

文章编号:1001-4888(2006)02-0111-11

器件表面形貌及粗糙度检测*

李喜德, 施惠基

(清华大学 工程力学系, 北京 100084)

摘要: 本文基于光学计量技术及扫描显微技术,从结构和器件的表面轮廓和粗糙度两个参数入手,介绍表面高度起伏从厘米到原子级水平的检测和分析中的一些重要方法,如适用于表面起伏从厘米到微米量级的结构光投影方法、表面起伏从毫米量级到亚微米量级的相干光形貌测试技术,以及从亚微米到亚纳米水平的光散射技术和扫描显微表面形貌与表面粗糙度测试技术等,并讨论各种尺度下表面的表征方式和检测参数。最后结合散斑统计分析技术,应用局域散斑场强度统计平均和散斑场自相关函数计算,给出了某战斗机机体蒙皮材料在环境应力腐蚀条件下表面粗糙度(范围从 0.025 微米到 0.7 微米)随腐蚀介质温度、腐蚀时间等参数的检测和分析结果。

关键词: 表面轮廓; 粗糙度; 结构; 器件; 光学测量; 扫描显微术

中图分类号: TN247; O438; TB96 **文献标识码:** A

0 引言

结构和器件表面检测与分析是今天很多行业所关注的领域,如航空航天、汽车、机械、建筑、微电子与半导体、生物甚至于化妆业等。显然,对于向航空航天、汽车等这类主要牵涉到大型和宏观尺度结构的领域,通过对其结构和器件的机械加工表面特性,如轮廓、粗糙度、纹理等进行检测和分析,就可以对加工和制造中的结构和器件质量进行控制。而对微电子与半导体行业,一方面,其器件和材料表面特性将直接影响产品的质量、甚至于下一步工艺的进行;另一方面,通过对结构和器件表面微形貌演化过程的连续检测和分析,可以预测结构和器件在外载或环境因素作用下的劣化过程和损伤程度。尤其是,随着微集成制造和纳米技术的发展,微器件表面基于微米、亚微米、亚深微米及至原子级光滑表面的要求已出现在不同的微制造领域,这一趋势体现了微纳米制造中突破传统光学衍射极限和减少微纳器件中界面磨损的新的需求。在生物界,生物材料的表面特性直接与生物体的适应性相关,而细胞表面粗糙度如今被认为是细胞交互作用中重要的控制参数。在化妆业,化妆品对皮肤光滑程度的改善、治疗过程中微细疤痕的愈合等,都需要实时地了解皮肤的表面信息。可见,今天的表面性能检测与表面特性分析,已是一个多学科研究的课题,而跨尺度表面检测、分析与评价方法的研究在今天更加凸显出重要性和实际应用价值。

从力学角度来说,结构和材料表面两个最基本的参数即是形貌和表面粗糙度。一般来讲,获得足够精确的表面轮廓参数后,可以由轮廓参数计算相关的表面粗糙度和纹理,但是反过来,我们是无法从表

* 收稿日期: 2005-01-24; 修订日期: 2005-09-08

基金项目: 研究获自然科学基金项目 10372049, 10072031 和 10232030 的资助; 国家重点基础研究专项 G1999065002 及清华大学开放实验室基金资助。

通讯作者: 李喜德(1963—), 男, 教授。主要研究领域为: 固体实验力学, 物理力学及数字图像处理。

E-mail: lxide@tsinghua.edu.cn

面粗糙度获得表面轮廓参数的。因此,不同的要求形成了表面检测中适合于轮廓和粗糙度的不同的检测方法。本文将基于光学及扫描显微技术,从结构和器件的表面轮廓和粗糙度两个参数入手,介绍表面检测和分析中的一些重要方法,并讨论各种不同检测技术所对应的结构表面起伏尺度和结构尺度。最后介绍应用散斑技术,给出某战斗机机体蒙皮材料在环境应力腐蚀条件下表面粗糙度随腐蚀介质温度、腐蚀时间等参数变化时的检测和分析结果。

1 表面轮廓测量

材料和结构的表面轮廓检测是光学计量中一个重要的内容,有众多的方法和技术可以应用于这一领域。以下将从结构光投影技术、光学干涉技术和显微扫描技术三个方面对这些方法进行介绍和讨论。

1.1 结构光投影轮廓检测技术(Structured light intensity pattern profilometry)

结构光投影技术是光学轮廓检测中应用最普遍和成熟的轮廓测量技术^[1-4]。所谓结构光投影就是将具有不同空间分布的强度光场投射到物体表面,然后通过对被测物体表面轮廓调制后的投影光场进行不同的数学解调而获得物体的轮廓参数。通常的结构光可以是正余弦或二值光栅条纹、线光或片光、点阵图案和格子图案等。如图 1 为一典型的结构光投影轮廓检测光路,其中图 1(a)即阴影云纹轮廓光路(Shadow moiré profilometry),而图 1(b)即为熟知的投影栅轮廓术光路(Projection grating profilometry)。由于早期的光学轮廓检测术主要是通过照相记录或眼睛观察,因此阴影云纹技术由于可直接产生低频等高条纹而被广泛应用。其检测轮廓高度 W 由下式确定:

$$W = \frac{P}{\tan\alpha + \tan\Psi} N_z = \frac{N_z}{2\pi f(\tan\alpha + \tan\Psi)} \quad (1)$$

