

衍射光强取样分析法测定划痕宽度: 实验部分

戴名奎 徐德行 沈卫星

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 根据衍射光强取样分析法理论部分的测量原理设计了一套实验方案, 比较了该方法与轮廓仪、显微镜对划痕实际宽度的测试结果, 给出了其相对测量误差, 并分析了误差的主要来源。该方法速度快, 精度高, 有推广和应用的价值。

关键词 衍射花样, 划痕宽度, 测量。

1 引 言

划痕宽度是近于宏观的微观结构, 肉眼(或借助放大镜)可以看见, 但又难以精确分辨其实际宽度。为此作者提出了衍射光强取样分析法^[1], 将定性测量转化为定量测量, 将微观测量转化为宏观测量, 解决了对划痕实际宽度精确而又快速的测量问题。

根据衍射光强取样分析法理论部分的测量原理, 设计了一套实验方案, 并就实验中得到的有关划痕的角谱进行分析与计算得到了划痕的实际宽度。文中比较了此方法与显微镜、轮廓仪的测试结果, 较为详细地分析了该测量方法的主要误差的来源。

2 实验方案

图 1 是根据衍射光强取样分析法设计的实验装置, 它由三个部分组成:

1) 扩束准直部分。来自氦氖激光器 1 的光束经反射镜 2 和 3 后被显微物镜 4 扩束, 再经

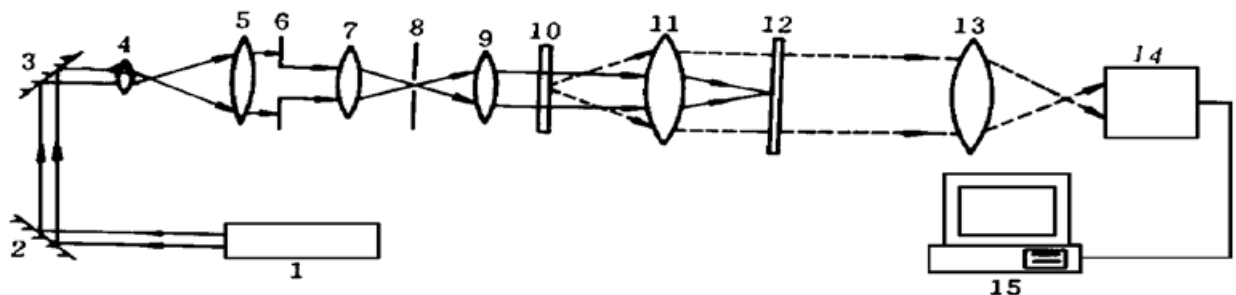


Fig. 1 Optical schematic of sampling the diffracted-light intensity to measure scratch width

准直透镜 5, 得到一束平行光。

2) 滤波照明部分。由 1) 得到的平行光经过光阑 6 后被透镜 7 聚焦到小孔 8 上, 再经透镜 9 变成一束平行光对被测件 10 进行均匀照明(如果光阑 6 放在透镜 7 的前焦点上且被测件 10 放在透镜 9 的后焦点上, 该部分所起的作用相当于把光阑 6 经过滤波成像到被测件 10 上), 其中的小孔 8 用于滤除光阑衍射角谱的高频部分。该部分用来排除光阑衍射对划痕衍射的干扰。

3) 衍射角谱接收部分。照明光束经过待测件后被透镜 11 会聚到中心滤波平板 12(位于透镜 11 的焦点上)上, 该滤波平板用于滤除光束中的低频部分, 仅让高频部分通过。最后经透镜 13 把中心滤波平板所在面的光强分布成像到 CCD(14)上, CCD 再把接收的数据输送到计算机(15)进行处理。用这种方法接收角谱可以避免焦点强光对划痕衍射谱的干扰和对 CCD 造成的可能损害。

3 实验结果

图2(a)、(b)是在该装置上用CCD接收到的划痕的衍射花样, 通过对图2(a)、(b)进行处理得到如图 3(a)、(b)上半部分所示的划痕衍射的一维光强积分分布曲线。

