

文章编号: 1001-9014(2009)02-0119-05

# 基于粗糙度形貌数据的花岗岩表面双向反射特性研究

谢 鸣, 穆 猷, 夏新林

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 利用原子力扫描探针显微镜 (AFM) 获得了花岗岩表面粗糙度形貌数据, 分析了该实际表面的形貌特征. 在几何光学近似下, 根据该实际表面形貌数据采用 Monte Carlo 法, 并考虑表面散射过程中的入射遮蔽及多次散射效应, 模拟了实际表面的双向反射分布函数 (BRDF). 将 BRDF 模拟值与在入射波长为  $0.6328\mu\text{m}$ 、不同的入射天顶角和入射平面内条件下实验测得的 BRDF 值进行比较, 结果表明在适当的误差范围内两者符合较好.

**关键词:** 扫描; 表面形貌; Monte Carlo 法; 双向反射特性

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A

## BI-DIRECTIONAL REFLECTANCE PROPERTIES OF GRANITE SURFACE BASED ON ROUGH TOPOGRAPHIC DATA

XIE Ming, MU You, XIA Xin-Lin

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Rough topographic data of granite surface were measured by atomic force microscope (AFM), and the characteristics of this real surface were analyzed according to the topographic data. In the range of geometric optics approximation, the bi-directional reflectance distribution function (BRDF) of this real surface was modeled by Monte Carlo method based on the surface topographic data, where the shadowing effect of incidence and the multiple reflections were considered. By comparing the modeling results of BRDF with its measured results which were measured at the wavelength of  $0.6328\mu\text{m}$  and at different incidence angles, the results show that there is a reasonable agreement between them within a certain error range.

**Key words:** scan; topography; Monte Carlo method; characteristics of bi-directional reflectance

### 引言

双向反射分布函数 (BRDF) 是有效描述材料表面光散射能量在空间分布状况的物理量. 粗糙表面 BRDF 可以通过数值求解 Maxwell 方程在粗糙边界面上的散射场获得. 由于电磁场理论及方程求解的复杂性, 出现了许多近似求解方法, 如: 时域有限差分法 (FDTD)<sup>[1]</sup>, Rayleigh-Rice 微扰理论<sup>[2]</sup>, Kirchhoff 近似<sup>[3]</sup>, 几何光学近似<sup>[4]</sup>等, 这些方法虽然取得了广泛的应用, 但通常有其特定的适用范围. 当入射光波长  $\lambda$ 、入射角  $\theta_i$  及均方根粗糙度  $\sigma$  满足  $0.2 < \sigma \cos \theta_i / \lambda$ <sup>[5]</sup> 时, 可以采用几何光学近似求解. 传统的几何光学近似是在给定粗糙表面参数 (均方根  $\sigma$  和相关长度  $\tau$ ) 的情况下, 先生成满足实际参数的各向同性 Gaussian 分布随

机表面, 然后再通过 Monte Carlo 法模拟数值表面的散射<sup>[6]</sup>, 得到的结果是基于各向同性假设的, 然而实际散射并非完全如此, 文献[7, 8]指出: 表面光滑、基底漫射的半透明涂层表面散射就呈现出规律的各向异性. Zhu 和 Zhang<sup>[9]</sup>通过原子力扫描显微镜 (AFM) 扫描得到了实际粗糙表面形貌图, 并且将计算得到的粗糙表面统计参数代入 BRDF 解析模型求解, 研究表明实际表面粗糙度的各向异性对表面的 BRDF 分布有较大的影响; 在实际模拟中, 粗糙表面不能简单地用 Gaussian 表面假设近似, 然而由于解析模型的限制, 他们的研究只考虑了入射平面内的一阶散射, 未考虑多次散射的影响. 因此, 可以在未对实际粗糙度做任何假设的测量表面的形貌数据上引入 Monte Carlo 法, 模拟求解实际复杂表面的 BRDF.

