

加工表面双向反射分布函数的测量与建模

史卫朝^{**}, 郑建明^{*}, 李言, 李旭波, 安倩楠

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 提出了一种基于同轴光显微成像的加工表面双向反射分布函数(BRDF)测量方法,采用激光共聚焦显微镜获得了不同粗糙度样块表面的 BRDF 测量值。测量结果表明,样块表面 BRDF 会随着粗糙度及微观形貌变化,该测量方法能够获得不同微面元的 BRDF 测量值。建立了 BRDF 参数模型,采用遗传算法对测量数据进行处理,确定了最优模型参数。将模型计算结果与测量结果进行了误差分析,最大相对均方根误差为 9.97%。结果表明,建立的 BRDF 模型具有可行性,能准确地描述加工表面反射信息。

关键词 散射; 双向反射分布函数; 加工表面; 同轴光显微成像; BRDF 模型

中图分类号 O436.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1029001

Measurement and Modeling of Bidirectional Reflectance Distribution Function on Cutting Surface

Shi Weichao^{**}, Zheng Jianming^{*}, Li Yan, Li Xubo, An Qiannan

School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract A measurement method of bidirectional reflectance distribution function (BRDF) on the cutting surface is proposed based on the coaxial optical microscopic imaging. The BRDF measurement values on sample surfaces with different roughnesses are obtained by using the laser confocal microscopy. The measurement results show that, the BRDF on the sample surface varies with the roughness and the micro-topography, and this measurement method can obtain the BRDF measurement value on different microfacets. The BRDF parameter model is built and the optimal model parameters are obtained when the measurement data are processed by the genetic algorithm. The error analysis between the model calculation results and the measurement results is carried out and the maximum relative mean square root error is 9.97%. The results show that the established BRDF model is feasible and can accurately describe the reflection characteristics on the cutting surfaces.

Key words scattering; bidirectional reflectance distribution function; cutting surface; coaxial optical microscopic imaging; BRDF model

OCIS codes 290.1483; 290.5820; 290.5880

1 引 言

双向反射分布函数(BRDF)将一个给定方向的人射辐照度与其在另一个特定方向的反射辐射率联系起来描述物体表面定向反射特性,被广泛应用于光学遥感^[1]、物体检测识别^[2]、环境监控^[3]等领域^[4-6]。近年来,研究者们利用 BRDF 对加工表面进行三维重构,实现表面粗糙度的在线非接触测量。目前,国内外主要通过测量材料宏观表面得到双向反射分布函数,测量过程中需改变入射、反射光束方

位角和天顶角,采用光谱辐射计或数码相机获取宏观表面的光学反射信息^[7-9],但大多数测量设备结构复杂,天顶角的测量范围被限制在 $0^\circ \sim 65^\circ$ 范围内^[10],导致测量效率低,无法获得较多的反射信息。此外,现有的 BRDF 测量和建模大都集中在未加工金属材料表面上^[11-12],对切削加工表面的研究还比较少。本文根据微面元理论,结合材料表面各微面元反射辐射率存在差异性的特点,利用微面元反射辐射率对应的图像亮度获得更多光学反射信息,提出了基于同轴光显微成像的加工表面 BRDF 测量

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-04-13; 录用日期: 2018-05-08

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究项目(2015JM5205)

* E-mail: zjm@xaut.edu.cn; ** E-mail: shiweichao@xaut.edu.cn

方法,采用激光共聚焦显微镜分别测量了表面粗糙度 $R_a=3.2, 1.6, 0.8 \mu\text{m}$ 的车削和平铣粗糙度样块的表面微观形貌及其图像亮度,数据处理得到了 BRDF 值及 BRDF 与表面粗糙度和微观形貌间的关系。根据样块表面 BRDF 测量数据,建立了 BRDF 参数模型,并采用遗传算法确定了最优模型参数,通过对比模型计算结果和测量结果,验证了 BRDF 参数模型的可靠性。利用加工表面 BRDF 模型,不仅可以得到同一加工条件下相同粗糙度表面的 BRDF 分布,还可以得到同一表面上任意微面元的 BRDF 值,能描述加工表面更多的反射信息。

2 加工表面 BRDF 测量

2.1 测量原理

BRDF 用于描述物体表面的光谱和空间反射特性^[13-14],如图 1 所示,物体表面反射方向 (θ_r, φ_r) 小立体角 $d\omega_r$ 内的反射辐射率 $dL_r(\theta_r, \varphi_r)$ 与入射方向 (θ_i, φ_i) 小立体角 $d\omega_i$ 内入射辐照度 $dE_i(\theta_i, \varphi_i)$ 的比值即为 BRDF:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)}, \quad (1)$$

