

文章编号: 0253-2239(2010)09-2578-07

抛喷丸表面的多波长散斑自相关法粗糙度测量

刘恒彪 王昌灵

(同济大学理学部, 上海 200092)

摘要 粗糙表面产生的多波长远场散斑图案的散斑延长现象可以用来进行表面粗糙度测量。以抛喷丸表面为研究对象, 具体介绍了多波长散斑自相关表面粗糙度测量方法。根据多波长散斑图案的各向同性径向辐射的特征, 提出了适用的数字图像处理方法。探讨了局部自相关函数特征长度的选取、数字图像处理过程中的局部窗口尺寸和散斑图像的饱和曝光比等因素对散斑延长效应的影响。通过拍摄和处理每一样品表面多个位置的多波长远场散斑图像, 计算了 R_a 分别为 0.4, 0.8, 1.6 和 3.2 μm 的表面样块的表面粗糙度指标值。结果表明, 该光学粗糙度指标能很好反映被测表面的粗糙程度。

关键词 光学测量; 表面粗糙度测量; 多波长散斑自相关; 散斑延长效应

中图分类号 TH741 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103009.2578

Roughness Measurement of Shot-Blasted Surface Based on Polychromatic Speckle Autocorrelation

Liu Hengbiao Wang Changling

(School of Sciences, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract The speckle elongation effect of speckle pattern produced at the far-field diffraction plane by roughness surface under illumination of polychromatic light can be utilized to measure surface roughness. A roughness measurement of a shot-blasted surface by means of polychromatic speckle autocorrelation is introduced. In consideration of the isotropic radial structure of polychromatic speckle pattern, an appropriate digital image processing algorithm is proposed. Several factors affecting the characteristics of the speckle elongation are discussed, which include the determination of characteristic length of local autocorrelation function, the size of local window for digital image processing, and the exposal saturation ratio of speckle image. By capturing and processing polychromatic far-field speckle images obtained from many points on each sample surface, optical roughness index values of sample surfaces with roughness parameter R_a of 0.4, 0.8, 1.6 and 3.2 μm are calculated, respectively. It is shown that the optical roughness index can be used in scaling well the roughness degree of sample surfaces.

Key words optical measurement; surface roughness measurement; polychromatic speckle autocorrelation; speckle elongation effect

1 引 言

利用相干光照射粗糙表面产生散斑的现象可以进行粗糙度测量。由于是非接触式测量, 散斑表面粗糙度测量技术对现代表面加工工艺的过程控制具有特殊意义。经过几十年的发展, 已经提出了多种具体的散斑表面粗糙度测量方法, 其中采用的照明光分单波长^[1,2]、多波长^[3~6]激光束和窄带连续谱光束^[7], 采集散斑图像信号的位置分像面^[3,4,6]和远场^[4,5,7,8], 处

理散斑图像信号的数学工具分对比度^[3]、自相关函数^[5,6,9]和互相关函数^[4,8]等。得益于现代半导体激光技术、图像传感技术和数字图像处理技术的进步, 多波长远场散斑自相关表面粗糙度测量方法^[7,9,10]较其他方法有装置易于小型化、工作距离长、使用调节简单、数据采集速度快等优点, 是一种有良好应用前景的在线测量方法。这种方法源于多波长远场散斑图案的散斑延长现象^[5,9,11], 散斑延长的幅度与光散射

收稿日期: 2009-10-28; 收到修改稿日期: 2009-12-21

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金(教外司留[2005]383号)资助课题。

作者简介: 刘恒彪(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事光学测量方面的研究。E-mail: liuhb62@tongji.edu.cn

表面的粗糙度有关,表面越粗糙,散斑延长幅度越小。由于散斑图案的分布特征与表面纹理也有关,对用不同方法加工的表面,要开发合适的数字图像处理算法来表征表面的粗糙程度。

本文以抛喷丸表面为研究对象,具体介绍多波长散斑自相关表面粗糙度测量方法;根据这类表面的多波长远场散斑图案的各向同性径向辐射特征,提出适用的数字图像处理方法,探讨局部自相关函数特征长度的选取、数字图像处理的局部窗口尺寸和散斑图像的饱和曝光比对散斑延长效应的表征效果的影响;由局部自相关函数特征长度的分布构建衡量表面粗糙程度的光学粗糙度指标。