收稿日期: 2008-05-12, 修回日期: 2008-10-05

基金项目: 国家自然科学基金 (90816022) 资助项目

作者简介: 谢 鸣 (1958-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 工学博士、教授, 主要从事红外辐射特性与传输理论和实验研究.

Received date: 2008-05-12, revised date: 2008-10-05

### 1 实际表面的形貌特征

基于 AFM 获得了实际表面的形貌数据,其结果存储于包含粗糙表面高度信息的二维数组  $z(i,j)$  中,其中  $i=1,2\cdots m,j=1,2\cdots n$  分别为沿  $x$  和  $y$  方向采样点的数目. 实际表面样品为黑色花岗岩,单面抛光,直径为  $3\text{cm}$ ,扫描区域为  $80\times 80\mu\text{m}^2$ ,沿  $x$  和  $y$  方向采样点数目均为 512,采样间距为  $\Delta d=0.1566\mu\text{m}$ . 图 1 为扫描获得的花岗岩表面微观形貌示意图,粗糙面平均高度在  $z=0$  处,均方根粗糙度  $\sigma=0.22\mu\text{m}$ .

由图 2 可见该实际表面高度分布并非完全服从 Gaussian 分布. 图 3 为该表面沿  $x$  和  $y$  方向斜率  $\zeta_x, \zeta_y$  (定义为  $\zeta_x = \partial z / \partial x, \zeta_y = \partial z / \partial y$ , 其中  $z$  为表面高度) 的分布状况,可以看出该表面沿  $x$  和  $y$  方向的斜率分布基本相同,可以判断该表面度分布呈现出各向同性,表面高度值的非 Gaussian 分布对表面状况的影响不大,大部分微元面斜率分布在  $-0.3\sim 0.3$  之间,总体分布比较平缓. 从统计观点看,射线在粗糙表面上反射后进入某有限立体角内的能量是同微元面的反射率以及具有相应法线朝向微元面的概率成比例的,由此可以预测:该表面的 BRDF 分布应该呈现出一定的各向同性,并在镜反射方向上具有较强的峰值.

### 2 物理模型及 BRDF 的测量

#### 2.1 Monte Carlo 模型描述

基于几何光学近似,可以通过解析模型或 Monte Carlo 法计算 BRDF. 解析模型限制了粗糙表面间多次反射的完整描述<sup>[5]</sup>. 而多次反射效应在统

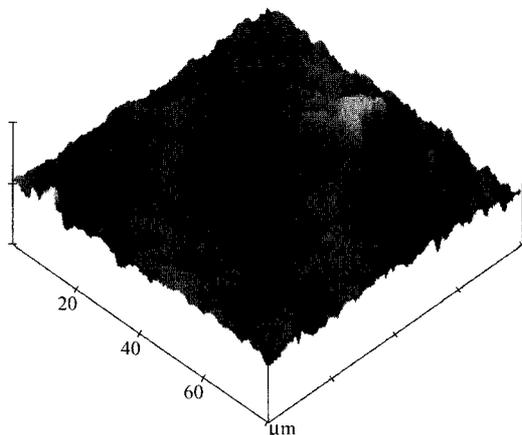


图 1 花岗岩表面微观形貌  
Fig. 1 Microcosmic topography of granite

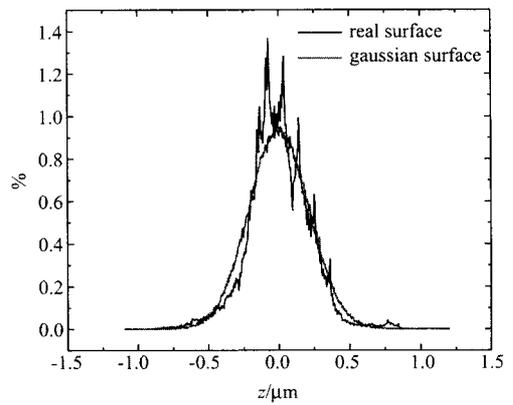


图 2 花岗岩表面粗糙度数据及相同参数下 Gaussian 随机表面数据分布  
Fig. 2 Roughness distribution of granite and random Gaussian surface