式中 θ 和 φ 分别为天顶角和方位角,下标 i 和 r 分别代表入射和反射。

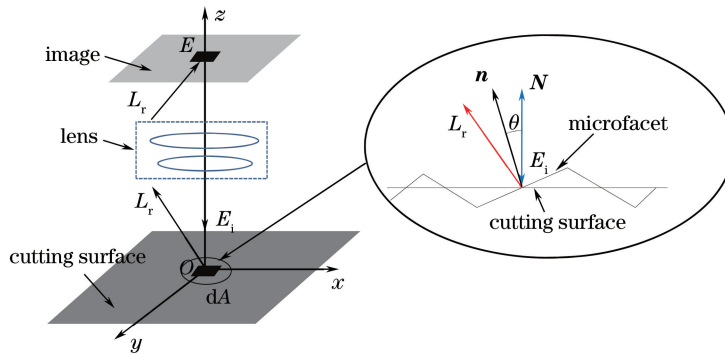


图 2 同轴光微面元反射及成像原理

Fig. 2 Microfacet reflection and imaging principle under coaxial light

由于微面元反射辐射率 L_r 与其对应图像亮度 E 之间存在密切关系^[15],即

$$E = L_r \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f}\right)^2 \cos^4 \alpha, \quad (3)$$

式中 E 为图像辐照度,可考虑为图像亮度; d 为透镜的直径; f 为透镜的焦距; α 为微面元与对应图像的连线和光轴之间的夹角。因此,微面元反射辐射率与其对应的图像亮度之间存在正比关系,即

$$L_r = \eta E. \quad (4)$$

样块表面的 BRDF 可通过微面元反射辐射率

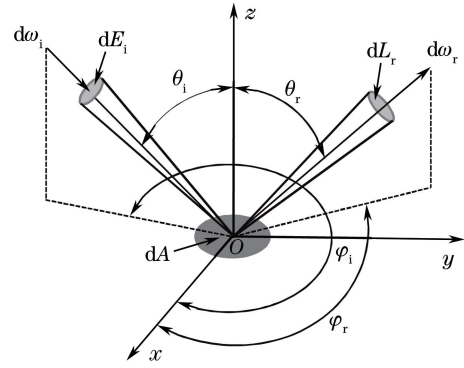


图 1 光线反射几何关系

Fig. 1 Geometric relationship of light reflection

在同轴光源下,光束入射角和反射角非常小,因此可假设入射光为平行光,与成像光轴及观察方向平行。光在材料表面微面元的反射及成像原理如图 2 所示。入射光垂直照射在单位微面元 dA 上, N 为加工表面法向方向, n 为等分入射方向与反射方向夹角的单位矢量,表示微面元法向方向。 θ 为入射光方向与微面元法向方向之间的夹角,即微面元法线偏角,可表达微面元形貌。 L_i 为加工表面的入射辐射率, $dA \cdot \cos \theta$ 为微面元 dA 在入射光方向上的投影面积, E_i 为 $dA \cdot \cos \theta$ 面积内的辐照度,则

$$E_i = L_i \cdot dA \cdot \cos \theta. \quad (2)$$

L_r 与入射辐照度 E_i 的比值得到^[15],即

$$f_r = \frac{L_r}{E_i} = \frac{\eta E}{L_i \cdot dA \cdot \cos \theta}, \quad (5)$$

式中图像像素点亮度 E 和入射辐射率 L_i 均可通过测量装置得到。根据矢量夹角知识可知,样块表面上任意微面元的法向方向可表示为 $(z_x, z_y, -1)$,由于入射光为平行光,可采用向量 $(0, 0, 1)$ 表示入射光方向,则微面元法向偏角

$$\theta = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{1 + z_x^2 + z_y^2}}\right), \quad (6)$$

式中 z_x 和 z_y 分别表示表面任意点的高度在 X 和 Y 方向的梯度, 可通过微面元形貌数据计算得到, 采用共聚焦显微镜可测量样块表面微面元形貌。

2.2 测量方案

样块表面 BRDF 测量方案如图 3 所示, 样块放置在工作台上, 工作台可沿 X、Y 方向移动。光源、聚光镜、半反射镜、光探测器和物镜等被安装在扫描头上, 扫描头可沿 Z 方向移动。入射光经透镜和半反射镜垂直照射到加工表面, 根据共聚焦原理, 物镜