2 实验装置与过程

图 1 为多波长远场散斑自相关表面粗糙度测量实验装置。两支不同波长的半导体激光器发出的光通过分束器合成同轴光束。由于半导体激光器的出

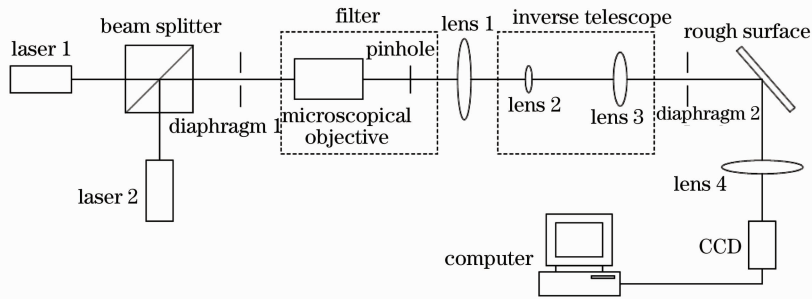


图 1 多波长远场散斑自相关表面粗糙度测量实验装置

Fig. 1 Experimental setup for surface roughness measurement based on polychromatic far-field speckle autocorrelation

为获得清晰的径向辐射状散斑图像,要保证不同波长的激光束同轴、准直、光斑强度分布一致地照射粗糙表面。为此,对实验装置要逐级进行精细调节。首先要调节两支单波长激光束的同轴性。将激光器安装在具有沿 x, y 轴(z 轴为光轴方向)平移和绕此二轴偏转功能的四维调节架上。在光学平台上布置、安装分束器和两支激光器。再在分束器的合成光束出射方向的两个相距较远的截面上,利用 CCD 图像传感器交替观察两支激光束的光斑中心位置,边观察边调节安有激光器的四维调节架,直到在两个观察截面上两支激光束的光斑中心都能重合。接着,安装光阑 1,使光阑孔中心与合成光束的光斑中心对正;调节光阑孔径至适当大小,使两单波长激光束的重叠部分通过,滤除差异部分。随后,顺着光路依次安装、调节各光学器件。在安装透镜 1 和望远镜后,都要检测出射光束的发散度,这依然可利用 CCD 图像传感器观测在两个相距较远截面上

射光斑成椭圆或短条形状,在分束器后设置光阑 1,以截取两激光束的光斑重叠部分通过。针孔滤波器对多波长激光束进行空间滤波,以得到均匀的出射光斑。透镜 1 将通过针孔的光准直成平行光。倒置的望远镜用于放大平行光的光斑直径。光阑 2 的作用是调节照明粗糙表面的光斑直径,并消除杂散光。多波长激光束被粗糙表面散射,在透镜 4 的后焦面上形成远场散斑。散斑图案用 CCD 图像传感器记录,信号被传输到计算机中进行数字图像处理。实验装置中,两支半导体激光器的波长分别为 635 nm 和 650 nm,最大输出功率均为 10 mW;针孔滤波器中采用了 10 倍显微物镜和直径为 $25 \mu\text{m}$ 的针孔;透镜 1、透镜 2、透镜 3 和透镜 4 的焦距分别为 38.1, 100, 150 和 100 mm;光阑 2 的直径调为 2.5 mm;CCD 图像传感器(AVT Marlin F-080B)的光敏单元尺寸为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$,图像尺寸为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$,动态范围为 8 bit。

的光斑直径来进行。光阑 1 和针孔滤波器是保证两支单波长激光束光斑强度分布一致性的关键。此外,还须调节两单波长激光束在粗糙表面处的光功率一致。

实验样品采用轮廓算术平均偏差 R_a 分别为 $0.4, 0.8, 1.6$ 和 $3.2 \mu\text{m}$ 的抛喷丸表面粗糙度比较样块。为便于对粗糙表面进行多点测量,表面样块固定在二维平移台上。由于这些表面样块已被拼装在一块金属板上,各样块表面的几何平面并不共面,相互存在小角度的倾斜,导致测量点从一个样块移到另一个样块时,多波长远场散斑图案的中心会出现较大偏移。将 CCD 图像传感器安装在另一套二维平移台上,通过视觉观察可使散斑图案中心与拍摄视场中心基本对正。

