

热历史对有机玻璃残余应力分布的影响

王 自 明

摘 要

本文应用双折射主切片法研究了热历史对有机玻璃残余应力分布的影响。研究表明：淬火有机玻璃残余应力的分布规律与玻璃型号、冷却方式无关；残余应力的数值取决于淬火冷却速率。退火能大幅度降低淬火有机玻璃内的残余应力，消除程度取决于退火温度和保温时间。在测定淬火有机玻璃残余应力方面，本文所推荐的双折射主切片法不仅远优于现有的只能定性和半定量的表面应力测量方法，而且优于能定量的剥层法和双折射次切片法。

一、前 言

有机玻璃残余应力的定量测定对飞机座舱透明件的质量控制、寿命估算和失效分析是十分重要的。

由于有机玻璃残余应力与高弹态成型时所受的机械力(定向应力、成型应力)及相应冻结应力条纹的多少无关^[1]，因此有机玻璃残余应力的测定，只需测定相同热历史条件下的热应力(下称残余应力)就可以了。可见，研究热历史对平板有机玻璃残余应力的影响具有重要的实际意义。

Broutman^[2]用 Treuting等人描述的剥层法^[3]、J.R.Saffell^[4]用双折射次切片法先后定量测定了水冷平板有机玻璃残余应力沿厚度的分布；本文用双折射主切片法^[5,6]研究了热历史对平板有机玻璃残余应力影响的试验结果。

二、试 验

1. 材料

采用公称厚度10mm的YB-3、YB-4平板有机玻璃(表1)作为试验材料。

2. 试件热处理

(1)淬火 将切成10×90×220mm的YB-3、YB-4有机玻璃试块加热到相应的主级玻璃化温度以上5℃，保温2h，然后分别水冷、空冷、炉冷降至室温。

表 1 YB-3、YB-4有机玻璃的性能

材料	主级玻璃化温度, °C	次级玻璃化温度, °C	材料条纹值(20°C), MN/m·级
YB-3	115	90	8.8×10^{-2}
YB-4	125	100	9.8×10^{-2}

(2)退火 将水冷和空冷后的YB-4淬火试块切去两端部，制作主切片(参见图1)。将主切片分别于50、80、90、100℃退火加热不同时间，缓冷(5℃/h)。

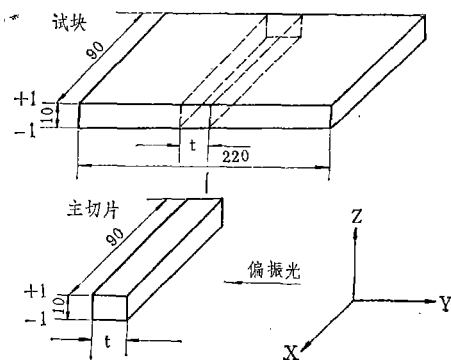


图 1 测定有机玻璃残余应力用的主切片

3. 残余应力定量方法

现已证实，淬火有机玻璃主切片上的残余应力可以根据相应主切片上的热应力条纹由式(1)获得(参见图1)^[5]：

$$\sigma_r^t = \sigma_x^t = \frac{f \cdot n_t^t}{t} \quad (1)$$

式中

$\sigma_r^t = \sigma_x^t$ ——主切片上所测得的残余应力, MPa;

n_t^t ——主切片上的热应力条纹数, 级;

t ——主切片厚度, mm;

f ——有机玻璃材料条纹值, MN/mm²·级。

证明可知, 主切片厚度趋于零时所测得的残余应力 σ^0 是未切片前相应点残余应力真值 σ 的 $(1-\mu)$ 倍; 实际主切片有一定厚度, 需要用试验订出修正系数 K 。考虑主切片厚度的影响, 制件残余应力由(2)式决定^[6]:

$$\sigma_r = \sigma_x = f \cdot n_t^t / K \cdot t \quad (2)$$

4. 设备仪器

主要设备仪器为DL—103型电热鼓风干燥箱、409-2透射式光弹仪、030型反射式光弹仪、RP-48偏光显微镜。采用单色光、圆偏振光暗场、零平衡线性补偿器(用于030仪)或单色光、偏振光暗场、Ehringhaus石英片倾斜补偿器(用于RP-48仪)测量双折射数值, 并确定其符号; 而白光、圆偏振光暗场则用来定零级条纹的位置, 并进行彩色照相记录。

