

激光与光电子学进展

基于 Beckmann-Kirchhoff 简化模型表征
钛合金板材表面清洁度赵文远^{1,2}, 刘建勇¹, 羊送球^{1*}¹中国科学院大连化学物理研究所分子反应动力学国家重点实验室, 辽宁 大连 116023;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 激光清洗的工业需要对材料表面清洗前后的清洁度评价提出了高要求。提出使用基于表面粗糙度测量的双向反射技术来表征材料表面质量,以自相关长度(T)与表面粗糙度均方根偏差(σ)作为表征样品表面质量的关键参数。基于 Beckmann-Kirchhoff 散射积分模型,在粗糙表面上进行合理的简化后,研究了入射光强(I_0)和反射光强(I_s)的比值(I_s/I_0)与波长平方分之一($1/\lambda^2$)的关系。在简化模型下,在 g 值比较大的垂直入射方向上,可以获得比较理想的线性曲线。线性拟合获得的参数 σ_g 可以作为表面清洁度的表征值。在实验中,将一束氙灯白光以垂直的角度照射到钛合金板材 TA15 样品表面,收集样品表面镜面反射出的光束。实验结果证实了样品表面质量与 σ_g 值大小的相关性。所提方法是无接触式的光谱探测方法,实现了高速扫描,方便快捷,可以在线判断激光清洗后的清洁度。

关键词 激光光学; 粗糙度; 激光清洗; 钛合金; 光散射; 清洁度

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1114006

Surface Cleanliness Characterization of Titanium Alloy Sheet Based on
Beckmann-Kirchhoff Simplified ModelZhao Wenyuan^{1,2}, Liu Jianyong¹, Yang Songqiu^{1*}

¹State Key Laboratory of Molecular Reaction Dynamics, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, Liaoning, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract With the industrial need of laser cleaning, new requirements are put forward for the cleanliness evaluation of material surfaces before and after cleaning. In this paper, the bidirectional reflection technology of surface roughness measurement is proposed to characterize the surface quality of materials, and the autocorrelation length (T) and the root mean square of surface roughness (σ) are taken as the key parameters to characterize the surface quality of samples. Based on the Beckmann-Kirchhoff integral scattering model and after a reasonable simplification on rough surfaces, we plot the ratio I_s/I_0 of the incident light intensity (I_0) to the reflected light intensity (I_s) versus the inverse square of wavelength ($1/\lambda^2$). Under the simplified model, an ideal linear curve can be obtained in the vertical incident direction with a large g value. The parameter σ_g obtained by linear fitting can be used as the characterization value of surface cleanliness. In the experiment, a beam of white light (xenon lamp) is first used to irradiate the surface of the titanium alloy sheet TA15 sample at a vertical angle, and then the specular

收稿日期: 2021-06-24; 修回日期: 2021-07-08; 录用日期: 2021-07-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1105002)、国家自然科学基金面上项目(21873100)

通信作者: *sqyang@dicp.ac.cn

reflected light beam on the surface of the sample is collected. The experimental results confirm the correlation between the surface quality of the sample and the σ_g value. This method is a non-contact spectral detection method, which can realize high-speed scanning, is convenient and fast, and can be used to online judge the cleanliness after laser cleaning in practical work.

Key words laser optics; roughness; laser cleaning; titanium alloy; light scattering; cleanliness

1 引言

作为一种新型的绿色清洗技术,激光清洗已经获得了广泛的应用。其在去除材料表面的锈痕、油污、漆层等方面有着独特的优势^[1-3]。随着工业的发展,人们要求激光清洗能够实现实时的激光功率调节,清洗质量能得到准确判断等。对样品表面的质量进行准确、快速、定量的表征是研究热点。

