

激光在物体表面涂层均匀度探测中的应用

何 宁 廖 欣 敖 发 良

(桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要 针对物体表面涂层的不均匀情况,采用激光对物体表面进行非接触测量,它能实现对物体表面微观变化的在线检测。通过光斑对被测表面扫描,分析反射光强的变化,获得了反射光强与物体表面涂层均匀度的关系。物体表面的涂层均匀度具有随机性,对光的反射程度也有所不同,依据接收光信号的变化,用计算机仿真得到被测物体表面的形貌特征,仿真结果能反映表面涂层均匀度的变化趋势。实验表明,系统结构简单、原理直观,检测范围 1~80 μm ,精度小于 5 μm 。

关键词 激光技术; 表面涂层; 反射光强; 均匀度; 在线检测

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

Application of Laser in the Measurement of Object Surface Coating Uniformity

He Ning Liao Xin Ao Faliang

(College of Information and Communication, Guilin University of Electronic and Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Aiming at the nonuniformity of object surface coating, laser is adopted in contactless measurement of object surface. By this way, online detection of microcosmic variations in the object surface is realized. Through scanning over the object surface with a light spot and analyzing the variation of intensity of reflected light, the relationship between reflected light intensity and object surface coating uniformity can be obtained. Uniformity of object surface coating is random, and the reflectivity is different on the surface. The appearance features of object surface to be measured are emulated by computer, and the simulated results can reflect the change tendency of surface coating uniformity. Experimental results prove that the measurement system has simple structure and intuitionistic principle, and precision of measurement value is less than 5 μm within an operation scope from 1~80 μm .

Key words laser technique; surface coating; reflected light intensity; uniformity; online detection

1 引 言

随着短波光学的不断发展,高精度表面的加工与检测日趋重要,利用光学技术实现物体非接触测量是现代测试技术的发展趋势^[1]。涂层均匀度反映了物体表面微观几何形貌,为保证测试表面质量的完好无损,在要求表面进行精细测量的领域,测试设备要避免与物体直接接触测试,因此,在非接触式测量方面激光有极大的优势。非接触测量可以大大提高测量速度,具有测量精度高、受环境电磁场的干扰小、工作距离宽、有利于扩大量程和防止测量过程中的碰撞等优点^[2]。表面涂层均匀度表现为在加工中人为的或控制过程的失调,造成表面涂层在厚度上的不均匀,使物体表面质量不能达到要求。本文应用

光学反射理论分析了光的反射受随机涂层表面影响的模型,对物体表面涂层均匀度的测试方法和测量精度进行了探讨。

2 物体表面反射光强分布

当一束光照射到被测物体表面时,依据光的反射和折射原理,其反射光强与被测物质的光透明性质有关,即与物质的折射率有关^[3]。若被测物体是不透明的,其表面十分粗糙,则反射光可视为漫反射。若被测物体表面为理想镜面,则反射光符合反射定律,光的入射角等于反射角,是理想的漫反射。其反射光强可表示为

$$I(\theta) = I_N \cos \theta, \quad (1)$$

基金项目: 广西壮族自治区科技厅(桂科基 0639058)资助课题。

作者简介: 何 宁(1958—),男,广西人,高级工程师,主要从事光通信、光电传感与探测等方面的研究。

E-mail: eicnhe@guet.edu.cn

式中 I_N 为反射体表面法线方向的反射光强, θ 为入射角。

实际的被测物体表面并非镜面,其表面的散射光既有漫反射成分,又有正反射成分。对于非理想漫反射体而言,当一束定向光入射时,漫反射光的分布只是集中在镜面反射光线的附近,图 1 和图 2 分别用向量表示的余弦辐射体在通过法线截面内的漫反射光强分布模型^[4]。

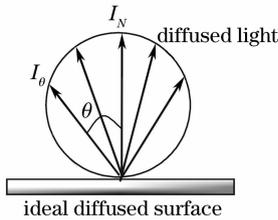


图 1 理想反射面光强分布

Fig. 1 Diffused light intensity distribution on ideal diffused reflecting surface

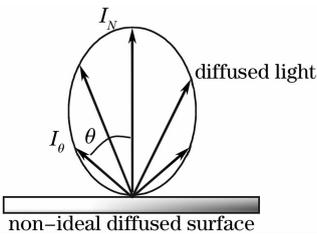


图 2 非理想反射面光强分布

Fig. 2 Diffused light intensity distribution on non-ideal diffused reflecting surface