3 多波长远场散斑图案的区域特征

粗糙表面的多波长远场散斑图案具有从中心沿

径向向外辐射的特征。对于像抛喷丸表面之类具有各向同性二维轮廓的表面,散斑图案的辐射特征也是各向同性的。图 2 给出了在 $R_a=0.4 \mu\text{m}$ 的表面样块上一个测量点散射的两幅单波长散斑图案和合成多波长散斑图案。多波长散斑图案的辐射特征归因于波长较大的单波长散射角度分布相对于波长较短的单波长散射角度分布的错位^[9,10]。考察图 2,

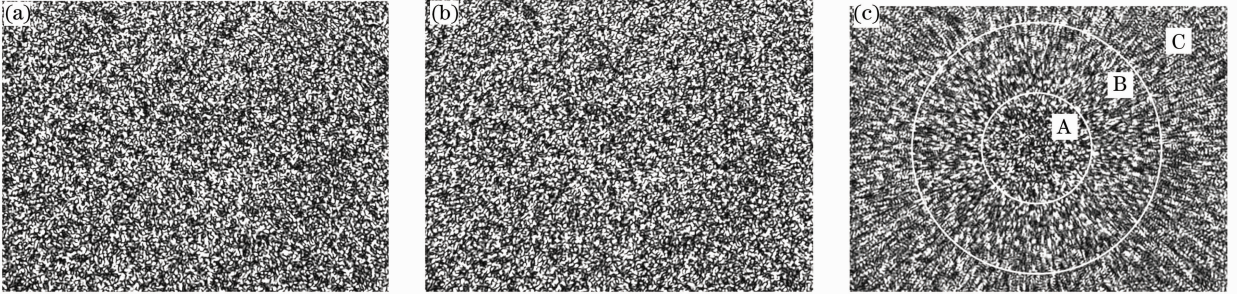


图 2 抛喷丸表面的单波长[(a) $\lambda=635 \text{ nm}$, (b) $\lambda=650 \text{ nm}$]和多波长[(c) $\lambda=635 \text{ nm}$ and 650 nm]远场散斑图案
Fig. 2 Monochromatic [(a) $\lambda=635 \text{ nm}$, (b) $\lambda=650 \text{ nm}$] and polychromatic [(c) $\lambda=635 \text{ nm}$ and 650 nm] far-field speckle pattern generated from shot-blasted surface

由于不同波长的散射光场角度分布的错位幅度随散射角的增大而增大,合成的多波长散斑图案呈现三个特征区域,如图 2(c)中的 A, B 和 C 所示。在 A 区,散斑斑粒的分布和大小与单波长的基本相同,这是由于两个单波长散斑图案的径向错位很小,两者直接重叠造成的。在 B 区,两个单波长散斑图案的径向错位增大,但错位幅度还不足使不同波长的散斑斑粒分离,两者部分重叠导致该区域的多波长散斑斑粒呈径向延长状。在 C 区,两个单波长散斑图案的径向错位进一步增大,凭视觉观察,两单波长的散斑斑粒完全错开。当然,从 A 区到 B 区,从 B 区到 C 区是平缓过渡的,并不存在明显的界限。与表面粗糙度测量关系大的是 B 区。C 区可否利用,有待进一步的研究。

4 多波长远场散斑图案的局部统计特征

散斑场强度空间分布的自相关函数是描述散斑延长效应的有效工具^[9],自相关函数的特征长度是对散斑斑粒“大小”的合适度量。在以往的理论研究和涉及散斑场点式探测的实验工作中,自相关函数通常定义在物面系综平均的基础上。为充分利用图像传感器对散斑场二维探测的大量数据,在散斑图案上设置可移动的局部窗口,以窗口内散斑强度分布的空间平均局部自相关函数的特征长度来表征该局部的散斑长度,这是一个合理的选择。鉴于多波长远场散斑图案的分区特征,局部窗口的尺寸要适