根据国标推荐使用的表面清洁度目视评定方法,将喷射处理后的材料表面分为 Sa1, Sa2, Sa2^{1/2}, Sa3 四个等级^[4],数字越大表示清洗越干净。这种定性的方法已经不能满足目前的高精度测量要求了。很多新方法被提出,比如利用电阻信号的改变来反映激光清洗效果^[5],基于声发射技术的激光清洗过程的监测技术^[6],利用 CCD 探测器对试样表面进行跟踪拍摄和分析的技术^[7],对试样表面的图像进行分析的方法^[8],利用光线传感器对温度应力的变化来实现在线监测的方法^[9]等。尽管已经有了不少的尝试,但是能够实现在线快速定量检测的技术还有待进一步的开发。

本文采用基于物体表面粗糙度测量的 Beckmann-Kirchhoff 散射公式的简化模型^[10],通过测量样品表面的自相关长度(T)和表面粗糙度均方根偏差值(σ)来描述样品表面粗糙度,并使用参数 σ_g 来表征表面清洁度^[11-14]。物体表面粗糙度测量是一项比较成熟的技术,国内外有比较多的方法^[15-19]。

粗糙度测量尚未用于表征激光清洗材料表面的特征。待清洗材料的表面无论是锈层还是涂层,一般都非常粗糙,且比激光清洗后的材料表面更粗糙。因此,可以用粗糙度来表征材料表面的清洁度。本文使用粗糙度的参数来表征材料表面的清洁度,以达到快速定量检测清洁度的目的。我们使用氙灯白光照射样品表面,收集其反射光。实验发现,对于钛合金 TA15 样品,其清洁程度与参数 σ_g 的值具有非常好的相关性,这说明粗糙度参数可以用于表征激光清洗后的清洁度。同时,TA15 样品的过清洗区域表现出了一定的吸收特性,这偏离了 Beckmann-Kirchhoff 理论的散射条件假设,利用这

一点可以判断是否存在过清洗区域。

2 基本原理与实验装置

2.1 Beckmann-Kirchhoff 简化模型

为了满足 Helmholtz-Kirchhoff 衍射积分条件,假设表面为理想反射面或是表面粗糙度均方根偏差远小于入射波长(λ),自相关长度 T 远大于入射波长^[11-12],此时可以获得封闭形式的解。假如粗糙表面的高度分布符合高斯函数形式,轮廓自相关函数符合指数函数形式,即 WA 模型^[20],那么在镜面反射角处收集到的光强^[10-11]满足

$$I_s = I_0 \exp(-g) \left(1 + \frac{\pi T^2}{A} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m! m} \right), \quad (1)$$

$$g = \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda} \cos \theta_i \right)^2, \quad (2)$$

式中: I_0 是入射光强; θ_i 是入射角; A 是入射光斑面积; m 是自然数。理论上只要获得两个不同入射角下的反射光强度值就可以求解得到 T 与 σ ,然而,函数形式比较复杂,可以通过适当的近似,得到简单的公式。

对于待清洗样品,特别是带有锈层的钛合金与钢铁等,其表面是非常粗糙的,实验中使用的光源是近紫外到近红外波段的光,即使入射角比较大, g 值也可能比较大。我们模拟了当 $\sigma=0.2 \mu\text{m}$, $\lambda=0.6 \mu\text{m}$ 时,入射角变化时 g 值的变化曲线,如图 1 所示。

当入射角为 0 时, g 值最大。当 g 值比较大时,式(1)中 $\exp(-g)$ 的值就非常小。另外,当 g 值趋向于大数时, $\exp(-g) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m! m}$ 存在一个极限值^[11],即

$$\exp(-g) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m! m} \rightarrow \frac{1}{g-1}. \quad (3)$$

于是,式(1)可简化为

$$\frac{I_0}{I_s} = \frac{A(g-1)}{\pi T^2} = \frac{16A\pi\sigma^2 \cos^2 \theta_i}{T^2 \lambda^2} - \frac{A}{\pi T^2}. \quad (4)$$