范围内的反射光透过半反射镜进入光探测器。首先设置光探测器为 CCD 相机, 反射光信息经图像处理系统处理后输出局部面的图像数据; 然后设置光探测器为光电倍增管, 扫描头在 X-Y 平面保持不动, 仅以指定的间距沿 Z 方向移动, 反射光信息和物镜高度信息经形貌处理系统处理后输出形貌数据。提取单位微面元的形貌数据及对应的图像亮度, 根据 (5) 式得到 BRDF 值。为了保证测量精度, 采用计算机控制扫描头及工作台移动。

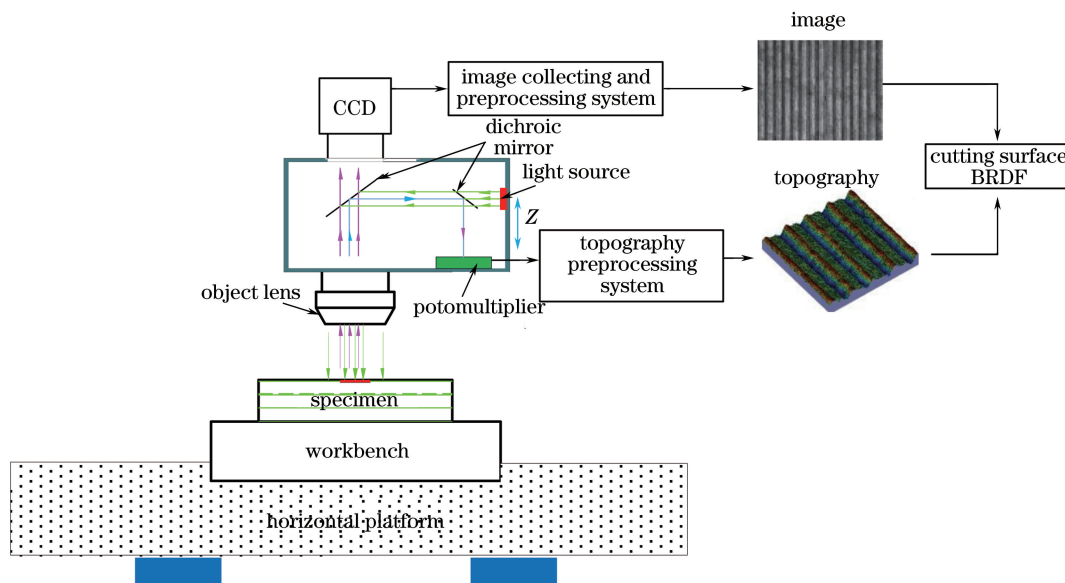


图 3 加工表面 BRDF 测量方案

Fig. 3 Measurement scheme of BRDF on cutting surface

2.3 测量设备

根据 BRDF 测量方案, 分别以 $R_a = 3.2, 1.6, 0.8 \mu\text{m}$ 的车削和平铣粗糙度样块作为研究对象, 在同一光照条件下, 采用德国徕卡公司 DCM-3D 型激光共聚焦显微镜的 10 倍放大镜头测量样块表面微

观形貌及图像数据, 图像像素处理为 $768 \text{ pixel} \times 576 \text{ pixel}$, 形貌采样点数亦统一为 768×576 。测量过程中, 像素元尺寸为 $1.66 \mu\text{m} \times 1.66 \mu\text{m}$, 测量区域面积为 $1.25 \text{ mm} \times 0.95 \text{ mm}$ 。