衍射光强取样分析法测量划痕宽度的计算公式为^[1]

$$d = \frac{\lambda}{2\pi \sin \theta_1} \cos^{-1} \sqrt{\frac{E_{sc2}}{E_{sc1}}}$$

其中, d 为划痕半宽度; λ 为激光波长; θ_1 为位置 1 的衍射角; E_{sc1} 和 E_{sc2} 分别为位置 1 和位置

2 处($\sin \theta_2 = 2 \sin \theta_1$) 划痕衍射的光强积分。由该公式计算得到如图 3(a)、(b)下半部分所示的划痕宽度。其中的横线为去干扰求平均后得到的划痕实际宽度。

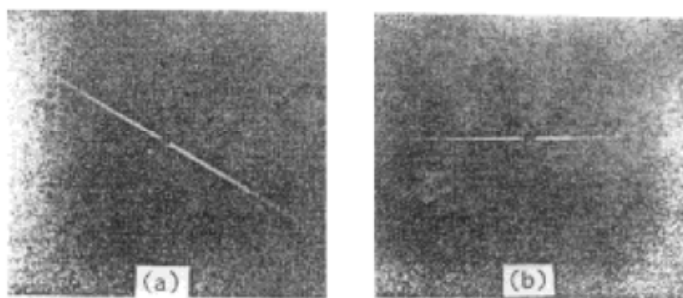


Fig. 2 Diffraction patterns of scratches

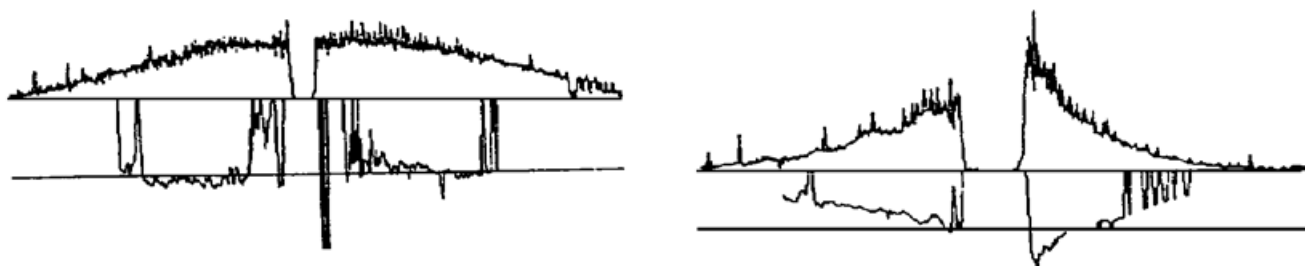


Fig. 3 The intensity integral of diffracted-light caused by scratches and its' measured widths

通过对一些自然划痕和人造划痕的测试得到的实验结果如表 1 所示, 作为比较与验证, 表中同时列出了用英国 Rank Taylor Hobson 公司制造的触针式轮廓仪和德国 LEITZ 公司制造的大视场显微镜的测试结果。从实验结果可以看出, 相对测量误差一般不超过 $\pm 15\%$ (极少数几个边缘有较高突起的划痕和深浅粗细很不均匀不易确定其具体宽度的划痕除外, 表中也未把它们列出)。

Table 1. The scratch width measured by sampling diffracted-light intensity, compared with the width measured by microscope and stylus profiler

| scratch no. | scratch width measured by sampling diffracted-light intensity / μm | scratch width measured by stylus profiler / μm | difference between the width measured by sampling diffracted-light intensity and stylus profiler /% | scratch width measured by microscope / μm | difference between the width measured by sampling diffracted-light intensity and microscope /% |
|-------------|---|---|---|--|--|
| 1 | 3.3 | — | — | 3.2 | 3.1 |
| 2 | 3.8 | — | — | 3.7 | 2.7 |
| 3 | 4.7 | — | — | 4.2 | 11.9 |
| 4 | 4.9 | — | — | 4.3 | 14.0 |
| 5 | 5.2 | 4.8 | 8.3 | 4.9 | 6.1 |
| 6 | 9.6 | 10.0 | - 4.0 | 9.1 | 5.5 |
| 7 | 15.2 | 16.5 | - 7.9 | 13.8 | 10.1 |
| 8 | 21.7 | 23.7 | - 8.4 | 21.4 | 1.4 |
| 9 | 24.9 | 26.0 | - 4.2 | 28.7 | - 13.2 |
| 10 | 26.0 | 27.5 | - 5.5 | 25.9 | 0.4 |

