

文章编号: 1001-3806(2014)02-0196-05

## 基于红外双光路的薄膜在线测厚系统的研究

曹智颖, 赵斌\*

(华中科技大学 机械科学与工程学院 仪器科学与技术系, 武汉 430074)

**摘要:** 红外测厚是薄膜在线测厚的主要方法之一,为了解决传统的红外测厚方法中尚存在的易受光源稳定性的影响、不适用于高速薄膜生产线等缺点,采用双光路参比测量的方法设计了一种双光路红外测厚系统,系统将光源的光分成测量路和参考路两路,并使用单个 CCD 同时收集两路光作为光强传感器。描述了系统的成像原理,讨论了系统对朗伯定律的适用性,最后通过对聚乙烯和聚四氟乙烯薄膜的标定实验论证了系统的精度。结果表明,该方法精度高、鲁棒性好,且能够有效避免光源不稳定带来的影响。

**关键词:** 测量与计量;薄膜测厚;红外;双光路

**中图分类号:** TN247;TH741

**文献标志码:** A

**doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.02.011

### Research of on-line film thickness measurement system based on infrared dual-light path

CAO Zhiying, ZHAO Bin

(Department of Instrument Science and Technology, College of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Infrared thickness measurement is one of the main methods of online film thickness measurement, but traditional infrared thickness measurement method still has such defects that it is sensitive to the stability of light source and it is not applicable to high-speed film production line. In order to solve these problems, a dual-light path reference measurement method was used and a dual-light path infrared thickness measurement system was presented. In the system, the light source is divided into measurement light path and reference light path, using a single CCD connecting both the measurement light and the reference light as light intensity sensor. The imaging principle was described and the applicability of the system for Lambert law was discussed. Finally, calibration experiments for polyethylene and polytetrafluoroethylene film were conducted to demonstrate the accuracy. The experimental results show that the method has high precision and good robustness, and can effectively avoid the impact of the unstable of light source.

**Key words:** measurement and metrology; film thickness measurement; infrared; dual-light path

### 引言

塑料薄膜种类繁多,广泛地应用于日常生活和科学研究的各个领域,在塑料薄膜的生产线上,一般都会安装在线测厚装置来实时测量其厚度。目前,比较常用的塑料薄膜在线测厚技术有:射线测厚、红外测厚、激光三角法测厚等。但是各类方法均有其

自身的局限性,激光三角法测量透明材料效果不佳<sup>[1]</sup>;射线测厚包括 X 射线、 $\gamma$  射线和  $\beta$  射线测厚,应用最广泛,但是存在放射性安全隐患、设备昂贵、能耗高;红外测厚使用红外光源,非放射性,对比其它在线测厚方法,有着明显的优势。

传统的红外测厚方法尚存在一些缺点,使用单光路开环的红外在线测厚系统,测量结果会受到光源稳定性的影响;还有一些使用装有两片滤光片的调制盘产生两束不同波长的单色光(分别作为测量光和参考光)的红外在线测厚系统<sup>[2-3]</sup>,其不适用于高速的薄膜生产线,因为调制盘旋转过程中,薄膜已经移动了一段距离,导致两束光照射到薄膜的不同位置上,造成测量误差。基于此,设计了一种红外双

基金项目:国家九七三重点基础研究发展计划资助项目(2013CB035405)

作者简介:曹智颖(1989-),男,硕士研究生,主要从事红外和激光精密测量方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: zhaobin63@sohu.com

收稿日期:2013-05-10;收到修改稿日期:2013-06-13

光路薄膜在线测厚系统,能够有效解决上述问题。

## 1 工作原理

### 1.1 红外测厚基本原理

红外透射测厚的基本原理是朗伯定律,即:

$$I = I_0 \exp(-\alpha t) \quad (1)$$

式中,  $I_0$  为原始光强,  $\alpha$  为吸收系数,  $t$  是光透射厚度。朗伯定律的本质来源于物质分子对于光的吸收。分子吸收红外辐射后会引引起构成分子中各化学键的振动,这些化学键的振动方式类似于双原子振动。当入射光的频率与分子中化学键的基频、倍频(约等于基频的倍数)或组合频率(多个基频之和)相等的时候,就引起共振,该能量就会被分子吸收,其振幅将增强。这就表现为材料对特定波长的光能的强烈吸收。大部分红外吸收是由 X—H 键(如 O—H 键、N—H 键、C—H 键)伸缩和弯曲振动的基频的倍频和组合频产生的,这正是塑料薄膜对于红外光吸收强烈的原因<sup>[4-5]</sup>。

