

综合评述

日本钢化玻璃表面应力 工业控制的现状

岸井 贯

(日本东芝综合研究所)

一、前言

玻璃制品由于引入表面压应力而获得机械增强。表面压应力可以抵消由外力引起的张力，以及防止存在于表面的裂纹端部应力集中(图1)。只有在张力超过压应力时，裂纹才开始扩展而导致破裂。

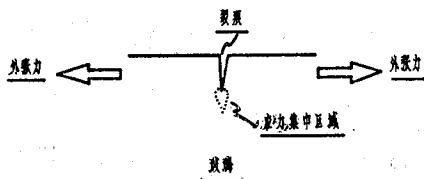


图1 玻璃表面裂纹端部的应力集中

表面压应力可以用热钢化和离子交换(化学钢化)的两种处理方法来引入。对于上述两种方法，就玻璃棒试样说来，下列关系式大体上是有效的：

$$\text{弯曲强度} = \text{钢化前强度} + \text{表面压应力}$$

因此，表面压应力决定着机械强度。此外，压应力层厚度是抵抗疲劳和抗刻划的性能相一致的。这些参量对于钢化玻璃的生产过程中的质量控制和工艺控制是重要的。

二、钢化处理

(一) 热钢化处理

热钢化处理可按下述程序完成(图2)：
①首先将玻璃制品在玻璃软化的温度范围内进行加热(图2a)，

②然后鼓入空气使玻璃制品骤然冷却(图2b~f)。

通过鼓入空气，使玻璃内温度呈抛物线分布。固化作用从玻璃两表面向着中心平面进一步深化。俟玻璃完全冷却后(图2f)，玻璃内的膨胀差引起了内应力。

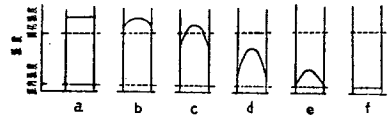


图2 在热钢化处理过程中玻璃内温度分布。

a. 骤冷前, f. 完全冷却后

应力分布基本上呈抛物线(图3)，除非玻璃太厚，骤冷速度过高。应力分布符合静态平衡条件：

$$|\text{面积} abca| + |\text{面积} a'b'c'a'| = |\text{面积} cec'dc| \quad (1)$$

通常使用下面的关系式，尽管只是大体上近似。

$$D_c = D/4, \sigma_0 = 2\sigma_1 \quad (2)$$

D : 玻璃厚度, D_c : 压应力层厚度,

本文作者因故不能出席1981年8月北京国际玻璃讨论会，特撰英文稿件投寄中国硅酸盐学会。本文是由中国硅酸盐学会《硅酸盐通报》编辑部米视祥同志翻译的，后经中国硅酸盐学会段锡荣工程师和天津市光学玻璃厂骆士雄工程师审校，特此表示感谢。

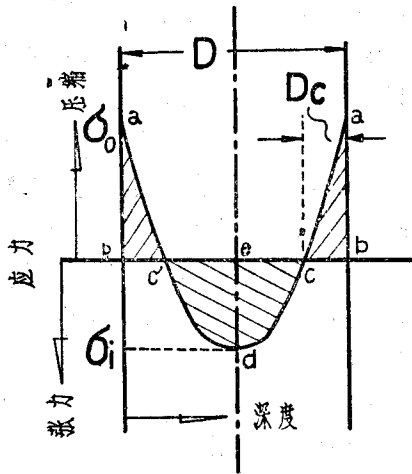


图3 经热钢化处理的平板玻璃内的应力分布。

σ_0 : 表面压应力, σ_1 : 在中心平面上的最大张力。

(二) 化学钢化处理

当玻璃制品浸入熔融的 KNO_3 浴中时, 玻璃表面发生离子交换(玻璃中 Na^+) \leftrightarrow (KNO_3 中 K^+)过程。由于 Na^+ 离子(0.98 Å)和 K^+ 离子(1.33 Å)间的离子半径差而引起表面层膨胀。然而,比 K^+ 离子扩散深度还厚的内层防止了这种膨胀。这一现象使玻璃内产生内应力,即表面层产生强大的压应力,内部产生微弱的张应力(图4)。

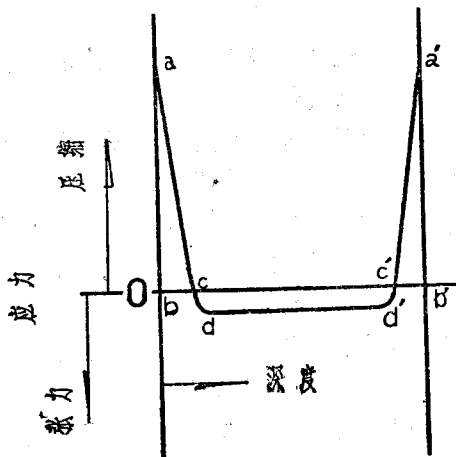


图4 经化学钢化处理的平板玻璃或薄玻璃内的应力分布。

静态平衡要求下列关系式:

$$|\text{面积}abca| + |\text{面积}a'b'c'a'| = |\text{面积}cc'd'dc| \quad (3)$$

当离子交换温度较低时, 表面层中 K^+ 离子分布同应力分布相对应(图5a, 参见照片2b)。当温度相当高时, 应力松弛会改变应力分布, 即最大应力朝中心平面方向移动(照片2b, 参见照片2c)。