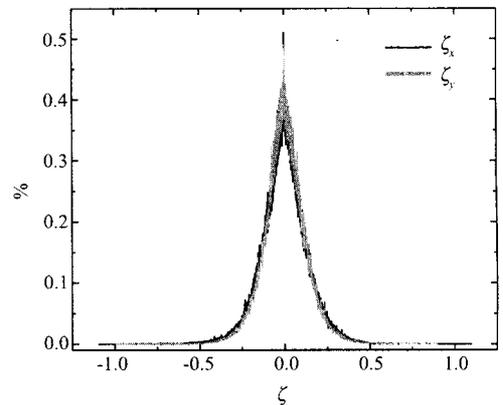


图 3 花岗岩粗糙表面的斜率分布  
Fig. 3 Slope distribution of granite surface

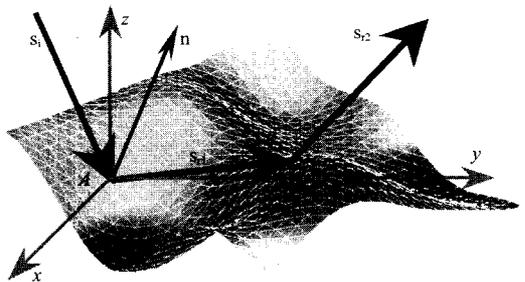


图 4 光线局部散射示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of local scattering

计大斜率粗糙表面以及大角度入射时尤为重要. 在 Monte Carlo 模型中,首先生成了满足特定粗糙度参数的随机表面,然后通过入射方向上发射大量光束,追踪每束光线在粗糙面间的作用直至光线被吸收或离开表面为止<sup>[6]</sup>,应用 Monte Carlo 法可以实现光线在粗糙表面间多次反射以及遮蔽效应的完全处理.

图 4 为光线在局部粗糙表面间反射的几何示意图, Monte Carlo 法的具体实现过程如下: 将粗糙表面形貌数据划分为图 4 所示三角形网格微元面, 一阶反射点按照网格编号在每个微元面上随机选择, 入射光线方向矢量为  $s_i$ , 光线在微元面上服从镜反射规律, 反射方向通过关系:  $s_r = s_i + 2 |s_i \cdot n| n$  确定, 其中  $n$  为该微元面法向矢量,  $s_r$  为反射方向矢量, 各微元面反射率由 Fresnel 定律通过下式计算

$$\begin{aligned} R_s &= \left( \frac{\cos\alpha - \sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}}{\cos\alpha + \sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}} \right)^2, \\ R_p &= \left( \frac{n^2 \cos\alpha - \sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}}{n^2 \cos\alpha + \sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}} \right)^2, \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $n$  为介质材料的折射率,  $\alpha$  为局部入射角,  $R_s$  和  $R_p$  分别为  $s$ -偏振和  $p$ -偏振光的反射率. 考虑每束光线携带能量为单位值, 对于单色随机偏振光, 认为  $s$ -偏振与  $p$ -偏振光能量相等, 分别计算各偏振光反射率求和即得到单色光反射率. 对于图 4 所示 A 点, 计算得到一次反射方向矢量为  $s_{r1}$ , 然后沿  $s_{r1}$  方向追踪光线, 如发现在 B 点处粗糙表面阻挡了光线的传播, 则认为反射光线在 B 点处发生二次反射, 按前述方法计算二次反射方向及反射率, 再重复该过程直至光线离开粗糙面; 如果光线穿过粗糙面边界传播出去而未发生反射, 则沿  $x$ - $y$  平面取其镜像方向; 光线在入射方向由于粗糙表面的遮挡而造成的遮蔽效应也可以通过类似的方法确定, 只不过沿着入射矢量的反方向进行光线追踪; 最后统计各个方向上的光线, 则某方向的 BRDF 可以通过下式求得

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{1}{N_i} \frac{\Delta N_r}{\cos\theta_r \Delta\omega_r}, \quad (2)$$

其中,  $\theta$  和  $\phi$  分别是标准球坐标下的天顶角和方位角, 下标  $i$  和  $r$  分别代表入射量和反射量,  $f_r$  (BRDF) 的值可在  $0 \sim \infty$  之间变化, 其量纲为球面度倒数 (即  $sr^{-1}$ ),  $N_i$  为总的入射光线数量,  $\Delta N_r$  为  $(\theta_r, \phi_r)$  方向立体角  $\Delta\omega_r$  内反射光线数量.