上式中, p 为参考栅节距; N_z 为考查点处云纹级数(设 A 点处级数为零)。

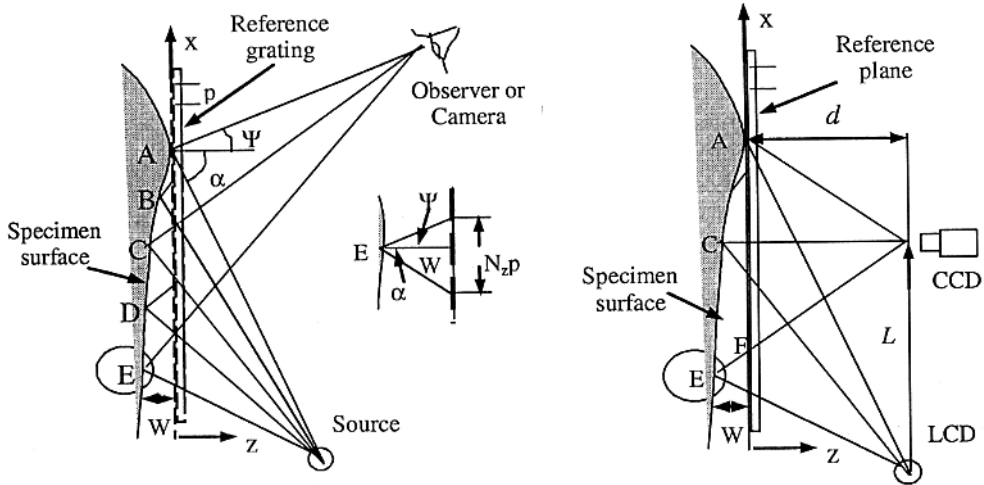


图 1 结构光投影轮廓检测典型光路,(a) 阴影云纹轮廓检测光路,(b) 投影栅轮廓检测光路

Fig. 1 Schematic drawing of the structured light intensity pattern profilometry

(a) Shadow moiré profilometry, (b) Projection grating profilometry

随着 CCD 记录系统和 LCD 投影设备的应用,投影栅技术已是目前广泛应用的自动轮廓测量技术^[5-8]。它利用计算机生成的不同性质的光栅图案通过 LCD 投射到物体表面,然后通过 CCD 摄像系统分别数字化记录参考平面和物体表面的光栅条纹。投影栅轮廓技术通过应用傅立叶载波分析技术或相移技术,可以高精度全场检测物体表面轮廓,其相关关系为:

$$W = \frac{d}{L} p N_z = \frac{d}{L} \frac{\varphi_{EF}}{2\pi} p = \frac{d}{L} \frac{\varphi_{EF}}{2\pi f} \quad (2)$$

式(2)中 φ_{EF} 可通过傅立叶载波分析技术或相移技术求出。

结构光投影技术发展到现在已经有几十年的时间,在这期间还有不同的检测和分析方法被研究出来,并应用于不同的研究领域。但是不论是由于分析方法或检测和记录设备如何变化,这一技术的基本

原理是相同的。从上文(1)和(2)两式可以看到,检测轮廓高度分辨率的主要控制参数为栅线节距和检测点相位变化。因此通过选择适当的栅线节距可以在一个很宽的范围里控制检测灵敏度。从目前可提供的栅线节距变化范围看,这一技术可以给出的轮廓高度检测分辨率可从亚毫米到数十纳米尺度。这一尺度分别对应的是每毫米数线的光投影条纹到每毫米上万条线的电子束投影。由于结构光投影技术具有宽广的分辨率范围,因此它在轮廓检测中的应用覆盖宏观结构、微观甚至纳观结构,条件是在不同的空间尺度下选择不同节距的投影栅,如非相干光宏观投影用于宏观结构轮廓检测、而干涉场显微投影及射线束投影则可应用于微纳观结构和器件的表面轮廓检测。

1.2 光干涉轮廓检测技术(Interferometric profilometry)

光干涉轮廓检测技术是既古老又非常有效的轮廓检测技术,它主要用于镜面结构或表面粗糙度在一定水平($R_a \leq 0.1 \mu\text{m}$)的结构表面检测。经过漫长的发展,在这一领域发展了众多的检测技术,其中最主要的技术为双光束干涉技术(Two-Beam Interferometry)^[9,10]、双波长干涉技术(Two-wavelength Interferometry)^[11-15]、白光干涉技术(White-Light Interferometry)^[16-21]和外差干涉技术(Heterodyne Interferometry)等^[22-24]。对于双光束干涉其轮廓高度值可以由下式统一描述:

$$W = \Gamma \frac{\phi}{2\pi} \lambda \quad (3)$$

其中 Γ 为一系数,根据不同的干涉系统取不同的值,如对于 Michelson 系统, $\Gamma = 1/2$, 而等厚干涉在只考虑厚度变化的前提下有 $\Gamma = 1/2n$, n 为介质折射率。对于相位函数 ϕ 可以利用上文提到的傅立叶或相移技术获得。在双光束干涉技术中著名的检测方法如迈克尔逊干涉(Michelson Interferometry)、等厚干涉(Equi-thickness Interferometry)、牛顿环(Newton ring)、泰曼干涉(Twyman Interferometry)、马赫-曾德干涉(Mach-Zehnder Interferometry)和法布里-珀罗干涉(Fabry-Perot)等。其重要的设备如各种干涉显微镜,其中相衬干涉显微镜可测量的表面高度变化在 $100 \sim 1500 \text{ \AA}$, 而多光束干涉显微系统的测量精度可达 $2 \sim 5 \text{ nm}$ 。

双波长技术是适用于漫射表面轮廓检测的技术之一。它应用两个波长接近的相干光合成一个相对长的有效波长,从而可实现较粗糙表面高度测量,正如在全息和散斑干涉中的结论,它的高度检测灵敏度为:

$$W = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)} \quad (4)$$

由(4)式可以看到,如两个波长相差较小,可以极大的扩展高度检测范围,从而避免由于波长缩短而造成的 2π 不确定性。如对于亚离子激光器的 477 nm 和 488 nm 线,双波长技术可以给出的高度间隔为 $10 \mu\text{m}$ 。

