

光滑表面粗糙度 R_z 参数的一种干涉测量法

褚长亮 屈光辉

(西安理工大学理学院 陕西 西安 710054)

王武孝

(西安理工大学材料科学与工程学院 陕西 西安 710054)

刘满仓 刘如军 张 琴

(西安理工大学理学院 陕西 西安 710054)

(收稿日期:2015-10-14)

摘要:介绍了一种光滑表面粗糙度 R_z 参数的干涉测量法. 该方法用空气膜层上表面与样本表面的基准面平行的方式来观察等厚干涉条纹, 用干涉条纹间的相对运动来判断样本表面的峰谷, 同时也给出了新的 R_z 计算公式. 该方法测量过程较简单、对仪器要求较低且有助于样本的表面微观形貌分析.

关键词:表面粗糙度 干涉测量法 表面微观形貌分析

1 引言

表面粗糙度是机械加工领域经常用到的一个参数, 它能决定一个工件的性能, 也可反映一个工件的等级和应用场合. 表面粗糙度的常用测量法有直接比较法、针触法、光切法和光波干涉法等. 描述表面粗糙度有多种参数. 测量光滑表面粗糙度可选用干涉法、用微观不平度十点高度参数 R_z 来描述. 对于 R_z 为 $0.03 \sim 1 \mu\text{m}$ 的样本, 可使用干涉显微镜来测量^[1].

本文提出了另一种光滑表面粗糙度 R_z 参数的干涉测量法.

2 测量原理

2.1 基本思想

参考平透镜或参考平面镜的虚像与样本表面之间有一空气膜层, 该空气膜层上表面是空气与参考平透镜或参考平面镜虚像的界面; 下表面是空气与样本表面的界面.

通常使用干涉显微镜测量光滑表面粗糙度 R_z 参数的原理如图 1 所示. 空气膜层上表面与样本表面的基准面(样本表面上各点到其距离的平方和最小的平面)成微小的夹角(数量级约为 10^{-3} Rad), 且空气膜层上表面与样本表面间的平均距离小于单色光相干长度的一半. 当平行光近于垂直地入射到空

气膜层上时, 在其上下表面反射的光将会发生干涉. 若样本表面有微小的起伏, 将会在显微镜中观察到如图 2 所示的弯曲等厚干涉条纹, 它们是样本表面形貌的间接反映. 测出干涉条纹的弯曲量平均值 \bar{a} 和干涉条纹间距的平均值 \bar{b} , 即可由公式^[2]

$$R_z = \frac{\lambda}{2} \frac{\bar{a}}{\bar{b}} \quad (1)$$

测出样本的 R_z 参数.

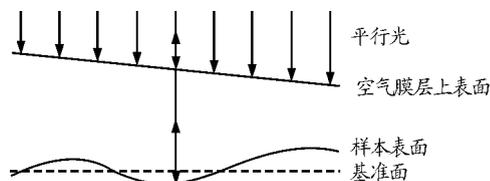


图 1

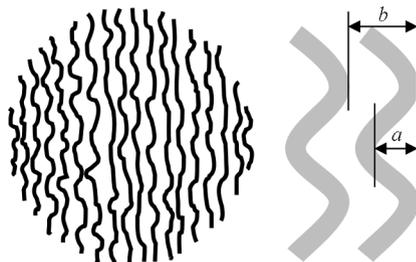


图 2

而本文方法的原理如图 3 所示. 空气膜层的上表面与样本表面的基准面平行(二者夹角数量级小于 10^{-4} Rad), 且空气膜层上表面与样本表面间的平均距离小于单色光相干长度的一半. 当单色平行光

垂直地入射到空气膜层上时,在其上下表面反射的光也会发生干涉.若样本表面有微小的起伏,将会在显微镜中观察到如图4所示的如同地形图中等高线般封闭的和不开封的条纹,那是直接由样本表面形貌所导致的等厚干涉条纹,它们是该空气膜层的“等厚线”.

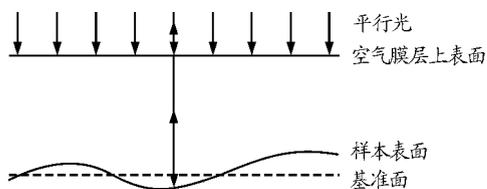


图3

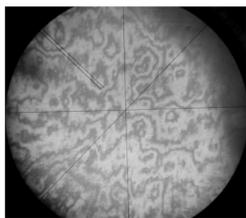


图4

2.2 峰谷的判断

如图5和图6所示,当空气膜层上表面由位置1平行移动到位置2时,空气厚度 e 与原先相同的位置在图5中会向远离峰顶的区域移动;在图6中会向靠近谷底区域移动.由于是等厚干涉,故对应的干涉条纹在图5中也会向远离峰顶的区域移动;在图6中也会向靠近谷底区域移动.也就是说,当空气膜层上表面靠近样本表面时,条纹向四周扩散的区域对应样本表面的峰,其中扩散的“源头”是峰顶;条纹从四周汇聚的区域对应样本表面的谷,其中汇聚的“终点”是谷底.

