

大型退火玻璃毛坯中应力分布对称性研究

赵文兴 金海玉

摘要: 本文在实验的基础上讨论了大型光学玻璃退火毛坯的应力分布对称性问题和各种放置方法的优缺点, 提出了阻热叠放式退火放置方法。

一、前 言

退火玻璃毛坯的残余内应力分布的对称性是指在退火玻璃毛坯中, 内应力沿着毛坯的某一方作对称的分布。实践证明, 应力对称性分布是大型光学玻璃毛坯的重要质量指标之一。具有这种特性的光学玻璃毛坯, 在加工中可以成倍地缩短加工周期, 并且光学元件的加工质量也得到提高。近年来, 人们非常强调这种对称性分布的重要性; 许多厂家(如西德schott厂, 日本保谷公司等)在商品目录中也提出了这种质量保证。本文在实验的基础上, 从不同的方面讨论了获得高对称应力分布退火毛坯的退火方法。

二、温度场对应力分布的影响

退火毛坯中的应力场是和退火时该毛坯中的温度场紧密相关的, 即一定的应力分布对应着一定的温度场。因此, 要想获得具有内应力对称分布的退火毛坯, 建立一个对称的温度场是必要的。

退火时毛坯中的温度分布主要决定于二个因素: 一是炉温分布不均对毛坯的影响, 二是毛坯对于线性退火的温度响应, 即由热传导过程而形成的温度场。由于影响因素较多, 要使炉温相对于玻璃毛坯呈对称性分布是比较困难的, 即使把毛坯严格地置放于圆筒形退火炉中心, 也不能完全保证由这一因素在毛坯中形成的温度场是对称的。而由热传导过程在毛坯中形成的温度场, 是与毛坯的形状紧密相关的, 对称形状的毛坯也会产生对称的温度场。因此, 如何避免炉温分布不均的影响, 使由热传导过程形成的温度场在毛坯中占主导地位是获得具有高对称应力分布的退火毛坯的关键。

三、毛坯放置方法对应力分布的影响

毛坯放置方法一般有三种, 即单块隔离、多行列与叠放见图1。从图中可以看出, 采用多行列放置方法, 在毛坯中不会形成对称温度场, 只有单块或多块叠放在炉子中心, 才有可能获得对称性温度场。

圆柱状毛坯在退火主冷却期间的准稳态温度分布为^[1]:

$$T(r, z) = \frac{h}{2K} \frac{(H^2 - z^2)(R^2 - r^2)}{2(H^2 - z^2) + (R^2 - r^2)} \quad (1)$$

式中 K 是玻璃的导温系数, h 是主冷却速率, H 和 R 分别为圆柱状毛坯的半厚度和半径, 因此,



图1 毛坯放置形式

单块隔离 (左)

多行列 (中)

多块叠放 (右)

由 N 块半厚度为 a ，半径为 R 的毛坯叠放退火，并忽略毛坯间的界面热阻，则其中心层 ($z = 0$) 的径向温差 ΔT_r 与该种毛坯单块隔离放置退火时的径向温差 ΔT_r 之比 M 为：

$$M = \Delta T_{r, \text{叠放}} / \Delta T_{r, \text{单块}} = N^2(2a^2 + R^2) / (2N^2a^2 + R^2) \quad (2)$$

即叠放退火时毛坯的径向温差比单块放置退火时大得多，因而将产生更大的热弹性应力。同时，应该看到，采用多层叠放退火，炉温分布的不均匀性对叠放中心层的影响要比单块放置退火时小得多，并具有较大的抗热冲击能力^[1]。

对多块叠放和单块隔离放置方法进行了对比退火实验。用 7 块 $\phi 260 \times 30 \text{mm}$ 的圆片状毛坯进行叠放退火，其边缘应力 (90% R 处) 较单块隔离放置时大得多表 1。但是，对于我们所关心的应力对称性分布，实验结果是令人满意的，采用等倾线图形检测方法^[2]发现各毛坯的图形均呈正交十字线形状，这表明残余退火应力沿圆周均匀分布。用立式偏光应力仪定点定量检测，各退火毛坯在不同 r 处的残余应力双折射值沿圆周的变化保持在测试误差的范围 ($< \pm 1 \text{nm}$) 内。而对单块隔离退火毛坯的检测，发现其边缘应力的最大值与最小值之差达 4nm/cm ，说明其退火应力缺少对称性分布。