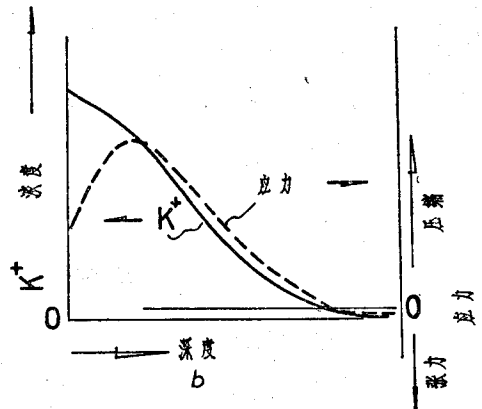
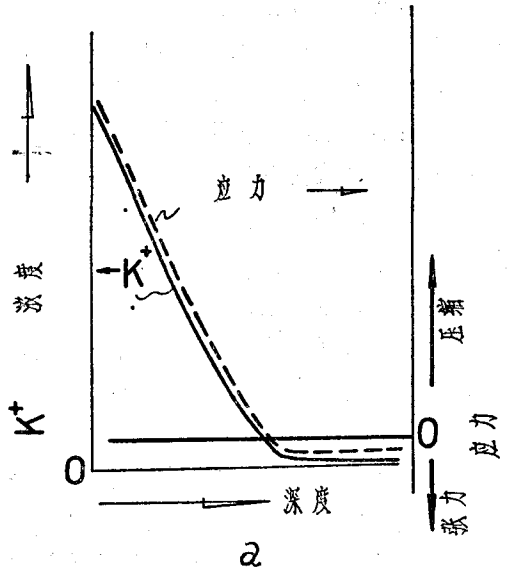


图5 经化学钢化处理的表面层内 K^+ 离子浓度和应力分布。

a. 在比较低的温度下经化学钢化处理的玻璃
b. 在比较高的温度下经化学钢化处理的玻璃

三、钢化玻璃产品

(一) 热钢化玻璃

在日本热钢化玻璃产品大部分是汽车用挡风玻璃(照片1)。平板玻璃原板被压弯成型后立即进行钢化处理。所有的挡风玻璃都是由浮法玻璃制成的。

列举其他产品如下:

- ① 蒸煮器用窗口玻璃
- ② 锅炉水位指示玻璃
- ③ 高功率照明装置用透镜和滤色镜
- ④ 太阳热收集器用盖板玻璃
- ⑤ 电子复印机用面板玻璃
- ⑥ 建筑内部用玻璃组件
- ⑦ 受压容器用液面指示器玻璃

最近石冢(Ishizuka)玻璃公司已经着手生产热钢化玻璃瓶。

不像美国那样,在日本建筑用热钢化玻璃外窗尚不普遍,热钢化眼镜片还没有进行生产。



照片1 加偏光滤光镜拍摄的日本汽车用热钢化处理的挡风玻璃

(二) 化学钢化玻璃

1. 钟表晶质玻璃

目前在日本生产的钟表大都装配经化学钢化处理的薄晶质玻璃。由于设计和式样时新的原故,需要薄钟表玻璃来减薄表的总厚度。可以使用各种类型的玻璃。例如,抛光薄玻璃、BK-7光学玻璃以及专门设计特种

组分的玻璃。国内外玻璃制造厂家均可供应。玻璃表面压应力范围为 $50\sim 100\text{kg}\cdot\text{mm}^{-2}$,其压应力层厚度为 $30\sim 50\mu\text{m}$ 。

2. 玻璃镜片

有两、三家透镜制造厂供给经化学钢化处理的镜片毛坯,包括光变色镜片。镜片毛坯先经过眼镜车间加工和磨边,然后镶入镜框里。为防止降低透镜强度需要特别磨边。加工和磨边时间需一小时左右。

某些眼镜商在车间里备置小规模盐浴。镜片毛坯在加工和磨边后,再进行钢化处理。钢化处理时间需 $8\sim 20$ 小时。

在日本不像美国那样对镜片强度没有法定限制。所以,化学钢化镜片只占总产量的一小部分。

部分玻璃毛料(包括光变色玻璃)依靠进口。

3. 玻璃瓶

几家玻璃瓶制造厂开始试产化学钢化玻璃瓶产品。许多专利说明书提出了若干方法,其中包括在玻璃瓶成形后,立即向其表面和内部喷涂钾盐溶液,然后退火。

4. 其他产品

弯面玻璃镜和喷气式飞机用挡风玻璃是工业用化学钢化玻璃产品的实例。目前也在试产化学钢化玻璃杯。

有数家光学仪器制造厂普遍使用化学钢化玻璃模具来成形塑料镜片。

对化学钢化玻璃表面的光学波导效率(见六、5、(2)节)预期对于集成光学是很有用处的。日本(Nippon)电器公司和日本(Nippon)平板玻璃公司在这方面进行了积极研究。两公司合作发展了光致偏器、光调制器、光开关等。塞尔福克牌号(Selfoc)的光学纤维是利用碱(Na^+ , $\text{N}^+\dots$)和 Tl^+ 离子间离子交换的处理方法制造的,大量应用于远距离通讯和光学仪器。

保谷(Hoya)电子公司已经制定了有

关化学钢化光掩膜玻璃的研究计划。这种玻璃预料能够降低操作时的破损以及减少因划伤造成掩膜图象的破坏，使半导体器件获得更高的产量。

四、钢化玻璃内的应力分布

如果大气压力 ($\approx 0.01 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2}$) 忽略不计，那么可以假定玻璃表面是自由表面，则垂直于表面的应力等于零。三个主要应力轴，其中一个轴垂直于表面，其他两轴与表面平行。所以，仅仅在与表面平行的方向才存在表面应力。

在钢化玻璃中表面压应力和内部张应力彼此处于静态平衡(方程式(1)和(3))。普通的光弹性技术是利用垂直于表面的偏振光的传播，只给出零或极小的应力值，表面压应力没有产生信息。表面压应力测定技术则需要通过光线沿其表面传播去进行光弹性观察。