白光干涉技术或称短程相干性干涉技术(short coherence interferometry)是一个具有很长发展历史的光学检测技术。早在 1893 年 Michelson 就用白光干涉估计标准具中一系列台阶形状的大小,从而导致了首次用光波长和国际标准米具原型的比较。尽管很早人们就已经了解到白光或多色光干涉的基本机理,但是由于白光的短程相干特性使得它的应用受到限制。然而随着微尺度研究的需要,今天白光干涉技术已是 MEMS 器件、集成微电子系统、微细观力学、生物技术等领域普遍关注和应用的微尺度对象形貌和变形测量技术。

典型的白光干涉光场为:

$$I(x, y) = I_0(x, y) [1 + V(x, y, \phi) \cos(\phi)] \quad (5)$$

其中 $V(x, y, \phi)$ 为强度包络函数(envelope function),它控制着白光干涉场的条纹对比度,且缓慢地随着光程差的改变而变化。当相干涉的两束光光程差为零时包络函数取得极值,从而(5)式具有最好的条纹对比度。因此在白光检测中,通过有控制地调整物体或参考光的位置,就可以通过包络函数调制的条纹场变化获得检测对象的形貌。白光干涉的检测视场范围在几十微米限度(直径),根据白光的相干特性并应用相位解调,其检测范围可从亚毫米到亚微米,纵向分辨达 1 nm 。主要取决于检测对象表面粗糙度和位置控制系统的精度。

外差干涉技术是光学检测中基于“点”意义检测的典型高精度检测技术,它可以提供波长的千分之一高分辨率的检测精度,即在可见光范围可达到亚纳米的测量精度。它的基本原理是通过改变两束相干光中其中一束的频率,即使某一束光发生频移从而在干涉场中产生“拍频”。这样通过对拍频的检测即可获得高精度检测,其位移强度关系为:

$$I(z, t) = I_0(x, y) \{1 + c(x, y) \cos[2\pi ft - 4\pi z/\lambda]\} \quad (6)$$

其中 f 为频移值, c 为条纹调制函数。通常光频移可以用多种方法实现,如 AOM(acousto-optical modulator), 旋转光栅、在激光谐振腔中加 Zeeman 分束镜或多波长运转的半导体激光器等。

1.3 三角轮廓测量技术(Triangulation profilometry)

三角轮廓测量术可分为被动和主动三角轮廓测量术两种^[22, 25, 26]。其中被动三角轮廓测量主要是利用照相测量法完成全场轮廓检测,而主动技术则是通过应用位置探测器或 CCD 摄像系统,记录聚焦激光点的运动,然后通过横向位移和纵向深度的几何关系给出轮廓信息。通常这一技术给出的高度分辨率为:

$$\Delta z = \frac{\Delta\alpha \cdot z_0^2}{B} \quad (7)$$

上式中 $\Delta\alpha$ 为记录系统的角度分辨率, z_0 为工作距离, B 为照明系统中心到成像系统中心的垂直距离。目前三角测量除在大尺寸形貌检测中获得应用外,在小尺度器件检测中也获得了广泛的应用。

以上介绍了目前广泛应用的轮廓测量技术和方法。事实上除了所列方法外还有一些重要的技术,如立体摄影检测(Stereo vision)^[27-30], 全息检测中的双折射率法(two-refractive index contouring)^[31, 32]、多光源法(multiple-source contouring), 共聚焦法(confocal method)^[33-35], 飞点法(Time-of-flight method)等。

1.4 探针轮廓测量技术(Stylus profilometry)

前文介绍了光学无接触轮廓检测技术,事实上还有一类轮廓检测术,那就是被称为接触式轮廓检测术或扫描探针式轮廓检测技术^[36-38]。起初的探针式轮廓检测技术主要是应用电子放大器检测与试件表面接触的探针的上下起伏信号获得检测点的高度信息。通过将探针在物体表面匀速二维扫描即可获得表面轮廓信息。通常接触探针式轮廓技术可以获得较大的扫描范围,如 20mm,而检测精度在微米量级,目前新的接触式探针技术高度分辨可达纳米量级,而其接触力小于 490nN。

接触式探针轮廓检测技术尽管可提供较大的检测面积和相对高的检测精度,但是接触力会破坏检测表面。扫描探针显微技术(SPM)的出现为微区域、微尺度轮廓检测提供了新的技术^[39-44]。SPM 的主要代表是 STM(scanning tunneling microscopy)和 AFM(atomic force microscopy)。在 STM 中一个金属探针和被测表面保持一个非常小的距离(通常 0.2nm),并在探针和被测表面间施加一个合适的电压,这时在这两个电极之间将产生一个随距离变化的隧道电流。于是通过在一个水平面上移动探针或通过移动被测物体使探针和被测表面的距离不变,即可通过电流变化或物体移动距离获得检测表面轮廓信息。STM 具有极高的纵向分辨率,其值优于 0.01nm,其横向分辨率在 0.1nm 量级。

STM 的缺点是要求检测表面为导体,这在某种程度上限制了它的应用,AFM 可克服这一不足,它将 STM 和探针技术(Stylus)结合起来实现轮廓检测。在 AFM 中,通过探针和检测表面的力来确定两者的远近程度。其中探针是一个由曲率半径约为 20 到 50nm 的尖锐针状结构和一个具有较低刚度的悬臂梁组成,尖锐固定在悬臂梁的末端并保持与检测表面接触或轻敲。由于接触力极小(通常小于 1nN),因此不会损坏被测表面。通过二维扫描并计算悬臂梁在检测点的挠度值,即可获得微区域轮廓数据。通常 AFM 检测区域为 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$,纵向分辨在 0.01nm,横向分辨取决于探针顶部到检测表面的距离和探针曲率半径,一般可达 0.1nm。