不难发现这种效应:两个单波长散斑图案的细节相似,大波长的图案[图 2(b)]比小波长的图案[图 2(a)]有所放大。这种角度扩散效应使两个单波长散斑图案的强度分布以镜面反射方向对应的点为中心沿径向相互错位,两个错位散斑图案强度合成的结果使多波长散斑图案[图 2(c)]呈现明显的径向辐射特征。

中,窗口太大,会减小相邻局部散斑长度计算值的差异;窗口太小,参与统计运算的数据量太少,会增加散斑长度计算值的不确定性。

根据多波长远场散斑图案的各向同性径向辐射特征,只须沿着通过散斑图案中心的一条径向轨迹移动局部窗口,计算散斑斑粒长度分布。由于通过视觉观察所确定的散斑图案中心并不精确处于拍摄视场中心,在计算散斑斑粒长度分布前,要用数字图像处理方法寻找散斑图案中心^[12]。本文将寻找散斑图案中心和计算散斑斑粒长度径向分布纳入到一个统一的框架内,具体过程如下:1)如图 3 所示,在一幅散斑图像上以垂直中线为轴线设置局部窗口,窗口从上到下(y 方向)以一定的步长移动,计算在每个窗口位置的局部自相关函数和其特征长度;在

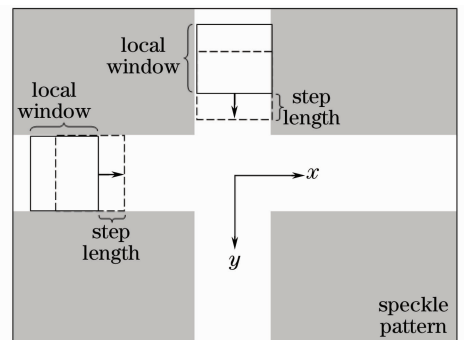


图 3 散斑图像处理的局部窗口设置
Fig. 3 Local windows setting of speckle image processing

特征长度分布曲线的中段用余弦函数进行曲线拟合,以拟合曲线最小值所在位置为散斑图案中心的纵向位置。2)以一条通过散斑图案中心的水平线为轴线设置局部窗口,窗口从左到右(x 方向)以一定的步长移动,计算在每个窗口位置的局部自相关函数和其特征长度;在特征长度分布曲线的中段用余弦函数进行曲线拟合,以拟合曲线最小值所在位置为散斑图案中心的横向位置。

4.1 多波长远场散斑图案的空间平均局部自相关函数

对分别沿 x, y 方向移动的局部窗口,统一规定各自的移动方向为其长度方向,与之垂直的方向为宽度方向。在局部窗口内,对沿窗口长度方向的位置偏移量 $\Delta\xi$ (对沿 x, y 方向移动的局部窗口, $\Delta\xi$ 分别为 $\Delta x, \Delta y$),散斑图像的空间平均局部自相关函数 $\gamma(\Delta\xi)$ 定义为

$$\gamma(\Delta\xi) \Big|_{\Delta\xi=k\delta} = \frac{\sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^{l-k} (I_{i,j} - \bar{I})(I_{i,j+k} - \bar{I})}{\sqrt{\sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^{l-k} (I_{i,j} - \bar{I})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^{l-k} (I_{i,j+k} - \bar{I})^2}}$$

式中 δ 是单位偏移量,相当于拍摄散斑图像的 CCD 传感器在局部窗口长度方向上两相邻光敏单元的中心距; k 为位置偏移单位数; l 和 w 分别为局部窗口内数字散斑图像的列数(沿窗口长度方向计数)和行数; $I_{i,j}$ 为局部窗口内第 i 行第 j 列散斑图像像素的灰度标度; \bar{I} 是局部窗口内散斑图像的平均灰度