精确测量必须是无破损性的，这一事实造成了其它困难。利用形成新表面或若干表面的一切处理必然会改变应力分布，这是调节新表面应力分布的结果。

尽管还存在这些困难，但许多研究者仍然积累了一些测定表面应力用的技术。

五、以折射法为基础的应力测量

假定玻璃棱镜处于应力 F 下(图6)。玻璃棱镜由于光弹性效应而成为双折射。棱镜折射率对于两种线偏振光分别为 n 和 $n + \Delta n$ 。

偏振光通过棱镜在距离 L 范围内传播时，则光学厚度分别为 nL 和 $(n + \Delta n)L$ 。在两偏振光之间的光程差 R 是：

$$R \equiv (n + \Delta n)L - nL = \Delta nL$$

另一方面，根据玻璃的光弹性常数 C 的

定义给出如下关系式：

$$R \equiv CFL = \Delta nL \quad (4)$$

所以， F 可以由下式给出，

$$F = \Delta n/C \quad (5)$$

$$F = R/(C \cdot L) \quad (6)$$

Δn 和 R 两者都可以确定 F 。

利用如下单位：

$$F = \text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$$

$$R = \text{nm}$$

$$C = (\text{nm} \cdot \text{cm}^{-1}) / (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})$$

$$L = \text{cm}$$

可以变换方程式(5)，给出下式：

$$F = 10^6 \cdot \Delta n/C \quad (7)$$

在表面应力沿光程不匀一时，则方程式(6)可以变换如下：

$$F = \frac{1}{C} \frac{dR}{dl} \quad (8)$$

式中， l 是沿光程的距离。

表中列出表面应力测定法的分类。

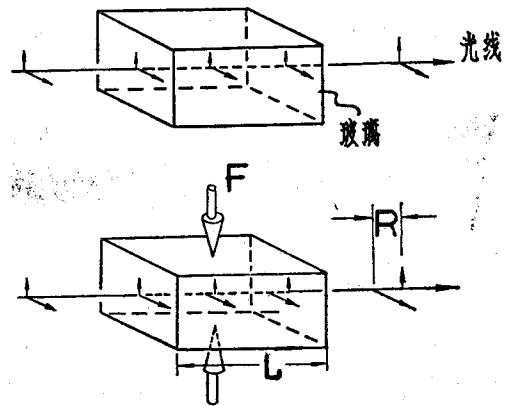


图6 线偏振光通过玻璃的透射

a. 无应力玻璃； b. 应力玻璃
 F : 应力, R : 光程差
 小箭头: 线偏振光的两个线偏振光分量

六、应力测定技术

(一) 薄切片光测弹性法

薄切片光测弹性法不适用于热钢化玻

钢化玻璃表面应力测定法的分类

方 法	破 损 性		无 破 损 性		
	薄切片光测弹性法	光学切片法	散射光或折射光的光测弹性法	折 射 法	
商业名称			Biacope	DSR ^R	Toshiba系统
测量用光波	透射光		表面波	反射光	表面波
要测量的量	光程差R		dR/dl	双折射 Δn	
灵敏度	高		中	低	
本文节数	六、(一)	六、(二)	六、(四)	六、(三)	六、(五)、1~3
参考文献	[1]	[2]	[6~8]	[3~5]	[9、11、15~18]