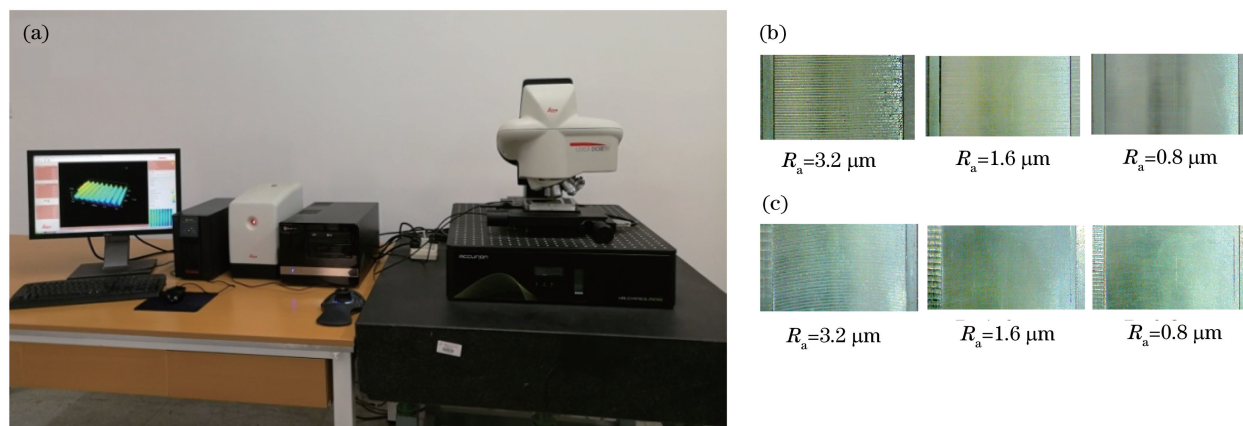


图 4 BRDF 测量装置。(a) 实物图; (b) 车削样块; (c) 平铣样块

Fig. 4 Measurement equipment of BRDF. (a) Physical map; (b) turning samples; (c) plain milling samples

2.4 测量结果及分析

在相同测量条件下采集了样块表面微观形貌数据和图像数据,如图5所示。

从图5可以看到,样块表面微观形貌属于非光滑、不连续的表面,具有典型的荒漠化分形结构特征。样块表面的图像纹理特征以明暗相间的直线条纹为主,随着表面粗糙度的变化,纹理也逐渐发生变

化。 $R_a=3.2\ \mu\text{m}$ 表面以连续、规则的暗条纹为主; $R_a=0.8\ \mu\text{m}$ 表面多为断续、混乱的亮条纹。上述纹理变化规律表明,样块表面微观形貌与其图像纹理之间有着密切联系。由于加工对象主要为金属材料且采用激光为同轴光源,根据(5)式可知,BRDF与入射光波长、入射角和反射角等因素无关,主要与样块表面微观形貌及粗糙度有关。