标度。

图 4 给出了按照上述算法对 $R_a=0.4 \mu\text{m}$ 的抛喷丸表面样块的一幅多波长远场散斑图像的局部自相关函数计算结果,图中 LW01~LW13 分别指沿通过散斑图案辐射中心的水平线从图像左边开始以 32 pixel 的步距移动到散斑图案辐射中心的 13 个局部窗口位置,局部窗口的大小为 129 行 \times 129 列。先看图 4(a),第一个窗口位置 LW01 处于散斑图案的 C 区,凭视觉观察,其中两单波长的散斑斑粒完全错开。在这个窗口位置,随着位置偏移 Δx 的增大,局部自相关函数先从 1 下降到一个极小值,再从极小值上升到一个极大值,然后从极大值下降到接近于 0。在窗口位置 LW02 和 LW03,局部自相关函数保持了在 LW01 窗口位置时的曲线特征,只是函数曲线振荡部位的极小值有所上升,振荡幅度减小。在前三个窗口的局部自相关函数曲线出现振荡的部位,在窗口位置 LW04 的局部自相关函数不再有极小值和极大值,但函数曲线的凹性同前三条曲线相同;在窗口 LW05 和 LW06,函数曲线的凹性逐渐消失。可以判定,窗口位置 LW06 是散斑斑粒延长幅度最大的位置。再看图 4(b),从窗口位置 LW06 到窗口位置 LW13,各局部自相关函数的曲线形状基本一致,曲线的下降部分依序逐渐靠近纵坐标轴。若要进行曲线拟合,LW06 曲线的数学模型应是近似线性函数,LW13 曲线的数学模型应是高斯函数。

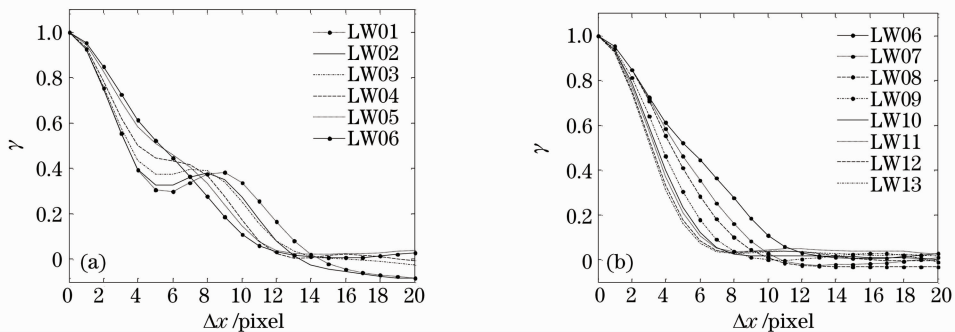


图 4 抛喷丸表面($R_a=0.4 \mu\text{m}$)的多波长远场散斑图案的局部自相关函数

Fig. 4 Local autocorrelation function of polychromatic far-field speckle pattern generated from shot-blasted surface ($R_a=0.4 \mu\text{m}$)

对不同粗糙度的表面样块在相同实验条件下拍摄的多波长远场散斑图像的局部自相关函数具有与图 4 相似的曲线形状变化过程,即随着局部窗口从散斑图案的 C 区移动到散斑图案的辐射中心,局部自相关函数的曲线形状由振荡下降、近似直线下降