璃，因为做薄切片必然地会使玻璃碎成小块。这一破碎作用会释出大量内应力。

化学钢化玻璃样品薄切片的制备可以采用和岩相学所用的相同方法。必须小心使观察的样品表面垂直于面板玻璃表面。

薄切片置于偏光显微镜的载物台上，然后籍助交叉尼科耳透镜观察（照片2a），或者用巴比内特（Babinet）补偿器观测（照片2b,c）

在补偿器上由石英光楔形成干涉条纹。在光楔上的薄切片实像投影使条纹移动。条纹位移量给出光程差R，然后利用R由方程式（6）确定应力。

籍助交叉尼科耳透镜通过观测来确定压应力层厚度。

薄切片光测弹性法虽有破损性，又耗费时间，但是在技术上简易。另一方面，此法还受到若干限制：

①做薄切片能够释出相当部分的应力。为了保持应力松弛达最小，则必须满足下述条件^[1]。

$$L > 2D \text{ 和 } l > 4D,$$

L:薄切片厚度, D:玻璃厚度,

l:薄切片长度,

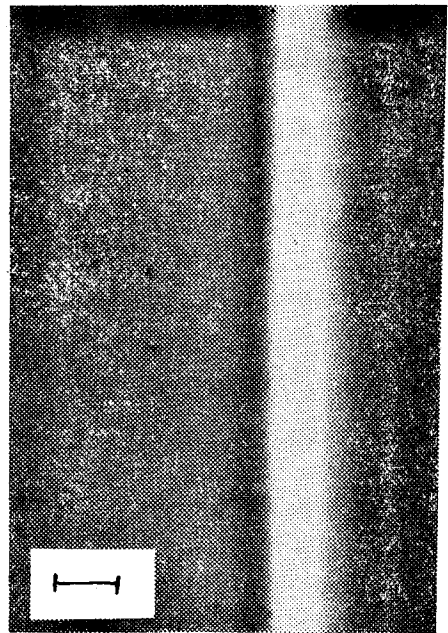
这些条件通常给出L值太大,使观测条纹位移发生困难。

②正如下面六、(五)、2、(2)节

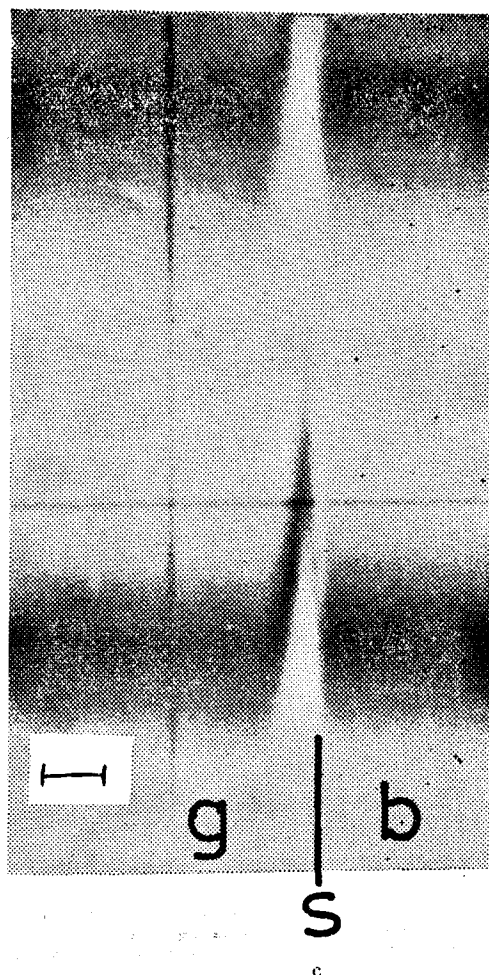
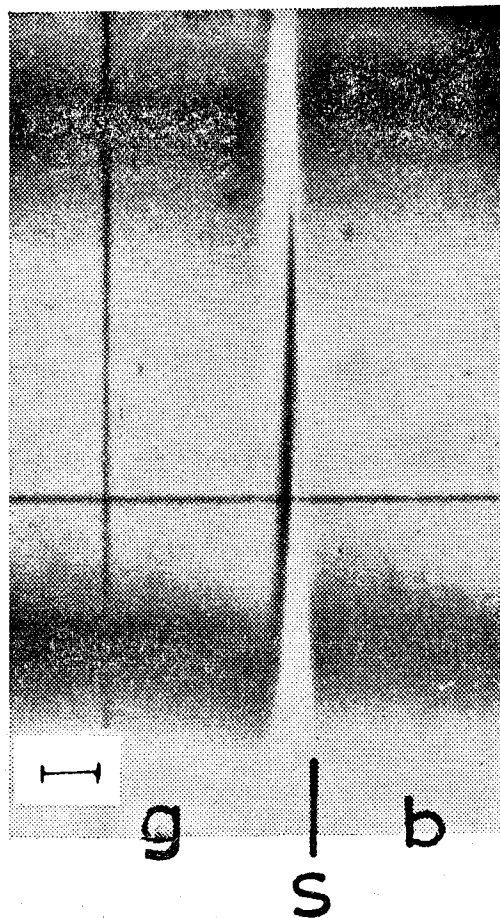
所述,由于接近样品表面的光波沿弯曲的光程传播。因此在样品表面上确切观察和估测R在原则上是不可能的。

③人为误差太大。

因此,薄切片光测弹性法仅仅适合于粗略估测。在没有介绍东芝(Toshiba)系统以前(见六、(五)、2、(3)节),日



a b
g |
s



照片 2 在偏光显微镜下的化学钢化玻璃薄切片。

a 藉助交叉尼科耳透镜的观察；
b 和 c 利用巴比内特补偿器的观测。
注：在 C 中表面上的应力松弛。
S：表面，g：玻璃，b：香脂，
线条：50 μ m。

本钟表工业为了控制钟表品质玻璃质量将薄切片光测弹性法与落木球碰撞试验一并使用。

(二) 光学切片法

光学切片技术是由美国康宁(Corning)玻璃厂开发的〔2〕。此项技术适用于筒形玻璃器皿。

将要测试的玻璃器皿浸入透光容器内的折射率匹配液里(图7a)。线偏振平行光束被投射到和透过玻璃器皿。光弹性程差，作为光程值的函数(图7b)可以用巴比内特补

偿器观测。

将该函数重叠来确定沿深度的应力分布(图7c)。这种重叠结果可假定为抛物线应力分布。因此，表面应力是间接测定出来的。

此种方法曾由东洋(Toyo)玻璃公司使用过，起码可供实验室测试用。这家公司的研究人员改进了数学程序。

(三) 差示表面折射计

差示表面折射计(DSR^R)是由美国PPG工业(Pittsburgh Plate Glass Co.)发

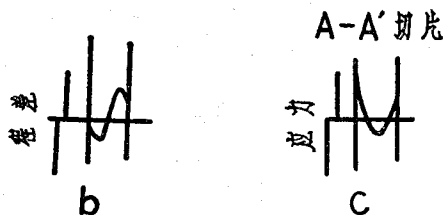
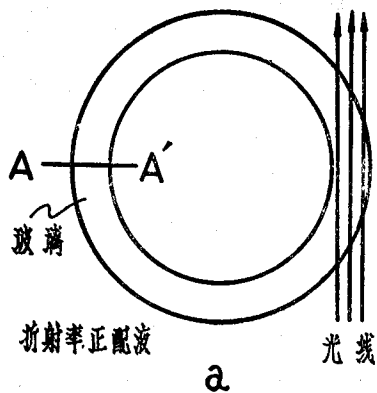


图7 筒形玻璃器皿的光学切片

- a. 平面图;
- b. 观察的程差分布;
- c. 由程差重叠而得到的应力分布。

明的〔3〕。

将高折射率玻璃棱镜放置样品表面上。然后将漫射的单色光投射到界面上(图8)。那些入射角(3)大于全反射临界角 ψ_0 的入射光线可完全被反射(3r)。入射角小于临界角 ψ_0 的光线(1)部分被反射(1r)，同时伴随着相当于折射光线(1t)的损失。在 ψ_0 的入射角(2)上的光线部分被反射(2r)，同时伴随着相当于沿界面受激发的临界光线(2c)的损失。