式(4)显示,用光强比值与波长平方的倒数作图,从斜率和截距中可以获得粗糙度的参数 T 与 σ 。

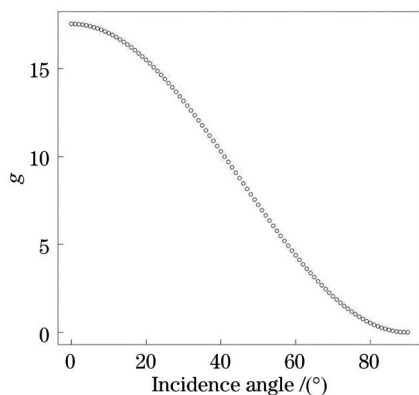


图 1 当 $\sigma=0.2 \mu\text{m}$, $\lambda=0.6 \mu\text{m}$ 时 g 值随入射角度的变化曲线

Fig. 1 g value versus incident angle when $\sigma=0.2 \mu\text{m}$ and $\lambda=0.6 \mu\text{m}$

在实际工作中,入射光强 I_0 和样品上的光斑面积 A 的精确测量不易实现。通常入射光强采用参考光或者光滑表面反射光的光强代替。激光清洗材料表面粗糙度比较大,散射很强,因此镜面反射光的强度比较小,只有在入射光比较大时可以得到比较强的反射光,但会导致入射光在检测器上的溢出。在实际工作中,采用参考光代替原始入射光,即 $I'_0 = kI_0$ 。在我们的实验中, $k=1$ 。调节入射光斑在样品表面的大小,半径约为 1 mm 。光斑面积可能随样品表面的凹凸变化有所波动,但是在接近垂直入射、平行光束条件下还是比较稳定的。

式(4)是在粗糙表面上获得的简化模型,其斜率是一个关键值。对于非常粗糙的表面,通常使用参数 σ_g 来描述其表面粗糙度^[21-22],即

$$\sigma_g = \frac{\sigma}{T} \sqrt{2} \quad (5)$$

这与我们在式(4)中获得的斜率是一致的(去掉一些常数)。 σ 表示高斯函数在垂直(高度)方向上的宽度, T 表示在水平(相关长度)方向上的宽度。 σ 值越小, T 值越大表示表面越光滑,也就是 σ_g 越小,表面越光滑。

2.2 实验装置

为了方便测量样品表面的反射光谱,我们搭建了一套简易的实验装置,如图 2 所示。氙灯光源耦合进入光纤,由光纤引导出射后,变为平行光束,照射到样品(s)表面。入射角尽量小,在镜面反射角处用物镜收集反射光,再耦合进入光纤,并引导进入光纤光谱仪,由 CMOS 线阵探测器读取光谱强度,进行后续的数据处理。光源入射角是可以调整的,极端情况是使用 Y 型光纤以获得最小的入射角(接近垂直入射)。实验中,TA15 样品(尺寸约为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$)被置于二维平移台上,由二维平台控制照射的采样点位置,如图 3 所示,其中 1、2、3 和 4 分别表示未清洗区、清洗不完全区(Sa1~Sa2 级别)、清洗完全区域(Sa3)和过清洗区域。样品表面的清洁度等级如表 1 所示,其中 R^2 为线性拟合度参数。

