

测量钢化玻璃表层应力的漏波导方法

金 锋 李玉善

(中国科学院长春物理研究所)

提 要

本文报道利用漏波导方法测量钢化玻璃的表层应力。通过基模的双折射引入有效表层应力,并制作出相应的测量装置。对风冷钢化、化学钢化和慢退火玻璃,测量了有效表层应力,并在理论上分析了测量精度。

关键词:漏波导方法。

一、引 言

集成光学,除了光纤通信、光计算和光信息处理以外,还可采用真波导的导模^[1]或准(漏)波导的漏模^[2]方法。

通常,对于同一种原板玻璃,在不同的钢化或退火工艺条件下,产生不同的表面双折射和表层折射率分布。为了严格测量表面应力,必须测量各阶 TE 和 TM 模的模折射率,并根据模方程计算出折射率分布和表面折射率^[3],而后才能计算出表面双折射和表面应力。此计算过程相当复杂。

为了避免表面应力的严格测量所必需的各阶模的模折射率测量和复杂的数字计算。本文报道利用导模或漏模方法测量表面应力^[3]。为此引入有效表层应力,它与基模的双折射成正比。要测量有效表层应力,只需测量基模的双折射并作简单的算术运算即可。基模的模折射率与表面折射率略有差别^[5a],所以有效表层应力稍微偏离表面应力值。但是,有效表层应力和表面应力一样,完全可以用来评价玻璃表层的钢化程度。

我国现行钢化玻璃标准中的抗冲击强度、内应力均匀性、耐水压强度和抗弯曲强度均与表层应力有关,但是这几项标准却建立在破坏性检测基础上。因此,有效表层应力的测量方法有助于建立风冷钢化、化学钢化和慢退火玻璃的非破坏性定量检测标准,以便在广大生产厂家和用户中普遍推广和使用。

二、测量原理

测量装置概示于图 1。它主要由钠光灯、望远镜(由物镜、15 倍测微目镜和偏振镜组成)和棱镜-漏波导耦合器(由棱镜、折射率油层和待测玻璃组成)组成。折射率油的折射率比玻璃表面的折射率高,所以玻璃表层变成漏波导。采用棱镜-漏波导耦合系统,无需向棱镜施加压力来调节耦合间隙,使棱镜仅靠自身重量与待测玻璃接触,就能呈现出漏模。漏模在目

镜视场中形成暗 m 线^[2], 相应的棱镜底入射角为 θ , 棱镜斜边的出射角为 α 。

目镜视场中最下边的暗线相当于漏波导的基模。基模的模折射率为^[5,6]

$$\begin{aligned} N_0 &= n_p \sin \theta_0 \\ &= \sin \alpha_0 \cos \epsilon \\ &\quad + (n_p^2 - \sin^2 \alpha_0)^{1/2} \sin \epsilon, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 n_p 为棱镜折射率, ϵ 为棱镜底面与斜面的夹角, 下标“0”表示与基模有关的物理量。当 $\epsilon = 60^\circ$ 和 $\alpha \ll 1$ 时, 由(1)式得到

$$\begin{aligned} N_0 &\approx 0.866 n_p \\ &\quad + 0.5 \alpha_0 [1 - 0.866 (\alpha_0 / n_p)]. \end{aligned} \quad (2)$$

对(2)式作差分, 得到基模的双折射

$$\Delta N_0 = 0.5 [1 - 1.732 (\alpha_0 / n_p)] \Delta \alpha_0, \quad (3)$$

式中 $\Delta \alpha_0$ 为 TE 和 TM 基模的出射角之差。

由基模的双折射, 引入有效表层应力

$$P_{\text{eff}} = C \Delta N_0, \quad (4)$$

式中 C 为比例常数, 对玻璃, $C = (1/2.8) \times 10^5 \text{ kg/mm}^2$ 。设 D_0 为基模的暗线在 TE 和 TM 偏振态之间的位移, 则 $\Delta \alpha_0$ 可表示为

$$\Delta \alpha_0 = D_0 / f, \quad (5)$$

式中 f 为物镜的焦距, 将(3)和(5)式代入(4)式, 得到有效表层应力为

$$P_{\text{eff}} = \eta K D_0, \quad (6)$$

$$\eta = [1 - 1.732 (\alpha_0 / n_p)], \quad K = C D_0 / 2f. \quad (7)$$

当 $\alpha \ll 1$ 时, 近似地有 $\eta \approx 1$, 于是得到计算有效表层应力的简单公式

$$P_{\text{eff}} = K D_0. \quad (8)$$

(8)式避免了模折射率测量所必需的角度 α 的精确测量, 并使基模双折射(有效表层应力)的测量转变成简单的位移 D_0 测量。

作为一个例子, 利用 $f = 510 \text{ mm}$ 和 $D_0 = 1 \text{ mm}$, 得到 $\Delta N_0 = 0.00098$ 和 $P_{\text{eff}} = 35 \text{ kg/mm}^2$ 。换句话说, 基模的暗线在 TE 和 TM 偏振态之间的位移 1 mm 就对应于基模的双折射 0.00098 和有效表层应力 35 kg/mm^2 。