三、结果与讨论

1. 淬火冷却速度对平板有机玻璃残余应力分布的影响

试验结果示于图2、3。

结果表明, 有机玻璃残余应力沿厚度的分布规律与玻璃型号、冷却速率无关: 两表面均为压应力, 拉应力产生在玻璃内部, 且异号应力互为平衡; 残余应力的数值主要取决于冷却速率。

现在来研究一下冷却过程中热应力的生成(图4)^[7]。

图的上部表示玻璃表面Ⅰ、中间区域Ⅱ及中心Ⅲ三部分的冷却曲线, 图的下部给出在冷却的个别阶段中的应力图。冷却开始时的特点是表面层冷却极快, 承受拉应力(简图a),

因为表面体积的收缩将受到中心的抵制。随之, 中心层受到已冷却表面的压力而很快地收缩。继续冷却时, 表里温度差(体积差)增大, 表面受拉力更大, 而中心受压力(简图b)。当表面终止冷却时, 收缩即已停止, 但内部仍继续冷却, 此时内部体积的收缩将受到外层的牵制, 中心将承受一种拉应力, 此拉应力抵消并超过了已有的压应力。但是在最初, 只是由于表

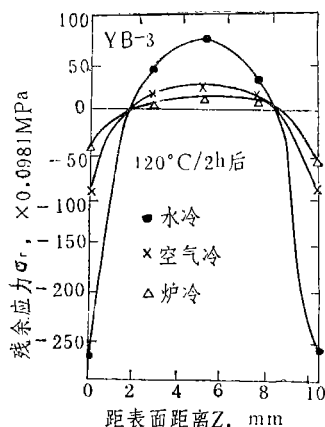
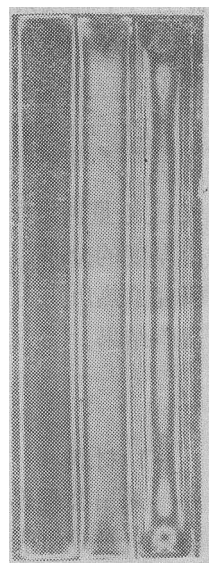
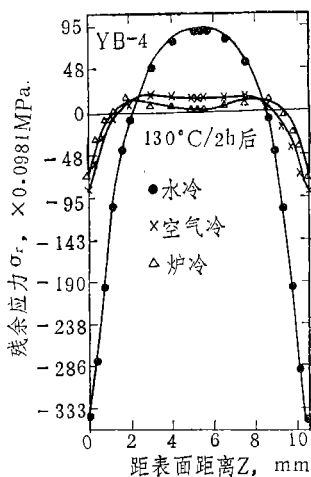


图2 淬火冷却速率对YB—3玻璃残余应力分布的影响



(a)

(b)

图3 淬火冷却速率对YB-4玻璃残余应力分布的影响

(a)残余应力沿厚度的分布曲线;

(b)与(a)相应的等差线图(自左至右: 水冷、空冷、炉冷)

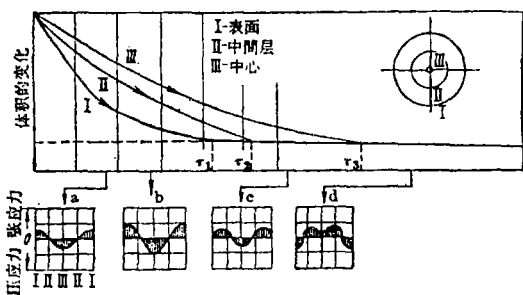


图 4 冷却过程中热应力的分布^[7]

面层原有的拉应力以及中心的压应力的渐减(简图c),终于在表面上产生了压应力(简图d)。最后一个图表示在常温下所具有的残余应力。显然,冷却速率越大,表里温度差越大,残余应力的值就越大。

