

# 光学玻璃精密退火炉的炉温均匀性研究

赵文兴 金海玉

**摘要:** 讨论了退火炉载物室内热的传递方式和载物室内(空炉)任一点的温度 $T_0$ 与载物室各壁面温度的关系。

## 一、前 言

大块光学玻璃毛坯的精密退火,对退火炉的性能有严格的要求,其中最重要的是炉温均匀性。炉温均匀性是指退火炉经长时间保温、传热趋于稳定后,在空炉条件下,炉温空间分布( $T = T(r, z)$ 或 $T = T(x, y, z)$ )达到的均匀程度。它主要取决于退火炉本身的结构及炉内热的传递方式,而与温控系统关系不大。均匀性是用同一瞬间退火炉载物室内各点间的最大温差 $\Delta T$ 来表示的; $\Delta T$ 越小,则炉温越均匀。

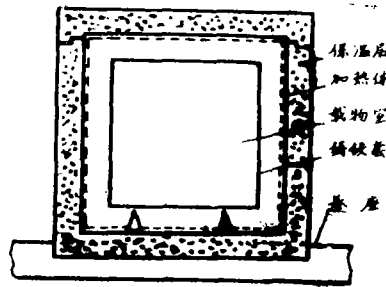


图1 退火炉结构示意图

目前,国内光学玻璃生产厂家的精密退火炉主要采用圆筒形电阻炉(图1)。为了减小炉内温差,提高炉温均匀性,通常使用厚壁铸铁筒作为载物室。载物室各壁面的热交换状态决定了室内温度分布的均匀程度。

## 二、载物室内的传热方式

### 1. 传导传热

传导传热由Fourier定律表述,数学表达式为:

$$Q_n = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \tag{1a}$$

式中， $\lambda$ 是导热系数， $\partial T/\partial n$ 是等温线法线方向( $n$ )的温度梯度。因此，从厚度为 $L$ 的平板的一个表面( $T_1$ )到另一个表面( $T_2$ )的传递热量为：

$$Q_c = \lambda(T_1 - T_2)/L \quad W/m^2 \tag{1b}$$

表1中列出了不同温度下空气的导热系数，数据表明，导热系数 $\lambda$ 随温度的变化较大。与空气比较，在300K时，铁的导热系数为80.2W/m·K，而铜的导热系数是401W/m·K。

表 1 空气的导热系数<sup>(1)</sup>

温 度(K)	300	400	500	600	700	800	1000	1200
$\lambda \times 10^3 (W/m \cdot K)$	26.3	33.8	40.7	46.9	52.4	57.3	66.7	76.3

### 2. 辐射传热

温度为 $T$  (K)的实际物体的辐射能 $Q_r$ 可按下式计算：

$$Q_r = \varepsilon C_0 (T/100)^4 \quad W/m^2 \tag{2a}$$

式中， $\varepsilon$ 是物体黑度； $C_0$ 是黑体辐射系数，其值为5.67W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>。上式表明，物体的辐射能与其温度的四次方成正比。两平行板（材料相同）之间的辐射热

$$Q_r = C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] / \left( \frac{2}{\varepsilon} - 1 \right) \quad W/m^2 \tag{2b}$$

式中 $T_1$ 、 $T_2$ 分别为高、低温表面的绝对温度。

### 3. 对流传热

对流传热是借助于流体介质流动而进行传热的一种方式。对流传热的热量 $Q_v$ 用下式表示：

$$Q_v = \bar{\alpha} \Delta T \quad W/m^2 \tag{3}$$

式中， $\Delta T$ 是壁面温度与流体温度之差， $\bar{\alpha}$ 是平均换热系数。载物室内无螺旋浆搅动时，空气流动为自然对流。这时的平均换热系数 $\bar{\alpha}$ 为3~10W/m<sup>2</sup>·℃<sup>[2]</sup>。

计算三种传热方式在两平行板间的热量传递，我们发现，当两平行板间距为10cm，温差为1K，材料的黑度 $\varepsilon = 0.85$ ，则600K时由传导传热和对流传热所传递的热量分别为0.469W/m<sup>2</sup>和3~10W/m<sup>2</sup>，而由辐射传热方式传递的热量可达36W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>；温度进一步升高，这一数值将迅速增大；至800K时，可达86W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>。由此可见，辐射传热在载物室内的热交换过程中是主要的传热方式。