三、测量结果

实验采用钠光灯($\lambda = 5893 \text{ \AA}$)和 ZF₆ 玻璃棱镜, 棱镜折射率和棱镜角分别为 $n_p = 1.7550$ 和 $\epsilon = 60^\circ$ 。将棱镜置于待测玻璃表面要测量的部位。在棱镜和玻璃之间滴入折射率油($n = 1.657$)。调整望远镜的角度, 使其轴线与玻璃表面大致成 30° 角。细心调整望远镜和反

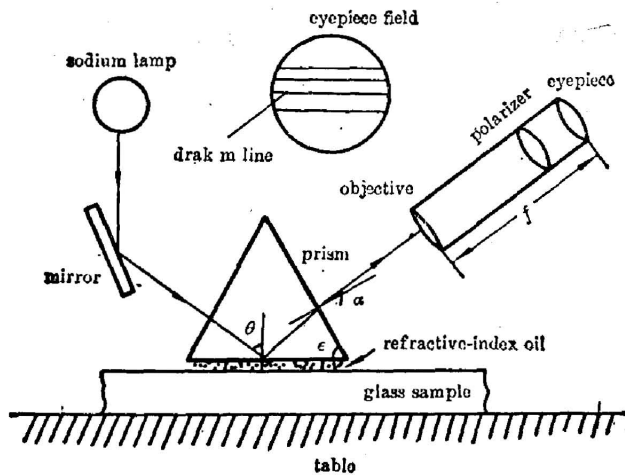


Fig. 1 Sketch of Measurement Apparatus

射镜的角度,直到在目镜视场内出现暗 m 线为止。基模的暗线在 TE 和 TM 偏振态之间的位移从测微鼓轮的刻度上读出。暗线的照片示于图 2。

对于沈阳、长春、大连和美国生产的风冷钢化、化学钢化和慢退火玻璃,测量其有效表层应力,测量结果列入表 1。我们的测量装置不仅可以用来测量这三种玻璃的表层应力,而且对未钢化的浮法玻璃也能探测到微小表层应力的存在。

对于若干钢化玻璃样品,作了内应力均匀性的破碎实验和抗冲击强度的钢球破碎实验。其实验结果与有效表层应力的测量相符合。这就表明,我们的测量装置完全可以用来检验钢化玻璃的内应力均匀性和抗冲击强度,并可以避免破坏性检测。

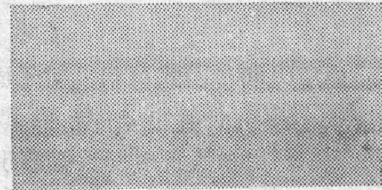


Fig. 2 Photograph of Dark m -Lines

Table 1 Measured values of the effective surface layer stress

manufacturer	strengthening method	effective surface stress (kg/mm ²)
Shenyang Strengthened Glass Factory	air cooled	11.6±0.6
	air cooled	10.4±0.6
Changchun Strengthened glass Factory	air cooled	16.2±0.8
	air cooled	12.1±0.7
	thermally tempered	4.9±0.4
Dalian Light-Industry College	chemical	51.5±2.4
	chemical	49.8±2.3
Cartery Co. (U. S. A.)	air cooled	14.4±0.7

四、测量精度

由(6)~(8)式可知,在比例常数 C 对各种玻璃保持不变的假定下,有效表层应力的误差 ΔP_{eff} 由 D_0 的误差 ΔD_0 、 f 的误差 Δf 和 η 对 1 的偏差 $\Delta \eta$ 决定。有效表层应力的误差传递公式为

$$\frac{\Delta P_{\text{eff}}}{P_{\text{eff}}} = \left[\left(\frac{\Delta D_0}{D_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \eta}{\eta} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (9)$$

$$\frac{\Delta \eta}{\eta} \approx \Delta \eta = \frac{1.732}{n_p} |\alpha_0|. \quad (10)$$

ΔD_0 主要由基模的暗线宽度(约 0.03 mm)决定,经过多次测量可以达到目镜测微器的最小刻度,即 $\Delta D_0 = 0.01$ mm。 Δf 主要由物镜的加工和安装公差决定,在本测量装置中,有 $(\Delta f/f) = 0.03$,下面着重分析 $\Delta \eta$ 对 ΔP_{eff} 的影响。