表1 退火毛坯的边缘应力

放置方法	多 块 叠 放				单 块 隔 离	
	1	2	3	4	最大值	最小值
叠放序号	1	2	3	4	最大值	最小值
边缘应力(nm/cm)	12.5	24.0	32.5	38.5	4.8	1.2

以上述实验结果可以看出，多块叠放退火，毛坯中的应力分布具有对称性，但数值太大，而单块隔离退火，毛坯的边缘应力小，但对称性分布很不理想，因此，提高应力分布的对称性和降低边缘应力是一个矛盾。如何利用这两种方法的优点，是解决这一矛盾的关键。

四、叠放毛坯的轴向温差与应力的关系

将多块毛坯叠放退火，增加了毛坯的径向温差见式 (2)，同时也增加了毛坯的轴向温差。但是，在相同的退火速率下，轴向温差的增大并不影响每一毛坯中的应力分布与大小。

假设由多块平板叠放为一无限大平板，厚度为 $2H$ ，并且板与板之间无热阻存在。这样，无限大平板在退火主冷却期间的准稳态温度分布为：

$$T(z) = \frac{h}{2K}(H^2 - z^2) \quad (3)$$

室温下，这一温度分布消失后，将在板中产生热弹性应力，其计算公式如下^[3]：

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left\{ -T(z) + \frac{1}{2H} \int_{-H}^H T(z) dz - \frac{3z}{2H^3} \int_{-H}^H zT(z) dz \right\} \quad (4)$$

式中 α 、 E 、 ν 分别是玻璃的膨胀系数、弹性模量和泊松比。根据图 2，考虑一厚度为

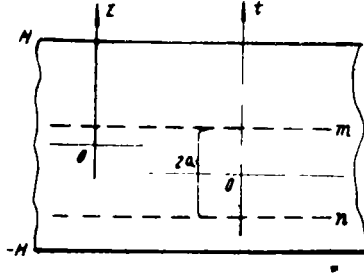


图 2 计算热弹性应力参考图

$2a(a < H)$ 的薄板。其上表面坐标 $z = m$ ，下表面坐标 $z = n$ ，薄板中心面 $z = \frac{m+n}{2}$ ，半

厚度 $a = \frac{m-n}{2}$ 进行坐标变换，令

$$t = z - \frac{m+n}{2} \quad (5)$$

这样，在新坐标系中温度分布式 (3) 可表示为：

$$T(t) = \frac{h}{2K} (H^2 - z^2) = \frac{h}{2K} \left[H^2 - \left(t^2 + \frac{m+n}{2} \right)^2 \right] \quad (6)$$

(6) 式所表示的温度分布在厚为 $2a$ 的薄板中产生的热弹性应力为：

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} = \sigma_{yy} &= \frac{\alpha E}{1-\nu} \left\{ -T(t) + \frac{1}{2a} \int_{-a}^a T(t) dt + \frac{3t}{2a^3} \int_{-a}^a t T(t) dt \right\} \\ &= -\frac{\alpha h E}{6K(1-\nu)} (a^2 - 3t^2) \end{aligned} \quad (7)$$

(7) 式表明，多块叠放退火时，其中任一平板中所产生的热弹性应力的大小与分布与该平板单独退火时所产生的热弹性应力^[4]相同。由这一结论，我们还可以看到：

(1) 式 (6) 所表示的温度分布对薄板来说是不对称的，因此，在退火中，毛坯的轴向对称冷却是不必要的。

(2) 无论叠放高度 $2H$ 有多大，可按叠放毛坯中的厚度最大的一块去计算退火毛坯的端面应力及冷却速度，而不必考虑叠放层数的多少。

根据上述分析，叠放退火时在厚度（轴向）方向产生的温差是不必担心的，因而多块叠放退火的主要矛盾是如何减少径向温差。

五、阻热叠放退火方法

要使退火毛坯具有低且对称分布的残余退火应力，必须尽可能地避免炉温不均匀分布的影响，并迫使毛坯中的热尽可能地沿毛坯的两个大面流出，减小径向温差。在这一原则下，我们选择的措施是将多块口径相同的毛坯，叠放在一口径大于玻璃毛坯口径 10cm 以上的铁