## 三、载物室内的温度分布关系

退火炉载物室某点的温度，一般是指放在该点的热电偶的感受温度。由热电偶引线的热传导作用而损失的热量可忽略不计；这样，根据辐射传热学，两个温度不同的物体表面的热流量 $\dot{Q}_{i,j}$ 用下式表示<sup>[2]</sup>

$$\dot{Q}_{i,j} = \frac{\varepsilon_i \varepsilon_j A_i F_{i,j} C_0}{1 - (1 - \varepsilon_i)(1 - \varepsilon_j) F_{i,j} F_{j,i}} \left[ \left( \frac{T_i}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_j}{100} \right)^4 \right] \tag{4}$$

式中  $A_i$  是  $i$  面的辐射面积,  $F_{ij}$  和  $F_{ji}$  是与  $i, j$  面的几何形状有关的角系数。载物室是用铸铁制造的, 并且经过多次使用, 其表面因严重氧化而变粗糙, 因而其辐射黑度  $\varepsilon$  大多在  $0.8 \sim 0.85$  之间。热电偶的情况也是如此。同时考虑到热电偶接点与各壁面的角系数  $F_{ij}$  约在  $0 \sim 0.8$  之间, 所以在 (4) 式中

$$(1 - \varepsilon_i)(1 - \varepsilon_j)F_{ij}F_{ji} \ll 1$$

$$\text{即 } \dot{Q}_{ij} \doteq \varepsilon_i \varepsilon_j A_i F_{ij} C_0 [(T_i/100)^4 - (T_j/100)^4] \quad (5)$$

当两表面温度相差不大时, 我们可以近似地认为:

$$T_i^4 - T_j^4 = (T_i - T_j)(T_i + T_j)(T_i^2 + T_j^2) \doteq 4(T_i - T_j)T_m^3 \quad (6)$$

式中  $T_m = (T_i + T_j)/2$ ,  $T_m^2 = (T_i^2 + T_j^2)/2$ , 是算术平均温度。因此,

$$\dot{Q}_{ij} \doteq C_{Rij} A_i F_{ij} (T_i - T_j) \quad (7)$$

式中  $C_{Rij} = 0.04 C_0 \varepsilon_i \varepsilon_j (T_m/100)^3$

任意放置在退火炉载物室内的热电偶接点, 在传热平衡时, 它从各壁面接受的热量和由其本身表面辐射出去的热量应相等, 即热电偶表面的辐射热流量

$$Q_0 = \sum_{j=1}^n \dot{Q}_{0j} = \sum_{j=1}^n C_{R0j} A_0 F_{0j} (T_0 - T_j) = 0 \quad (8)$$

式中  $n$  表示壁面数, 并假定同一壁面上各点温度相同。由于各壁面材料相同, 且在平衡时, 各壁面与热电偶之间的算术平均温度相差不大, 因而,  $C_{R01} \doteq C_{R02} \doteq \dots \doteq C_{R0n}$ 。这样, 式 (8) 可改写为:

$$\sum_{j=1}^n F_{0j} (T_0 - T_j) = 0 \quad (9)$$

根据角系数的加和原则,  $\sum_{j=1}^n F_{ij} = 1$ , 代入 (9) 式, 得到:

$$T_0 = \sum_{j=1}^n F_{0j} T_j \quad (10)$$

式 (10) 指出了载物室内各点温度与各壁面温度的函数关系, 即热电偶接点处的温度取决于热电偶所在的位置和载物室的几何形状及各壁面的温度。同时, 由于推导过程中热电偶接点放置的任意性, 我们得到了一个重要的结论: 退火炉载物室内温度完全均匀的必要条件是载物室各壁面温度相同。

#### 四、角系数

式 (10) 中的角系数是与载物室形状有关的辐射形状因数。根据角系数的等值性, 一切物体, 不管其与微面积圆  $dA$  的距离是有多远, 也不管其形状方位如何, 只要从  $dA$  看这些物体的轮廓时构成同一立体角, 则  $dA$  对这些物体的角系数是相同的。即有

$$T_0 = \sum_{j=1}^n F_{0j} T_j = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^n W_{0j} T_j = \sum_{j=1}^n S_j T_j \quad (11)$$

式中  $W_{0j}$  是热电偶接点对于面的立体角,  $4\pi$  是全部空间的立体角。  $S_j = W_{0j}/4\pi$ 。

圆筒形载物室共有三个壁面, 根据角系数的加和性, 只要求出任意两个  $S_j$  之后, 第三个  $S_j$  可迅速得到。因此, 对圆筒形载物室, 主要是求热电偶接点对上、下底面的角系数。