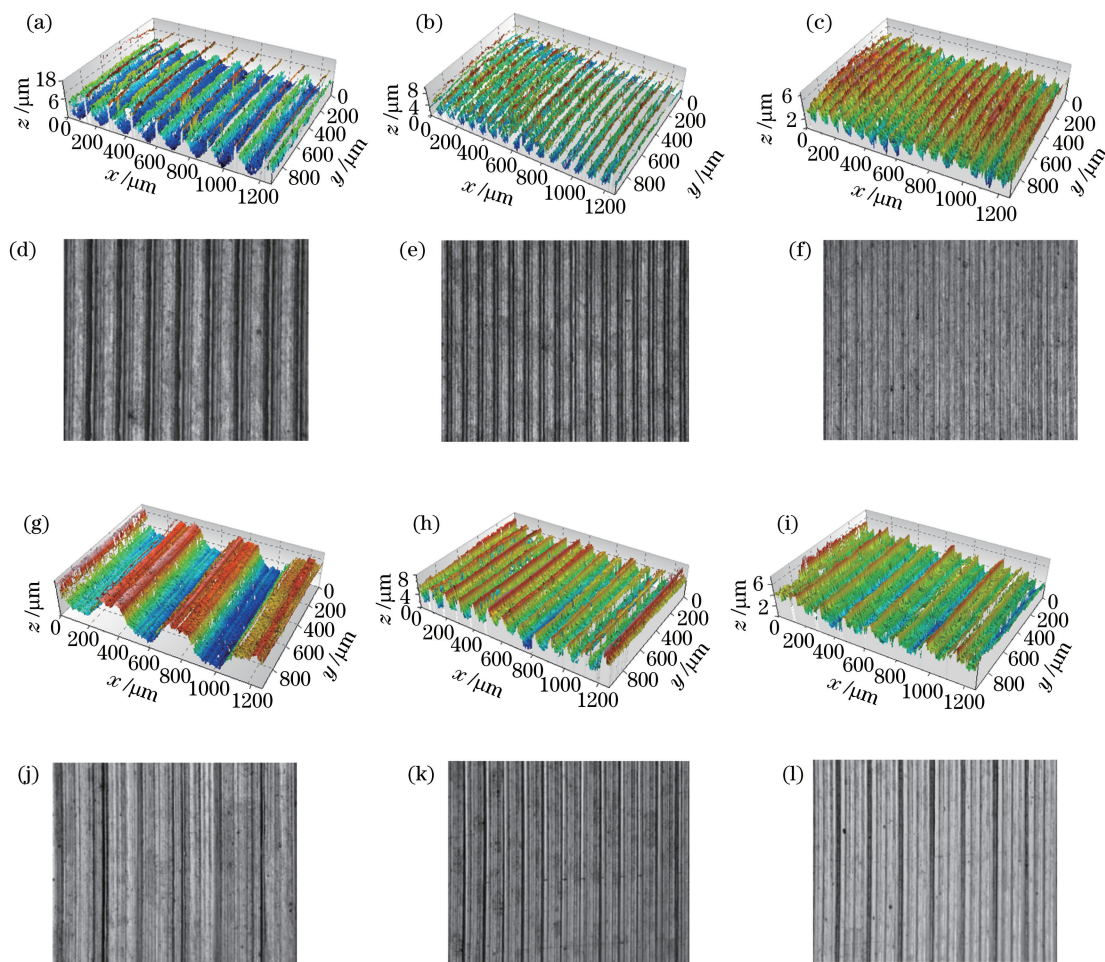


图5 样块表面形貌(彩色图)和图像(灰度图)测量数据。(a)(d) $R_a=3.2\ \mu\text{m}$,车削表面;(b)(e) $R_a=1.6\ \mu\text{m}$,车削表面;(c)(f) $R_a=0.8\ \mu\text{m}$,车削表面;(g)(j) $R_a=3.2\ \mu\text{m}$,平削表面;(h)(k) $R_a=1.6\ \mu\text{m}$,平削表面;(i)(l) $R_a=0.8\ \mu\text{m}$,平削表面
Fig. 5 Measuring data of surface morphology (color) and images (grayscale) of samples. (a)(d) $R_a=3.2\ \mu\text{m}$, turning surface; (b)(e) $R_a=1.6\ \mu\text{m}$, turning surface; (c)(f) $R_a=0.8\ \mu\text{m}$, turning surface; (g)(j) $R_a=3.2\ \mu\text{m}$, plain milling surface; (h)(k) $R_a=1.6\ \mu\text{m}$, plain milling surface; (i)(l) $R_a=0.8\ \mu\text{m}$, plain milling surface

为了便于分析样块表面BRDF,首先对形貌数据进行趋势项处理,采用中值滤波方法对图像数据进行降噪处理,并将图像亮度数据归一化;其次分别提取两组数据的特征进行对应点的选择和配对;然后采用迭代最近点算法,使形貌数据和参考图像数据对应,完成两组数据空间位置的配准;最后,通过(5)式得到不同微面元的BRDF值。统计不同法向偏角的微元反射分量组成,其中漫反射分量比较明显。 $R_a=$

面与其BRDF值之间关系,结果如图6所示。

从图6可以看到,加工表面双向反射分布函数随微面元的法向偏角变化,当法向偏角 θ 减小时,BRDF测量值增大。不同样块表面的BRDF变化趋势也不相同,这主要与表面粗糙度有关, $R_a=3.2\ \mu\text{m}$ 表面的粗糙度最大,BRDF测量值分布较为分散,双向反射分布函数主要由镜面反射分量和漫