2 表面粗糙度测量

正如表面轮廓参数一样,表面粗糙度参数也是结构和器件表面性能分析中重要的参数之一。只是与轮廓术不同,表面粗糙度可以用不同的统计参数进行描述,如在机械 engineering 行业中常用算术平均表面

粗糙度 R_a ,而在光学中惯用均方根表面粗度 R_q 等。与轮廓检测一样,粗糙度检测也可以分为接触与非接触检测两类。

2.1 接触式粗糙度检测技术(Contact roughness measurement)

接触式粗糙度检测主要为扫描探针式测量^[45-49]。最初的探针为金刚石材料,它直接和检测表面接触,通过移动探针或运动检测平面,探针随着表面的起伏而在高度方向位移变化。一个位移传感器获得这一信号,并把它转化为电信号进行处理,从而获得表面粗糙度参数 R_a 或 R_q 。通常获得 R_a 的检测长度为 0.8mm。接触式粗糙度检测可以获得较长的测量样本(几十毫米量级)和相对宽的粗糙度范围(0.1nm到几十微米),但是对于较软的材料容易划伤检测表面。今天由于 SPM 检测设备的出现,这一问题已可以解决。正如上文所述,纳牛级的力对一般的材料表面是不会损伤的,同时不同的工作方式,如 AFM 的轻敲模式(tapping mode)更使这一风险得以降低。目前通过 SPM 系统,其粗糙度检测范围可从 0.1nm 到 50nm。

2.2 非接触式粗糙度检测技术(Noncontact roughness measurement)

非接触方式主要为光学检测方式^[50-55]。正如前文所述所有可以进行轮廓检测的光学计量方法均可以实现粗糙度的检测,因此本节仅介绍几种与上文不同的光学非接触式粗糙度直接检测技术。这些技术主要涉及两大类技术:光散射测量技术(light-scattering techniques)和激光散斑测量技术(speckle techniques)。

光散射测量技术 在过去的几十年中光散射在粗糙度检测方面已经引起人们高度的重视,尤其是在需对光滑和超光滑表面检测的今天,光散射技术由于其非破坏、对光滑表面起伏敏感的特点在 MEMS 和微集成制造领域得以广泛应用。在这一技术中表面粗糙度信息可以通过检测给定方向反射光的强度得以确定^[56-58];也可以由散射强度获得检测表面高度变化的互相关函^[59]或通过对散射强度进行傅立叶变换,从而通过应用散射光的空间谱估计表面粗糙度^[60-62]。上述光散射技术其粗糙度检测上限在 2~5 μm ,下限则可以远小于照明光的波长。另外两种适合光滑表面测量的重要光散射技术是全积分光散射技术 TIS (Total integrated scattering)和角度分辨光散射技术 ARS(Angle-resolved scattering)。如对于 TIS 根据标量散射理论给出 rms 粗糙度 R_q 为^[63,64]:

$$R_q = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{I_{\text{scattered}}}{I_{\text{specular+scattered}}}} \quad (8)$$

上式根号中分子分母中分别为试件表面散射光和镜面反射光的强度。对于上式若用 He-Ne 激光照明,可以检测的最大 R_q 为 10nm($R_q/\lambda=0.016$)。

ARS 是比 TIS 技术更复杂的超光滑表面测量技术,它应用矢量散射理论可以获得更多的表面粗糙度信息。这一技术要求检测表面为各向同性,检测表面横向尺寸远大于波长,而检测表面高度远小于照明波长^[22]。

激光散斑测量技术 与光散射粗糙度技术相比,激光散斑技术具有操作和实现简单,粗糙度测量范围大等特点,因此在粗糙度检测领域发挥着重要的作用。通常在激光检测技术中主要的粗糙度检测方法有散斑衬度技术(speckle contrast technique),散斑相关技术(speckle correlation technique)和散斑场平均强度技术(averaged intensity technique)等。

散斑对比度技术是由 Fujii 等人上世纪七十年代提出的^[65-67]。在这一技术中,通过实验检测远场或像面散斑场的衬度,然后获得表面粗糙度和衬度的关系:

$$C = \frac{[\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2]^{1/2}}{\langle I \rangle}, \quad \sigma_h = f(C_{\text{max}}) \quad (9)$$

其中 $\langle I \rangle$ 为散斑场的平均强度, σ_h 为表面高度起伏的标准偏差, C_{max} 为不同粗糙度表面所对应的衬度极大值。通常要使(9)式的后一式为线性函数,衬度法的粗糙度测量范围上限不超过 0.3 μm 。

散斑相关技术主要适应表面粗糙度大于照明波长的检测范围,可分为不同角度照明散斑相关^[68]和单光场自相关两种技术。对于转角相关技术,在表面均匀、各向同性及表面粗糙度大于照明波长的假设情况下有如下关系:

$$\gamma_R = \frac{\exp(-\sigma_h^2 \sin^2 \alpha k^2 \delta \alpha^2) \sum_{\xi} \sum_{\eta} I_1(\xi, \eta) I_2(\xi - f \cos \alpha \delta \alpha, \eta)}{\sqrt{\sum_{\xi} \sum_{\eta} I_1^2(\xi, \eta) \cdot \sum_{\xi} \sum_{\eta} I_2^2(\xi - f \cos \alpha \delta \alpha, \eta)}} \quad (10)$$