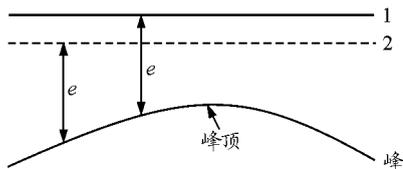


图5

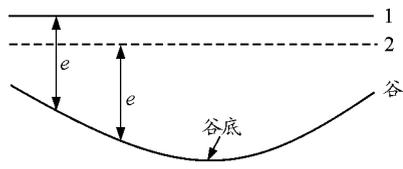


图6

对于空气膜层上表面远离样本表面的情况,有相反的结果.

2.3 R_z 计算公式

如图7所示,若空气膜层厚度 e 以空气膜层上表面为零起点;样本表面某点的高度以基准面为零起点(向上为正,向下为负).由于空气膜层上表面与基准面是平行的,故样本表面任意两点A和B处的空气膜层厚度差 Δe 等于这两点高度差 Δy ,即

$$\Delta e = \Delta y \quad (2)$$

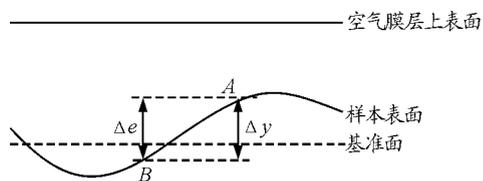


图7

所以图4中的条纹也对应样本表面的“等高线”.若设 Δe_0 和 Δy_0 分别为相邻峰顶谷底对应的空气膜层厚度差和高度差,则有

$$\Delta e_0 = \Delta y_0 \quad (3)$$

在图3中平行光垂直入射到空气膜层上,其中任一束光在空气膜层上、下表面分别反射而形成的两束相干光的光程差为(不考虑半波损失)

$$\delta = 2e \quad (4)$$

考虑干涉条件(暗条纹)

$$\delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, (k = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

其中 k 为条纹级数,有

$$e = \frac{1}{2}k\lambda + \frac{\lambda}{4} \quad (6)$$

故

$$\Delta e = \frac{1}{2} \Delta k \lambda \quad (7)$$

其中 Δk 就是样本表面任意两点对应的条纹级数差.对于相邻峰顶谷底有

$$\Delta e_0 = \frac{1}{2} \Delta k_0 \lambda \quad (8)$$

其中 Δk_0 为相邻峰顶谷底间对应的条纹级数差.

在取样长度内,被测轮廓上5个最大轮廓峰高 y_{pi} 的平均值与5个最大轮廓谷深 y_{vi} 的平均值之和,称为微观不平度十点高度,即

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 y_{vi} \right) \quad (9)$$

令

$$y_{pi} + y_{vi} = \Delta y_{oi} \quad (10)$$

其中 Δy_{oi} 为取样长度内某对相邻峰顶谷底的高度差,则式(9)变为

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \Delta y_{oi} \quad (11)$$

由式(3)、(8)、(11)可知

$$R_z = \frac{\lambda}{10} \sum_{i=1}^5 \Delta k_{oi} \quad (12)$$

其中 Δk_{oi} 为取样长度内某对相邻峰顶谷底间对应的条纹级数差,其值等于该对相邻峰顶谷底间的条纹数减 1. 式(12)也可写成

$$R_z = \frac{\lambda}{2} \overline{\Delta k_0} \quad (13)$$

其中 $\overline{\Delta k_0}$ 为所测若干对相邻峰顶谷底间条纹级数差的平均值.

3 测量器材

本文方法可用至少放大 30 倍的、物镜上带有倾斜 45° 半反镜的显微镜来实现,也可用经过改装的干涉显微镜. 本文以前者为例来说明本文方法.

所需测量器材:显微镜 1 台,钠光灯 1 盏,样本 1 个,与样本大小相当的光学平板玻璃 1 块.

4 测量过程

(1) 打开钠光灯,将其置于显微镜正前方.

(2) 调节钠光灯高度和其与显微镜的距离,使显微镜的半反镜与钠光灯窗口等高且二者间距离约为 30 cm.

(3) 将样本表面覆盖光学平板玻璃后置于显微镜载物台上,物镜下方.

(4) 通过目镜观察,同时轻轻转动或左右移动显微镜底座,使得视场达到最亮状态.

(5) 将目镜叉丝调清晰.

(6) 选择适当的物镜倍数,缓慢转动调焦手轮,直至观察到明亮、清晰、如同等高线般的干涉条纹.

(7) 双手用适当的力压覆盖于样本表面的光学平板玻璃两侧,并通过目镜观察:凡是条纹扩散的区域是峰,其中扩散的“源头”是峰顶;凡是条纹汇聚的区域是谷,其中汇聚的“终点”是谷底.