到依高斯函数规律下降;不同的是,随着粗糙度的增大,在散斑图案 C 区同一位置处的局部自相关函数曲线的振荡区逐渐下移。

4.2 散斑长度的确定

鉴于局部窗口从多波长远场散斑图案的 C 区

移动到散斑图案辐射中心的过程中,局部自相关函数的曲线形状由振荡下降、近似直线下降到依高斯函数规律下降,拟以曲线上具有特定函数值的点(如果出现多个点,以最左边的点为准)对应的位置偏移量 $\Delta\xi$ 作为散斑长度,所取的特定函数值称为量度水平。为考察量度水平在表征散斑延长效应时的作用,仍对产生图 4 的散斑图像进行处理。所取局部窗口的尺寸、移动步距同上,窗口沿通过散斑图案辐射中心的水平线从图像左边开始移动到图像右边,共 28 个局部窗口位置。对每个窗口位置计算局部自相关函数,分别在量度水平为 0.2,0.3,0.4 和 0.5 时确定散斑长度,结果显示在图 5 中。图 5 的横轴表示局部窗口中心在散斑图像上所处的 x 坐标(坐标原点在图像左边),图中的散斑长度分布曲线经过了三次样条插值,各曲线的取名规则是字符“H”加量度水平。当量度水平为 0.2 时,从散斑图案辐射中心沿径向向外,散斑长度逐渐增长;即使在不同单波长的散斑颗粒相互分离的 C 区,也是如此。这显然与视觉观察不相符。在量度水平为 0.3 和 0.4 时,散斑长度分布曲线的两端出现骤然下降的线段,这个现象与散斑图案 C 区的局部自相关函数的振荡特性有关。考察图 4(a),当量度水平取为 0.3 时,对于曲线 LW01,散斑长度的测量点落在振荡区极小点之前的下降段;对于曲线 LW02,测量点却落在振荡区极小点之后的下降段,这导致了图 5 中 H0.3 曲线左端的跳变。为利用散斑图案 B 区的散斑延长特征进行表面粗糙度测量,量度水平的取值应大于所有局部自相关函数曲线的振荡区极小值。曲线 H0.5 说明,量度水平 0.5 满足这个要求。

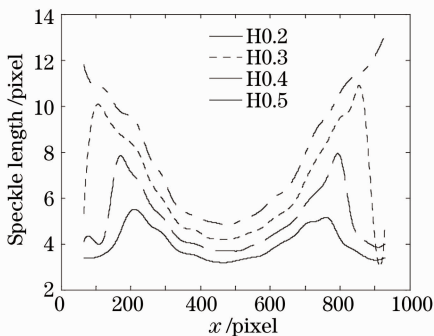


图 5 在局部自相关函数不同水平处确定的散斑长度分布

Fig. 5 Distributions of speckle length determined by different levels of local autocorrelation function

4.3 局部窗口尺寸对散斑长度计算值的影响

作为一个随机过程,散斑图案各位置的散斑长

度计算值明显受到局部窗口尺寸的影响。窗口越小,算得的局部自相关函数的曲线形状越复杂,振荡幅度也越大;相邻窗口位置的散斑长度值的波动也较大。窗口过大,会使散斑图案辐射中心位置与最大散斑延长位置的散斑长度的差值变小,影响表面粗糙度测量的灵敏度和测量范围。图 6 显示了沿水平方向移动的局部窗口的尺寸对散斑长度分布的影响情况,图中曲线 W65, W97 和 W129 分别对应窗口尺寸 65 行 \times 65 列, 97 行 \times 97 列和 129 行 \times 129 列。除沿水平方向移动的局部窗口的尺寸不同外,图 6 采用了同图 5 相同的散斑图像和处理参数。

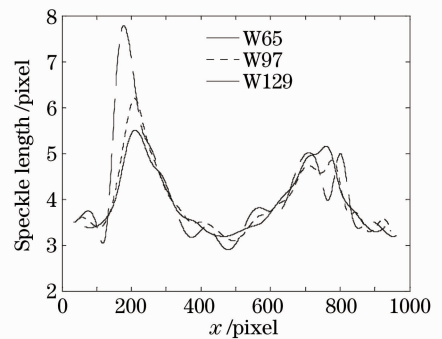


图 6 局部窗口尺寸对散斑长度计算值的影响

Fig. 6 Affection of local window size on calculated values of speckle length

4.4 饱和曝光比对散斑长度计算值的影响

根据统计光学理论^[13],单波长散斑图像的强度服从负指数统计规律。这意味着用有限动态范围的数字图像传感器拍摄散斑图像时会出现饱和问题。如果以出现最大灰度标度的像素数占图像总像素数的百分比(下称“饱和曝光比”)来衡量图像的饱和程度,饱和曝光比对散斑图像各位置的散斑长度计算值有影响。图 7 中三条散斑长度分布曲线 T1, T2 和 T3 是对拍摄自同一散射场,但饱和曝光比分别控制在 2%, 5% 和 10% 的三幅散斑图像的处理结