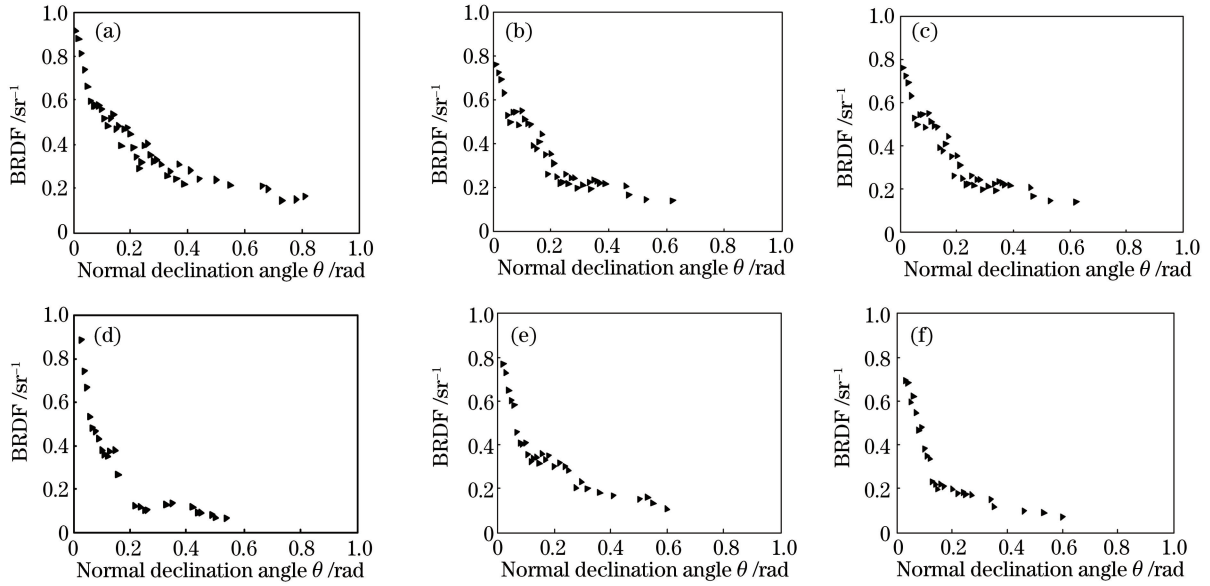


图 6 同轴光源下不同粗糙度表面 BRDF 值与法向偏角 θ 间的关系。(a) $R_a=3.2 \mu\text{m}$, 车削表面; (b) $R_a=1.6 \mu\text{m}$, 车削表面; (c) $R_a=0.8 \mu\text{m}$, 车削表面; (d) $R_a=3.2 \mu\text{m}$, 平削表面; (e) $R_a=1.6 \mu\text{m}$, 平削表面; (f) $R_a=0.8 \mu\text{m}$, 平削表面

Fig. 6 Relationship between BRDF value and normal declination angle θ under coaxial light for surfaces with different roughnesses. (a) $R_a=3.2 \mu\text{m}$, turning surface; (b) $R_a=1.6 \mu\text{m}$, turning surface; (c) $R_a=0.8 \mu\text{m}$, turning surface; (d) $R_a=3.2 \mu\text{m}$, plain milling surface; (e) $R_a=1.6 \mu\text{m}$, plain milling surface; (f) $R_a=0.8 \mu\text{m}$, plain milling surface

集中, 表面反射特性主要表现为镜面反射。

3 加工表面 BRDF 模型

3.1 加工表面 BRDF 模型

由微面元理论可知, 加工表面任一局部面是由大量朝向各异且光滑的微面元组成, 微面元的正切平面可替代微面元。此外, 由于加工表面各个微面元的尺寸比入射光波长, 光的衍射现象可以被忽略, 因此加工表面 BRDF 可以认为是由正切平面的镜面反射分量和漫反射分量组成。根据加工表面双向反射分布函数的测量数据, 建立其 BRDF 参数模型, 利用不同粗糙度对应不同的模型参数来模拟 BRDF 随粗糙度的变化, 则加工表面 BRDF 模型可表示为

$$f_r = k_d \cos \theta + k_s \frac{\exp(-a\theta^b)}{\pi \cos \theta}, \quad (7)$$

式中等号右侧第一项表示加工表面双向反射分布函数的漫反射分量, 它遵守 Lambert 法则; 第二项表示镜面反射分量。 $\exp(-a\theta^b)$ 是微面元法向偏角的

分布函数。 k_d 、 k_s 、 a 、 b 为待定参数, k_d 和 k_s 分别表征漫反射分量和镜面反射分量, 与加工表面的粗糙度和反射率有关; a 和 b 表征微面元法向偏角分布函数, 与表面微观形貌有关。

3.2 数据拟合

采用遗传算法 (GA) 确定 BRDF 模型参数。GA 是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传学机制的全局搜索学习方法, 在评估多个解的过程中找到全局最优解^[16]。将模型计算数据与测量数据的均方根 (RMS) 误差最小值作为目标函数, 确定模型最优参数, 目标函数为

$$E(k_d, k_s, a, b) = \min_{\theta} \sum_{\theta} g(\theta) \times [f_{r_model}(k_d, k_s, a, b) - f_{r_measured}(\theta)]^2, \quad (8)$$

式中 f_{r_model} 为 BRDF 模型的计算数据; $f_{r_measured}$ 为 BRDF 的测量数据; $g(\theta)$ 为调整测量误差的加权函数。