### 1.2 仪器光路结构及成像原理

仪器光路结构如图 1 所示,仪器成像示意如图 2 所示。光源使用大功率红外发光二极管(light emitting diode, LED),波长 850nm,光首先由准直透镜准直,然后由分光棱镜分为测量光路和参考光路两路;在测量光路,光依次透过乳白散射玻璃、被测物和红外带通滤光片(直径 8mm,通带中心波长 850nm,半带宽 30nm),经反射镜反射后透过分光镜,最后透过成像透镜打到 CCD 的光敏面上;在参考光路,光依次透过乳白散射玻璃、参考物和红外带通滤光片,经反射镜反射后再经半透半反分光镜反射,最后透过成像透镜打到 CCD 的光敏面上。两光路对称布置,同名光学元件的参量一致。

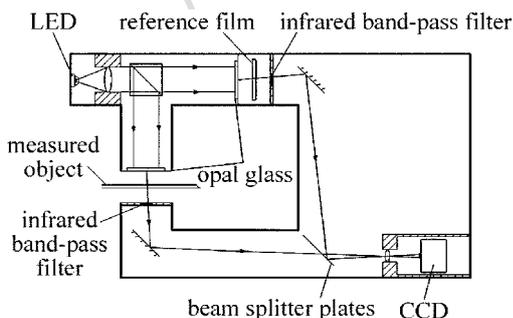


Fig. 1 Optical structure of the system

测量时,被测物 A 通过测量路反射镜所成像为 A', 参考物 B 依次通过参考光路反射镜和半透半反分光镜成像为 B'', 由于光路对称,此时 A' 和 B'' 重

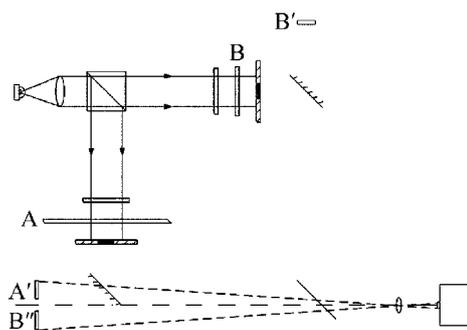


Fig. 2 Schematic diagram of optical image system

合;半透半反分光镜在 45° 的初始角度下逆时针旋转一个微小角度以使 A' 和 B'' 上下分开,最后通过成像透镜把 A' 和 B'' 成像到 CCD 光敏面上, CCD 再将图像传送到计算机。

使用 CCD 作为光强传感器测量厚度,即以 CCD 采集到的图像灰度值表征光强大小,此方法并不罕见,已有诸多先例,例如测量聚对苯二甲酸类塑料(polyethylene terephthalate, PET) 薄膜局部厚度分布<sup>[6]</sup>、测量菲涅耳棱镜局部厚度分布<sup>[7]</sup>以及纸张匀度<sup>[8]</sup>等等。

将系统光路简化等效为如图 3 所示,像 A' 和像 B'' 相对于光轴上下对称布置,分别通过透镜成像到 CCD 光敏面的下部和上部。假设 A' 和 B'' 都是理想的漫射体,其辐射亮度分别为  $L_A$  和  $L_B$ , 根据经典的成像系统像面的照度公式,取 A' 上的一面微元  $dA$ , 成像后对应的像面上的光照度为<sup>[9-10]</sup>:

$$E_A = \frac{n'^2}{n^2} \tau_A \pi L_A \sin^2 U' f(\omega') \quad (2)$$

式中,  $n$  和  $n'$  分别为物方和像方的折射率,  $\tau_A$  是光学系统的光透射比,  $U'$  是像方孔径角,  $\omega'$  是微元的像点主光线与光轴之间的夹角;  $f(\omega')$  即为修正函数,当轴外点的像方孔径角很小时,  $f(\omega') = \cos^4 \omega'$ 。