利用望远镜观察反射光线，在目镜上呈现暗/明界限的视场。暗/明界限相当于临界角 ψ_0 。这一点恰好与阿贝折射计的情况相同。

在样品玻璃表面由于光弹性成为双折射时，则由两种线偏振光分别形成两个界限。两界限间的距离与表面应力成正比。

恩塞文(Ansevin)预料DSR折射计会适

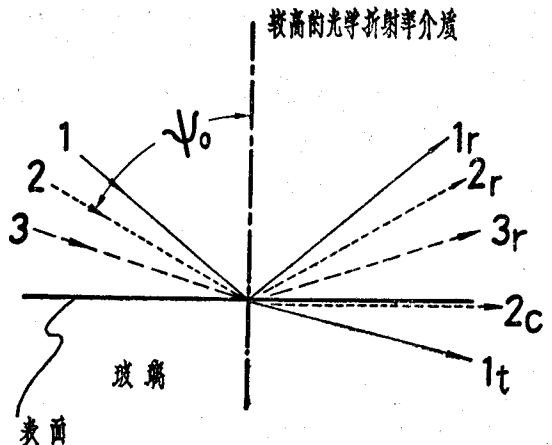


图8 在界面上光线的反射和折射词尾 r、t 和 c，分别表示反射、经折射后的透射和临界光线。

ψ_0 : 全反射的临界角

用于弯曲表面。然而，设计的DSR仅仅适用于平坦表面。日本平板玻璃制造厂采用DSR，来供实验室测试用。

日本(Nippon)平板玻璃公司〔4〕和朝日(Asahi)玻璃公司〔5〕的研究人员对DSR做了许多改进。

DSR不适用于浮法玻璃接触气体的表面(见七、节)。

(四) 比厄斯科普法

比厄斯科普(Biascope)光测弹性法是由法国圣戈宾(Sant-Gobain)公司发明的〔6〕。看来西欧使用很普遍〔7〕，但在日本对此法的应用却没有报导过。本文作者通过运用气体激光作为光源改进了比厄斯科普法〔8〕。而且，作者发现，该法适用于弯曲的钢化玻璃表面〔9〕。日本平板玻璃制造厂家计划引进比厄斯科普法，用来对夹层挡风玻璃的表面应力进行测定。

比厄斯科普法使用光学表面波(图9)。将线偏振激光束(波长 $=\lambda$)以光密度较高的介质中射入玻璃表面内。选择入射角为 ψ_0 (图8)，以便沿其表面激发临界光线。

如果有表面应力，临界光线的两个线偏

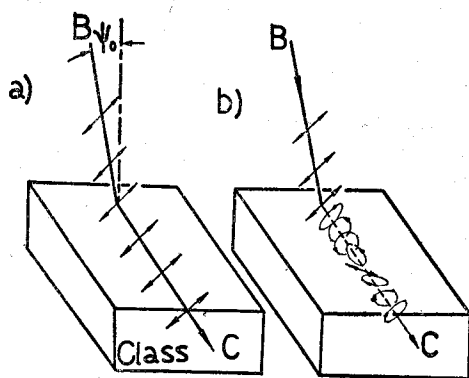
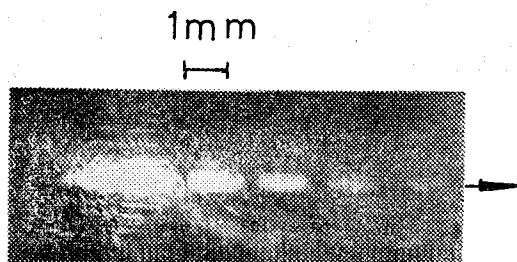


图9 比厄斯科普法原理

- a. 无应力玻璃; b. 应力玻璃。
 B: 线偏振激光束。
 ψ_0 : 全反射的临界角。
 C: 临界光线。

振光分量之间就产生程差 R 。通过对从临界光线折射到光密度较高的介质中的数条光线的观测能够鉴定出作为传播长度 l 的函数 R 的变化。

对于热钢化光学玻璃的激光比厄斯科普图象如照片3所示。暗-明-暗或明-暗-明图象的一个周期相当于 λ 的程差变化。利用方程式(8)可以确定局部应力。

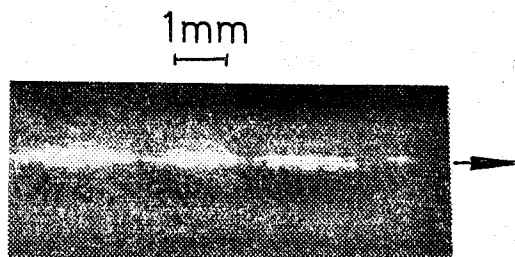


照片3 热钢化光学玻璃表面的激光比厄斯科普图象

箭头: 光传播方向。
 线条: 沿传播光程的1mm距离

此法也适用于浮法玻璃的锡扩散表面(照片4), 尽管各个传播方式(见六、(五)、1节)间的折射率差可以改变图象。

因为在表面层中的各传播方式折射率差是极大的, 所以比厄斯科普法不适用化学钢化玻璃。因此, 应力双折射不可能从比厄斯



照片4 热钢化浮法玻璃表面的激光比厄斯科普图象

箭头和线条: 和照片3的标注相同

科普图象中鉴定出来。

(五) 以玻璃内光学波导效 应为基础的测量技术

1. 热钢化浮法玻璃

在日本浮法玻璃占平板玻璃生产的主要部分。玻璃成形后。在高温下表面采用锡浴抛光。在玻璃锡界面上发生(玻璃中 Na^+) \longleftrightarrow (在锡浴中 Sn^{2+} 和 Sn^{4+}) 离子交换^[10], 同时在玻璃表面上形成锡扩散的、高折射率表面层。

高折射率表面层起到光学波导作用。光在该表面层中受到捕获, 然后传播, 并没有发散。因为该层很薄, 所以光只能以一种有限数量的单种或几种独特模式传播^[11]。

对于这种现象必须在给定的边界条件下的麦克斯韦电磁波方程式为基础进行分析。然而, 光线光学模式(图10)却有助于讨论。在折射率分级介质中的光线以奥妙的方式沿弯曲的光程传播。光线到了表面上发生全反射。重复反射和弯曲光程能使光线的传播在宏观距离上不发散。