根据 BRDF 测量数据, 采用 GA 确定加工表面 BRDF 模型的最优参数, 结果见表 1。

表 1 加工表面 BRDF 模型参数

Table 1 BRDF model parameters on cutting surface

Cutting method	Surface roughness $R_a/\mu\text{m}$	k_d	k_s	a	b
Turning	3.2	0.06	2.95	2.94	0.660
	1.6				0.601
	0.8				0.531
Plain milling	3.2	0.06	2.95	5.23	0.782
	1.6				0.719
	0.8				0.662

3.3 拟合误差

将加工表面 BRDF 模型计算结果与测量结果进行比较,结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出, BRDF 模型计算结果与测量结果整体吻合性较好。随着法向偏角的不断增大,

模型的计算结果与测量结果偏离相对较大,这主要是由于加工表面微观形貌具有典型的荒漠化分形结构特征,粗糙表面微面元法向偏角的分布主要集中在某个区间范围内,当法向偏角离分布区间较远时, BRDF 模型计算结果会出现偏差。

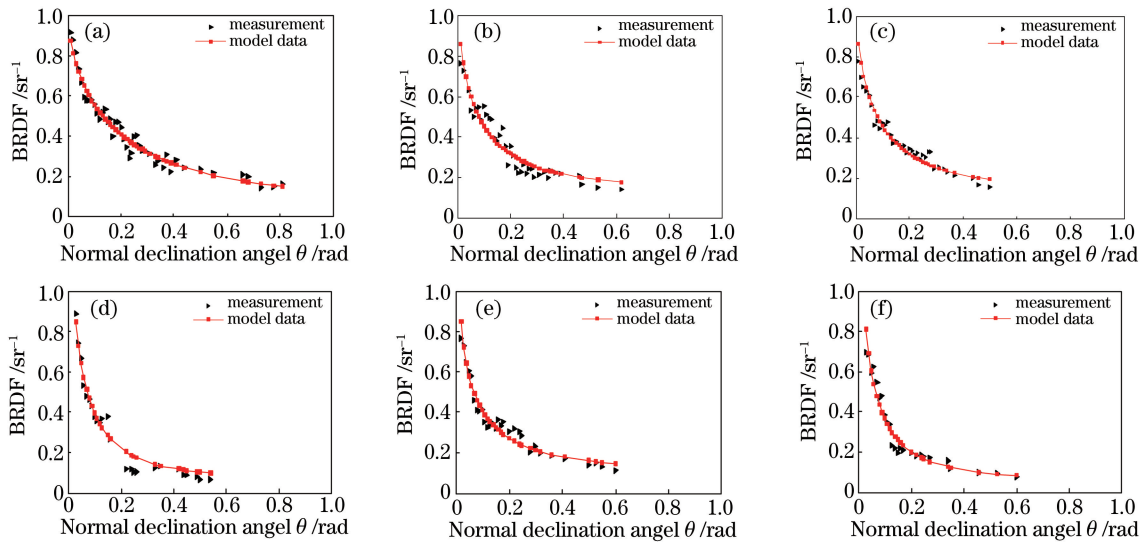


图 7 加工表面 BRDF 模型计算结果与测量结果的比较。(a) $R_a=3.2\ \mu\text{m}$, 车削表面; (b) $R_a=1.6\ \mu\text{m}$, 车削表面; (c) $R_a=0.8\ \mu\text{m}$, 车削表面; (d) $R_a=3.2\ \mu\text{m}$, 平削表面; (e) $R_a=1.6\ \mu\text{m}$, 平削表面; (f) $R_a=0.8\ \mu\text{m}$, 平削表面

Fig. 7 Comparison between measurement data and model calculation data of BRDF on cutting surface. (a) $R_a=3.2\ \mu\text{m}$, turning surface; (b) $R_a=1.6\ \mu\text{m}$, turning surface; (c) $R_a=0.8\ \mu\text{m}$, turning surface; (d) $R_a=3.2\ \mu\text{m}$, plain milling surface; (e) $R_a=1.6\ \mu\text{m}$, plain milling surface; (f) $R_a=0.8\ \mu\text{m}$, plain milling surface

相对均方根误差能够很好地反映模型计算结果偏离测量结果的程度^[17],即

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left(\frac{f_{r_model} - f_{r_measured}}{f_{r_measured}} \right)^2} \quad (9)$$

采用相对均方根误差对不同粗糙度样块表面进行拟合误差分析,分析结果见表 2。表 2 拟合误差结果表明, BRDF 模型计算结果与测量结果非常接近,最大拟合误差为 9.97%,建立的 BRDF 模型能够准确地描述加工表面反射特性。