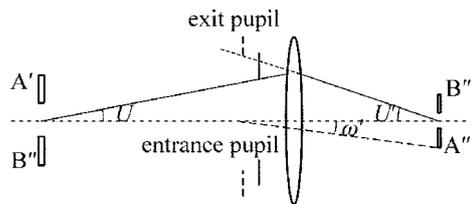


Fig. 3 Schematic diagram of simplified equivalent optical image system

相机所采集到的辐射能是光敏面上接收到的光照度对时间(曝光时间)  $t_{im}$  的积分,曝光时间很短,期间照度不变;假设相机响应辐射能到图像灰度值的转换效率为  $\rho$ , 显然  $\rho$  是相机增益  $G$  的函数,即  $\rho = \rho(G)$ 。综上所述, CCD 所获得的图像中光斑 A'' 总的灰度值为:

$$G_A = \rho(G) t_{int} \iint_{S_A} \frac{n'^2}{n^2} \tau_A \pi L_A \sin^2 U' f(\omega') dA \quad (3)$$

式中,  $S_A$  是像 A' 的面积, 同理光斑 B'' 总的灰度值为:

$$G_B = \rho(G) t_{int} \iint_{S_B} \frac{n'^2}{n^2} \tau_B \pi L_B \sin^2 U' f(\omega') dB \quad (4)$$

式中,  $S_B$  是像 B'' 的面积,  $dB$  是 B'' 上的面微元, 由此可得:

$$\frac{G_A}{G_B} = \frac{L_A}{L_B} \cdot \frac{\iint_{S_A} \frac{n'^2}{n^2} \tau_A \pi \sin^2 U' f(\omega') dA}{\iint_{S_B} \frac{n'^2}{n^2} \tau_B \pi \sin^2 U' f(\omega') dB} = \frac{L_A(t)}{L_B(t_0)} \cdot k_2 \quad (5)$$

式中,  $k_2$  为与光路结构相关的一常量,  $t$  和  $t_0$  分别是 A 和 B 的厚度, 如果  $L_A(t)$  和  $L_B(t_0)$  依然满足朗伯定律, 则:

$$\frac{G_A}{G_B} = \frac{L_{A,0} e^{-\alpha t}}{L_{B,0} e^{-\alpha t_0}} k_2 = k_1 k_2 e^{-\alpha(t-t_0)} = K e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (6)$$

式中,  $L_{A,0}$  和  $L_{B,0}$  可以理解成膜厚度等于 0 时参考物和被测物的亮度,  $k_1 = L_{A,0}/L_{B,0}$ ,  $k_1$  可以理解成薄膜之前经分光棱镜分光后两路光的光强比,  $K = k_1 \cdot k_2$ ,  $K$  为不放置薄膜时两路光的灰度比。因此拟合标定  $K$  和  $\alpha$  后, 只要测得参考光路和测量光路的光斑的灰度  $G_A$  和  $G_B$ , 就可以求出被测物的厚度  $t$ 。

### 3 实验数据分析

#### 3.1 拟合标定实验

使用 VC 编写程序实时采集相机图像, 如图 4 所示; 投影处理后由灰度的 1 阶导数获取两个光斑的边界, 再通过排序统计获取边界内所有亮光斑的数量和灰度值总和, 基于此就可以求得两光斑的平均灰度值和两光斑的灰度比值, 图像处理比较简单不作赘述。

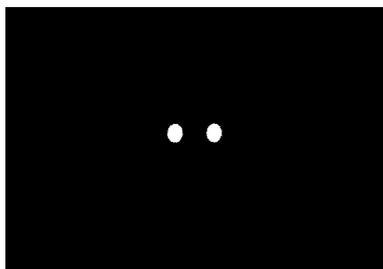


Fig. 4 Light spot image collected in real-time

实验样品为厚度为 15 $\mu\text{m}$  的聚乙烯 (polyethylenex, PE) 薄膜, 拟采用多张薄膜叠合的方法来获取不同厚度的被测物, 首先来分析下简单的叠加增厚带来的影响。