4 误差分析

衍射光强取样分析法通过接收和分析划痕的衍射光强分布求出其宽度,从某种意义上说,它避开了划痕深度的影响,实现了对划痕实际宽度的测量。但由于实验样品上的划痕的形状往往并不象假设的那样规则,其衍射花样与理论计算的结果或多或少存在一点差别,由衍射光强取样分析法得到的宽度与实际的宽度的差别一般随划痕的不规则性的增大而增大。另外本实验装置和处理方法还不很完善,也给测量结果带来一些误差。由于影响测量结果的因素较多,下面将只对其中的几个主要误差来源进行具体分析。

4.1 划痕形状的复杂性给测量带来的误差

本实验所用的划痕中,很多划痕各段宽度并不相同,甚至差别很大。如果在测量区内各段宽度的变化也很大,如何判定划痕到底有多宽是一个令人头痛的问题。即使轮廓仪能很清楚地描绘出划痕的几何形貌,也很难精确估计出划痕的具体宽度。实验中轮廓仪测量的是一个截面的宽度,衍射光强取样分析法测量的是一段划痕的综合宽度,且位置也可能不很一致,因此彼此所得结果难免存在一定差异。

划痕截面的几何形状与系数因子密切相关。对于那些纯粹下陷性划痕,如果它在测量区内划痕各段的宽度和深度变化不是很大,其深度又不是很深,且预知其大概的截面形状(如它类似于三角形或是余弦形),用透射方法测量时,系数因子的影响一般不超过 $\pm 5\%$ 。对于那些边缘有较高突起的划痕,衍射光强取样分析法对该类划痕的测量误差大概在 $\pm 15\%$,有时可能会更大一些。如果划痕很深,某些截面形状(如三角形)划痕的衍射光有一部分偏离中心很远,使靠近中心部分的衍射光强分布接近于矩形划痕的衍射光强分布,对于这种情况,系数因子接近于1,且受深度改变的影响大约在 $\pm 10\%$ 左右。对于那些不深又不浅的划痕,分析起来比较复杂,目前还未找到合适的处理方法精确地测定其宽度,其测量的估计值相对

实际宽度的误差可能会超过 $\pm 20\%$, 有时可能更大一些。

总而言之, 划痕形状复杂性给测量带来的较大误差, 其中有一部分是由于方法的原因而不能很精确地测定某些划痕的宽度, 还有一部分是由于划痕深浅粗细很不均匀, 不易确定其具体宽度造成的。

4.2 背景光强及 CCD 噪声的干扰给测量带来的误差

本实验设备未能配套, 不能很好地隔离外界的较强杂光, 以致所接收的背景光强数值较大, 而且杂光并不是非常均匀, 加之 CCD 本身的噪声, 都给划痕衍射光的提取造成一定的影响。

4.3 照明光强和接收光强的调节给测量带来的误差

本实验对照明光强和接收光强的调节还不够好, 使接收的衍射光强有的太暗, 也有的有点饱和。光强太暗受背景光的起伏干扰比较大, 在提取划痕衍射光强时容易将占相当大比重的背景光计算进划痕衍射光中, 也容易将划痕衍射光作为背景光滤除。光强太强, 会超过 CCD 的线性范围, 数值化以后相应的数值就不能如实反映光的强度, 当然难免要影响最终的结果。