## 2.2 BRDF 的实验测量

该表面的 BRDF 通过自行研制的双向反射率测试系统获得<sup>[10]</sup>. 该系统由光学调试系统、机械转动系统和电路接收系统三部分组成. 测试系统光源的激光波长包括可见光的  $0.6328\mu\text{m}$ , 近红外  $1.34\mu\text{m}$ , 中红外  $3.39\mu\text{m}$  及中远红外  $10.6\mu\text{m}$  波段. 该系统采用单一对比测试法<sup>[10]</sup>, 即先进行样品表面的测量, 再测量相同几何条件下标准白板 (近似朗伯体)

数据, 通过与标准白板电压值的对比获得样品 BRDF 值, 测量误差能够控制在 12% 以内<sup>[11]</sup>.

## 3 结果与讨论

考虑到花岗岩成分以二氧化硅 (含量在 70% 以上) 为主, 故模拟中采用二氧化硅的折射率近似, 模拟结果同波长为  $0.6328\mu\text{m}$  的可见光的实验值对比,  $0.6328\mu\text{m}$  光的折射率取为  $n = 1.544$ <sup>[12]</sup>. 在 Monte Carlo 统计中, 半球空间的角分辨率  $\Delta\theta$  和  $\Delta\phi$  均取  $1^\circ$ , 整个半球空间划分为  $90 \times 360$  个微元立体角. 为获得稳定的结果, 抽样光束在  $5 \times 10^7$  以上, 结果以  $f_r \cos\theta$  形式给出, 它与反射方向上的能量成比例, 结果曲线通过取每个节点相邻 5 点的平均值以减少统计噪声.

首先以  $\theta_i = 30^\circ$ ,  $\phi_i = 0^\circ$  角度入射, 以入射平面 (入射光线与法线所在平面) 内 BRDF 为例, 考察模拟中粗糙表面采用不同网格间距以及表面尺寸对模拟结果的影响.

### 3.1 网格间距的影响

固定表面尺寸为  $80 \times 80\mu\text{m}^2$ , 通过对数组  $Z(i, j)$  每隔 2 点、4 点、8 点提取粗糙形貌数据以实现增大网格尺寸间距的目的, 对不同网格间距的粗糙度数据模拟表面散射, 结果如图 5 所示. 从图 5 中可以看出, 随着网格尺寸的增大, BRDF 分布曲线波动逐渐增大, 呈现出较大的振荡, 并且  $30^\circ$  镜反射方向上的峰值逐渐增大. 在粗糙表面尺寸固定时, 其表面网格划分的尺寸越细, 则对该表面的微观形貌的细节描述就越细致, 通过光线追踪对该表面散射的模拟就越真实, 其结果就越能够反应真实表面的散射状况; 当增加粗糙表面网格尺寸时, 就忽略了表面形貌的细节特征, 其结果就相当于对实际粗糙表面进行了低通滤波, 滤掉了高频细节, 从而使粗糙表面逐渐趋于平缓光滑, 散射的镜像特征逐渐增强, 导致  $30^\circ$  镜反射方向峰值逐渐增大; 同时又由于网格尺寸的增大, 过多表面形貌细节的漏掉, 致使表面形貌数据逐渐丧失统计上的稳定性, 而 Monte Carlo 法的模拟结果的正确性正是基于统计上的稳定性, 所以结果出现了较大的振荡, 即使通过增大光线抽样数目以及对模拟结果相邻点取平均也无法有效地消除.