由图 1,图 2 可看出,在镜面反射光光强相同的条件下,对相同的 θ 角,非理想漫反射表面漫反射光的光强明显小于理想漫反射面漫反射光的光强。

3 反射光强与涂层均匀度的关系

均匀度是反映物体表面光滑程度的一个物理量,实际表面大多不是由单一材料构成的,或是金属合金,或具有涂层,甚至涂层中含有随机分布的各类粒子,很难对它们的均匀度参量和光学参量给以精确的测量,同时由于多重散射、遮蔽效应和体散射的影响,在测量时会导致一定误差^[5,6]。一般情况下,当涂层粒子直径大于入射光波长 λ 时,散射光的作用占主要地位,并且激光入射角的分布与表面的光滑程度之间有一定的对应关系。在实际测量中,由于被测表面的随机性,散射的光线也具有随机性,从而使反射光强发生变化^[7,8]。

散射光场反映了表面涂层均匀度的情况,可用一个特征值 β 表示

$$\beta = E_i/E_o, \quad (2)$$

式中 E_i 为反射光中心亮斑区域接收的能量, E_o 为散射带接收的能量。根据光散射统计理论,涂层均匀度 γ 为

$$\gamma = \exp\left(\frac{-1}{2M^2\sigma_h^2}\right), \quad (3)$$

式中 M 为一个比例常量,其值取决于被测表面、光源和接收面三者间的相对位置关系及所采用的光源波长, σ_h 为表面高度的均方根偏差, $E_i = KI_oq^2$, $E_o = KI_o\gamma^2$, $\gamma^2 + q^2 = 1$, I_o 为入射光强, K 为涂层表面反射率,所以

$$\beta = q^2/\gamma^2, \quad (4)$$

由(4)式看出, β 不受入射光强 I_o 及涂层表面反射率 K 的影响,仅和 γ 、 q 和 M 有关,即只与表面均匀程度和几何形状有关。

4 接收光强分析

在实际测量中,光束从被测表面反射回来后,物体表面微观形貌的随机特性将使入射光束在入射点处发生散射,随着不同的入射角,散射光场的空间分布也将发生变化,从而使接收光强发生变化。物体表面的光散射是一个十分复杂的问题,与表面的均匀度及物体复折射率均有关系^[9],为使问题简化,分析时只考虑表面均匀度。

当激光以一定角度投射到粗糙表面时,受表面微观不均匀度的调制,散射光强呈特定的空间分布,当表面较为光滑时,散射光角分布正比于表面的功率谱密度,如果表面比较粗糙,则与表面的轮廓角分布成比例,散射图谱中只有散射光的作用存在^[10],散射光强以空间角度为变量的高斯分布。根据贝克曼(Beckman)电磁波散射理论可知,在表面不均匀的高度和斜率分布为高斯型的条件下,当入射激光波长为 λ ,光垂直照在物体表面,反射的光强为

$$I = 2 \int_0^{\alpha_{\max}} I(\alpha) d\alpha, \quad (5)$$

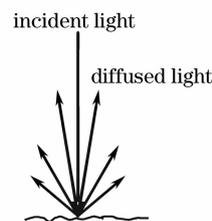


图 3 入射光与散射光光强分布

Fig. 3 Intensity distribution of incident light and diffused light

式中 α 为被测表面散射的入射光到光探测器的光锥的半平面角, α_{\max} 为其中最大半平面角, $I(\alpha)$ 为光强分布。图 3 为入射光与散射光在反射点的光场分布图, 假设入射光束很细, 对入射点所张立体角很小。

在一般情况下, 光接收器与被测表面的距离为常量, α 角不大, 所以随物体表面涂层均匀度的不同, 光探测器接收到的光强也不同。

5 实验与仿真

测试系统如图 4 所示, 当光束照射到被测物体表面时, 光束在反射点发生反射, 如果反射点的涂层

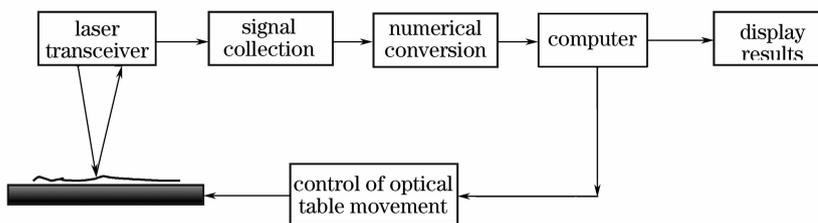


图 4 测试系统框图

Fig. 4 Block diagram of measurement system

被测表面涂层均匀度反射光强分布的计算机仿真如图 5。由图可看出, 对同一种材料的涂层, 材料对光的吸收和反射能力是一定的, 只是表面涂层不均匀造成的散射程度不同, 图中的高低显示了物体表面涂层均匀程度, 高低变化小对应的反射光强变化不大, 若高低变化大则说明反射光强的变化较大。