对于表面加工纹理规则的样本,干涉条纹也是大体沿着纹理方向排列. 在垂直于条纹(即垂直于加工纹理)的方向随机选取 5 段取样长度,每段长度上应至少包含 5 个峰和 5 个谷. 在每段取样长度上至少测出 5 对相邻峰顶谷底间的 Δk_0 并记录.

对于加工纹理不规则的样本,干涉条纹也是不规则分布的. 故可随机选取至少 25 对不同的相邻峰顶谷底,测出它们的 Δk_0 并记录.

注:若干干涉条纹不易数清,可借助目镜的叉丝来数. 若有条件,也可借助 CCD 放大成像来数条纹.

5 测量结果

表 1 用本文方法对样本测量的结果

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Δk_{oi}	1	1	3	2	2	1	1	1	2	1	1	2	2
i	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
Δk_{oi}	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	

由表 1 可得 $\overline{\Delta k_0} = 1.44$, 将其代入(13)式,并取 λ 为 $0.5893 \mu\text{m}$, 可得样本的表面粗糙度参数

$$R_{z1} = 0.424 \mu\text{m}$$

6 与通常方法比较

用 6JA 型干涉显微镜用通常方法对同一样本进行测量,可得表 2 和表 3 结果. 其中 a 为随机选取的 5 条干涉条纹上的条纹弯曲量测量值(每个条纹上测 5 个弯曲量); b 为随机选取的干涉条纹间距测量值.

表2 用6JA型干涉显微镜对同一样本条纹弯曲量的测量结果

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
a_i	0.075	0.181	0.177	0.038	0.051	0.050	0.289	0.146	0.211	0.055	0.194	0.173	0.123
i	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
a_i	0.153	0.156	0.173	0.037	0.113	0.123	0.186	0.140	0.172	0.122	0.144	0.144	

表3 用6JA型干涉显微镜对同一样本条纹间距的测量结果

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
b_i	0.075	0.076	0.101	0.062	0.076	0.102	0.107	0.064	0.068	0.113

由表2可得 $\bar{a}=0.137\text{ mm}$;由表3可得 $\bar{b}=0.0844\text{ mm}$.将之代入式(1)且 $\lambda=0.5300\text{ }\mu\text{m}$ (绿光),可得同一样本的表面粗糙度参数

$$R_{z2}=0.430\text{ }\mu\text{m}$$

本文方法与通常方法对同一样本测量值的偏差

$$E=\frac{|R_{z1}-R_{z2}|}{R_{z2}}\times 100\%\approx 1.3\%$$

7 测量范围

7.1 下限

由于 Δk_{0i} 能被较准确地数清是在 Δk_{0i} 为整数且 $\Delta k_{0i}\geq 1$ 时,故能够较准确测量时, $\overline{\Delta k_0}\geq 1$.考虑到式(13),本文方法能够较准确测量 R_z 的下限是 $\frac{\lambda}{2}$.由此可知,使用的光波长 λ 越小,用本文方法所能较准确测量的 R_z 下限就越低.

对于钠黄光(λ 为 $0.5893\text{ }\mu\text{m}$),用本文方法测量的 R_z 下限为 $0.29\text{ }\mu\text{m}$.

7.2 上限

用本文方法能看清95%以上干涉条纹的样本,即可用本文方法测量 R_z .故测量上限与样本表面情况及显微镜的放大倍数均有关.

用30倍的显微镜测量用本文方法能看清95%以上干涉条纹的样本, R_z 的测量上限为 $3.0\text{ }\mu\text{m}$.

8 结束语

本文提出的光滑表面粗糙度 R_z 参数测量方法的测量过程简单、对仪器要求较低且有助于样本的表面微观形貌分析.本方法也适用于教学——对加深学生对表面粗糙度及等厚干涉的理解,具有一定意义.

参考文献

- 汪洁,谢铁邦.基于垂直扫描白光干涉法的6JA干涉显微镜的改造.实验技术与管理,2007,24(4):58~60
- 张三慧.大学物理学·波动与光学(第二版).北京:清华大学出版社,2000.145~146

One Kind of Interferometry Measurement Method about Roughness Parameter R_z of Smooth Surface

Chu Changliang Qu Guanghui Wang Wuxiao Liu Mancang Liu Rujun Zhang Qin

(Xi'an University of Technology, Xi'an, Shanxi 710054)

Abstract: One kind of interferometry of roughness parameter R_z of smooth surface is introduced, which observes the equal thickness interference fringes by the way that upper surface of the air film is parallel to the datum plane of the surface of a sample, and judges peaks and valleys of the surface of a sample by relative motion between interference fringes. A new computational formula of R_z is also given. The method in this paper is simple in measuring process and undemanding on measuring instruments. At the same time, this method is helpful to surface microcosmic profile analysis of a sample.

Key words: surface roughness; interferometry measurement method; surface microcosmic profile analysis