### 3.2 表面尺寸的影响

固定网格间距  $\Delta d = 0.1566\mu\text{m}$ , 通过缩小数组  $Z(i, j)$  为原始值的  $1/4$ 、 $1/16$  和  $1/64$ , 以减小表面尺寸, 模拟结果如图 6 所示. 从图 6 中可以看出减小表面尺寸对 BRDF 分布的影响同前面固定表面尺寸增

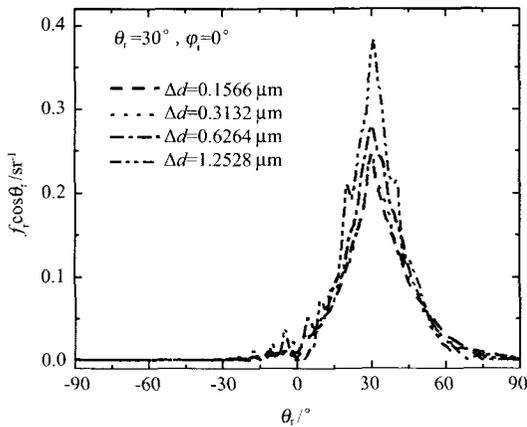


图 5 不同网格间距下的结果比较

Fig. 6 Comparison of results at different grid resolution

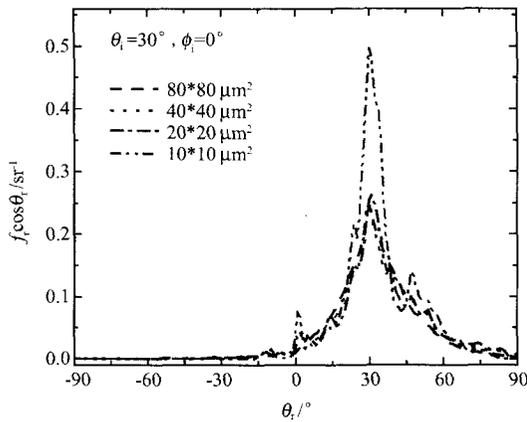


图 6 不同表面尺寸下的结果比较

Fig. 6 Comparison of results at different surface size

加网格间距的规律类似,由于表面尺寸的减小,表面形貌数据的统计稳定性逐渐丧失,模拟结果同样出现较明显的波动;但需要注意的是:图 6 中 BRDF 曲线在 30° 镜反射方向上峰值的增大具有一定的特殊性,由于实际表面并不像通常假设的那样各向同性,对某一面积较大表面的子表面而言,其各个子表面形貌的统计特征并不完全相同,可能这一个子表面较光滑,散射呈现出较明显的镜反射特征;而另一子表面较粗糙,散射呈现出明显的漫反射特征,所以不能将图 6 中镜像峰值的增大做为这种情况下的一般规律,而我们通过抽取不同子表面进行模拟的结果也证实了我们的观点,限于篇幅就没有给出具体的模拟结果.