上式中 f 为成像系统焦距, $\delta \alpha$ 为照明角度变化, α 为照明角度, $k = 2\pi/\lambda$ 。

单光场自相关技术是直接对检测表面的漫射散斑场进行自相关运算, 然后通过实验, 建立自相关函数半宽度 B_e (相关函数值取 $1/e$ 时对应的宽度) 与表面粗糙度的关系:

$$C = \frac{\langle I_1 I_2 \rangle - \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle}{[\langle I_1^2 \rangle - \langle I_1 \rangle^2] [\langle I_2^2 \rangle - \langle I_2 \rangle^2]^{1/2}}, \quad R_a = f(B_e) \quad (11)$$

其中 I_1 和 I_2 分别为同一散斑场中不同位置的散斑强度值。单光场自相关技术简单, 方便实现, 但当粗糙度较大时其和半宽度一般不具备线性关系。根据以往的研究结果, 目前散斑相关技术适用的粗糙度范围在 1 到 $30\mu\text{m}$ 。

散斑场平均强度技术是将不同表面的漫射散斑场分区域进行强度平均运算:

$$\bar{I} = \frac{\sum_{ij} G_{ij}}{mn}, \quad R_a = f(\bar{I}) \quad (12)$$

其中, m 和 n 分别为所选区域的 x 和 y 向区域长度。就目前的研究, 这一结果在表面粗糙度小于 $1\mu\text{m}$ 时可以给出较好的线性关系。

3 飞机蒙皮材料在环境应力腐蚀条件下表面粗糙度的测量

在我国南方, 飞机通常会在潮湿和应力相互作用的工况下飞行和待命, 这一环境作用在机身蒙皮材料上会产生严重的腐蚀现象。为了从最初始阶段了解环境和应力腐蚀的生成机理, 通过模拟海水潮湿环境和初应力, 本研究应用散斑场强度平均技术和散斑相关技术对机身用材料进行了粗糙度检测。

3.1 实验系统

实验系统采用如图 1(a) 所示像面散斑布置, 成像系统选用长工作距离显微系统, 这样可以对微区域进行测量。图 1(b) 为接收到的试件表面散斑图。

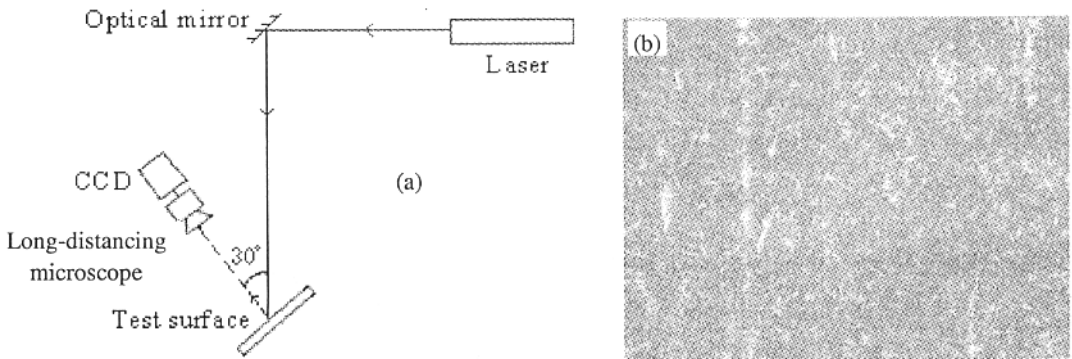


图 2 实验光路图及检测表面散斑场

Fig. 2 Optical setup and the speckle field on the tested surface

3.2 检测系统标定

为了建立平均光强及自相关半宽度与粗糙度的关系, 首先要对检测系统进行标定。其具体过程为, 选择与检测对象同样的材料对其表面进行抛光处理, 从而获得具有不同粗糙度的表面 (通过粗糙度仪给出粗糙度值), 称之为粗糙度参考板。然后将这些参考板放入光路进行测量, 并分别应用 (11) 和 (12) 式进行计算, 得到粗糙度 R_a 与相关参数的实验曲线, 图 3 分别为平均光强及自相关半宽度与粗糙度的实验曲线。对其进行拟合可得如下关系:

$$\bar{I} = 142.381 + 164.9R_a \quad (13)$$

万方数据

$$B_e = 14.02343 - 12.30649e^{(-\frac{R_a}{0.14834})} \tag{14}$$

有了(13)和(14)式, 就可以对检测表面的粗糙度进行测量。

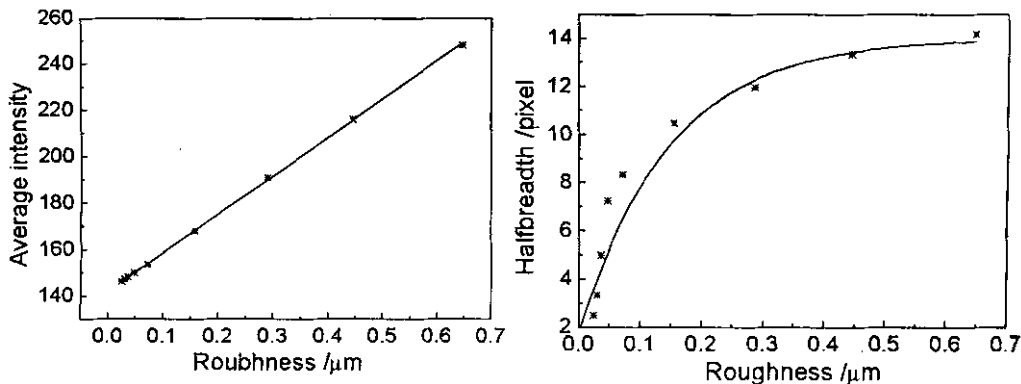


图 3 平均强度和自相关函数半宽度随粗糙度变化的曲线

Fig. 3 Roughness versus the averaged intensity and the half-width of the autocorrelation function