在两折射率不同的界面上, 光会发生折射和反射, 假设光在空气与本实验样品聚乙烯的界面上 (上下共两个界面) 的光强反射损失比为  $r$ ; 同理, 当两层聚乙烯薄膜叠合在一起的时候, 层间有空气, 假设光透过一个空气夹层光强透射比为  $\tau$ ; 在参考路上放置厚度为  $t$  的薄膜, 并将  $N$  张厚度为  $t$  的同一薄膜叠合起来作为被测物, 显然被测物中存在  $N-1$  个空气夹层, 则 CCD 采集到的两路光的灰度值分别为:

$$G_A = G_{A,0} (1-r) \exp(-\alpha \cdot t) \quad (7)$$

$$G_B = G_{B,0} (1-r) \tau^{N-1} \exp(-\alpha \cdot Nt) \quad (8)$$

式中,  $G_{A,0}$  和  $G_{B,0}$  为不放置薄膜时两路光的灰度, (7) 式除以 (8) 式, 并作化解:

$$\frac{G_A}{G_B} = K \cdot \tau^{N-1} e^{-\alpha(N-1)t} = K e^{-(N-1) \ln \tau} e^{-\alpha(N-1)t} = K e^{-\bar{\alpha}(N-1)t} \quad (9)$$

由上式可知, 最终的灰度比仍然满足朗伯定律, 只不过由等效吸收系数  $\bar{\alpha} = \alpha + (\ln \tau)/t$  代替  $\alpha$ 。

在参考光路放置厚度为 15 $\mu\text{m}$  的聚乙烯薄膜, 在测量光路分别放置 1 层到 9 层的同一批聚乙烯薄膜, 即厚度分别为 15 $\mu\text{m}$ , 30 $\mu\text{m}$ , 45 $\mu\text{m}$ , 60 $\mu\text{m}$ , 75 $\mu\text{m}$ , 90 $\mu\text{m}$ , 105 $\mu\text{m}$ , 120 $\mu\text{m}$  和 135 $\mu\text{m}$  共 9 组, 每组测量 600 次取平均, 对这 9 组数据依照 (6) 式进行拟合, 得到灰度比值 (即相对透射比) 和厚度的拟合标定曲线, 如图 5 所示。

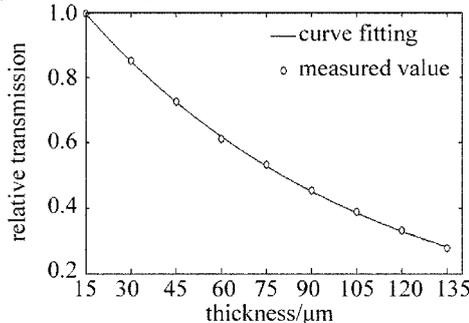


Fig. 5 PE calibration curve

拟合结果  $K = 0.9962$ ,  $\bar{\alpha} = -0.01053 \mu\text{m}^{-1}$ , 即得标定公式:

$$\frac{G_A}{G_B} = 0.9962 \cdot e^{-0.01053(t-15)} \quad (10)$$

再将测得的两光斑灰度比代入标定公式,得到实测厚度值,如表 1 所示,最大误差不超过  $1.5\mu\text{m}$ ,且每组 600 个数据单次的测量重复性均小于  $0.5\mu\text{m}$ ,精度和重复性均较高,这个结果还是比较保守的,因为薄膜很薄,操作中难免弄皱,直接叠合增厚本身亦不稳定。由于标定得到的是被测物叠合时的等效吸收系数,故此数据只用以衡量仪器的精度,无法用来实测不同厚度的聚乙烯薄膜。

Table 1 PE calibration measurement data

No.	actual value/ $\mu\text{m}$	measurements/ $\mu\text{m}$	deviation/ $\mu\text{m}$
1	15	15.02	0.02
2	30	29.75	-0.25
3	45	45.06	0.06
4	60	61.18	1.18
5	75	74.31	-0.69
6	90	89.54	-0.46
7	105	104.43	-0.57
8	120	119.72	-0.28
9	135	136.29	1.29

