

玻璃应力的测量方法

2004-6-17 来源：中国玻璃网 作者：佚名 点击数：1547 次

更多 [玻璃应力 测量方法 新闻](#)

控制应力是玻璃生产工艺中极其重要的一环，应用适当热处理来控制应力的方法已为玻璃技术人员所熟知。然而，如何准确测定玻璃应力仍是困扰广大玻璃厂的难题之一，传统的经验性估计已越来越不适应当今社会对玻璃制品质量的要求。本文全面地介绍了常用的应力测定方法，希望对大家有所帮助和启发。

1. 应力测定的理论基础

1.1 偏振光

众所周知，光是一种电磁波，其振动方向与前进方向垂直，在所有与前进方向垂直的振动面上振动。如在光路中引入只允许某一振动方向光线通过的偏振滤片，就可获得偏振光，简称偏光。

1.2 双折射

玻璃是各向同性体，各方向的折射率相同。如玻璃中存在应力，各向同性的性质受到破坏，引起折射率变化，两主应力方向的折射率不再相同，即导致双折射。折射率与应力值的关系由下式确定：

$$n_x - n_y = CB(\sigma_x - \sigma_y)$$

式中： n_x 、 n_y 分别为 x 及 y 方向的折射率。 σ_x 、 σ_y 分别为 x 及 y 方向的应力。 CB 为应力光学常数，它是物性常数，仅与玻璃品种有关。

1.3 光程差

当偏光透过厚度为 t 的有应力玻璃时，光矢会分裂为两个分别在 x 及 y 应力方向振动的分量。如 v_x 、 v_y 分别为两光矢分量的速度，则透过玻璃所需的时间分别为 t/v_x 和 t/v_y ，两分量之间不再同步，而是存在光程差 δ ：

$$\delta = C(t/v_x - t/v_y) = t(n_x - n_y)$$

式中 C 为真空中光速。

结合上述二式，即得如下公式： $(\sigma_x - \sigma_y) = \delta / (tCB)$

即应力与光程差存在一定关系，一般借助光干涉原理测出光程差，从而计算出应力值。需要强调的是，得出的不是应力的绝对值，而是二主应力之差，有时虽然测出的应力为零，但实际上二主应力均存在，只不过二者相等而已。典型例子是平板玻璃，从平面上看，存在各向相等的表面压应力及板芯张应力，表面压应力在数值上等于 2 倍板芯张应力，但采用平面透射光并不能测出应力，原因就是 $\sigma_x = \sigma_y$ 。必须取样，使光透过玻璃端面才能测定。因此，对不同制品，根据工艺情况，设计适当的应力测试方法是极为重要的。

1.4 干涉色

两光矢量透过检偏器后，在同一平面内振动，且存在一定光程差，满足相干条件，会发生干涉。干涉作用产生的光强 I 由下式决定：

$$I = a^2 \sin^2(\beta - \alpha) \sin^2(p\delta/\lambda)$$

式中各符号的意义见图 1。由此式可得出如下结论：

- a) 当 $\beta - \alpha = 0$ 时，即两主应力方向分别与起偏器及检偏器方向一致时， $I = 0$ 。此黑条纹即是“等倾线”，线上所有点的应力具有相同的方向。此原理常用来确定应力的方向。
- b) 当 $\beta - \alpha = 45^\circ$ 时，即主应力方向与偏振方向成 45° ，在 $\delta = 0, 1\lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots, N\lambda$ 处， $I = 0$ 。也就是光程差为波长的整数倍时，出现黑色条纹。
- c) 当 $\beta - \alpha = 45^\circ$ 时，下列波长的光能较好地透过： $\sin^2(p\delta/\lambda) = 1$ ，即 $\lambda = 2\delta, 2\delta/3, 2\delta/5, 2\delta/7, \dots$ 。而以下波长的光被阻： $\sin^2(p\delta/\lambda) = 0$ ，即 $\lambda = \delta, \delta/2, \delta/3, \delta/4, \dots$ 。白光是波长从 $400\text{—}700\text{nm}$ 范围内多种颜色光波的混合物，有效波长一般按 565 nm 计。所以用白光作光源时，玻璃就出现多彩的干涉色，可用来估计应力值。相同的干涉色连成的色带称“等色线”，线上的应力值相等。

2. 常用的应力测量方法

2.1 定性、半定量测量方法

使用正交偏光观察玻璃中残余应力的方法为大家所熟知，此种方法广泛用于定性或半定量判定玻璃中的应力情况。最简易的应力仪通常由一个白光光源及二片偏光片组成，偏光片的光轴互相垂直，玻璃样品置于两偏光片之间，主应力方向与偏振轴成 45° 。如果玻璃中存在垂直于光线传播方向的非均匀应力，则可观察到黑、灰、白的干涉带，应力更高时，可见黄、红、蓝等彩色干涉条纹。无应力的玻璃只能观察到均匀的暗场。

对于退火玻璃制品，一般仅出现灰白干涉色，此时为提高分辨率，需增加一块灵敏色片。灵敏色片其实是一种光程差为 565nm 的人工双折射片，相当于人为将总光程差增加或减少 565nm ，使视域中出现彩色干涉色，提高肉眼对干涉色的分辨能力。

表 1：干涉色与光程差对照表

干涉色	无灵敏色片时的光程差 nm	灵敏色片时的光程差 nm
黑	0	565
灰	150	415
淡黄	250	315
黄	300	265
桔黄	450	115
红	500	65

紫	565	0
兰	600	
兰绿	650	
绿黄	750	
黄	850	
桔	950	
红	1050	
紫	1130	
绿	1300	
绿黄	1400	
粉红	1500	
紫	1695	