### 1. 中心轴上各点对底面的角系数

参照图 2, 热电偶接点对半径为  $R$  的底面的立体角分数  $S_j$  是:

$$S_j = \frac{2\pi r_j(r_j - l_j)}{4\pi r_j^2} = \frac{1}{2} (1 - l_j/r_j) = \frac{1}{2} (1 - 1/\sqrt{1 + m_j^2}) \quad (12)$$

式中  $l_j/r_j = 1/\sec\theta_j = 1/\sqrt{1 + (R/l_j)^2}$

即  $m_j = R/l_j$

### 2. 非中心轴上各点对底面的角系数

对于其它偏离中心轴的各点, 可利用球面三角的知识得到  $S_j$  的近似值。如图 3 所示, 以点  $O_j$  对底面作垂线交于  $O'$  点; 以  $O'$  为中心, 以平行于底面的某线作射线, 旋转  $360^\circ$ , 则可以得到若干由射线和底面圆周线相交而成的扇形面, 例图中的  $A'O'B'$ 。  $O_j$  点对底面的立体角就是该点对这些小扇形面的立体角之和。

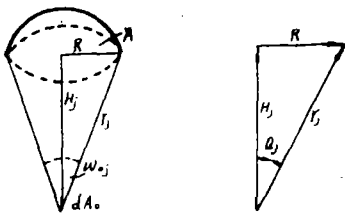


图 2 求  $S_j$  用参考图

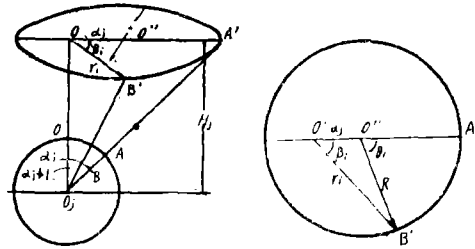


图 3  $S_j$  求用参考图

当  $\beta_i$  足够小时,  $\widehat{A'B'}$  可以近似地看作一条直线, 扇形面  $A'O'B'$  在单位球面上的投影是一个近似球面三角形。由球面三角学可知, 球面角  $E_i$  就是球心对球面三角形  $AOB$  的立体角<sup>[4]</sup>。

$$\operatorname{tg} \frac{E_i}{2} = \operatorname{tg} \frac{W_i}{2} = \frac{\sin \alpha_i / 2 \sin \frac{\alpha_{i+1}}{2} \sin (\beta_{i+1} - \beta_i)}{\cos \frac{\alpha_i}{2} \cos \frac{\alpha_{i+1}}{2} + \sin \frac{\alpha_i}{2} \sin \frac{\alpha_{i+1}}{2} \cos (\beta_{i+1} - \beta_i)} \quad (13)$$

式中  $\alpha_i, \alpha_{i+1}$  是球面三角形的边  $\widehat{OA}$ ,  $\widehat{OB}$ ,  $\angle \beta = \beta_{i+1} - \beta_i$  是二个边的夹角。由图 4,

$$\alpha_i = \operatorname{tg}^{-1}(\sqrt{R^2 + a_j^2 + 2Ra_j \cos Q_i} / l_j) \quad (14)$$

$$\beta_i = \cos^{-1} \left( \frac{a_j^2 + Ra_j \cos Q_i}{a_j \sqrt{R^2 + a_j^2 + 2Ra_j \cos Q_i}} \right) \quad (15)$$

$\beta_i$  的取值, 或者说  $Q_i$  的取值越小, 得到的  $W_i$  值越接近于真实值。

将整个底面分成  $2N$  个扇形面, 则有

$$W_{0j} = 2 \sum_{i=1}^{N-1} W_i \quad (16)$$

$$S_j = W_{0j} / 4\pi \quad (17)$$

## 五、实验结果与讨论

### 1. 实验结果

对载物室内的温度分布测定实验证实了上述推导结果。实验是在空炉状态下进行的。载物室的结构与测试热电偶的分布如图4所示。在恒温 and 恒速冷却二种情况下，测试了各点温度，并利用式(10)、(12)分别计算了中心热电偶接点处的温度。测试数据与计算结果列于表2。从表中可以看出，计算数据与实测结果相差甚小；这说明在光学玻璃的退火过程中，辐射传热方式在热量运输过程中占主导地位。计算温度略高于实测温度，说明传导与对流传热也起一定的作用。