仍使用叠合增厚的方法,为了准确地标定被测材料的吸收系数,可以使用与被测物折射率相近的液体或溶液填充层间间隙。聚四氟乙烯 (polytetrafluoroethylene, PTFE) 的折射率约为 1.35,水的折射率为 1.333,由菲涅耳定律可得水与聚四氟乙烯之间的界面上的反射率为:  $(1.35 - 1.333)^2 / (1.35 + 1.333)^2 \approx 0.04\%$ ,亦即使用水作为介质叠合聚四氟乙烯薄膜时,层间光强损失可以忽略不计。使用 4 张 5 丝  $10\text{cm} \times 2\text{cm}$  的聚四氟乙烯薄膜,其厚度分别为(使用螺旋测微器在其不同的区域测量 10 次取平均):  $47.0\mu\text{m}$ ,  $47.1\mu\text{m}$ ,  $47.4\mu\text{m}$ ,  $47.5\mu\text{m}$ ,然后使用水作为介质叠合得到厚度:  $94.5\mu\text{m}$ ,  $142\mu\text{m}$ ,  $189\mu\text{m}$ ,总共 7 组,参考路上不放置薄膜。由于薄膜本身厚度不均匀,故在每块薄膜不同位置上随机测量 200 次做中值滤波,标定拟合的数据如图 6 和表 2 所示。

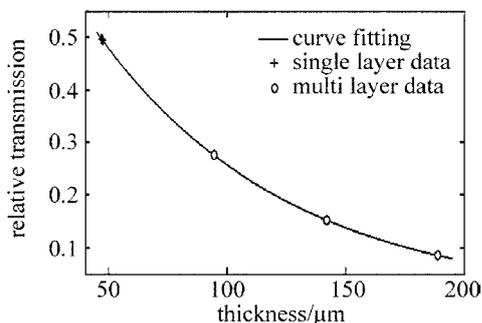


Fig. 6 PTFE calibration curve

Table 2 PTFE calibration measurement data

No.	actual value/ $\mu\text{m}$	measurements/ $\mu\text{m}$	deviation/ $\mu\text{m}$
1	47.0	47.1	0.1
2	47.1	47.1	0.0
3	47.4	47.5	0.1
4	47.5	47.3	-0.2
5	94.5	94.5	0.0
6	142	142.3	0.3
7	189	188.1	-0.9

拟合结果为  $K = 0.8914$ ,  $\bar{\alpha} = -0.01244\mu\text{m}^{-1}$ ,相比聚乙烯实验拟合出的参量  $K$  变小,主要原因是参考光路没有放置薄膜,故薄膜与空气界面的光透射比  $(1 - r)$  亦蕴含在系数  $K$  中,其次两次实验的两路光灰度比略有差异。

由表 2 可以看出,单层薄膜厚度的测量误差最大也仅为  $0.2\mu\text{m}$ ,而多层薄膜的测量误差较大,特别是 4 层叠合的时候误差为  $0.9\mu\text{m}$ ,主要原因分两方面,首先薄膜叠合时难免混入气泡、灰尘等一些杂质;其次由图 6 可以看出,4 层薄膜时由于厚度大,对应拟合曲线上该点的斜率小,也即微小的透射率差异就会导致较大的厚度测量误差。

### 3.2 光源光强变化对测量的影响

分别在参考光路和测量光路放置厚度为 10 丝(实测厚度  $100\mu\text{m} \pm 5\mu\text{m}$  不均匀)的聚乙烯薄膜,通过降低 LED 的供电电压来改变 LED 的亮度,获取不同的光斑亮度下,两光斑的亮度比值。实验中使用的大功率红外 LED,采用 650mA 的恒流电源供电,工作电压约为 1.7V,恒流电源的输入为直流 12V。为了获取较明显的实验现象,将直流稳压电源的输出电压调至 6V 以下,这时 LED 光强开始发生明显的变化,并变得不稳定。4 次改变直流稳压电源的输出电压,每次测量 100 组数据,最终数据如图 7 所示,纵坐标为灰度值和灰度比值,横坐标为测量次数。对每组数据的光斑灰度和比值取均值如表

