

透明介质厚度的散斑法测量

肖明海

(军械工程学院)

摘要: 本文提出了用激光散斑技术测量透明介质厚度的方法, 导出了试件厚度与散斑位移的关系式, 并进行了比较实验和误差分析。

The measurement of the thickness of transparent medium with method
of scattered-spot

Xiao Minghai

(Institute of Ordnance Engineering)

Abstract: In the paper the method is presented that measures the thickness of transparent medium by means of technology of the scattered laser-spot. The relationship between the thickness of test sample and the laser-spot replacement is turned out, the error of the measurement is discussed and the experimental results are compared with that of the mechanical method.

一、引言

目前, 测量物体厚度的方法大都采用卡尺千分尺来完成, 这对表面光洁度要求不高的零件是一种方便而有效的检测方法。但对一些透明介质而表面光洁度要求较高的零件的测量是不

参 考 文 献

[1] A.P.L., 1985, Vol.47, No.6, P.564.

[2] 《激光与红外》, 1984年, 第4期, 第60页。

作者简介: 曾 论, 男, 1962年出生。工程师。现从事离子注入和半导体光电器件研究。
周 明, 男, 1963年出生。硕士。现从事光学薄膜器件的研究。

收稿日期: 1988年12月28日。

利的(如平板光学玻璃)。对这类零件再用卡尺等机械法测量,必然会影响表面的光洁度,为克服这个问题,本文提出了一种非接触测量,即用散斑技术测量透明介质的厚度。

二、测量原理

激光散斑技术已被成功地应用到面内微小位移的测量中去,并有较高的灵敏度。对于两表面为平面且透明的介质,根据其成象特性,当入射光线方向不变时,不管该介质如何摆动,其出射光线的方向总与入射光线的方向一致,并且出射光线相对入射光线平移一个距离^[1]。因位移量与该透明介质的厚度有关,所以只要设法测出此位移量,就可以得到相应介质的厚度,其关系如图1所示。

由 $\triangle ABC$ 得:

$$\overline{AC} = \frac{d}{\cos i'}$$

再由 $\triangle ACD$ 得:

$$h = \overline{DC} = \overline{AC} \sin(i - i') = d \sin(i - i') / \cos i'$$

由上式解得:

$$d = \frac{h \cos i'}{\sin(i - i')}$$

由折射定律 $i' = \arcsin \frac{\sin i}{n_1}$ 得:

$$d = \frac{\cos \arcsin \frac{\sin i}{n_1} \cdot h}{\sin(i - \arcsin \frac{\sin i}{n_1})} \quad (1)$$

式中, n_1 为试件对照明光波长的折射率; i 为测量过程中试件摆过的角度,可直接测出; h 为试件摆动后出射光线相对入射光线的平移量,显然只要测出 h 值,就可以由上式计算出被测试件的厚度。对 h 值,利用激光散斑技术可灵敏的测出来。即:将试件置入散斑场中,将试件摆动前后的两组散斑图记录在同一张全息干板上,显然干板上每个散斑将因试件摆动而成对出现。根据杨氏干涉理论可方便地求出散斑对的距离,该距离就是光线的平移量 h 值,由此可求出试件的厚度。

三、测量方法和装置

其测量装置主要由 He-Ne 激光器、定时器、准直系统、毛玻璃、成象物镜等组成,经扩束的平行激光束射到毛玻璃上,产生激光散斑。测量时,首先调整试件,使其表面与光轴大致垂直,进行一次曝光。此时在位于成象物镜象面的全息干板上记录下一组散斑图,然后保持其他不变,将试件摆动一角度值,进行第二次曝光。这样就在全息干板上记录下了两组内容完全相同的散斑图,测出散斑图上成对散斑的间距,即可计算出试件厚度。

四、计算方法

因全息干板上记录的是若干对间距、方向都相同的激光散斑,而每个散斑可以看成一

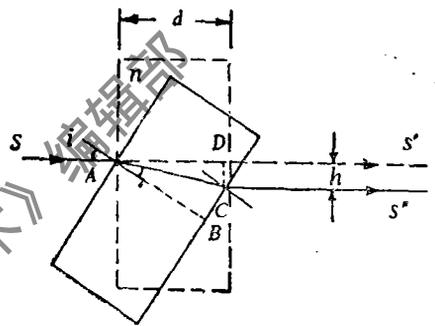


图 1

“透光孔”，因此用激光束来照射散斑图时，由于这些“透光孔”对的作用，就产生杨氏干涉条纹^[2]如图3。只要测出图中散斑图到接收屏的距离 Z ，屏上干涉条纹的间距 e ，再测出成像物镜的放大倍率 M ，据杨氏干涉理论^[3]，由下式可计算出散斑对的间距。

$$h = \frac{Z \cdot \lambda}{M \cdot e} \quad (2)$$



图 2

1. He-Ne激光器 2. 定时器 3. 扩束系统 4. 毛玻璃 5. 试件 6. 成像物镜 7. 全息平板

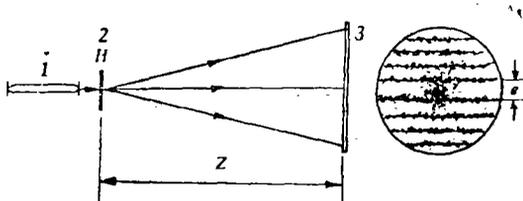


图 3

1. He-Ne激光器 2. 散斑图 3. 屏

再将(2)代入(1)可得试件厚度表式为：

$$d = \frac{\cos \arcsin \frac{\sin i}{n_1}}{\sin(i - \arcsin \frac{\sin i}{n_1})} \cdot \frac{Z \cdot \lambda}{M \cdot e} \quad (3)$$