### 3.3 实际表面散射分布

以扫描获得的原始粗糙表面形貌数据模拟了花岗岩表面的散射,下面给出在波长为 0.6328 micrometers 的可见光以不同入射天顶角入射的情况下,在不同的

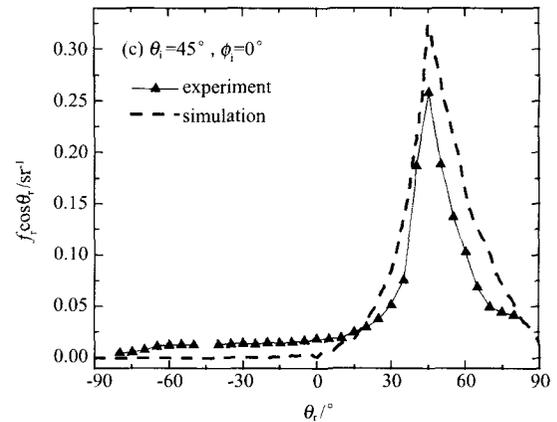
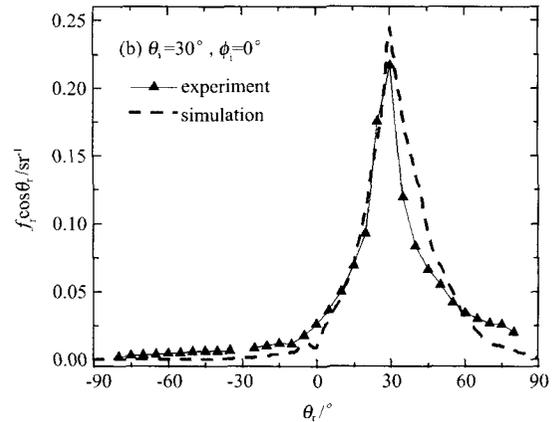
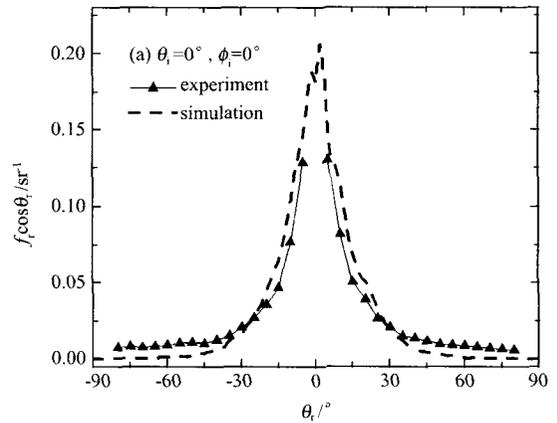


图 7 不同入射角下模拟值与实验值的比较

Fig. 7 Comparison of modeling results with experiment data at different incident angles

入射平面内模拟结果同实验结果的比较(由于入射平面内反射角 0°、-30°、-45° 分别对应着相应的激光入射方向,故这几个点上的值无法测量),结果如图 7 所示.可以看出模拟结果同实验结果的分布趋势一致,均在镜反射方向存在一相应的峰值,但实验值在镜射方向周围的 BRDF 分布比模拟值在镜射方向分布范围稍窄,并且在镜射方向周围模拟值比实验值稍微偏大,而在其他角度(后向)实验值比模拟值稍小;对较光滑表面而言,镜射方向能量较强,后

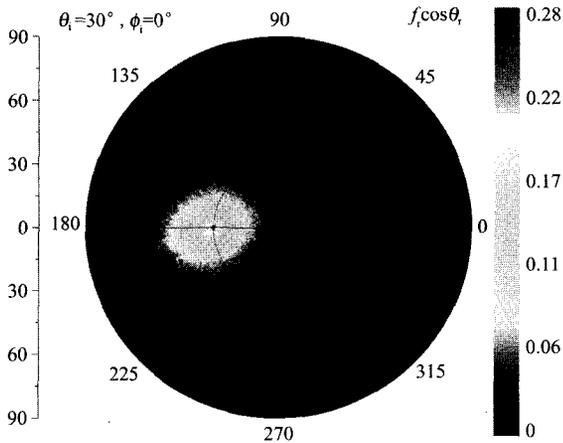


图 8  $\theta_i = 30^\circ$  下 BRDF 的空间分布等高图  
Fig. 8 Spatial contour map of BRDF at  $\theta_i = 30^\circ$

向几乎没有能量分布,而实验却有微小值,分析认为是探测器的原因.通常探测器是对某一连续波段的响应,通过适当的电路设计可以实现对实验波长的最佳响应以达到抑制杂散光的目的,但杂散光的影响无法完全消除,这导致了后向测量值的偏大;随着入射角的增大,模拟值同测量值的偏差逐渐增大,在  $\theta_i = 45^\circ$  时,可以看出模拟值同实验值有明显的偏差,推测是由于  $\sigma \cos \theta_i / \lambda$  定义的光学粗糙度减小所致,入射角的增大使  $\sigma \cos \theta_i / \lambda$  减小,从而逐步逼近几何光学近似的下限,故模拟误差增大;通过实验值同模拟值的对比及分析认为在适当的误差内两者能够较好地符合.