基于有机玻璃残余应力仅与冷却条件有关^[1],因此,不同淬火冷却条件下残余应力沿断面的分布规律对估计和评价有机玻璃制件的

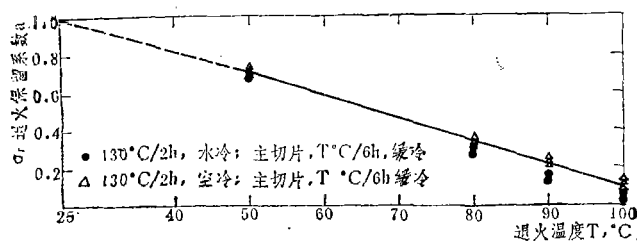


图 5 退火加热温度对消除YB-4玻璃拉伸残余应力的影响

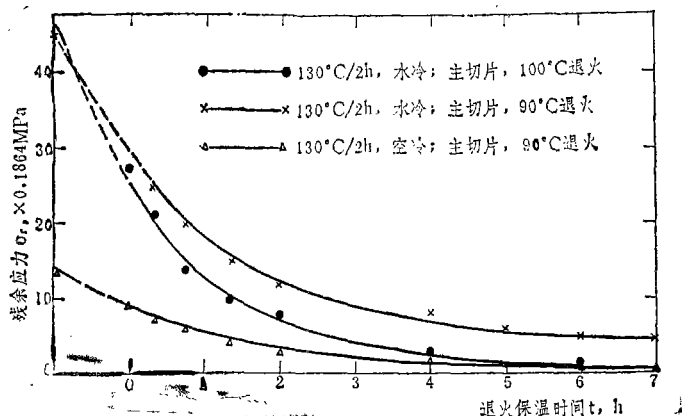


图 6 退火保温时间对消除YB-4玻璃拉伸残余应力的影响

残余应力具有指导意义,并为研究残余应力对力学性能的影响和寻求消除或制造(有益的)残余应力的方法提供了技术途径。

2. 退火工艺参数对消除有机玻璃拉伸残余应力的影响

试验结果示于图5.6。

结果表明,退火肯定可以降低有机玻璃的拉伸残余应力;降低的程度取决于退火温度和保温时间。

由于有机玻璃的残余应力仅取决于热应力^[1],而热应力主要是由于玻璃态冷却不均造成温度差(体积差)产生的⁵,因此,重新加热存在残余应力的玻璃态有机玻璃而后使其缓慢冷却,可以减少热胀冷缩的不均匀性,从而降低残余应力;温度越高,保温时间越长,这种不均匀性消除的越完全,残余应力消除的越充分。在特定退火温度下,充分退火的保温时间取决于材料的热传导系数、工件的几何形状和尺寸;

每一特定温度和特定零件,都必然对应一定的充分保温时间。试验证明,对所用主切片,消除拉伸残余应力,90°C/6h或100°C/4h即可。

应用测定有机玻璃残余应力的双折射主切片退火法^{8、9、10}测定了采用上述工艺参数退火的座舱玻璃试块的残余应力,获得满意结果^[11]。此结果可作为选择该种座舱玻璃最佳去应力退火工艺参数的重要依据之一。

3. 残余应力测量方法的比较

据所见报导,能够定量测定淬火有机玻璃残余应力沿厚度分布规律的方法只有剥层法^[2]和双折射次切片法^[4]。

剥层法必须将主切片(参见图1)小心逐次剥层(图7),测量其曲率的变化,并进行较繁琐的计算^[2]:

$$\sigma_r(Z_1) = \sigma_r(Z_1) = \frac{-E}{6(1-\nu)}$$

$$\left\{ (Z_0 + Z_1)^2 \frac{d\rho_x(Z_1)}{dZ_1} + 4(Z_0 + Z_1)\rho_x(Z_0) - 2 \int_{Z_1}^{Z_0} \rho_x(Z_0) dZ \right\}$$

式中

$\sigma_x(\sigma_r)$ ——残余应力, MPa;

E ——弹性模量, MPa;