表 I 两种测量方法的比较

测量方法 试件编号	散斑法		卡尺法	
	有关参数(mm)	测量结果	测量结果	差值
I 材料 ⁽⁴⁾ (K ₀)	$\lambda = 0.0006328$ $n_\lambda = 1.51389$ $i = 3^\circ$ $M = \frac{y'}{y} = \frac{23}{28.4} = 0.81 \times$ $e = 8.40$ $Z = 850.8$	4.44	4.45	-0.01
II 材料 (K ₀)	$\lambda = 0.0006328$ $n_\lambda = 1.51389$ $i = 4^\circ$ $M = \frac{y'}{y} = \frac{11.8}{14.6} = 0.81 \times$ $e = 9.15$ $Z = 798.0$	3.08	3.10	-0.02

五、实验结果

实验中选了四块厚度不同的平行平板玻璃进行了测量，并与卡尺测量做了比较。根据试件的散斑图再现时的干涉条纹，将两块试件的测量结果列于表中（见表 I）。同时由试件的干涉条纹看出，即使对较薄或者很薄的透明介质，同样能够得到清晰的干涉条纹，这说明该方法测量试件厚度的范围较宽。

六、误差分析

该测量为一间接测量，由原理式看出，影响测量误差的主要因素是 Z 、 M 、 e 、 i 等值的测量中误差 σ_z 、 σ_M 、 σ_e 、 σ_i ，折射率和照明光波长的误差忽略不计。其相对中误差表达式为：

$$\frac{\sigma_d}{d} = \pm \left[\left(\frac{1}{Z} \right)^2 \sigma_z^2 + \left(-\frac{1}{M} \right)^2 \sigma_M^2 + \left(-\frac{1}{e} \right)^2 \sigma_e^2 + (A+B+C)^2 \sigma_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中， $A = \cos i \left[(n_\lambda^2 - \sin^2 i)^{1/2} \operatorname{tg} \left(i - \arcsin \frac{\sin i}{n_\lambda} \right) \right]^{-1}$ ， $B = - \left[\operatorname{tg} \left(i - \arcsin \frac{\sin i}{n_\lambda} \right) \right]^{-1}$ ； $C = -\sin i \cos i \left[(n_\lambda^2 - \sin^2 i)^{1/2} \cos \arcsin \frac{\sin i}{n_\lambda} \right]^{-1}$ 。

以试件 I 为例计算本方法的测量误差，式中有关参数见表 I，各直接测量值的中误差分别为：

σ_z ：散斑图到接收屏的距离测量中误差，此值用钢卷尺测出，中误差为 $\pm 0.5 \text{mm}$ 。

σ_e ：条纹间距测量中误差， e 值可用显微镜测出，其中误差为 $\pm 0.01 \text{mm}$ 。

σ_M ： M 是测量全息底片上的象高 y' 和物高 y 而得到的，即 $M = \frac{y'}{y}$ 。中误差表达式为：

$$\sigma_M = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{y} \right)^2 \sigma_{y'}^2 + \left(-\frac{y'}{y^2} \right)^2 \sigma_y^2}$$

出，故 $\sigma_{y'} = \sigma_y = \pm 0.01 \text{mm}$ ，从而得到：

$$\sigma_M = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{28.4} \right)^2 \times 0.01^2 + \left(-\frac{23}{28.4^2} \right)^2 \times 0.01^2} = \pm 0.00045 \text{mm}$$

σ_i ：试件的摆动角度中误差，此角度用一度盘测出，对准形式为游标对准。对准误差 $\sigma = 0.15'$ ，对准时用一放大倍率为 Γ_M 的显微镜。故此测角误差为一对准误差，

$$\sigma_i = \pm \frac{0.073\sigma}{\Gamma_M} = \pm \frac{0.073 \times 0.15}{58} = \pm 0.000126 \text{mm}$$

将以上各值代入 (4) 式：

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_d}{d} &= \pm \sqrt{\left(\frac{0.5}{850.8} \right)^2 + \left(-\frac{0.00045}{0.81} \right)^2 + \left(-\frac{0.01}{8.4} \right)^2 + (19.137 \times 0.000126)^2} \\ &= \pm 0.28\% \end{aligned}$$

由以上分析计算看出，该方法测量透明介质的厚度，其相对中误差可达微米的量级。如果提高试件摆角的测量精度，其测量误差还将减小。