表 2 拟合误差结果

Table 2 Fitting error results

Cutting method	Surface roughness $R_a/\mu\text{m}$	Relative RMS error $\sigma_r/\%$
Turning	3.2	9.97
	1.6	9.81
	0.8	6.09
Plain milling	3.2	9.88
	1.6	9.78
	0.8	9.41

4 结 论

提出了一种基于同轴光显微成像的加工表面 BRDF 测量方法,测量了粗糙度分别为 3.2, 1.6, 0.8 μm 的车削样块表面 BRDF 值,分析了 BRDF 随表面粗糙度和微观形貌的变化机理。该方法是一种特定条件下的 BRDF 测量新思路,测量设备通用性强,测量效率高且测量结果较准确。从微面元理论出发,根据样块表面 BRDF 测量数据,建立了 BRDF 参数模型,并采用遗传算法确定了模型的最优参数。对模型计算结果和测量结果进行了拟合误差分析,最大拟合误差为 9.97%,两者符合良好,验证了模型的准确性和可行性。所提出的 BRDF 测量方法和模型可为显微成像条件下加工表面的三维重构提供参考。

参 考 文 献

- [1] Bousquet L, Lach erde S, Jacquemoud S, *et al.* Leaf BRDF measurements and model for specular and diffuse components differentiation[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 98(2/3): 201-211.
- [2] Xu C, Zhang Y S, Li P, *et al.* Calculation of optical cross section areas of spatial objects based on OpenGL picking technique[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0720001.
徐灿, 张雅声, 李鹏, 等. 基于 OpenGL 拾取技术的空间目标光学横截面积计算[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0720001.
- [3] Kimmel B W, Baranoski G V. A novel approach for simulating light interaction with particulate materials: Application to the modeling of sand spectral properties [J]. Optics Express, 2007, 15(15): 9755-9777.
- [4] Bai L, Tang S Q, Wu Z S, *et al.* Transmission characteristic of external mixture of aerosol from ultraviolet to visible-light band[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2175-2179.
白璐, 汤双庆, 吴振森, 等. 紫外到可见波段外混合气溶胶的传输特性[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2175-2179.
- [5] Du X P, Liu H, Chen H, *et al.* Research of satellite shape inversion matching algorithm based on photometric characteristic [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0820001.
杜小平, 刘浩, 陈杭, 等. 基于光度特性的卫星形状反演匹配算法研究[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0820001.
- [6] 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.
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.
- [7] Jaanson P, Manoocheri F, M ntynen H, *et al.* Gonireflectometric properties of metal surfaces[J]. Metrologia, 2014, 51(6): S314-S318.
- [8] Ben-Ezra M, Wang J, Wilburn B, *et al.* An LED-only BRDF measurement device [J]. Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008: 10140070.
- [9] Ward G J. Measuring and modeling anisotropic reflection[J]. Proceeding of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1992, 26(2): 265-272.
- [10] Wang H Y, Zhang W, Dong A T. Measurement and modeling of bidirectional reflectance distribution function (BRDF) on material surface[J]. Measurement, 2013, 46(9): 3654-3661.
- [11] Zhang Y, Li J L, Huang Z W, *et al.* Research on reflection and phase shift characters of metal surface based on BRDF model[J]. Electro-Optic Technology Application, 2017, 32(3): 32-35.
张颖, 李金龙, 黄趾维, 等. 基于 BRDF 模型的金属表面反射特性及相变特性研究[J]. 光电技术应用, 2017, 32(3): 32-35.
- [12] Zhu J P, Wang K, Liu H, *et al.* Modified model of polarized bidirectional reflectance distribution function for metallic surfaces [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 99: 160-166.
- [13] Nicodemus F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity [J]. Applied Optics, 1970, 9(6): 1474-1475.
- [14] Lu R, Koenderink J J, Kappers A M L. Optical properties (bidirectional reflectance distribution function) of shot fabric[J]. Applied Optics, 2000, 39(31): 5785-5795.
- [15] Horn B K P. Robot vision[M]. Wang L, Jiang X L, Transl. Beijing: China Youth Press, 1986: 232-235.
Horn B K P. 机器视觉[M]. 王亮, 蒋欣兰, 译. 北京: 中国青年出版社, 1986: 232-235.
- [16] Feng W W, Wei Q N, Wang S M, *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.
- [17] Hubbs J E, Brooks L D, Nofziger M J, *et al.* Bidirectional reflectance distribution function of the infrared astronomical satellite solar-shield material[J]. Applied Optics, 1982, 21(18): 3323-3325.