熙政,郭立新,吴振森.一维随机粗糙面向后增强效应的蒙特-卡罗方法研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(4): 491-496.
- [8] TORRANCE K E, SPARROW E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, **57**(9): 1105-1114.
- [9] NAYAR S K, IKEUCHI K, KANADE T. Surface reflection: physical and geometrical perspectives[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(7): 611-634.
- [10] TANG K, DIMENNA R A, BUCKIUS R O. Regions of validity of the geometric optics approximation for angular scattering from very rough surfaces[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1996, **40**(1): 49-59.
- [11] SCHOTT P, DE BEAUCOUDREY N, BOURLIER C. Reflectivity of one-dimensional rough surfaces using the ray tracing technique with multiple reflections[C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Proceedings. 2003 IEEE International. IEEE, 2003, 7: 4214-4216.*
- [12] LEE H J, LEE B J, ZHANG Z M. Modeling the radiative properties of semitransparent wafers with rough surfaces and thin-film coatings[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2005, **93**(1): 185-194.
- [13] XIA Xin-lin, REN De-peng, TAN He-ping. Effects of medium absorption and scattering on bi-directional reflection of semitransparent coatings [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, **24**(5): 361-365.  
夏新林,任德鹏,谈和平.介质吸收散射对半透明涂层表面双向反射特性的影响[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(5): 361-365.
- [14] ZHANG B J, ZHAO C Y. Geometric optics approximation

- with considering interference for reflection from random rough surface [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2013, **27**(3):458-464.
- [15] CHEN Xue, SUN Chuang, XIA Xin-lin. Spectral scattering properties analysis of semitransparent medium layer with rough surface by microfacet slope method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12):260-264.  
陈学,孙创,夏新林.基于微面斜率法的粗糙表面半透明介质层光谱散射特性分析[J].*光学学报*,2012,**32**(12):260-264.
- [16] LEE H J, ZHANG Z M. Measurement and modeling of the bidirectional reflectance of SiO<sub>2</sub> coated Si surfaces [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2006, **27**(3):820-839.
- [17] TANG K, BUCKIUS R O. The geometric optics approximation for reflection from two-dimensional random rough surfaces[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, **41**(13):2037-2047.
- [18] ZHOU Y H, ZHANG Z M. Radiative properties of semitransparent silicon wafers with rough surfaces [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2003, **125**(3):462-470.
- [19] LIANG Yu. Research on modeling and fast calculation related to electromagnetic scattering from the rough surface and composite scattering from the rough surface and target[D]. Xi'an: Xidian University, 2011:17-22.  
梁玉.粗糙面及其与目标复合电磁散射建模及快速计算研究[D].西安:西安电子科技大学,2011:17-22.
- [20] WARNICK K F, CHEW W C. Numerical simulation methods for rough surface scattering [J]. *Waves in Random Media*, 2001, **11**(1):R1-R30.
- [21] ZHU Q Z, LEE H J, ZHANG Z M. Validity of hybrid models for the bidirectional reflectance of coated rough surfaces [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2005, **19**(4):548-557.
- [22] BERGSTROM D, POWELL J, KAPLAN A F H. A ray-tracing analysis of the absorption of light by smooth and rough metal surfaces [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, **101**(11):113504/1-11.
- [23] FU K, HSU P. Modeling the radiative properties of microscale random roughness surfaces [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2007, **129**(1):71-78.