3.3 机身材料表面粗糙度检测

将机身材料制成一长条形试件, 并对其预加初始应力。图 4 给出了试件尺寸和受力结构。将试件及其加力结构一起放入由 3.5% 的 NaCl 水溶液构成的腐蚀流动液中, 每隔一小时对试件表面进行一次测量。图 5 给出了两种方法对试件在不同温度腐蚀液时的粗糙度随腐蚀时间的变化曲线(观测区应力维持在 174MPa)。

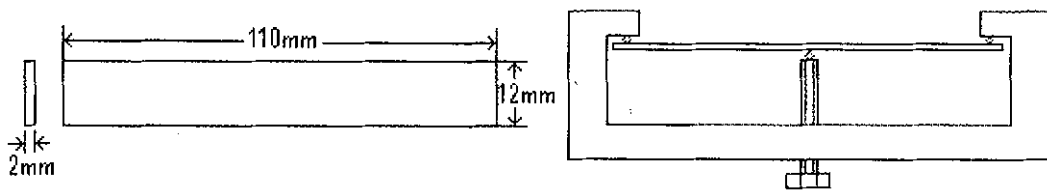


图 4 试件尺寸示意图和施力图

Fig. 4 Schematics of the specimen and the loading configuration

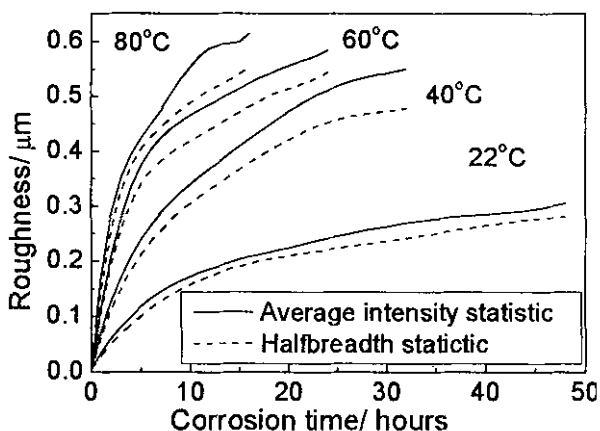


图 5 平均光强与半宽度检测时试件表面粗糙度随腐蚀液温度和腐蚀时间变化曲线

Fig. 5 Roughness versus the temperature of corrosion solution and the corrosion time

由上图可以看到在腐蚀初期, 不论在那一温度下材料粗糙度均迅速变化; 在同一腐蚀时刻, 温度越高腐蚀越明显。另外从图中我们可以看到, 两种方法给出的粗糙度略有差别, 尤其是在较大粗糙度时, 这反映了两种方法对不同粗糙度值的检测特性不同。

万方数据

4 结 论

本文对结构和器件表面特性中两个重要的参数—轮廓和粗糙度的检测技术和方法进行了介绍和讨论,给出了这两个参数在不同检测技术中的适用条件和可能的检测精度或范围。最后结合散斑平均光强及散斑自相关检测技术,给出了战斗机机体蒙皮材料在环境应力腐蚀条件下表面粗糙度随腐蚀介质温度、腐蚀时间等参数的变化结果。

参考文献:

- [1] Dai Y Z, Chiang F P. Contouring by moire interferometry [J]. *Exp Mech*, 1991, 31(1):76~81.
- [2] Post D, Ifju P. High Sensitivity Moire: Experimental Analysis for mechanics and Materials [M]. Springer, Berlin, Heidelberg, 1994.
- [3] Halioua M, Liu H C. Optical three-dimensional sensing by phase measuring profilometry [J]. *Opt Laser Eng*, 1989, 11(3): 185~215.
- [4] Yoshizawa T, Yamaguchi T, Takahashi H, et al. Structured lighting method using moire pattern projection[C]. *SPIE*, 2001, 4567:40~47.
- [5] 周灿林, 王蕴珊. 基于锁相循环投影的物体形貌检测[J]. *实验力学*, 2000, 15(3):324~328 (Zhou Canlin, Wang Yunshan. Contouring's measurement based on phase locked loop profilometry with grating projection. *Journal of Experimental Mechanics*, 2000, 15(3):324~328 (in Chinese))
- [6] 束方军, 冯传玉, 续伯钦, 何世平. 全景三维轮廓检测技术研究[J]. *实验力学*, 2000, 15(2):147~151 (Shu Fangjun, Feng Chuanyu, Xu Boqin, He Shiping. The technique of 3D object's profile detection. *Journal of Experimental Mechanics*, 2000, 15(2):147~151 (in Chinese))
- [7] 程鹏, 柳兆涛, 付东杰, 续伯钦, 伍小平. 蜻蜓飞行姿态的实时模拟测量[J]. *实验力学*, 2002, 17(3):315~319 (Cheng Peng, Liu Zhaotao, Fu Dongjie, Xu Boqin, Wu Xiaoping. Real time measurement of simulated dragonfly's flying posture. *Journal of Experimental Mechanics*, 2002, 17(3):315~319 (in Chinese))
- [8] 缪泓, 于一丁, 续伯钦, 伍小平. 投影光刀法测量碳纤维编织材料烧蚀表面粗糙度[J]. *实验力学*, 2003, 18(4): 495~499 (Miao Hong, Yu Yiding, Xu Boqing, Wu Xiaoping. Surface roughness measurement for the ablated carbon fiber woven materials by projective light-knife. *Journal of Experimental Mechanics*, 2003, 18(4):495~499 (in Chinese))
- [9] Kandpal H C, Mehta D S, Vaishya J S. Simple method for measurement of surface roughness using spectral interferometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, 34(3):139~148.
- [10] Yuan L, Liu Y, Sun W. Fiber optic Moire interferometric profilometry[C]. *SPIE*, 2005, 5633:55~65.
- [11] Onodera R, Ishii Y. Two-wavelength interferometry based on a Fourier-transform technique[C]. *SPIE*, 1999, 3749:430~431.
- [12] Dale M, Buckberry C, Towers D. Two wavelength contouring for shape and deformation measurement[C]. *SPIE*, 2000, 4076: 181~190.
- [13] Sainov V, Harizanova J, Shulev A. Two-wavelength and two-spacing projection interferometry for real objects contouring[C]. *SPIE*, 2003, 5226:184~188.
- [14] Kandulla J, Kemper B, Knoche S, Von B G. Two-wavelength method for endoscopic shape measurement by spatial phase-shifting speckle-interferometry[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(29):5429~5437.
- [15] Bitou Y. Two-wavelength phase-shifting interferometry using an electrically addressed liquid crystal spatial light modulator[J]. *Optics Communications*, 2004, 242(1-3):1~6.
- [16] Ryoo S, Seong Y K, Choi, Tae S. 3-D profilometry based on the white light interferometer for rough surfaces [C]. *SPIE*, 1999, 3782: 619~626.
- [17] Windecker R, Tiziani H J. Optical roughness measurements using extended white-light interferometry[J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(6):1081~1087.
- [18] Holme B. Studying changes in surface topography by white light interferometry[C]. *TMS Annual Meeting*, 2002, 205