根据(10)式, $\Delta \eta$ 与 α_0 和 n_p 有关。又根据(2)式, α_0 和 n_p 与 N_0 有关。所以 $\Delta \eta$ 又与 N_0 有关。在(2)式中,忽略 α_0 的平方项,得到

$$N_0 \approx 0.866 n_p + 0.5 \alpha_0. \quad (11)$$

由(11)式求得 α_0 并代入(10)式, 得到 $\Delta\eta$ 的另一表达式

$$\Delta\eta = 3.464 \left| \frac{N_0}{n_p} - 0.866 \right|. \quad (12)$$

由(10)和(12)式可知, 对于固定的 n_p , $\Delta\eta$ 只与 N_0 或 α_0 有关。对于 ZF₀ 玻璃棱镜 ($n_p=1.7550$), 计算出 $\Delta\eta$ 与 N_0 和 α_0 的关系, 列入表 2。由表 2 可见, 为了估计 $\Delta\eta$, 必须知道 N_0 。利用衬底折射率近似等于最高阶模模折射率的事实^[5a], 由(11)式和类似于(11)式的最高阶模模折射率的表达式, 可以推得 N_0 的近似表达式

$$N_0 \approx n_s + 0.5 |\Delta\alpha| = n_s + 0.5 \left| \frac{D}{f} \right|, \quad (13)$$

式中 n_s 为衬底折射率, $\Delta\alpha$ 为同一偏振的基模和最高阶模的出射角之差, D 为同一偏振的基模和最高阶模的暗线间距。对表 1 所列的玻璃, $n_s=1.50\sim 1.53$, 并且 D 均未超过 3.5 mm, 即 $|\Delta\alpha| < 0.0034$ 。对此, 根据(13)式和表 2, 有 $\Delta\eta < 3.4\%$ 。表 1 中的误差是利用 $\Delta\eta=3.4\%$ 、 $\Delta D=0.01$ mm 和 $(\Delta f/f)=0.03$, 由(9)式估算的。

Table 2 Relations of $\Delta\eta$ with N_0 and α_0 ($n_p=1.755$)

$\Delta\eta$	0~3.4%	0~6.9%	0~10.3%	0~13.8%
N_0	1.502~1.537	1.485~1.555	1.468~1.572	1.450~1.590
α_0	-2°~+2°	-4°~+4°	-6°~+6°	-8°~+8°

Table 3 Relations of n_p with N_0 and α_0 ($\Delta\eta=0\sim 3.4\%$)

n_p	1.706	1.747	1.787	1.827
N_0	1.460~1.495	1.495~1.530	1.530~1.565	1.565~1.600
α_0	-2°~+2°	-2°~+2°	-2°~+2°	-2°~+2°

由表 2 可知, 如果只采用一种折射率的棱镜(如 $n_p=1.7550$), 在我们感兴趣的 N_0 值范围内, $\Delta\eta$ 最高可达 14%。为了降低 $\Delta\eta$, 必须采用多种折射率的棱镜。对于 $0 < \Delta\eta < 3.4\%$, 由(10)~(12)式计算出 n_p 与 N_0 和 α_0 的关系, 列入表 3。如果选用表 3 所列的四种折射率的棱镜, 则在保证 $\Delta\eta$ 小于 3.4% 的前提下, N_0 值可以覆盖 1.46~1.60。所以, 利用这四种折射率的棱镜, 能够测量各种钢化玻璃的表层应力。但是在测量时要注意, 首先由(13)式估计 N_0 , 然后从表 3 选择相应折射率的棱镜。

综上所述, 利用漏波导基模的双折射引入有效表层应力, 并对各种钢化玻璃测量了有效表层应力。这一测量方法有许多优点: 无需制作试样, 待测玻璃的尺寸不受限制, 可作非破坏性测量, 操作简便, 计算公式简单, 测量精度较高, 在单模情况下也能测量。因此, 这种方法可在风冷钢化、化学钢化和慢退火玻璃的生产厂和用户中广泛使用, 不仅可以用于钢化玻璃的质量评价和全面质量管理, 而且可以用来建立其非破坏性定量检测标准, 避免破坏性检测并能节省原材料。

参 考 文 献

- [1] R. Ulrich, R. Torge; *Appl. Opt.*, 1973, 12, No. 12 (Dec), 2901~2908.
 [2] G. Leclerc, A. Yelon; *Appl. Opt.*, 1984, 23, No. 16 (Aug), 2760~2762.

- [3] 岸井貫;《窯業協會誌》,1979, 87, No. 3 (Mar), 119~126.
[4] J. M. White, P. F. Heidrich; *Appl. Opt.*, 1975, 14, No. 4 (Apr), 946~949.
[5] 鋒金, 范俊清編著;《集成光学》(上册), (国防工业出版社, 1981), 第一章。金鋒, 范俊清編著;《集成光学》(下册), (国防工业出版社, 1982), § 4.4。

Leakage waveguide method for measuring surface layer stress of strengthened glasses

JIN FENG AND LI YUSHAN

(Changchun Institute of Physics, Academia Sinica)

(Received 19 September 1986; revised 20 November 1986)

Abstract

We report the simple measurement of surface layer stress of strengthened glasses by means of leakage waveguide method. Effective surface layer stress was introduced by birefringence of the fundamental mode, and corresponding apparatus of measurement was fabricated. For air-cooled tempered, chemically strengthened, and thermally tempered glasses, values of effective surface layer stress have been measured, and the accuracy of measurement has been analysed theoretically. This method can be used for nondestructive measurement of surface layer stress.

Key Words: Leakage waveguide method