圈中，铁圈与毛坯之间的空隙充填导热性差的保温材料，叠放毛坯的上下表面铺设导热性差的平板，例如石棉板等图3。这种方法的特点是人为地改变热流方向，因而称为阻热叠放退火方法。

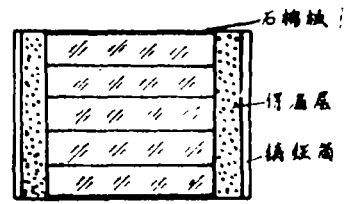


图3 阻热叠放退火方法

阻热叠放退火方法增加了叠放单位的体积，因而具有较大的抗热冲击能力，炉温不均匀分布的影响也相应减小。由于毛坯的周围是保温材料，因而相对地减小了径向温差，减少了因径向温差而产生的热弹性应力。叠放单位的上下表面所铺设的石棉板，有如河流中所筑的一道堤坝，增大了毛坯与外部环境（载物室内空间）的温差，因而进一步减少了炉温不均匀分布的影响，减少了毛坯内的温度梯度，使同一叠放层（尤其是表面）的温度更趋于均匀。

根据上述分析，我们按照图3的方法将7块 $\phi 260 \times 30\text{mm}$ 的毛坯叠放在 $\phi 400\text{mm}$ 的铸铁圈内，毛坯与铁圈之间的空隙充填硅藻土，在采取与表1所列毛坯相同的退火工艺条件下，退火后中心毛坯（4*）的边缘应力仅为叠放退火时的1/4.5。采用等倾线图形方法检测应力分布对称性，发现各毛坯在不同的角度均呈正交十字线图形，用立式偏光应力仪定点定量检测时，沿玻璃毛坯中心点旋转一周，不同 r 处残余应力双折射的变化均保持在测试误差范围（ $< \pm 1\text{nm}$ ）内。

利用阻热叠放退火方法进行了多次生产性实验，也取得了比较理想的结果。尽管我们在一个退火炉中同时摆放2—3个叠放单位，每个叠放单位相对于退火炉都不是对称的，但退火后毛坯的检测结果都是比较理想的。按照应力对称性标准^[5]，均达到C级以上。这一结果说明，叠放单位是作为一个相对独立的传热体系存在于退火炉载物室中的。每个体系各保持自己的独立性，互相之间影响较小。这种独立性主要是由于保护层使毛坯与外部空间形成的温差而促成的。基于这一特点，我们就可以充分地利用退火炉的空间，在保证退火质量的前提下，最大限度地提高生产率，降低生产成本。

六、结 论

理论和实验证实：

- (1) 单块隔离式退火易获得具有较低边缘应力的退火毛坯，但对称性分布较差。
- (2) 与（1）相反，叠放退火可获得高对称应力分布的退火毛坯，但边缘应力较大。
- (3) 阻热叠放式退火兼顾（1）和（2）的优点，可获得低且对称应力分布的退火毛坯。
- (4) 阻热叠放式退火的主要特点是人为地改变热流方向，增大了毛坯与环境的温差，减少了炉温分布不均的影响，使传导传热形成的温度场在毛坯中占主导地位。

参 考 文 献

- [1] 赵文兴, 线性退火时玻璃毛坯的温度响应, 光学机械, 1987年, 第3期, 41页
- [2] 邓文荣, 光学机械, 1980年, 第5期 53页
- [3] A. Boley and J. H. Weiner, Theory of Thermal Stress, 1960, 278
- [4] Б. Э. Данюшевский, 光学玻璃线性退火原理 (中译本) 1965, 19

— 6 —

Investigation on Symmetrisity of Stress Distribution in Fine Annealed Glass Blocks

Zhao Wenxing Jin Haiyu

Abstract

This paper discusses, based on experiments, the symmetrisity of stress distribution in large annealed optical glass blocks. An annealing method named thermal-resistance stack way has been suggested.