图 8 为在  $\theta_i = 30^\circ, \phi_i = 0^\circ$  入射下,该表面 BRDF 在球坐标系下的空间分布等高图,图中沿圆周逆时针方向和半径方向分别为  $\phi_i$  和  $\theta_i$ ,圆上每点对应着反射空间的一个点,该点的 BRDF 值通过不同的灰度表示.从图中可以看出在镜反射方向  $\theta_i = 30^\circ, \phi_i = 180^\circ$  点上对应着一个很强的峰值,以该点为中心散射能量分布值逐渐减小,同实际的散射情况相符.

#### 4 结语

基于 AFM 扫描获得了花岗岩表面的粗糙度地貌数据,对数据的分析表明实际表面粗糙度高度并非 Gaussian 分布,但其斜率分布状况表明该表面总体分布比较平缓,呈现出一定的各向同性;在几何光学近似下,引入 Monte Carlo 法,考虑散射过程中的人射遮蔽及多次反射效应,模拟了实际复杂表面散

射的 BRDF,同实验值的对比表明:在几何光学有效近似范围内,该模型能够较好地模拟实际复杂表面的散射分布.

#### REFERENCES

- [1] Fu Kang, Hsu Pei-feng. Modeling the radiative properties of microscale random roughness surfaces [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2007, **129**: 71—78.
- [2] Hastings F D, Schneider J B, Broschat S L. A Monte-Carlo FDTD technique for rough surface scattering [J]. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 1995, **43** (11): 1183—1191.
- [3] Beckmann P, Spizzichino A. *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces* [M]. Artech House, Norwood, MA, 1987.
- [4] Tang K, Dimenna R A, Buckius R O. Regions of validity of the geometric optics approximation for angular scattering from very rough surfaces [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1997, **40** (1): 49—59.
- [5] Tang K, Buckius R O. A statistical model of wave scattering from random rough surfaces [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2001, **44** (21): 4059—4073.
- [6] Tang K, Buckius R O. The geometric optics approximation for reflection from two-dimensional random rough surfaces [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1998, **41** (13): 2037—2047.
- [7] JIANG Li-Wen, WANG Lin-Jun, LIU Jian-Min, et al. Optical properties of nano-crystalline diamond films [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (蒋丽雯, 王林军, 刘健敏, 等. 纳米金刚石薄膜的光学性能研究. *红外与毫米波学报*), 2006, **25** (3): 195—198.
- [8] XIA Xin-Lin, REN De-Peng, TAN He-Ping. Effects of medium absorption and scattering on bi-directional reflection of semitransparent coatings [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (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. *红外与毫米波学报*), 2005, **24** (5): 361—365.
- [9] Zhu Qun-zhi, Zhang Zuo-ming. Anisotropic slope distribution and bidirectional reflectance of a rough silicon surface [J]. *J. Heat Transfer*, 2004, **126**: 985—993.
- [10] QI Chao, YANG Mao-Hua, DAI Jing-Min. Technique for bi-directional reflectance distribution function (BRDF) measurements from visible to infrared [J]. *Chinese Optics Letters* (齐超, 杨茂华, 戴景民. 从可见光到红外线双向反射率测量技术. *中国激光*), 2003, **30** (4): 134—136.
- [11] ZHAO Zhong-Yi, DAI Jing-Min, LI Ying. Error analysis and calibration of BRDF measure system [J]. *Infrared Technology* (赵忠义, 戴景民, 李颖. 双向反射分布函数测量系统的误差分析与标定. *红外技术*), 2007, **29** (10): 579—583.
- [12] Palik E D. *Handbook of Optical Constants of Solids* [M]. Orlando, Florida, Academic Press, 1985.