表 2 测试温度与计算数据比较

实验条件	恒 温	恒 温	恒 温	降温5(℃/h)	降温(5℃/h)	降温(5℃/h)
$T_0$ 测定(℃)	644.4	540.53	379.46	638.1	592.5	571.7
$T_0$ 计算(℃)	644.5	540.85	379.14	638.4	592.84	571.81
误差(℃)	+0.1	+0.32	-0.32	+0.3	+0.34	+0.1

载物室内径向温度分布状态对大块光学玻璃毛坯的精密退火质量有着重要的影响。图5是由式(17)根据图4的结构计算的载物室中心面上热电偶接点对上、下底面的辐射角系数沿半径方向的变化情况。图中曲线表明，随着接点逐渐移向侧面壁，上、下底面对热电偶接点的辐射作用逐渐减小，反之，侧面壁的作用逐渐增大。

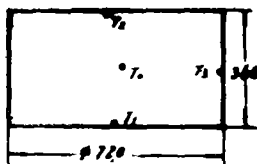


图4 载物室结构与测试点

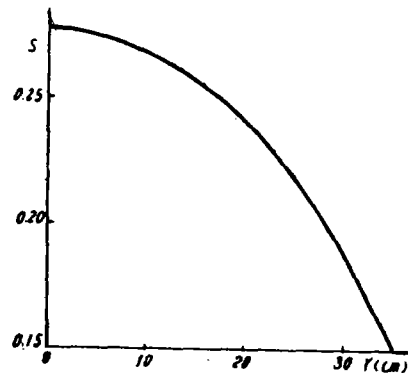


图5 辐射角系数与半径的函数关系

从图 5 的曲线形式及定点数据分析, 我们发现, 各点的角系数  $F_{0j}(r)$  与半径  $r$  的变化有如下的近似关系, 即

$$F_{0j}(r) \approx \alpha_{0j} + \beta_{0j}r^2 \tag{18}$$

式中  $\alpha_{0j}$  为  $r=0$  时的角系数,  $\beta_{0j}$  为常数。代入式 (10), 得到

$$T_0(r) \approx \sum_{j=1}^n (\alpha_{0j} + \beta_{0j}r^2) T_{0j} = \sum_{j=1}^n \alpha_{0j} T_{0j} + r^2 \sum_{j=1}^n \beta_{0j} T_{0j} \tag{19}$$

这样, 室内径向温度分布决定于载物室的结构和各壁面温度, 并且沿半径方向近似地呈二阶抛物线型分布。后一结果与文献<sup>[6]</sup>所做的假设是一致的。

## 2. 讨论

通过上述推导及实验, 证实了辐射传热方式在光学玻璃退火炉中的热量输运过程中占主导地位。提高炉温均匀性, 主要是通过调整各壁面的温度来实现。这一结果对于退火炉结构的改进和退火时毛坯的放置方法的选择具有重要的意义。

根据公式(10)与(19), 我们可以按照玻璃毛坯的放置方法和玻璃的退火要求, 调整各壁面的温度, 改变玻璃毛坯内部的热流方向, 从而获得高质量的退火毛坯。

本文是在空炉条件下进行推导与实验的。当载物室内堆放玻璃毛坯时, 由于空间结构的变化, 室内温度分布将会产生变化, 尤其是退火时玻璃内部热量的释放, 也会产生影响。尽管如此, 我们认为, 上述结果对于实际退火过程仍具有一定的意义。

本文是在导师王大珩研究员和王世焯研究员的指导下完成的, 在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 钱滨江等; 简明传热手册, 高等教育出版社, 1983, 388.
- [2] 钱滨江等; 简明传热手册, 高等教育出版社, 1983, 147.
- [3] 德国工程师协会工艺与化学协会; 传热手册 (中文版), 化工出版社, 1983, 421.
- [4] 张楚宾; 球面三角学, 人民教育出版社, 1978, 57.
- [5] E.Э. Данюшевский; 光学玻璃线性退火原理 (中译本) 国防工业出版社, 1965, 28.

## An Investigation of Temperature Uniformity in Fine Annealing Leer for Optical Glasses

Zhao Wenxing    Jin Haiyu

### Abstract

In this paper a consideration about the transfer way of heat in the chamber of optical glass fine annealing leer is introduced. The relation between the temperature (for empty leer) at any point and the temperature of chamber walls are discussed.