- [19] Pavlicek P. Height profile measurement by means of white light interferometry[C]. SPIE, 2003, 5259:139~144.
- [20] Dufour M L, Gauthier B. Precise surface profilometry based on low coherence interferometry[C]. SPIE, 2003, 5260:173~178.
- [21] Kim G, Kim S. White light scanning interferometry for thickness measurement of thin film layers[C]. SPIE, 1993, 783:239~246.
- [22] Pramod K R. Optical measurement techniques and applications[M]. Boston, Artech House, 1997.
- [23] Onuma K, Tsukamoto K. In situ study of surface phenomena by real time phase shift interferometry[J]. Journal of Crystal Growth, 1994,137(3-4):610~622.
- [24] McMackin L. Scalable surface profiling using multi-wavelength heterodyne interferometry[C]. SPIE, 2003, 5162:183~193.
- [25] Lu G, Wu S, Palmer N, et al. Application of phase shift optical triangulation to precision gear gauging[C]. SPIE, 1998, 3520:52~63.
- [26] 严安, 吴科如, 张东, 姚武. 用激光三角法重构混凝土断裂面三维轮廓与断裂能分析[J]. 实验力学, 2001,16(2):213~219(Yan An, Wu Keru, Zhang Dong, Yao Wu. Reconstructing the 3-D profile of fracture surface in concrete by laser triangulation and analyses is of fracture energy. Journal of Experimental Mechanics, 2001,16(2):213~219 (in Chinese))
- [27] Deng W, Lu N, Zhuang J, et al. Stereo vision system for measurement of 3-D object[C]. SPIE, 1998, 3558:248~252.
- [28] McDonald A J, Crossley S, Bennett J C, et al. Stereo vision measurements of soil surfaces and their utility in testing microwave backscattering models[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999,5:2634~2636.
- [29] Ye Q, Ong S, Han X. A stereo vision system for the inspection of IC bonding wires[J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 2000, 11(4):254~262.
- [30] Feng D, Yan Y, Lu, N. Fast parallel 3-D stereo vision measurement system using an artificial neural network[C]. SPIE, 2002, 4787:244~249.
- [31] Gyimesi F, Fuzessy Z. Difference holographic interferometry (DHI): two-refractive-index contouring[J]. Optics Communications, 1985,53(1):7~22.
- [32] Chien C, Chiou Y, Lin L. Application of two-refractive-index contouring on the contour difference of two compared specimens[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1996 15(1):1~10.
- [33] Yamane T, Hirano T. New detailed CD measurement method by scanning confocal laser microscope[C]. SPIE, 1998, 3412:420~428.
- [34] Wang F, Tan J, Zhao W. Optical probe using differential confocal technique for surface profile[C]. SPIE, 2000, 4222:194~197.
- [35] Wang Y, Yu X, Li R, Fei Y. Non-scanning 3D profile parallel confocal detecting system based on DLP technology [C]. SPIE, 2003, 5253:437~441.
- [36] Teague E C, Scire F E, Baker S M, et al. Three-dimensional stylus profilometry[J]. Wear, 1982, 83(1):1~12.
- [37] Wills W J, Leadbeater P B. Stylus profilometry of large optics[C]. SPIE, 1990,1333:183~194.
- [38] Walker D, Yang H S, Kim S W. Novel hybrid stylus for nanometric profilometry for large optical surfaces[J]. Optics Express, 2003, 11(15):1793~1798.
- [39] Schoellhammer J, Chang L, Rabkin E, et al. Measurement of the profile and the dihedral angle of grain boundary grooves by atomic force microscopy[J]. Materials Research and Advanced Techniques, 1990, 90(9):687~690.
- [40] Barrett M, Dennis M, Tiffin D, et al. 2-D dopant profiling in VLSI devices using dopant-selective etching: an atomic force microscopy study[J]. IEEE Electron Device Letters, 1995, 16(3):118~120.
- [41] Nelson M W, Schroeder P G, Schlaf R, Parkinson B A. Two-dimensional dopant profiling of an integrated circuit using bias-applied phase-imaging tapping mode atomic force microscopy [J]. Electrochemical and Solid-State Letters, 1999, 2(9):475~477.
- [42] Cunningham T, Serry F M, Ge L M, et al. Atomic force profilometry and long scan atomic force microscopy: New techniques for characterization of surfaces[J]. Surface Engineering, 2000, 16(4):295~298.