然而, 光学干涉条件仅使表面层中存在一种或多种不连续光程或数种光程的光线。

每一光线就称之为一种传播模式。对于每一模式来说表面层的有效折射率等于光程转折点上的折射率(即模式的有效折射率)。

模式的有效折射率可以通过折射计视场内的条纹鉴定出来(照片5a)。当玻璃表面

成为光弹性双折射时，每一条纹可以分裂成两个条纹（照片5b）。条纹间的距离与表面应力是成正比例的。

所有的日本平板玻璃制造厂家为了工业上的质量控制都使用以此种原理为基础的仪器（FSM-30）。此种仪器主要的改进方面是，它不仅适用于平板玻璃，而且还适用于弯曲面的挡风玻璃。

2. 化学钢化玻璃

(1) 历史评述

离子交换（玻璃中 Na^+ ） \leftrightarrow （ KNO_3 中 K^+ ）在玻璃表面层中形成折射率梯度（照片6）。表面层起到光学波导的作用。许多

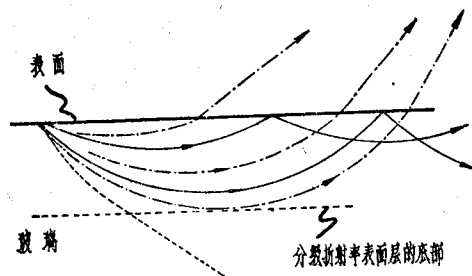
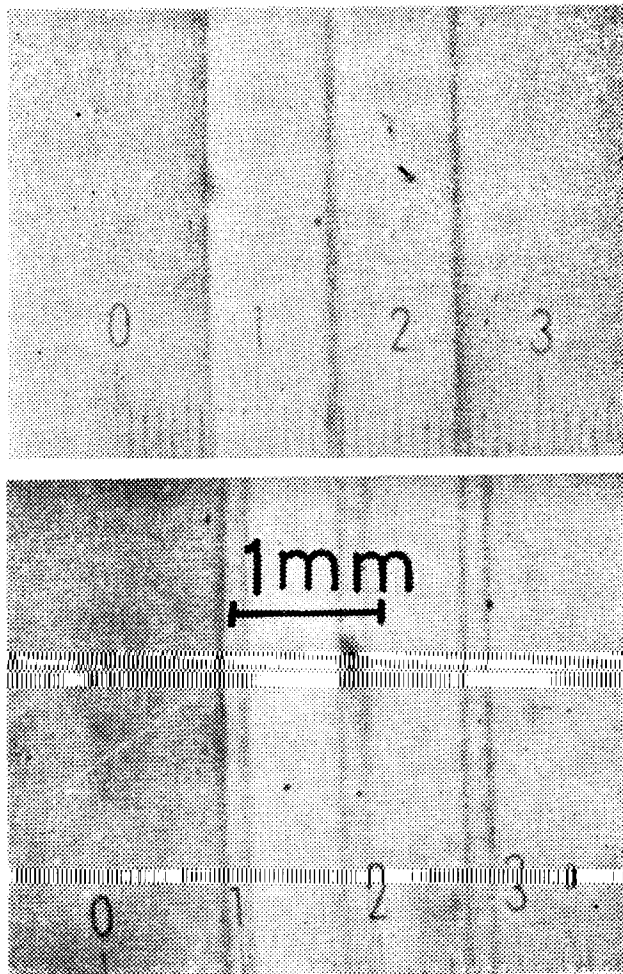


图10 在折射率分级表面层中的光线传播

- : 能够长距离传播的光线
- - -: 在短光程传播后被折射的光线
-: 从表面层中散射出来的光线

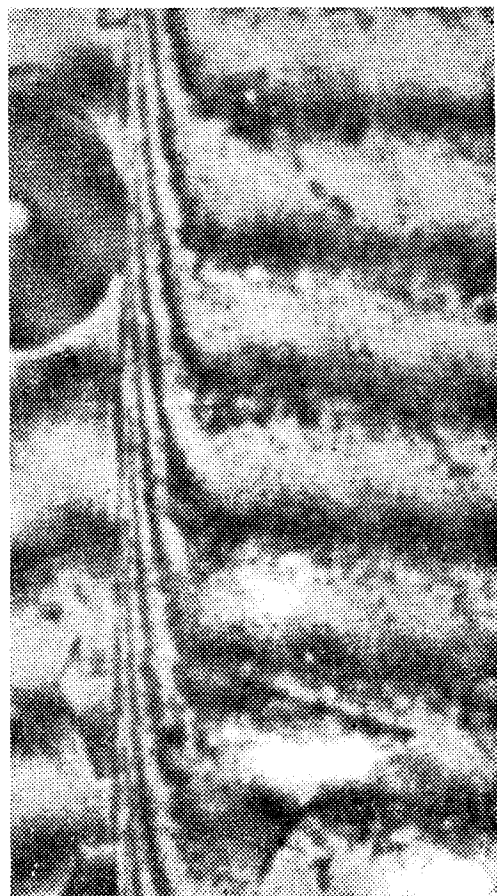
研究者提出了若干以表面层中光学现象为基础的表面应力测定理论和方法 [5, 12~14]。然而，从最近发展的集成光学理论来看，这些



照片5 浮法玻璃锡扩散表面的折射计图

- a. 正如公认的那样，无应力玻璃；
- b. 热钢化玻璃

方法是不完整的，或不是令人满意的。特别值得提出的一点，对于工业应用在数学上太复杂。



s g

照片6 借助干涉显微镜观测到的化学钢化玻璃表面层中的折射率分布

S:表面, g:玻璃

(2)方法[15]

