

光学玻璃的热光性质

黄国松 陈世正

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

为了减小环境温度变化对光学元件的热干扰,本文首先引进了描述光学玻璃在一定温度场中光学性质变化的三个热光系数 W 、 P 、 Q ,给出了这三个系数的测量方法和部分光学玻璃的测试结果,最后讨论了减小光学元件的热干扰的可能性。

一、光学玻璃的热光系数

为了建立一个在任何温度条件下都能高质量传递光信息的光学系统,必须排除光学元件对光束波面的热干扰(或叫热象差)。长期以来,人们比较注意光学玻璃的折射率热变化、热膨胀和应力双折射对光学元件质量的影响,我们的研究表明,光学玻璃的热应变引起的各向同性的折射率变化对光学元件的热干扰是不可忽略的,在许多光学玻璃中,这种热干扰相当严重,而且热应变干扰与折射率热变化干扰的弛豫时间也相同^[1]。

在一定温度场中,光学玻璃的折射率发生变化:

$$\Delta n = \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_{\sigma} \Delta T + \left(\frac{\partial n}{\partial \sigma} \right)_{T} \Delta \sigma. \quad (1)$$

第一项描述了玻璃无应变时折射率变化,一般定义:

$$\beta = \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_{\sigma}$$

为玻璃的折射率温度系数。第二项描述了在一定温度分布下玻璃热应力产生的折射率变化。在均匀温度场中,玻璃不产生应变,光通过光学元件时,光速波面曲率半径将随温度的变化而改变。用热光系数

$$W = \beta + (n-1)\alpha \quad (2)$$

可以描述玻璃的这种性质,其中 n 为玻璃的折射率, α 为热膨胀系数。利用玻璃的这种性质可估算温度变化时光通过光学元件后其相位角的变化。

在非均匀温度场(如激光器)中,光学元件(如激光棒)内部温差产生的热应变使其光学性质发生了变化,对一定几何形状的元素,用应力热光系数 P 和热应力双折射系数 Q 可描述玻璃的这种性质^[1, 2]:

$$P = -\frac{\alpha E}{2(1-\nu)}(C_1 + 3C_2), \quad (3)$$

$$Q = \frac{\alpha E}{2(1-\nu)}(C_1 - C_2), \quad (4)$$

其中 E 为玻璃的弹性系数, ν 为泊松比, C_1 和 C_2 为应力光学系数。 P 描述了在一定温度分布下玻璃热应力引起的各向同性折射率变化, Q 描述了玻璃热应力引起的双折射效应。

热光系数 W 与玻璃组分有密切关系, 系数 P 、 Q 与玻璃成分之间的关系尚未进行系统的研究, 但可利用玻璃热膨胀系数、弹性系数和应力光学系数的研究结果, 借助于公式(3)、(4)进行估算, 而寻找一种直接测量这些系数的方法也是有意义的。

二、玻璃热光系数的测量

利用马赫-陈德尔干涉仪测量三个热光系数, 并同时可测量玻璃的热膨胀系数和折射率温度系数。图 1 是测量原理图。

1. α 、 β 、 W 测量

考虑干涉仪一臂的光程:

$$S_1 = (L-l) + nl,$$

其中 L 为干涉仪臂长, l 为玻璃样品长度。均匀升温 ΔT 后光程的变化:

$$m_1 \lambda = Wl \Delta T。$$

用干涉条纹记数器记录温升 ΔT 后条纹变化数 m_1 可得到热光系数 W :

$$W = m_1 \lambda / l \Delta T。 \quad (5)$$

考虑玻璃棒两通光表面反射形成的棒端面干涉仪的光程:

$$S_2 = 2nl。$$

温升后光程变化

$$m_2 \lambda = 2l(W + \alpha) \Delta T。 \quad (6)$$

由(5)、(6)、(2)式得:

$$\alpha = \frac{m_2 - 2m_1}{2l \cdot \Delta T} \lambda,$$

$$\beta = \left[\frac{m_2}{2} + n \left(m_1 - \frac{m_2}{2} \right) \right] \lambda / l \cdot \Delta T。$$

同时记录温升 ΔT 后两种干涉仪条纹变化数 m_1 和 m_2 , 则可测出 α 、 β 两系数。

2. P 、 Q 的测量

在平板玻璃中建立温度场可测量 P 、 Q ^[3], 但这种方法并不简便且误差极大。用空心圆柱棒建立轴对称恒定温度场测量 P 、 Q 较为方便^[2]。设空心圆柱内外表面曲率半径分别为 a 、 b , 长度为 l , 内外表面温度分别为 T_a 和 T_b , 由热弹性力学求得热应力^[4]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rr}(r) &= \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} \left[\left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \bar{T} + T(r) \right], \\ \sigma_{\theta\theta}(r) &= \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} \left[\left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \bar{T} + \bar{T}(r) - 2T(r) \right], \\ \sigma_{zz}(r) &= \frac{\alpha E}{1-\nu} [\bar{T} - T(r)], \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