另一种较为精确的颜色对比法是采用一套至少包括 6 片的标准光程片组，将被测玻璃样品在偏光下与标准片对比干涉色，从而判断应力大小。标准光程片是一种均匀的双折射片，每片的光程差人为控制在 21.8–23.8 nm 之间，直径至少 30mm，同一组内各片的光程差基本一致。通过增减标准光程片数目，使玻璃样品的干涉色与标准片组的干涉色相同，根据标准片的片数及各片光程数据，就能计算出玻璃中的应力值。

2.2 Senarmont 定量应力测定法

此种方法采用的光学元件及其方向匹配关系请参照图 2。起偏器及检偏器的偏振方向均须与水平线成 45°，它们之间必须相互垂直。被测样品主应力之一方向必须与水平线一致，即主应力方向须与偏振方向成 45°，如样品是瓶子等圆柱形制品，则将瓶子水平放置、使瓶子轴线与水平线重合即可。

检偏器是可以旋转的，转动角度由刻度指示。使用时，先将检偏器转至 0 刻度处；然后放置被测样品，调整样品方向，使被测点主应力的方向与偏振方向成 45°；再转动检偏器，直到被测点变得最暗；记下转角读数，每度相当于 3.14 nm 光程差。

根据旋转方向可判断出是压应力还是张应力。如顺时针转动检偏器能使被测点变暗，则为张应力，反之则为压应力。需要指出，如四分之一波片转动 90° 安装，则检偏器旋转方向所代表的应力性质正好相反，读数绝对值不变。如果对仪器有疑问，可取 25 X 200mm 的平板玻璃测其板芯应力，已知板芯应力是张应力，故能用来验证仪器的应力测试方向。

四分之一波片的精度对此方法的测定精度有较大影响，一般要求该波片的光程误差在 ± 2 nm 之内。Senarmont 法适用于测定已知应力方向的玻璃制品，如平板玻璃、瓶子、玻璃管等。对于应力方向复杂的制品，采用 Tardy 方法比较方便。

2.3 Tardy 定量应力测试方法

与 Senarmont 法不同；Tardy 法增加了一块四分之一波片，两块四分之一波片的光轴均与偏振方向成 45°，两块波片均能从光路中移走；玻璃样品中的主应力方向与偏振方向重合。其余部分与 Senarmont 法类似。

测试时，先将两块四分之一波片撤离光路；然后放入被测样品，此时可从检偏器中看见样品上黑色的应力等倾线，即在此线上，应力方向均相同并与偏振方向一致；再调整样品的放置方向，使等倾线通过被测点；将二块四分之一波片推入光路，等倾线即消失；此时可旋转检偏器，直至被测点光线最弱；后面步骤同 Senarmont 法。

由于 Tardy 法要求应力方向与偏振方向一致，故可利用等倾线性质实现方向的相对调整，不必准确确定应力的实际方向。

二块四分之一波片的光轴相互垂直，对光程的作用互为补偿，所以波片的精度要求可低一些，只需控制二块波片之间的相对误差。故此方法的测量精度要好于 Senarmont 法。

2.4 Babinet 补偿器法

Babinet 补偿器是一种光程差可调的双折射元件，相当于在应力仪中加入一个应力值可调的人工应力片，其方向与被测玻璃样品中的应力方向相反，当两者数值相等时，应力相互抵消，在正交偏光下观察到消光黑条纹。

Babinet 补偿器一般由两块石英楔构成，二者尺寸相同，光轴互相垂直。一块楔是固定的，另一块可滑动，滑动的位置由测微螺杆转换成读数，光程差值与楔滑动的距离成线性关系。

此种方法操作较为简单，首先确定被测点的主应力方向，旋转补偿器测微螺杆，直至被测点为黑条纹所覆盖，记下测微螺杆读数并乘以补偿器常数即得到玻璃的应力值。应力的方向亦根据测微螺杆旋转方向加以确定。

此法操作简单，精度高。不足之处是补偿器价格昂贵。

3. 几个需注意的问题

3.1 所有方法测出的均是相互垂直的两主应力的差值。如果两主应力相等，即使应力值很大，测出的应力也是零，这种现象经常会产生误导，使人容易忽略实际存在的应力。因此，一般选择主应力之一为零的部位作为测量点。

3.2 只有垂直于光路的应力才能被测出。如果一维主应力平行于光透射方向，则也会得出不存在应力的错误结论。另一方面，此特性也常被用来解决上述

3.1 条所讨论的问题，如玻璃中存在二维应力，应使主应力之一平行于光路，从而准确测出另一主应力值。

3.3 测出的应力是光经过的玻璃内不同位置应力的代数和。如果一个玻璃瓶壁的外表面存在压应力、而内表面是张应力，光从瓶身一侧射进、从另一侧射出，则测得的应力是各处应力的平均值，各处的实际应力很可能远大于此平均值。

3.4 光的入射方向须与玻璃表面垂直。异型制品须浸入与玻璃折射率相同的液体中，以杜绝反射、折射等现象产生的光学作用，这些作用会干扰应力干涉色，影响应力测量精度。

4. 结束语

应力测定工作并不是一项高难度的工作，但它涉及的因素多，且容易混淆，稍不注意就会得出错误甚至相反的结果。在实际测定之前，一定要先分析造成玻璃制品失效的应力因素，理清思路，选择合理的测定方法与步骤。应力测定的目的是反馈给玻璃生产工段，为其采用更合适的热处理设备、制定更合理的热处理工艺提供依据。因此应力测定既是检验工序的工作，更重要的应该是工艺过程控制的一环，应力测定与生产工艺应紧密结合在一起。