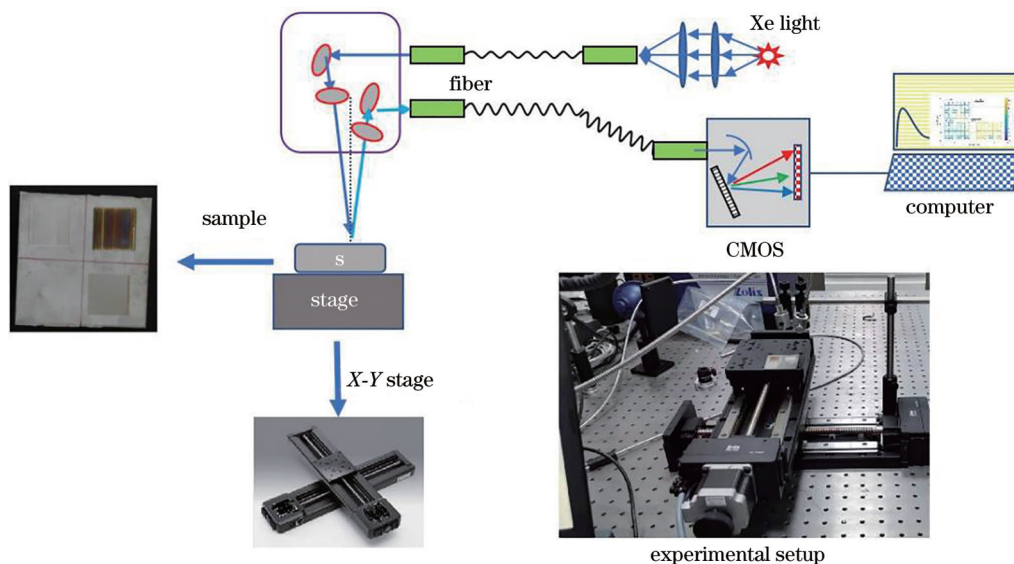


图 2 实验装置示意图,右下角是实验室搭建的设备照片

Fig. 2 Schematic of experimental device with established device in laboratory shown in bottom-right corner

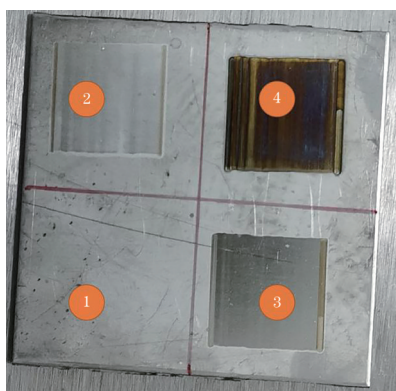


图3 TA15样品的照片

Fig. 3 Photograph of TA15 sample

表1 光斑半径为 1000 μm 时钛合金 TA15 样品表面各区的清洁度以及典型的 R² 值与 σ_g 值

Table 1 Cleanliness and typical R² and σ_g of each zone of TA15 sample surface for radius of light spot of 1000 μm

Zone No.	Cleanliness level	Typical σ _g	Typical R ²
1	Uncleaned	1.62 × 10 ⁻⁴	0.9268
2	Sa1-Sa2	0.80 × 10 ⁻⁴	0.9529
3	Sa3	0.35 × 10 ⁻⁴	0.9509
4	Over-cleaned	1.09 × 10 ⁻⁴	0.8545

3 分析与讨论

3.1 理论模型在 TA15 样品上的适用性分析

本文利用 Beckmann-Kirchhoff 理论来表征材料表面的清洁度,并且进行了适当的简化。对于非常粗糙的表面,使用式(5)中的 σ_g 来表示样品表面粗糙度是文献中已有的方法。但是,对于特殊的样品以及从紫外到近红外的波长范围,本文所讨论的这种简化模型是否适用还没有定论。因此我们首先研

究这种理论的适用性。

实验中使用的氙灯光源光谱范围主要为 310~1010 nm,如图 4(a)所示。将光源的耦合光纤头转接到光纤光谱仪中,测量得到光纤入射光强度 I₀(λ)。在样品的不同区域,反射光强度 I_s(λ) 不一样。其中,1号未清洗区域的反射强度最低。根据式(4),我们将 I₀/I_s 对 1/λ² 作图,得到图 4(b)所示的曲线,其中波长单位转化为微米(μm)。