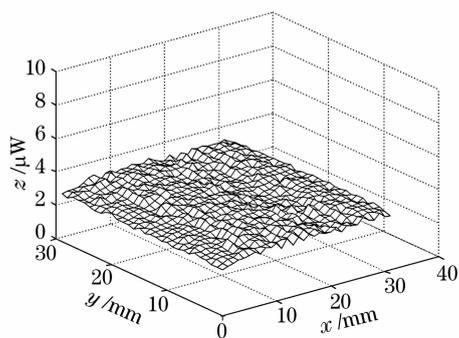


图 5 反射光强三维空间分布

Fig. 5 Three dimensional distribution of reflected light intensity

实验装置中激光传感器的出射光为短波长 (670 nm), 在可见光和近红外区中, 被测表面除镀膜、抛光样片外, 大多数表面涂层均匀度起伏均比入射波长大得多, 能达到的测试精度为 10λ 。测试系统的每次测试过程没有相关性, 测试的条件和数据结果只是相对于单次测量而言。光学平台需进行水平调整, 以保证被测物体在一个基平面, 保持激光束

颗粒大小或厚薄不均匀, 将有光的散射, 通过对散射光的接收, 可判断被测点表面涂层的均匀程度的变化。被测平面随着光学平台的移动, 激光将对被测表面扫描, 从而获得被测表面涂层的反射光强分布, 由计算机进行处理后得到被测物体表面在垂直方向上各点的变化幅度, 通过显示的二维曲线来实时监控其偏离初始状态, 观察反射光强与被测物体表面均匀度的对应关系。测试结束后, 计算机自动对测试数据进行统计平均, 再将所有数据与平均值比较, 得到各采样值与平均值的偏离程度。

与光学平台垂直, 激光传感器与被测表面距离为 55 mm, 照射到涂层表面的光斑直径为 0.8 mm, 光斑对 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的涂层面扫描, 共采集 900 个数值进行分析处理, 根据光强最大偏差的平均, 再将每一采集数值与平均值的偏离程度进行统计对比, 得到反射光信号变化范围大小与物体表面形貌的关系, 从而可对物体表面涂层均匀度进行评估。

6 结 论

采用激光传感器完成光发射和接收, 被测物体表面的不均匀度大于激光波长, 测试面积大小可自行设定, 通过对不同材料均匀度在 $1 \sim 8\ \mu\text{m}$ 范围进行了实验, 在保证激光光斑和入射角较小的条件下, 在一定的工作距离范围内, 其均匀度的变化趋势一致。测量系统只针对平面涂层测试, 在满足激光传感器检测距离范围和要求的测试条件下, 对垂直方向变化为 $80\ \mu\text{m}$ 内的样品进行测试, 测试精度小于 $5\ \mu\text{m}$ 。测试系统适合于工业表面制造业需求, 如喷漆面、喷塑、电镀、医用药膏面的检测等, 并能进行实时在线检测。

参 考 文 献

- 1 Kan Shanshan, Huang Yu, Wang Shurong. Methodological disquisition of spherical fine metrical precision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(3): 195~198
- 2 闾珊珊, 黄煜, 王淑荣. 高精度检测球面面形的方法研究[J].

- 光学学报, 2005, **25**(3): 195~198
- 2 Zheng Junli, Zhao Xuezheng, Zhou Lili. Noncontact surface roughness measurement by using laser[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(3): 148~150
郑俊丽, 赵学增, 周莉莉. 表面粗糙度的激光非接触检测方法[J]. 激光与红外, 2005, **35**(3): 148~150
- 3 Hua Shiqun, Luo Ying, Hong Yun. Measurement of refractive index of liquid by the equal thickness interference[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1542~1546
花世群, 骆英, 洪云. 基于等厚干涉原理的液体折射率测量方法[J]. 中国激光, 2006, **33**(11): 1542~1546
- 4 Du Ying, Zhang Guoxiong, Li Zhen *et al.*. Influence of metal surface on optical non-contact probe [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, **27**(5): 62~65
杜颖, 张国雄, 李真等. 金属表面对光学非接触测头的影响[J]. 光电工程, 2000, **27**(5): 62~65
- 5 Yang Rui, Zheng Jie, Wan Min *et al.*. Measurement method of laser scattering[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.): 353~356
杨锐, 郑捷, 万敏等. 激光散射特性测量[J]. 中国激光, 2006, **33**(增刊): 353~356
- 6 Wu Zhensen, Xie Donghui, Xie Pinhua *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 S. L. Toh, C. Quan, K. C. Woo. Whole field surface roughness measurement by laser speckle correlation technique [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, **33**(6): 427~434
- 8 S. L. Toh, H. M. Shang, C. J. Tay. Surface-roughness study using laser speckle method [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1998, **29**(3): 217~225
- 9 Meng Ke, Wang Donghong. Online optical measurement of surface roughness[J]. *J. Harbin Engineering University*, 2003, **24**(5): 560~562
孟克, 王东红. 表面粗糙度的光学在线检测[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, **24**(5): 560~562
- 10 Wang Shihua, Zhou Zhaofei. Laser scattering surface roughometer[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 1997, (1): 58~61
王世华, 周肇飞. 散射式激光表面粗糙度测量仪[J]. 导弹与航天运载技术, 1997, (1): 58~61