- [43] Ruzin A C N, Lubarsky G, Rosenwaks Y. Nano-scale potential profiles of silicon particle detectors measured by atomic force microscopy[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2001, 461(1-3):229~232.
- [44] Fukutome H, Arimoto H, Hasegawa S. Two-dimensional characterization of carrier concentration in metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with the use of scanning tunneling microscopy[J]. Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2004, 22(1):358~363.
- [45] Oden P I, Majumdar A, Bhushan B, et al. AFM imaging, roughness analysis and contact mechanics of magnetic tape and head surfaces[J]. Journal of Tribology, Transactions of the ASME, 1992, 114(4):666~674.
- [46] Cho N, Tsukada T, Takahashi M. Measurement of surface roughness with small waviness by contact stylus instrument correcting specimen orientation[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 1993, 59(11):1871~1876.
- [47] Poon C Y, Bhushan B. Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiler[J]. Wear, 1995, 190(1):76~88.
- [48] Kuhle A, Rosen B G, Garnæs J. Comparison of roughness measurement with atomic force microscopy and interference microscopy[C]. SPIE, 2003, 5188:154~161.
- [49] Mandak J. Device working on the light principle for surface-roughness measurement[C]. SPIE, 1992, 1776:158~164.
- [50] Bennett J M. Recent developments in surface roughness characterization[J]. Engineering Optics, 1993, 6(1):1~9.
- [51] Mashimo K, Nakamura T, Tanimura Y. Development of optical noncontact sensor for measurement of 3D profiles using the depolarized component of backscattered light[C]. SPIE, 1995, 2536:180~191.
- [52] Windecker Robert, Tiziani H J. Optical roughness measurements using extended white-light interferometry[J]. Optical Engineering, 1999, 38(6):1081~1087.
- [53] Osanna P H, Durakbasa M N. Concept for computer aided non-contact laser roughness evaluation of engineering surfaces[C]. SPIE, 2002, 4900(2):708~714.
- [54] Osanna P H, Durakbasa M N. Concept for computer aided non-contact laser roughness evaluation of engineering surfaces[C]. SPIE, 2002, 4900(2):708~714.
- [55] Yamaguchi I, Kobayashi K, Yaroslavsky L. Surface roughness measurement by digital speckle correlation[C]. SPIE, 2004, 5532:178~189.
- [56] Horiuchi T, Tomita Y, Hammel R. Surface roughness measurement with speckle intensity distribution detected using a linear image-sensor[J]. Jpn J Appl Phys, 1982, 21(12):743~745.
- [57] Stover J C, Serati S A. Calculation of surface statistics from light scatter[J]. Opt Eng 1984, 23(4):406~412.
- [58] Whitley J Q, Kusy R P, Mayhew M J, Buckthat J E. Surface roughness of stainless steel and electroformed nickel standards using a He-Ne laser[J]. Opt Laser Technol, 1987, 19(1):18~25.
- [59] Kurita MS, Nakano K. A technique for rapidly measuring surface roughness using a laser[J]. Int J Jpn Soc Mech Eng, 1992, 35(3):335~339.
- [60] Marx E, Vorbürger T V. Direct and inverse problems for light scattering by rough surfaces[J]. Appl Opt, 1990, 29:3613.
- [61] Huynh V M, Kurada S, North W. Texture analysis of rough surfaces using optical Fourier transform[J]. Meas Sci Technol, 1991, 2(9):831~837.
- [62] Perick B J. Surface roughness measurements with an optical Fourier spectrumanalyzer[J]. Appl Opt, 1979, 18:796.
- [63] Bennett J M, Lars M. Introduction to surface roughness and scattering [M]. Washington, DC: Optical Society of America, 1989.
- [64] Bennett H E. Scattering characteristics of optical materials[J]. Opt. Eng, 1978, 17(5):480~488.
- [65] Fujii H, Asakura T, Shindo Y. Measurement of surface roughness properties by means of laser speckle techniques [J]. Opt Commun, 1976, 16(1):68~72.

- [66] Toh S L, Sang S L, Tay C J. Surface-roughness study using laser speckle method[J]. *Opt Laser Eng*, 1998, 29 (2-3):217~225.
- [67] Fujii H, Asakura T, Shindo Y. Measurements of surface roughness properties by using image speckle contrast [J]. *J Opt Soc Amer*, 1976, 66(11):1217~1221.
- [68] Spagnolo G S, et al. Roughness measurement by electronic speckle correlation and mechanical profilometry[J]. *Measurement*, 1997, 20(4): 243~249.

Measurement of Device Surface Profile and Roughness

LI Xi-de, SHI Hui-Ji

(Department of Engineering Mechanics, FML, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The important methods on the measurement of surface height fluctuation, ranged from millimeter to sub-nanometer, are introduced with the parameters of profile and roughness based on the optical and scanning microscopic techniques. Topics include the structured light intensity pattern profilometry, the coherence profilometry, as well as the optical scattering and microscopic scanning methods which are applicable to the height fluctuations from centimeters to micrometers, from millimeters to sub-micrometers and from sub-micrometers to sub-nanometers respectively. The characterization mode and measured parameters in various height scales are discussed. Finally, the stress corrosion experiments are carried out to test the roughness change of an aluminum alloy (roughness change from $0.025\mu\text{m}$ to $0.7\mu\text{m}$) and the relationship between the surface roughness and the temperature of the corrosion solution and corrosion time is presented using local speckle intensity average and speckle autocorrelation methods respectively.

Key words: surface profilometry; roughness; structure; device; optical metrology; scanning microscopy