从图 4 可以看到,当 1/λ² > 7 nm⁻² 时(λ < 378 nm),曲线的线性比较差,但是当 1/λ² < 7 nm⁻² 时,有很好的线性。这个 1/λ² < 7 nm⁻² 的区域是可见光-近红外光区域。从样品的 2号、3号区域同样可以得到这样的结论。在紫外区域(λ < 378 nm)不能获得比较好的线性响应,原因可能是由于金属表面氧化层对紫外光的吸收,这种吸收导致 Helmholtz-Kirchhoff 理论的假设不能得到满足,从而响应偏离了线性。在 4号区域,即使是在可见-近红外区域,也不能获得单一的线性响应,这应该是由过氧化层上出现了颜色,表明过氧化层对白光有吸收,从而导致了非线性响应。即便如此,我们还是使用了式(4)的斜率和式(5)来表征表面的清洁度,同时还考虑线性拟合度参数 R²。当 R² 明显小于 1 时,该样品测量点出现了过氧化。

另外,我们注意到,样品过清洗区域的颜色明显有别于其他区域。因此我们对四个区域的光反射式吸收光谱进行了测量,得到图 5 所示的结果。可以看到,过清洗区域(zone 4)表现出完全不同的吸收曲线。其他三个区域在可见区的吸收曲线都比较平缓,过清洗区域则在 600~1000 nm 区域有较小吸收率,在 280~500 nm 区域有较大吸收率。因

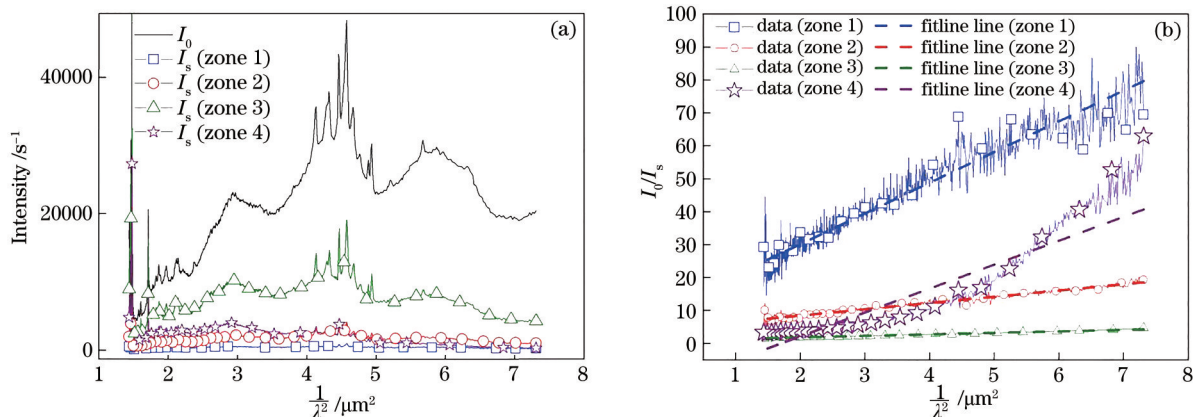


图4 不同清洗区域的样品表面光谱。(a)光源的入射光谱及不同区域的反射光谱;(b)各区域的 I₀/I_s 随 1/λ² 的变化曲线

Fig. 4 Spectra of sample surface in different cleaning areas. (a) Spectrum of incident light and reflection spectrum of each zone;

(b) I₀/I_s of each zone versus 1/λ²

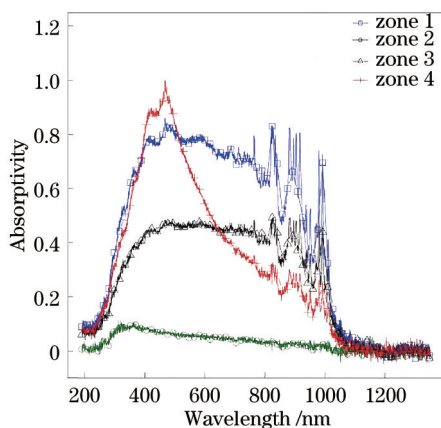


图 5 不同区域的反射式吸收光谱曲线
Fig. 5 Reflective absorption spectrum of each zone

此使用这种特征吸收来表征过清洗情况。我们选择 440 nm 和 780 nm 波长附近的吸收强度的比值作为表征过清洗情况的参数,用以辅助判断清洗质量。

从上述分析可以得出结论,式(4)在 TA15 样品的测量中是适合的,样品表面的反射光谱与波长的对应关系符合 Beckmann-Kirchhoff 理论的简化模型,可以通过 $I_0/I_s \sim 1/\lambda^2$ 曲线的斜率获得 σ_g 以表征表面粗糙度。