ν ——波松比;

ρ_x ——平行于 x 方向的曲率, m^{-1} ;

$Z = \pm Z_0$ ——主切片上、下表面的初始值,

m ;

$Z = Z_1$ ——主切片每次剥层后上表面的

值, m ;

这种方法的应用实例如图8所示。

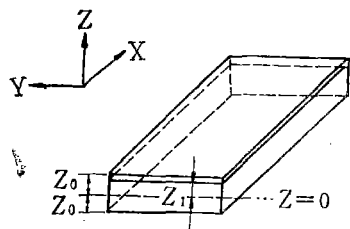


图7 逐次剥层的矩形试样(主切片);逐次剥层厚度为 $(Z_0 - Z_1)$

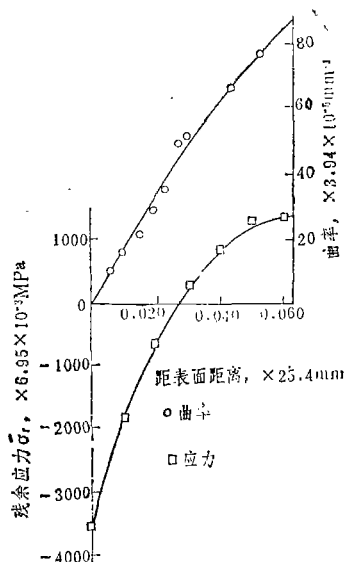


图8 淬火有机玻璃残余应力分布(剥层法)^[2]
双折射次切片法必须从主切片中再切出厚

度不大于 $1mm$ 的次切片(图9)^[4]。考虑到有机玻璃固有的滞弹性性质,该方法实行起来不太容易;实际上,作者仅给出了用此法测定的水冷淬火平板玻璃的残余应力,且结果难以满足平衡条件(图10)^[4]。

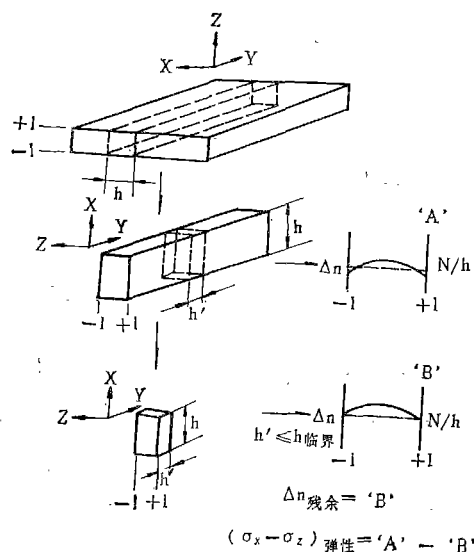


图9 用于从主切片的双折射图(“A”)中分离出残余双折射(“B”)和残余应力(“A”-“B”)的方法示意图(无论是“A”或“B”,光轴方向均为 X 轴方向; N/h 为条纹级数)^[4]

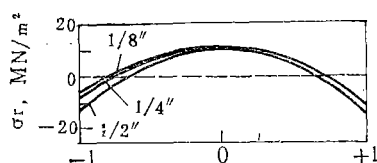


图10 不同厚度平板有机玻璃淬火($150^{\circ}C$ 加热, $20^{\circ}C$ 水冷)后的残余应力分布(双折射次切片法)^[4]

本文所采用的双折射主切片法是基于有机玻璃从高弹态不均匀冷却所产生的热应力条纹基本上是一种弹性应力条纹(参见图11)^[5]的新论点提出的,根据主切片上的热应力条纹直接获取有机玻璃的残余应力。该方法既无需逐次剥层,也无需次切片,方法简便、可靠,