表面层中折射率分布如图11所示。折射率在两种线偏振光之间彼此不同。这种折射率差是由于光弹性效应造成的，并且同表面层中的应力相对应。

每一折射率分布相应决定着可能的传播模式。反之，由两种线偏振光观测到的传播模式的有效折射率分布（照片7）可以确定

折射率分布、表面应力（图12）和在应力层厚度（图13）。

该法既适用于平坦表面也适用于弯曲表面[16]。虽然它是以波动光学为基础的，但是计算可以简化到最简单的形式。

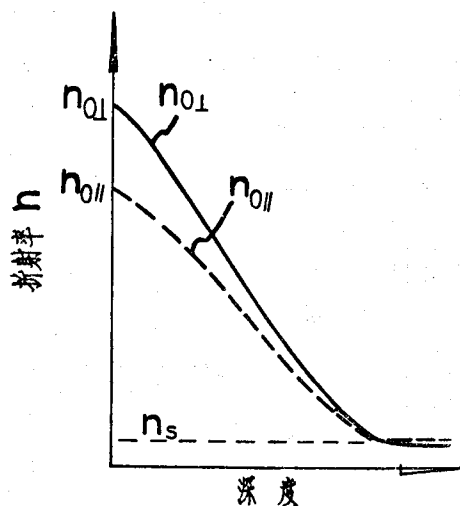
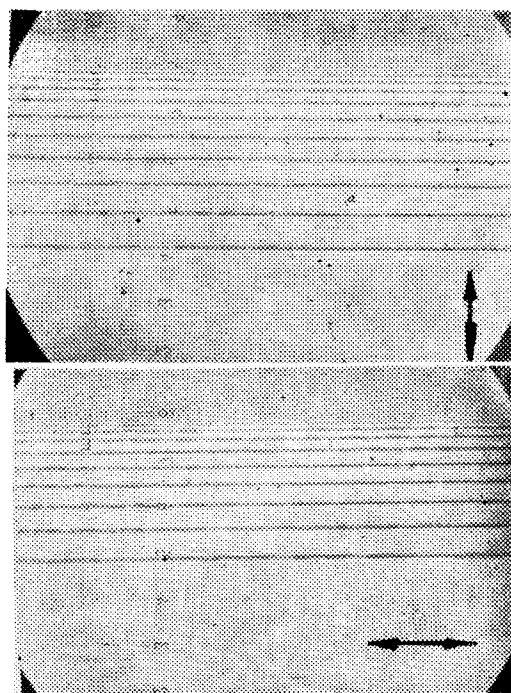


图11 表面层中的折射率分布



照片7 化学钢化玻璃的折射计图象
箭头:线偏振光的振动方向

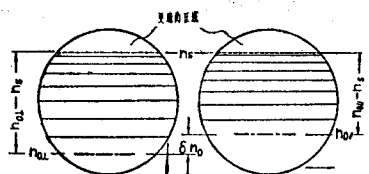


图12 折射计图象和折射率分布之间的关系。

—:观测的条纹
 -·-·-:通过外推观测的条纹位置获得相当于表面折射率 n_0 的位置。
 ·····:相当于折射率分级层的底部折射率 n_s 的位置。
 ↔:用于观测线偏振光的振动方向。

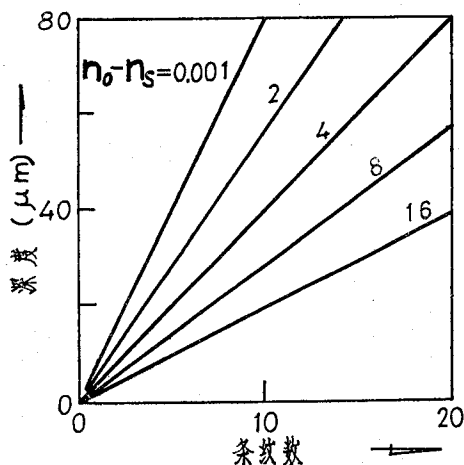
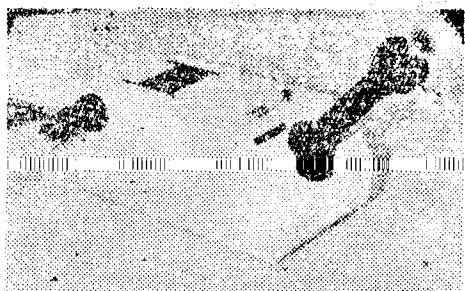


图13 条纹数与压应力层厚度的关系,以 $n_0 - n_s$ 作为参数。

(3) 工业应用

在日本全部钟表晶质玻璃都是利用仪器(FSM-10, 照片8)来控制质量。某些制造厂家对弯曲玻璃如玻璃瓶和玻璃镜片也是分别利用为此目的而设计的仪器(FSM-40)来控制质量。



照片8 化学钢化玻璃用的东芝表面应力计FSM-10

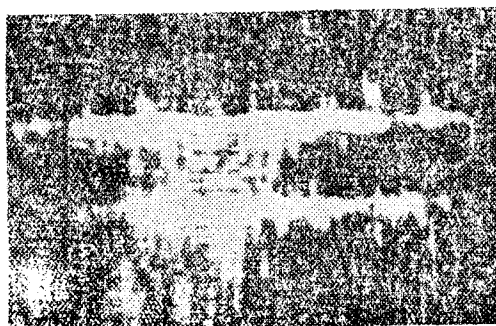
3. 其它方法

其它方法虽然尚不能在工业上应用,但

是本文作者仍介绍其中的几种方法。这些方法全部都是利用光学表面波的折射法。

(1) 利用临界光线的折射法^[17]