3.2 清洁度与粗糙度的相关性分析

从图 4 中可以拟合得到斜率,进而由式(4)与(5)获得 σ_g 的值。从表 1 中可以看到, σ_g 值与清洁程

度存在正相关响应。清洁达标的 3 号区域获得了最小的 σ_g 值,而 1 号未清洗区域获得了最大的 σ_g 值, 2 号中度清洗区域的 σ_g 值处于 1 号与 3 号区域之间。4 号过清洗区域获得的 σ_g 值大于 2 号区域、小于 1 号区域。 σ_g 值越小,说明清洗越彻底。4 号过清洗区域与 2 号中度清洗区域的 σ_g 值接近,这只能说明两个区域都是未清洗干净的,但是不能区分它们。由表 1 中的线性拟合参数 R^2 可知,4 号的 R^2 值小于 0.9,线性度非常差,这说明表面过清洗区域对光有吸收,导致式(4)偏离。另外,我们可以从截距获得相关长度 T 的值。 T 值的变化趋势与 σ_g 值是一致的。总之,我们通过实验证实了基于 Beckmann-Kirchhoff 简化模型的粗糙度测量可以用于 TA15 金属表面清洁度的表征。

3.3 自动化成像分析

利用实验室搭建的装置,通过编写软件程序,测量了 TA15 样品的 σ_g 值、 R^2 值以及吸收强度比值。我们选取图 3 所示的样品进行了自动测量。二维移平台在软件控制下移动样品,每隔 0.5 mm 记录一次信号。调整照射光斑半径约为 0.5 mm。在光纤光谱仪中记录下入射光谱谱线,根据各指定位置的反射光谱,自动绘制 $I_0/I_s \sim 1/\lambda^2$ 曲线,并且对所得的曲线自动进行线性拟合回归分析。计算 σ_g 值和 R^2 值以及 420 nm 和 790 nm 处的吸收强度的比值。实验获得了图 6 所示的三个成像图。

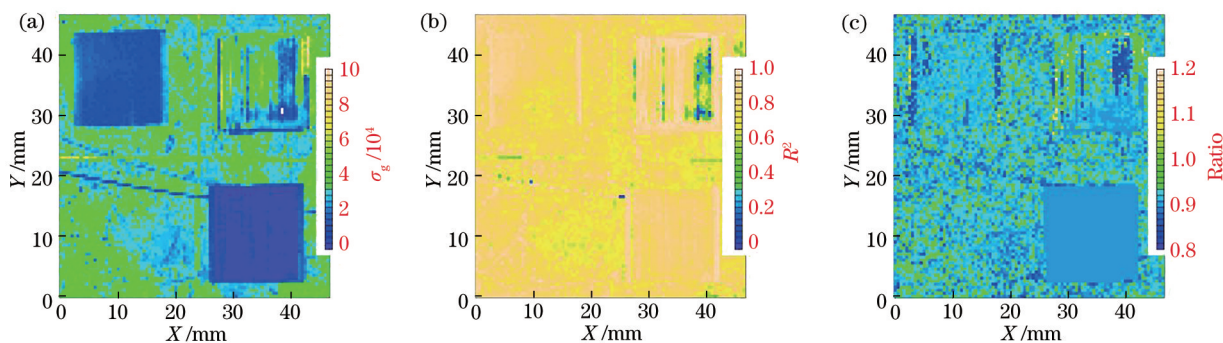


图 6 自动测量得到的 TA15 样品的三个不同表征值的成像图。(a) σ_g 值; (b) R^2 值; (c) 420 nm 与 790 nm 处的吸收强度的比值
Fig. 6 Imaging maps for three different characterization values of TA15 sample obtained by automatic measurement. (a) σ_g value; (b) R^2 value; (c) ratio of absorption intensity at 420 nm to that at 790 nm

