

# 聚合物应力光学系数的测试方法<sup>\*</sup>

李 曦<sup>1</sup> 陈宇宏<sup>2</sup> 詹茂盛<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学, 北京 100191; 2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘要** 根据经典平面光弹性理论, 对聚合物圆片试样进行径向加载, 通过推导加载方向主应力的差值与条纹级数的关系, 求出聚合物的应力光学系数, 从而提出了一种实用的测试聚合物应力光学系数的方法。使用该方法对聚碳酸酯的应力光学系数进行测量, 所获得的实测值与理论值能够很好地吻合, 准确度达到 99% 以上。

**关键词** 平面光弹性理论 等差条纹级数 应力光学系数

人们在研究透明聚合物材料的内应力和双折射的关系时发现, 双折射系数  $\Delta n$  的大小和应力  $\sigma$  存在一定关系<sup>[1-2]</sup>:

$$\Delta n = C \sigma \quad (1)$$

其中  $C$  为应力光学系数, 是聚合物的特征值, 其大小与分子结构有关, 与聚合物的成型加工条件无关。

应力光学系数是表征材料光学性能的一项重要性能参数, 是用来评价一种材料能否作为光学透明制件及光学数据存储制件使用的必要指标。具有低应力光学系数的聚合物材料尤其具有应用前景, 因为其体现了制件的内应力对材料光学性能的影响, 即应力光学系数越低, 内应力对光学性能的影响就越小, 成型后制件越不易产生双折射, 从而可得到具有优良光学性能的光学制件<sup>[3]</sup>。因此可以以该参数为指标, 进行成型用聚合物原材料的选择; 此外通过测量聚合物的双折射, 可以由式 (1) 得到聚合物在双折射平面方向上由于成型、冷却时大分子取向造成的主应力差值, 从而评价该成型加工方法的优劣。

目前缺乏透明聚合物材料的应力光学系数测试机理和方法的研究, 更没有形成相应的国家标准。笔者旨在利用经典的平面光弹性理论推导出一种简便的求取聚合物应力光学系数的方法。

## 1 实验原理

### 1.1 试验所用仪器——光弹性仪的基本构造

笔者选用平行光式光弹性仪作为应力光学系数测试仪器。图 1 为平行光式光弹性仪的光路图<sup>[4]</sup>, 包括光源、隔热玻璃、滤色片、准直透镜、起偏镜、1/4 波片、检偏镜、加载架、视场镜和照相机等。

### 1.2 公式推导

根据平面光弹性试验的平面应力 - 光学定律, 两束平面偏振光以不同的速度通过模型后, 所产生

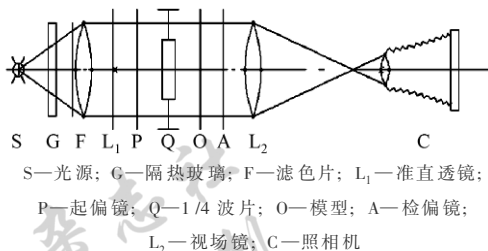


图 1 平行光式光弹性仪光路图

的光程差  $R$  为:

$$R = Ch(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2)$$

式中:  $h$ ——模型的厚度;

$\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ ——分别为模型上某一点处的主应力。

当模型厚度一定时, 任一点的光程差与该点的主应力差成正比。

又根据平面偏振布置中的光弹性效应, 光程差  $R$  为:

$$R = N \lambda \quad (3)$$

式中:  $N$ ——等差线条纹级数,  $N = 0, 1, 2, \dots$ , 对应于光程差为  $N$  个波长的等差线称为  $N$  级等差线;

$\lambda$ ——入射光的波长。

当式 (3) 成立, 即两束平面偏振光以不同的速度通过模型后所产生的光程差等于入射光波长的整数倍时, 联系应力 - 光学定律, 同时式 (2) 也成立, 即受力模型中的主应力差 ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) 所造成的光程差为波长的整数倍时, 联立式 (2)、式 (3) 可得:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N\lambda}{Ch} \quad (N = 0, 1, 2, \dots) \quad (4)$$

测试对象为对径向受压的圆盘, 圆盘的直径为  $D$ , 厚度为  $h$ , 载荷为  $P$  时, 根据弹性力学, 圆盘中心

\* 国家高技术研究发展计划项目 (863 计划项目) (2007AA03Z534)

处主应力差值为:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{8P}{\pi Dh} \tag{5}$$

将式(5)代入式(4)可得:

$$C = \frac{\pi DN \lambda}{8P} \tag{6}$$

通过式(6)便可以求得聚合物的应力光学系数。

2 实验步骤

2.1 试样制备

(1) 将待测粒料放入真空干燥箱, 在 80 ~100 ℃ 下烘干 8 ~12 h, 然后用注塑机 (HTF 110X 型, 海天塑料机械公司) 注塑成直径为 50 mm, 厚度为 2 mm 的透光圆片试样。

(2) 将透光圆片试样放入鼓风干燥箱进行去应力退火, 退火的温度应该在聚合物的玻璃化转变温度以上 5 ~10 ℃ 内, 退火时间为 8 ~12 h。退火完毕后, 在干燥箱中自然冷却, 退火完毕的试样其内应力应基本消除。