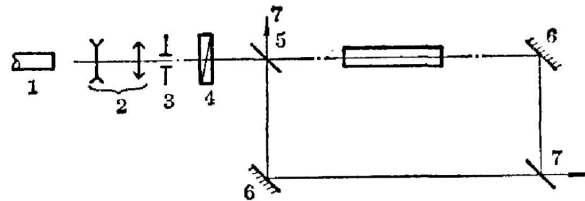


图 1 热光系数测量装置

1—He-Ne 激光器; 2—扩束望远镜; 3—光阑;
4—偏光片; 5—分光镜; 6—全反射镜;
7—干涉条纹记录器

Fig. 1 Apparatus for measuring thermo-optic coefficients

1—He-Ne laser; 2—Beam expanding telescope;
3—Stop; 4—Polarizer; 5—Beam splitter; 6—Total reflection mirror; 7—Interferometric fringe recorder

其中: $\bar{T} = \frac{2}{b^2 - a^2} \int_a^b rT(r)dr$, $\bar{T}(r) = \frac{2}{r^2} \int_a^r rT(r)dr$.

由光折射定律:

$$\left. \begin{aligned} n_r V_r &= n_\theta V_\theta = n_0 V_0, \\ n_r - n_0 &\simeq \frac{n_0}{V_0} (V_0 V_r) \\ n_\theta - n_0 &\simeq \frac{n_0}{V_0} (V_0 - V_\theta), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中 n_r 、 n_θ 分别为径向和切向偏振光的折射率; V_0 、 V_r 、 V_θ 分别为无应变时光束和径向、切向偏振光传播速度。利用 *Neuman* 公式^[5]

$$\left. \begin{aligned} V_r - V_0 &= q\varepsilon_{rr} + P(\varepsilon_{\theta\theta} + \varepsilon_{zz}), \\ V_\theta - V_0 &= q\varepsilon_{\theta\theta} + P(\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{zz}), \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

和广义胡克定律:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= E^{-1}[\sigma_{rr} - \nu(\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz})], \\ \varepsilon_{\theta\theta} &= E^{-1}[\sigma_{\theta\theta} - \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{zz})], \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中 ε_{rr} 、 $\varepsilon_{\theta\theta}$ 、 ε_{zz} 为玻璃棒的三个主应变, p 、 q 为 *Neuman* 光学系数。由 (8)~(10) 可得到热应力引起的折射率变化:

$$\left. \begin{aligned} \delta n_r &= C_1 \sigma_{rr} + C_2 (\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz}), \\ \delta n_\theta &= C_1 \sigma_{\theta\theta} + C_2 (\sigma_{rr} + \sigma_{zz}), \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$C_1 = \frac{n_0}{EV_0} (2\nu p - q), \quad C_2 = \frac{n_0}{EV_0} (\nu q + \nu_p - p)$$

为应力光学系数。由 (1)、(7)、(11) 得圆柱内外表面上折射率变化:

$$\Delta n_{r,\theta}(a) = \beta(T_a - T_0) + (P \pm Q)(T_\theta - \bar{T}), \quad \Delta n_{r,\theta}(b) = \beta(T_b - T_0) + (P \pm Q)(T_b - \bar{T}).$$

因此内外表面之间径向偏振光和切向偏振光的光程差分别为:

$$\Delta S_r = m_r \lambda = (\beta + P + Q)l \Delta T_{ab}, \quad \Delta S_\theta = m_\theta \lambda = (\beta + P - Q)l \Delta T_{ab}.$$

分别计数径向偏光和切向偏光在圆柱内外表面之间的干涉条纹 m_r 、 m_θ , 并利用 β 的测量结果可确定 P 、 Q :

$$P = \frac{m_r + m_\theta}{2d \cdot \Delta T_{ab}} \lambda - \left[\frac{m_2}{2} + n \left(m_1 - \frac{m_2}{2} \right) \right] \lambda / l \cdot \Delta T, \quad Q = \frac{m_r - m_\theta}{2d \Delta T_{ab}} \lambda,$$

其中 ΔT_{ab} 为圆柱内外表面温差。表 1 列出了部分光学玻璃三个热光系数的测量结果和利用 (3)、(4) 式 P 、 Q 的计算结果, 表 2 列出了计算 P 、 Q 的物理常数。在误差范围内, 测量与计算结果相符。

三、讨 论

(1) 我们描述的测量方法, 可以测量光学玻璃的热膨胀系数, 折射率温度系数和三个热光系数。利用干涉方法测量得到的低温热膨胀系数有很高的精度和准确度。由于干涉仪的灵敏度很高, 因此本方法也可作微膨胀光学玻璃的热膨胀系数的测量。