与图 3 相比,我们发现,图 6(a)很好地反映了样品的清洗情况。很明显,各区域的 σ_g 值与激光清洗程度完全对应,包括一些小细节,比如划痕、标识的十字线等。这说明 σ_g 值应用于清洁度表征是合适的。由图 6(b)、(c)可以看出,过清洗区域(4 号区域)的 R^2 值和吸收强度比值与其他区域不同。有些

未清洗区域也表现出比较大的吸收强度比值,这可能是氧化层或者附着物对光的吸收导致的。 R^2 值的成像图在本次实验中表现较好,能够较好地反映出过清洗的状态。吸收强度的比值成像图可以很好地反映出清洗达标区域。对多个样品测试后发现,当某些氧化层区域(未清洗区域)有较大吸收

率时, R^2 值也会表现出比较低的线性, 因为表面的吸收会导致表面散射光谱偏离 Beckmann-Kirchhoff 散射假设。吸收强度比值也有类似问题。所以, 不能根据单一的 R^2 值或者吸收强度比值来判断是否清洗达标或者过清洗, 必须结合 σ_g 值一起考虑, 就可以给出清洗达标区域和过清洗的区域。

4 结 论

利用 Beckmann-Kirchhoff 理论的简化模型来测量金属表面的粗糙度, 并用其表征激光清洗后的清洁度。简化了 Beckmann-Kirchhoff 公式, 得到了 I_0/I_s 与 $1/\lambda^2$ 的线性关系式。通过测量实验光谱, 计算得到 σ_g 值。

利用实验室搭建的仪器设备以及编写的软件, 对 TA15 样品的清洗区域进行了详细的测量与分析。发现 σ_g 值与样品的清洁度是相关的。 σ_g 值越小, 样品表面越干净。配合线性拟合度参数 R^2 值或者吸收强度在 420 nm 和 790 nm 处的对比值, 可以对 TA15 的过清洗区域进行判定。因此, 可以用 σ_g 值和 R^2 值来表征激光清洗后的清洁度。实现了自动化测量, 得到了样品的信号成像图, 测量结果与样品的目视清洁程度完全对应。

参 考 文 献

- [1] 刘鹏飞, 王思捷, 刘照围, 等. 激光清洗技术的应用研究进展[J]. 材料保护, 2020, 53(4): 142-146.
Liu P F, Wang S J, Liu Z W, et al. Research progress in application of laser cleaning technology [J]. Materials Protection, 2020, 53(4): 142-146.
- [2] 马玉山, 王鑫林, 何涛, 等. 金属表面腐蚀层及涂层的激光干式清洗研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 124-134.
Ma Y S, Wang X L, He T, et al. Research progress in dry laser cleaning on corrosion and coating layers of metal surfaces[J]. Surface Technology, 2020, 49(2): 124-134.
- [3] 赵海朝, 乔玉林, 杜娴, 等. 脉冲激光清洗铝合金表面漆层的技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602121.
Zhao H C, Qiao Y L, Du X, et al. Research on paint removal technology for aluminum alloy using pulsed laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602121.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 涂覆涂料前钢材表面处理表面清洁度的目视评定 第一部分: 未涂覆过的钢材

表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级: GB/T8923.1—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Preparation of steel substrates before application of paints and related products—visual assessment of surface cleanliness—part 1: rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings: GB/T8923.1—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.