2.2 通过光弹性试验测定应力光学系数

(1) 调整光源及各镜片和透镜的高度, 使它们的中心线在同一条水平线上。

(2) 开启白光光源, 调整平面偏振光场。首先从光学系统中卸去两块 1/4 波片, 再借助一个等倾线位置已知的受力模型来调整起偏镜和检偏镜的位置。转动一个镜片直至屏幕上的光场背景达最暗, 然后顺时针或逆时针同步转动起偏镜及检偏镜, 直至屏幕上出现的圆盘等倾线呈正“十”字形交叉的 0°等倾线为止, 这时两块镜片的偏振轴不仅正交, 且一个在水平位置另一个在垂直位置。装上试样, 在屏幕上描出试样轮廓, 为简化测量过程, 在有等倾线经过的地方选取几个测量点。

(3) 调整圆偏振光场。在上述平面偏振光场中加入一个 1/4 波片, 并转动它, 直到屏幕上的光场背景达到最暗, 然后将该 1/4 波片向任意方向转动 45°, 再装入第二块 1/4 波片并转动其角度, 直至幕上的光场背景再次达到最暗为止, 即得到双正交圆偏振光暗场。

(4) 用双波片补偿法测量条纹级数。①将圆片试样置于光弹性仪加载架上进行加载, 使每次加载的  $P$  值满足  $\sigma_1 - \sigma_2 = 1、2、3、4、5$  MPa。②用白光做光源时, 除零级等差线呈现永久性黑色条纹外, 其它级次的等差线都是黄、红、绿所组成的彩色条纹, 常

以红绿交界的过渡颜色——紫色作为整数级条纹的分划线。圆片中心点的条纹正好为紫色时, 则可以直接读出条纹数。若不为紫色, 则单独旋转检偏镜, 可以看到各条等差线均在移动。当圆片中心点附近的整数级等差线  $N$  通过该点时, 记下检偏镜旋转的角度  $\theta_1$ , 这时被测点的条纹级数 ( $N_0$ ) 按式(7) 计算。若转动检偏镜时,  $N - 1$  级条纹移向被测点, 转角为  $\theta_2$ , 则  $N_0$ 按式(8) 计算。

$$N_0 = N - \frac{\theta_1}{\pi} \tag{7}$$

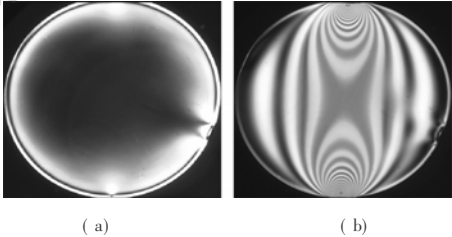
$$N_0 = (N - 1) + \frac{\theta_2}{\pi} \tag{8}$$

③根据式(7) 可以作出不同的  $\sigma_1 - \sigma_2$  值下  $\lambda N/h$  值的点, 将这些点连接, 作一条过原点的直线, 直线斜率即为要求的  $C$  值。

3 实验数据及处理

笔者以聚碳酸酯( PC ) 为例, 通过上述的试验步骤, 测试应力光学系数。并以 PC 的标准应力光学系数为参照, 检验该方法的准确性。

图2 为 PC 圆片的光弹性试验照片。



a—加载前完全退火的 PC 圆片, 内应力基本为零;  
b—在与圆片中心处条纹的切向方向同向的压力加载下  
条纹级数  $N = 3$  时的完全退火的 PC 圆片

图2 PC 圆片的光弹性试验照片

表1 为 PC 圆片在不同主应力差值下的条纹级数。

表1 PC 圆片在不同主应力下的条纹级数

| $(\sigma_1 - \sigma_2) / \text{MPa}$   | 2      | 4      | 6      | 8      | 10     |
|----------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $P/N$                                  | 79     | 157    | 236    | 314    | 393    |
| $N_1$                                  | 0.436  | 1.103  | 1.961  | 2.462  | 3.012  |
| $N_2$                                  | 0.455  | 1.157  | 1.888  | 2.439  | 3.057  |
| $N_3$                                  | 0.501  | 1.157  | 1.801  | 2.447  | 3.004  |
| $\bar{N}$                              | 0.464  | 1.139  | 1.883  | 2.449  | 3.024  |
| $\frac{\lambda N}{h} (\times 10^{-6})$ | 122.73 | 301.27 | 498.05 | 647.76 | 799.85 |

根据表1 的数据结合式(4), 得到不同  $\sigma_1 - \sigma_2$  值下的  $\lambda N/h$  值, 利用这些数值作图, 得到一条过原点的直线, 如图3 所示。直线的斜率即为要求的  $C$  值。由图3 中直线上一点  $x = 5.76$  MPa,  $y = 462.64$

$\times 10^{-6}$ , 可以得出 PC 的应力光学系数为  $80.3 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ , 与 PC 的理论值  $80.0 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1[5]}$  相符, 其准确度达到了 99% 以上。