4.4 CCD 的定标给测量带来的误差

由于 CCD 接收的是透镜 13 对透镜 11 的空间频谱面所成的像, CCD 的定标也就是测出 CCD 单个像素对应于透镜 11 的空间频谱面上的多大的尺寸。如果被测件放在透镜 11 ($f_1 = 150 \text{ mm}$) 的前焦面上, CCD 的定标对测量结果的影响很小。当被测件放在偏离透镜 11 前焦面外 10 mm , 透镜 13 把空间频谱缩小 3 倍成像到 CCD 上, 定标钢棒(应置于透镜 11 后焦面)偏离空间频谱面 5 mm , 由位置调整引入的误差大约为 $\pm 0.3\%$ 。本实验的定标钢棒对应 CCD 上大约 96 个像素的宽度, 测量宽度与实际宽度大约相差一个像素, 由此引入 $\pm 1.1\%$ 的误差。

4.5 焦点位置的确定给测量带来的误差

本实验如果在确定焦点位置时将挡板移开, 让焦点落到 CCD 上(要加滤光片), 误差大约为 1 个像素。为方便起见, 本实验以挡板的中心为焦点位置, 误差在 4 个像素左右。当 CCD 每个像素对应于空间频谱面上 0.0338 mm 的宽度, 对于宽度为 $5 \mu\text{m}$ 的矩形划痕, 如果以焦点位置为分界线的一半频谱来计算划痕宽度, 由焦点位置的确定引入的误差大约为 $\pm 1\%$; 对于宽度为 $20 \mu\text{m}$ 的矩形划痕, 误差大约为 $\pm 4\%$; 如果把由分析两半频谱得到的划痕宽度平均起来, 由焦点位置的确定引入的误差会小很多。

除此以外还有一些因素影响测量结果, 如实验装置中光学元件的像差与其光路调整时存在的偏差以及透镜 13 位置选取(即确定系统对空间频谱的放大倍数)的不当都会缩小测量的有效区, 光学件的表面粗糙度及疵病造成的散射光会影响对划痕衍射光的提取等。

结 论 衍射光强取样分析法在接收到划痕衍射的空间频谱后只要用 30 s 左右的时间就能算出划痕的宽度。目前对于宽度在 $2 \mu\text{m} \sim 30 \mu\text{m}$ 范围内且较为规则的划痕, 实验测量误差一般不超过 $\pm 15\%$ 。如果进一步提高光学系统的质量和完善数据处理方法, 对于那些预知划痕截面的大概形状的规则划痕, 预计其测量误差将优于 $\pm 10\%$ 。

衍射光强取样分析法比较适用于因加工不完善在表面留下的划痕宽度的测量。对于那些由刻划得到的划痕, 该方法的测量精度会因划痕形状的不同而有所不同。不过作者认为, 鉴于划痕形状比较复杂, 即使测量误差达到 $\pm 15\%$, 相对于目视法说, 已有了相当大的进步。

甚至误差达到 $\pm 30\%$ ，也还基本上能适应疵病不同等级的划分^[2]。

衍射光强取样分析法克服了目视法受人的主观因素影响较大的缺点，实现了对划痕宽度的客观测量。它的仪器化对于大量的高功率激光光学元件的疵病检验^[3]，必将起到巨大的作用。

参 考 文 献

- [1] 戴名奎, 徐德衍, 衍射光强取样分析法测定划痕宽度: 理论部分. 光学学报, 1997, 17(3): 351~ 356
- [2] 机械工业部仪器仪表工业局统编, 光学元件技术要求. 北京, 机械工业出版社, 1984: 98
- [3] H. E. Bennett, Use of MIL-O-13830 for specifying the surface quality of laser optics. *Proc. SPIE*, 1985, 525: 78~ 81

Measuring Scratch Width by Sampling Diffracted-Light Intensity: Experiment

Dai Mingkui Xu Deyan Shen Weixing

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 15 January 1997; revised 30 April 1997)

Abstract An experimental arrangement has been built for measuring scratch width by sampling diffracted-light intensity. Using this arrangement, several specimen are measured, and the scratches widths can be obtained efficiently and quickly. In general case, the measuring error is smaller than $\pm 15\%$.

Key words diffraction pattern, scratch width, measurement.