- [5] 徐杰, 李志超, 徐振海, 等. 一种激光清洗实时监测装置及方法: CN110773518A[P]. 2020-02-11.
Xu J, Li Z C, Xu Z H, et al. Laser cleaning real-time monitoring device and method: CN110773518A [P]. 2020-02-11.
- [6] 谢小柱, 黄庆澎. 一种基于声发射技术的激光清洗过程监测方法: CN109813805A[P]. 2019-05-28.
Xie X Z, Huang Q P. A monitoring method of laser cleaning process based on acoustic emission technology: CN109813805A[P]. 2019-05-28.
- [7] 肖海兵. 一种激光清洗检测设备及激光清洗检测方法: CN110836896A[P]. 2020-02-25.
Xiao H B. A laser cleaning detection equipment and laser cleaning detection method: CN110836896A[P]. 2020-02-25.
- [8] 王春明, 黎硕. 一种基于激光清洗装置的清洗质量监测装置及方法: CN107340302A[P]. 2017-11-10.
Wang C M, Li S. Cleaning quality monitoring device and method based on laser cleaning device: CN107340302A[P]. 2017-11-10.
- [9] 宋峰, 蔺诗洁. 一种激光清洗的在线监测方法: CN110686810A[P]. 2020-01-14.
Song F, Man S J. An on-line monitoring method for laser cleaning: CN110686810A[P]. 2020-01-14.
- [10] Beckmann P, Spizzichino A. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces[M]. New York: Pergamon Press, 1963.
- [11] 李丽娟. 目标激光散射特性在钢板表面微观轮廓精度测量中的应用研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2005.
Li L J. Research on applying laser scattering characteristic of object to measure surface microcosmic profile precision of steel plate[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2005.
- [12] 张科鹏. 基于散射测量的光学元件表面质量评估方

- 法研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2019.
- Zhang K P. Assessing surface quality for optical components by light scattering measurement[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 产品几何技术规范(GPS)表面结构 轮廓法 术语、定义及表面结构参数: GB/T3505—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Geometrical Product Specifications (GPS)-surface texture: profile method-terms, definitions and surface texture parameters: GB/T3505—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [14] Alexander V V, Islam M N, Terry F L, Jr, et al. Surface roughness measurement of flat and curved machined metal parts using a near infrared super-continuum laser[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50: 113602.
- [15] Liang Y, Guo L X. A study of scattering from rough surface with different scale of roughness based on the efficient numerical strategies[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 217877-217882.
- [16] Sheikh F, Gao Y, Kaiser T. A study of diffuse scattering in massive MIMO channels at terahertz frequencies[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(2): 997-1008.
- [17] 郭瑞鹏, 陶正苏. 表面特性光学实时检测的理论和实验研究[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(7): 1040-1043.
- Guo R P, Tao Z S. Theoretical and experimental investigation on the optical in-process measurement of surface characteristics[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2010, 21(7): 1040-1043.
- [18] Whitehouse D J, Archard J F. The properties of random surfaces of significance in their contact[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical and Physical Sciences*, 1970, 316 (1524): 97-121.
- [19] 陆敏, 王治乐, 张树青, 等. 表面缺陷的偏振散射表征方法及区分原理[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1229001.
- Lu M, Wang Z L, Zhang S Q, et al. Polarization scattering characterization and discrimination principle of surface defects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41 (12): 1229001.
- [20] 任梦凡, 朱磊, 马晓敏, 等. 基于粗糙度测量和颜色距离的织物缺陷检测方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(4): 0410008.
- Ren M F, Zhu L, Ma X M, et al. Fabric defect detection method based on coarseness measurement and color distance[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(4): 0410008.
- [21] Butler S D, Nauyoks S E, Marciniak M A. Comparison of microfacet BRDF model to modified Beckmann-Kirchhoff BRDF model for rough and smooth surfaces[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 29100-29112.
- [22] Hyde M W, Schmidt J D, Havrilla M J. A geometrical optics polarimetric bidirectional reflectance distribution function for dielectric and metallic surfaces [J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 22138-22153.