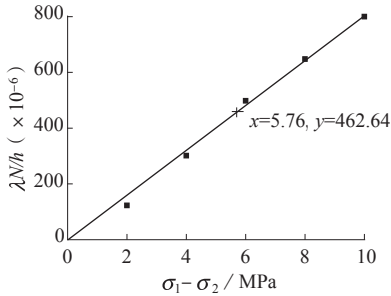


图 3  $\sigma_1 - \sigma_2$  与  $N/h$  的关系图

#### 4 结论

根据经典平面光弹性理论, 利用对聚合物圆片试样径向加载, 通过加载方向主应力的差值与条纹

级数的关系, 求出聚合物的应力光学系数, 从而提出了一种实用的测试聚合物应力光学系数的方法。该方法简便易行, 准确度达到 99% 以上。但是该方法对试样的要求较为严格, 必须是形状规整的光学圆片, 且经过严格的去应力退火。

#### 参考文献

- [1] 杨柏, 吕长利, 沈家骢. 高性能聚合物光学材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] 李复生, 魏东伟, 崔金华, 等. 聚碳酸酯光学性能应用及改进研究进展[J]. 塑料, 2003, 32(3): 65-69.
- [3] Ramesh H, Gary C D, Marc B W. Data storage media containing transparent polycarbonate: US, 6593425B2[P]. 2003-07-15.
- [4] 张如一, 陆耀楨. 实验应力分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981: 217-262.
- [5] James E M. Physical properties of polymers handbook[M]. New York: American Institute of Physics, 1996: 535-543.

### METHOD OF MEASURING STRESS-OPTICAL COEFFICIENT OF POLYMERS

Li Xi<sup>1</sup>, Chen Yuhong<sup>2</sup>, Zhan Maosheng

(1. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Beijing Institute of Aeronautics Materials, Beijing 100195, China)

**ABSTRACT** A new method on stress-optical coefficient measurement was introduced. The method was based on classic plane-photoelasticity theory. By loading on polymer disc samples, the stress-optical coefficients could be obtained according to the relationship between the isochromatic fringe values and the stresses. The stress-optical coefficients of PC were tested by this method, and the results matched well with the theoretical coefficients, its accuracy could reach up to 99%.

**KEYWORDS** plane-photoelasticity theory, isochromatic fringe values, stress-optical coefficients

#### 美 Envion 公司发明废塑料转换成燃料新技术

日前, 美国华盛顿一家公司称其已经发明一种技术, 可以将废塑料转变成类似于石油的燃料产品, 并且每桶只需 10 美元。这家名为 Envion 的公司表示, 经过转变后的燃料产品能够同其它成分进行混合, 最终能够被当成汽油或者柴油来使用。

Envion 公司对废塑料进行转化的过程中, 使用红外线能量对其进行加热, 使其达到预先设定的温度。这一过程能够在不使用催化剂的情况下, 消除废塑料内所含的碳氢化合物。

Envion 公司表示, 这种方法能够将废塑料内 82% 的能量转变成燃料。而在此之前, 科学家在尝试将废塑料转变成燃料的时候, 往往会导致塑料内的能量也会一同消失。

Envion 公司的转换设备每年能够处理超过 1 万 t 的废塑料(包括塑料瓶的瓶盖), 每吨废塑料可产出 3~5 桶燃料。此外, 每产生 1 L 的燃料, 还需耗费约 2~3 美分的电费。

2009 年 9 月 17 日, Envion 公司在华盛顿投资 500 万美元建造的废塑料转换设备举行了开幕仪式。据悉, 已经有公司同意购买 Envion 公司所研制的转换设备。不过, 具体废

塑料转换成燃料的比率能不能达到 Envion 公司所声称的那样, 还需进行进一步观察。(中聚网)

#### 美农业研究实验室开发出生物塑料填料

美国南达科他州 Brookings 的北方中央农业研究实验室, 隶属于美国农业服务局(ARS), 据了解, 该实验室与北伊利诺伊州大学(NIU)合作进行的初步研究表明, 玉米为原料生产乙醇(玉米乙醇)发酵的副产物可作为非石化路线生产的塑料填料。

这种乙醇发酵副产物名称为含可溶物的干酒糟, 它具有纤维含量高、适合与其它分子结构的分子结合的特点。ARS 农业工程师 Kurt Rosentrater 认为, 上述两个特性使它非常有可能作为塑料填料。

Rosentrater 与 NIU 工艺系的 Robert Atatara 一起制备了酒糟蛋白饲料(DDGS)与酚醛树脂(PF)的共混物压缩模塑产品。发现当 DDGS 的质量分数为 25%~50% 时, 共混物应用前景看好。目前为止的研究仅得到 DDGS/PF 共混物有限的物性数据, 进一步深入的研究正在进行中。研究人员还发现, DDGS 和干酒糟有可能作为生物填料(竹子、干蔗、玉米秸秆、大豆皮和鸡毛)的替代物, 这已被研究人员考虑作为降低塑料产品石油消耗的方法。(中聚网)