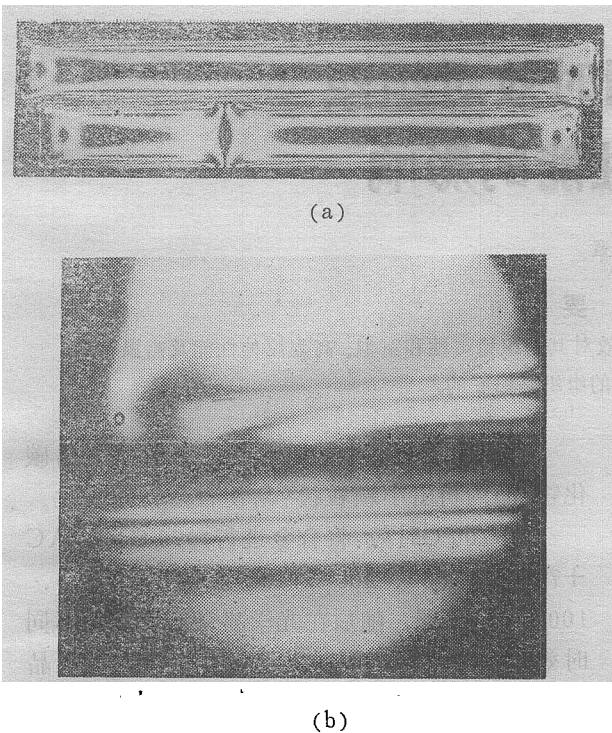


图 1:1 水冷淬火 ($130^{\circ}\text{C}/2\text{h}$, 水冷) 的 YB-4 平板玻璃主切片作次切开(即将主切片一分为二)后的等差线图(汞录光, 圆偏振光暗场)

结果准确、直观(参见图3)。

可见,在测量淬火有机玻璃残余应力方面,双折射主切片法不仅远优于现有各种定性和半定量的表面应力测量方法,而且优于能够定量的剥层法^[2]和双折射次切片法^[4]。

四、结 论

1. 淬火后的 YB-3、YB-4 平板有机玻璃残余应力的分布规律与玻璃型号、冷却方式无关,两表面均为压应力。拉应力产生在玻璃内部,且异号应力互为平衡;残余应力的数值取决于冷却速率。所获结果对估计和评价有机玻璃制件的残余应力具有指导意义,并为研究残余应力对力学性能的影响和寻求消除或制造(有益的)残余应力的方法提供了技术途径。

2. 退火能大幅度降低淬火后的 YB-4 有机玻璃内的拉伸残余应力,消除程度取决于退火

温度和保温时间,所获结果可以作为选择 YB-4 和 DYB-4 制件去应力退火工艺参数的重要依据之一。

3. 在测定淬火有机玻璃残余应力方面,本文所推荐的双折射主切片法不仅优于现有的只能定性和半定量的表面应力测量方法,而且优于能定量测量的剥层法和双折射次切片法,既无需剥层,也无需次切片,且结果直观。

赵文燕同志参加了本文实验工作,谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] 王自明,航空材料(专刊),3(2),1983,75~78. 1983~1984年中国航空学会学术会议论文选编,1986.2,46~51.
- [2] So Paul and Broutman, L.J., Polymer Engineering and Science, 16(12), 1976, 785~791.
- [3] Treuting, R.G. and Read Tr., W.T., J. Appl. Phys., 22, 1951, 130.
- [4] Saffell, J.R. and Windle, A.H., J. Appl. Polym. Sci., 25, 1980, 1117~1129.
- [5] 王自明,航空学报,6(2),1985,141~147.
- [6] 王自明,有机玻璃残余应力测定中的主切片厚度效应及其修正,中国力学学会第五届实验力学学术会议论文集,OA13(1987.4.南京)。
- [7] 北京钢铁学院金相及热处理教研组编,金属热处理(修订本),中国工业出版社,1965.5,203.
- [8] Wang Ziming (王自明), A Photoelastic Method for Determining Residual Stress in PMMA, Proc. ICEM (Beijing 1985), Science Press, 753~759.
- [9] 王自明,航空材料(学报),7(1),1987,72.
- [10] 北京航空材料研究所标准 Q/6S479-86,有机玻璃成型残余应力的光弹性测定法。
- [11] 王自明,4*有机玻璃座舱透明件去应力退火工艺参数的光弹性研究,中国航空学会第五届光测力学学术会议论文集,1986.10.长沙。