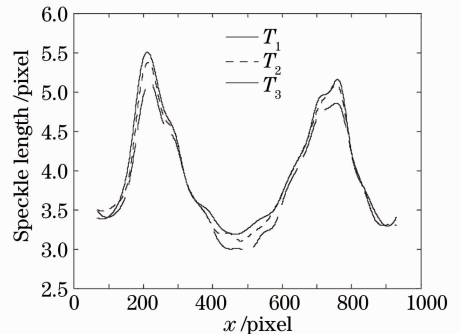


图 7 散斑图像的饱和曝光比对散斑长度计算值的影响

Fig. 7 Affection of exposure saturation ratio of speckle images on calculated values of speckle length

果。图 4~6 也与图 7 出自同一散射场,前三者又出自饱和曝光比为 2% 的同一散斑图像。图 7 表明,随着饱和曝光比的增大,散斑长度分布曲线近似向下作整体平移;若以各曲线的最小值对曲线进行规一化处理,三条规一化曲线的差别并不大。这说明,在所考察的 2%~10% 范围内,饱和曝光比的波动对表征散斑延长效应影响不大。

5 表面粗糙度测量实验

考虑到粗糙表面不同局部区域微观特征的不均匀性,为提高表面粗糙度测量的精度,采用多点平均方法进行测量。这个方法的具体步骤是:

1) 对每个表面样块随机选取多个表面测量点(剔除疵点),按照在第 2 节介绍的实验过程拍摄每个测量点散射的多波长远场散斑图像;

2) 再按照在第 4 节介绍的方法处理这些图像,得到每幅图像的散斑长度分布曲线;

3) 以散斑长度分布曲线中部的余弦拟合曲线的极小点作为基准点,移动各散斑长度分布曲线至各基准点相互对齐,求平均散斑长度分布并对分布曲线中部的极小值进行规一化;

4) 在给定区间内,计算规一化平均散斑长度分布曲线与纵坐标值等于 1 的水平直线之间的面积,以此作为衡量被测表面粗糙程度的参数——光学粗糙度指标。

实验过程中,对每个表面样块的测量点数为 20。在拍摄多波长远场散斑图像和进行散斑图像处理时,采用了第 4 节讨论所确定的合适参数,即饱和曝光比为 2%,局部窗口尺寸为 129 行×129 列,窗口移动步距为 32 pixel,散斑长度的量度水平为 0.5。图 8 给出

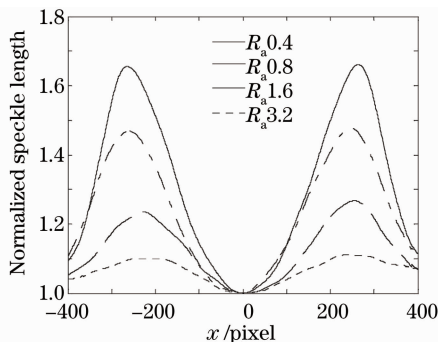


图 8 抛喷丸表面的多波长远场散斑图案的规一化平均散斑长度分布

Fig. 8 Distributions of normalized average speckle length of polychromatic far-field speckle patterns generated from shot-blasted surfaces

了从 R_a 分别为 0.4, 0.8, 1.6 和 3.2 μm 的 4 个抛喷丸表面样块得到的规一化平均散斑长度分布。每条曲线呈对称双峰形状;各曲线的高度随表面粗糙度的增大依次下降,峰值点逐渐移向散斑图案的辐射中心。图 9 是由图 8 的 4 条规一化平均散斑长度分布曲线在 $[-400, 400]$ 区间算得的光学粗糙度指标。随着表面样块粗糙度的增大,光学粗糙度指标值依次减小。