(2) 光学玻璃的热光系数 W 与玻璃组分之间有密切关系, 它的值可以在很大的范围内进行调整, 因而提供了制造热光系数 W 很小的光学玻璃以减小光学元件热象差的可能性。

表 1 部分光学玻璃的热光系数
Table 1 Thermo-optic coefficient of some optical glasses

光学玻璃	$W \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$P \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$		$Q \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	
		测 量	计 算	测 量	计 算
K ₉	5.2	4.0		1.0	
BaK1	4.6	4.3		1.0	
QK2	6.0	2.0		0.5	
ZF6	11.0	9.7		0.4	
磷酸盐玻璃	0.3~1.0	5~7		0.4~0.8	
激光玻璃 N ₀₁	4.0	5.0	5.4	0.8	0.9
N ₀₂	4.6	4.8	5.4	1.0	1.2
N ₀₃	5.8	4.1	4.9	0.9	1.0
N ₀₄	6.8	2.7	2.9	0.8	0.7
N ₀₆	4.3	4.9	5.2	1.0	1.1
N ₀₇	4.1	4.0	4.7	1.1	1.3
N ₀₈	2.5	5.5	5.7	1.0	1.3
N ₀₉	4.6	4.2	4.8	1.0	1.0
N ₁₀	5.4	4.6	5.0	1.0	1.0
N ₂₂	0.6	6.1	5.5	0.5	0.8
相对误差	±5%	±5%	±20%	±15%	±15%

表 2 计算 P、Q 的物理常数
Table 2 Physical constants for measuring P and Q

玻 璃	α ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	E (10^6 kg/cm^2)	ν	$-C_1$ (10^{-6} kg/cm^2)	$-C_2$ (10 kg/cm^3)
N ₀₁	9.0	6.8	0.220	0.15	0.38
N ₀₂	8.3	7.2	0.226	0.12	0.42
N ₀₃	8.0	7.6	0.216	0.11	0.36
N ₀₄	5.2	7.3	0.220	0.08	0.37
N ₀₆	8.7	8.1	0.219	0.10	0.35
N ₀₇	8.9	6.5	0.210	0.11	0.40
N ₀₈	10.7	6.5	0.239	0.09	0.33
N ₀₉	8.7	6.9	0.219	0.11	0.37
N ₁₀	8.9	7.5	0.220	0.09	0.35
N ₂₂	10.6	5.4	0.276	0.14	0.32

由于 W 值可正可负,因而也提供了采用不同 W 值玻璃制备成热干扰光学系统的可能性。

(3) 应力热光系数和热应力双折射系数与玻璃组分之间的关系尚未研究,从表 1 给出的数据可看出它与玻璃组分之间的关系不如 W 密切,系数 P 一般总是正值,制备 P 值很小的玻璃有一定困难,但是由于 P 对光束波面的干扰是各向同性的,而 W 对光束波面的干扰也是各向同性的,且可为负值,因此可以制造 $W+P$ 很小的光学玻璃以克服光学元件的热象差。系数 Q 值较小,它描述了玻璃热应变对不同偏振状态的光束波面的不同影响,且使各向同性的光学玻璃表现为各向异性的单轴晶体,这种双折射效应一般难于补偿,因此寻求 Q 值很小的光学玻璃是减小光学元件热致双折射的重要途径。微晶玻璃的 Q 值很小,因为它的膨胀系数接近于零,重铅玻璃的 Q 值也较小,因为它的应力光学系数 C_1 和 C_2 相当接近,对 Pockels 玻璃, Q 值为零,不产生热应力双折射。

随着光学仪器对光学玻璃要求的不断提高,开展光学玻璃热光性质的研究是有意义的。

参 考 文 献

- [1] 激光玻璃检验组;物理学报,1978, **27**, No. 1 (Jan), 22.
- [2] Ю. А. Апаньев и др.; ЖПС, 1970, **12**, №. 4, 668.
- [3] А. А. Маг;ОМП, 1971, **38**, No. 9, 42.
- [4] B. A. Baley et. al; «Theory of Thermal Stresses» (New York, John Wiley, 1967).
- [5] F. E. Neuman; Ann. Phys., 1841, **54**, 499.

Thermo-optic properties of optical glass

HUANG GUOSONG AND CHEN SHIZHENG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 20 May 1981)

Abstract

In order to minimize the influence of environmental temperature on optical components, thermo-optics coefficients W , P and Q that describe the variation of optical properties of optical glasses at a certain temperature are introduced. The methods of measuring some optical glasses in respect of their coefficients are described and the results are given. This paper ends with a discussion on the possibility of reducing the influence of thermal disturbance on optical components.