在传播时,临界光线(图8中的2c)部分被折射到光密度较高的介质一边。折射角等于全反射的临界角 ϕ_0 。当玻璃表面成为光弹性双折射时,两条线偏振光之间 ϕ_0 的差异可以测定表面应力(照片9)。此种方法适用于平坦表面和弯曲表面。



照片9 在热钢化光学玻璃表面内由临界光线形成的折射计图象。

(2) 利用条纹层中导波的折射法^[18]

在平板玻璃及薄玻璃中,不均匀性排列大致平行于表面。那么最大折射率值也是按相同的方式自行排列,并且起到折射率分级器的光学波导的作用。在表面波导距离小于几微米时,则利用集成光学普遍采用的技术使光线受到激发,并且从波导中完整地提取出来。

如果有表面应力,可使波导成为双折射。用两种线偏振光的传播模式之间的有效折射率差可以进行表面应力测定。

人们期望此种方法可供热钢化非浮法玻璃使用。日本平板玻璃制造厂家计划在将来推广此种技术,供薄热钢化玻璃测定用。

七、存在问题

如上所述,虽然有许多方法,但无破坏性表面应力测定尚有以下几种情况仍然是些

悬而未决的问题:

①浮法玻璃与气体接触的表面^[18]

在表面层中折射率随着深度而增加。在玻璃成形过程中折射率分布是由碱蒸发造成的。一切从外部射入到表面和表面层内的光线急速地浸没到更深的部位,而后发散。因此,比厄斯科普法和折射法无论哪一种方法对此都不适用。

如果最大折射率偶然存在于不超过几微米深的部位时,折射法是适用的^[18]。

②化学钢化光变色玻璃

为了使玻璃活化,玻璃要含有 Ag^+ 离子。(玻璃中 Ag^+) \longleftrightarrow (盐浴中 K^+) 离子交换在玻璃表面上会造成折射率降低。

③利用(玻璃中 Li^+) \longleftrightarrow (盐浴中 Na^+) 离子交换的化学钢化玻璃

这种离子交换也能使在玻璃表面上的折射率降低。况且,某种含 Li_2O 玻璃由于与钾盐的离子交换也能降低表面折射率。基尼斯科普(Kinescope)灯泡玻璃就是这样的例子。

七、结 束 语

无破损性的表面应力测量技术创始还不到25年。在日本才刚刚开始工业应用。随着理论、技术和实际应用等各个方面许多未来问题的得到解决,这种表面应力测量技术将会有助于日本玻璃工业及其相关的制造业改进质量和提高产量。

参 考 文 献

- [1] U. Soltész, Zur Spannungsoptischen Messung von Eigenspannungsverteilungen in Vorgespannten Gläsern an Schlifffproben, *Glastech. Ber.*, 54 [1] 12 (1981).
- [2] H.N. Ritland, Stress Measurement in Cylindrical Vessels, *J. Amer. Ceram. Soc.*, 40 [5] 153 (1957).
- [3] R. W. Ansenin, Non-destructive Measurement of Surface Stresses in Glass, *Instr.*

Soc. Am. r. Trans., [4] 339 (1965).

- [4] I. Kitano and H. Togo, Measurement of Residual Surface Stress on Tempered Glass Plate, *yōgyō-Kyōkai- Shi (J. Ceram. Soc. Japan)*, 80 [4] 173 (1972).
- [5] M. Hara, Investigation of Stresses at the Surface of Chemically-Toughend Sheet Glass, *Reports Res. Lab. Asahi Glass Co., Ltd.*, 21 [1] 19 (1971).
- [6] P. Aclouque and C. Guillemet, Spannungsmessung durch ein "Spiegelugs"- Verfahren, *Silikattechnik*, 11 502 (1960); *Nouvelles méthodes optiques de détermination des contraintes au voisinage des surfaces des milieux transparents*, *Rev. Franc. Mécan.*, (1962) 157; *Compt. Rend.*, 250 4328 (1960); *Compt. Rendu du colloque sur la nature des surfaces vitreuses polies (Union Scientifique Continental du Verre, Charleroi, Belgium, 1959)* 121; *US Pat.* 3 286 581 (1966); *Glass Ind.* (August 1960).
- [7] K. Blank, Thermisch Vorgespanntes Glas, *Glastech. Ber.*, 52 [1] 1 (1979).
- [8] T. Kishii, Laser Biascope for Surface Stress Measurement of Tempered Glasses, *Opt. Laser Tech.*, 13 (1981) to be published.
- [9] T. Kishii, Surface Stress Measurement of Thermally Tempered Curved Glasses by Optical Surface Waves, *yogyo-Kyokai-Shi*, 89 [7] 363 (1981).
- [10] R. Brückner and J. F. Navarro, Spannungen und Ionentransport in Floatglast Glastech. Ber., 44 [9] 361 (1971).
- [11] T. Kishii, Surface Stress Measurement by the Optical Waveguide Effect in Thermally Tempered Float Glass, *Opt. Laser Tech.*, 11 [5] 259 (1979).
- [12] C. Guillemet, L'interferometrie à ondes multiples appliquée à la détermination de la répartition de l'indice de réfraction dans un milieu stratifié, Thesis, Univ. Paris, (1970), quoted in ref. 1.
- [13] H. Eifert, Beitrag zur Refraktometrischen Untersuchung und Bestimmung von Ionen-Haustauschvorgängen in Gläsern unterhalb T_g , *Silikattechnik*, 22 [2] 60 (1971).
- [14] B. Gänswein, Refractometrische Untersuchungen zur Spannungsaufbau durch Ionenaustausch an Optischen Gläsern, *Glastech. Ber.*, 53 [8] 220 (1980).
- [15] T. Kishii, Surface Stress Measurement of Chemically Tempered Glass by Optical Waveguide Effect, *yōgyō-Kyōkai-Shi*, 87 [3] 119 (1979).
- [16] T. Kishii, Optical Waveguide Effect in

(下转46页)