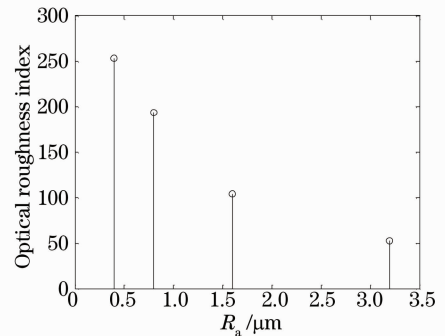


图 9 抛喷丸表面的光学粗糙度指标

Fig. 9 Optical roughness index of shot-blasted surfaces

6 结 论

抛喷丸表面散射的多波长远场散斑图案具有各向同性的径向辐射特征。用合适尺寸的局部窗口在散斑图像上作一次垂直和一次水平扫描移动,对各窗口位置计算散斑强度分布的局部自相关函数,并以合适的量度水平在局部自相关函数中确定散斑长度,就可得到一条在散斑图案辐射径向上的散斑长度分布。对一个粗糙表面的多个表面点分别拍摄多波长远场散斑图像,处理这些图像所得到的平均散斑长度分布的曲线形状更平稳。由规一化平均散斑长度分布计算的被测表面样块的光学粗糙度指标与表面样块的轮廓算术平均偏差 R_a 之间成单调下降的函数关系。对于其它粗糙度范围、其它方法加工的表面可在理论研究确定多波长激光束的波长组合后,再依照本文建立和调节实验装置,拍摄表面样品的多波长远场散斑图像,适当修改散斑图像数字处理算法,就可得到所需的光学粗糙度指标与轮廓算术平均偏差或标准规定的其它表面粗糙度参数之间的对应关系。这种测量方法适用于在线测量。

参 考 文 献

- Liu Hengbiao, Liu Chenglin. Experimental research on surface roughness measurement using angular-speckle correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 697~701
- 刘恒彪, 刘成林. 角度散斑相关法表面粗糙度测量实验[J]. *光学学报*, 2009, 29(3): 697~701

- 2 Zhao Xuezheng, Gao Zhao. Computer simulation and experiment for surface roughness measurement using speckle images [J]. *Opt. Tech.*, 2009, **35**(2): 239~243
赵学增, 高 昭. 利用散斑图像测量表面粗糙度的计算机模拟及实验[J]. *光学技术*, 2009, **35**(2): 239~243
- 3 Carlos M. P. Rodrigues, Joao L. Pinto. Contrast of polychromatic speckle patterns and its dependence to surface heights distribution [J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(6): 1699~1703
- 4 Bernd Ruffing. Application of speckle-correlation methods to surface-roughness measurement; a theoretical study [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(8): 1297~1304
- 5 Y. Tomita, K. Nakagawa, T. Asakura. Fibrous radial structure of speckle patterns in polychromatic light [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(18): 3211~3218
- 6 N. Nagamatsu, K. Nakagawa, T. Asakura. The autocorrelation function of polychromatic laser speckle patterns near the image plane [J]. *Opt. and Quantum Electron.*, 1983, **15**(6): 507~512
- 7 Peter Lehmann. Aspect ratio of elongated polychromatic far-field speckles of continuous and discrete spectral distribution with respect to surface roughness characterization [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(10): 2008~2014
- 8 Wang Jing, Liu Hengbiao. Numerical simulation of surface-roughness measurement based on angular speckle-correlation method using spatial average [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 259~264
王 靖, 刘恒彪. 空间平均的角度散斑相关粗糙度测量模拟研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 259~264
- 9 Peter Lehmann, Stefan Patzelt, Armin Schöne. Surface roughness measurement by means of polychromatic speckle elongation [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(10): 2188~2197
- 10 Liu Hengbiao, Chi Jingchun. Analysis of affecting factors on surface roughness measurement based on polychromatic speckle elongation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 279~284
刘恒彪, 池景春. 基于多波长散斑延长效应的表面粗糙度测量及影响因素分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 279~284
- 11 G. Parry. Some effects of surface roughness on the appearance of speckle in polychromatic light [J]. *Opt. Commun.*, 1974, **12**(1): 75~78
- 12 Andreas Ciossek. Einsatz von Speckle-Korrelationsverfahren im Nitrierprozess [M]. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2003
- 13 J. W. Goodman. *Statistical Optics* [M]. New York: Jhon Wiley & Sons, Inc., 1985