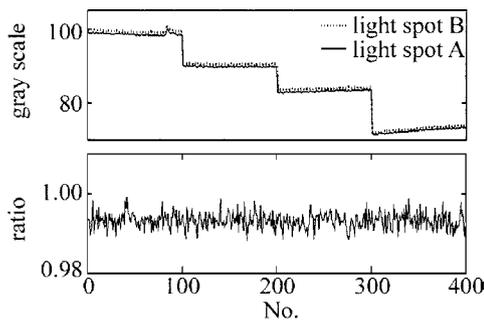


Fig. 7 Curve of gray scale ratio with different light intensity

3 所示。

Table 3 Data of gray scale ratio with different light intensity

No.	voltage/V	light spot B gray scale	light spot A gray scale	gray scale ratio $G_A/G_B$
1 ~ 100	5.31	99.147477	98.475556	0.993223
101 ~ 200	5.00	90.290180	89.677692	0.993216
201 ~ 300	4.81	83.661621	83.057436	0.992778
301 ~ 400	4.59	72.877477	72.379916	0.993173

由表 3 可知,在光源光强变化导致光斑灰度从 99 变化到 72 的过程中,各组实验的灰度比值之间的差异小于 1%,该值已经小于系统本身的单次测量的测量重复性,因此可以认为,光源光强的变化不会对该测量系统造成显著影响。

#### 4 结 论

针对传统红外薄膜测厚系统尚存在的一些局限,设计了一种双光路红外薄膜测厚方法,对系统的成像进行简化和分析,推导出 CCD 收集到的两路光的灰度比;为测试系统精度,设计了通过叠加薄膜来增厚的标定实验,理论推导出两路光的光强比仍然符合朗伯定律,实验结果验证了推导结论,由实验数据可以看出,该系统的测量精度高,对聚乙烯薄膜  $15\mu\text{m} \sim 135\mu\text{m}$  叠合增厚,测量误差小于  $1.5\mu\text{m}$ ,对  $50\mu\text{m}$  聚四氟乙烯单层测量误差小于  $0.5\mu\text{m}$ ,光源光强的变化不会对该测量系统造成显著影响。

#### 参 考 文 献

- [1] WANG Ch, ZHAO B. Research of thin plate thickness measurement based on single lens laser triangulation[J]. Laser Technology, 2013, 37(1):6-10(in Chinese).
- [2] ZHANG M H. Uses of the infrared technology for on-line gauging of plastic film thickness[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 1985(2):1-8(in Chinese).
- [3] LIAO F Z, WEI H R, ZHAO W K, et al. A non-contact method for measuring the thickness of polyester film with infrared absorption[J]. Acta Metrologica Sinica, 1990, 11(4):266-270(in Chinese).
- [4] WORKMAN J, WEYER L. Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy[M]. 2nd ed. Boca Raton, Florida, USA: Chemical Rubber Company Press, Inc., 2012: 12-16.
- [5] MENG F F, WANG T W, ZHANG Q T. Preparation and performance analysis of near-infrared absorption PVB films[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 3003-3007(in Chinese).
- [6] JOHNSON J, HARRIS T. Full-field optical thickness profilometry of semitransparent thin films with transmission densitometry[J]. Applied Optics, 2010, 49(15): 2920-2928.
- [7] MARTINEZ ANTON J C, GOMEZ PEDRERO J A, ALONSO FERNANDEZ J, et al. Optical method for the surface topographic characterization of Fresnel lenses[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8169:816910.
- [8] CHEN W, HU K T. Study on sheet formation with computer visual system[J]. World Pulp and Paper, 2000, 19(3):48-50(in Chinese).
- [9] QU E Sh, ZHANG H J, CAO J Zh, et al. Discussion of illuminance formula in optical design[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(7):1364-1368(in Chinese).
- [10] YU D Y, TAN H Y. Engineering optics[M]. Beijing: Press of Mechanical Industry, 2011: 82-83(in Chinese).