

# 熔石英玻璃材料测试用折射液配制技术研究

胡明鹏 吴时彬 龚秀明 杨 伟 景洪伟

(中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘要** 为了对熔石英光学玻璃应力及光学均匀性进行测试, 提出一种测试用高精度折射液配制方法。根据分子结构定量关系及组分的摩尔折光度定量可加的原理, 推导了折射液配比公式并制定了折射液的配比工艺; 分析了折射液的折射率随测试温度和测试波长不同的变化规律, 并进行了实验验证; 最后分析了折射液精度对测试结果的影响。通过上述方法在实验室环境配制出与熔石英折射率匹配精度为  $\pm 2 \times 10^{-5}$  的折射液; 通过对粗磨光学玻璃透射比实验表明, 采用该方法配制的折射液对粗磨光学玻璃在 450~700 nm 光谱范围内透射比从低于 20% 提高到 97% 以上; 利用该方法和选用的成分配制的折射液具有毒性小、挥发性小、无色无味、长时间保存折射率保持性好的优点, 可以很好地用于熔石英光学玻璃材料特性测试。

**关键词** 测量; 折射液; 光学均匀性; 应力双折射; 熔石英

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0212004

## Research on Refractive Index Fluid for the Test of Fused Silica

Hu Mingpeng Wu Shibin Gong Xiuming Yang Wei Jing Hongwei

(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

**Abstract** In order to measure the stress-induced birefringence and optical homogeneity of fused silica, a method of proportioning refractive index fluid is put forward. Firstly, according to the characteristic of the groups in molecules and molar refraction additivity of the two solutions, formulas for the refractivity of binary solution are analyzed and the technique is given. Secondly, dependence of the refractive index of fluid on different temperatures and wavelengths, is analyzed and verified experimentally. At last, the influence of refractive index fluid precision on test result is analyzed. According to the method, the match precision of the fluid and fused silica can be  $\pm 2 \times 10^{-5}$ ; Through the experiment of rough-ground glass, the fluid can improve the transmission from below 20% to above 97% at the wavelength between 450 nm and 700 nm. The fluid which is prepared by the method and the composition we choose, has the characters of low toxicity, no color, no smell, nonvolatile, and its refractivity can remain stable for long. It can be well used for the measurement of the stress induced birefringence and optical homogeneity.

**Key words** measurement; refractive-index fluid; optical homogeneity; stress-induced birefringence; fused silica

**OCIS codes** 120.4800; 120.5475; 160.2750

## 1 引 言

光学玻璃的应力、光学均匀性参数是曝光系统参数设计的重要依据<sup>[1]</sup>。为了达到高精度的像质, 对玻璃材料的应力和光学均匀性的测试精度也提出了很高的要求, 如对应力测试精度要求可达 0.1 nm/cm, 而对光学均匀性测试精度可达  $0.2 \times 10^{-6}$ 。在光学玻璃应力、均匀性等参数测试过程中需要配制高精度折射率液, 折射率液配制的精度直接影响测量的精度,

其原因如下:

1) 在对玻璃应力测试时, 若测试对象为毛坯玻璃, 由于光的散射导致玻璃透光性能较差, 需要在其表面涂抹与其折射率相匹配的折射液以增大其透光性, 匹配程度越高, 透光性也就越好<sup>[2]</sup>; 若对加工后的非平板玻璃进行应力测试, 测试方法之一是将浸入与其折射率匹配的折射液中。光的入射方向与玻璃表面垂直, 折射率匹配程度越高, 玻璃散射、折

收稿日期: 2011-08-09; 收到修改稿日期: 2011-09-14

基金项目: 国家重大专项(2009ZX02204-003)资助课题。

作者简介: 胡明鹏(1982—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事光学检测方面的研究。E-mail: humingpeng2010@163.com

射等对测试的影响也就越小。

2) 采用平面干涉测量法对玻璃光学均匀性测试时,用平面干涉仪与标准平面镜的光程差与放入样品后的光程差的差值来计算样品的光学均匀性。折射液与光学玻璃折射率的差异引入的光程差成为影响最终测试结果的误差之一,对折射率的要求<sup>[3,4]</sup>不大于 $\pm 1 \times 10^{-4}$ 。

刘万余等<sup>[5]</sup>提出了一套折光率为 1.402~2.004 折射率浸油的配制方法,在低折射率 1.450~1.630 采用的化学试剂为高沸点煤油蒸馏物与  $\alpha$  氯代萘。然而  $\alpha$  氯代萘具有较大的毒性和挥发性,而高沸点煤油蒸馏物的制作工艺较复杂,成本也较高。许国珍等<sup>[6]</sup>提出一种环保化的用于玻璃光学均匀性和应力测试用的折射液,其折射率范围(1.471~1.541)较熔石英玻璃(1.458~1.459)偏大;丁香油、大豆油都带有一定的颜色(浅黄色),经测试在 450 nm 附近的光谱透射比较低:66.4%(20 mm 厚度,25 °C)。该方法也不能用于高精度熔石英玻璃材料特性测试。

根据用于曝光系统用熔石英玻璃材料应力和均匀性高精度测试的特点,本文提出一种高精度折射液的配制方法,并对折射液各种物理化学性质进行了详细的实验,最后对测试精度的影响给出分析。采用该方法配制的折射液通过对光学玻璃应力与均匀性测试实验验证,效果良好。

## 2 折射液配比原理及公式

由摩尔折光度具有近似可加和性即存在定量关系原理进行二元有机液折射率配置公式的推导。由物质的折射率与比重及相对分子质量能计算出物质的分子折光度,液体的折射率与比重和相对分子质量之间的关系可用洛伦茨-洛伦兹(Lorenz-Lorentz)公式表示为<sup>[7]</sup>

$$R_M = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \frac{M}{\rho}, \quad (1)$$

式中  $R_M$  为分子摩尔折光度; $M$  为分子量, $\rho$  为同温度时物质密度, $n$  为物质的折射率。

实际操作时不必在意二元混合液每种成分分子结构的具体形式,可以将各自的摩尔折光度看成常数  $R_{M1}$ ,  $R_{M2}$ ,  $R_{M1}$  是单位物质的量的组元 1 的所有分子对折射率的贡献,同样  $R_{M2}$  是单位物质的量的组元 2 的所有分子对折射率的贡献。根据摩尔折光度的加和性,溶液的摩尔折光度  $R_M$  等于组元 1 和组元 2 摩尔折光度之和,可表示为

$$R_M = X_1 R_{M1} + X_2 R_{M2}, \quad (2)$$

式中  $X_1$ ,  $X_2$  分别为组元 1 和组元 2 的物质的质量分数。

如果认为混合液混合前后体积变化不大,混合液折射率可以表达为

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} V = \frac{n_1^2 - 1}{n_1^2 + 2} V_1 + \frac{n_2^2 - 1}{n_2^2 + 2} V_2, \quad (3)$$

式中  $V_1$  为组元 1 的体积; $V_2$  为组元 2 的体积; $V$  为混合液总体积, $V = V_1 + V_2$ ;  $n_1$  为所需组元 1 的折射率; $n_2$  为所需组元 2 的折射率; $n$  为两种液体混合后折射率。

## 3 折射液成分的选取与精确配制

一般选用二元有机溶液进行折射液配制,对有机液的要求如下<sup>[5]</sup>:1) 配制化学试剂挥发点应高,而且试剂挥发点应相近;2) 配制化学试剂之间不起化学变化;3) 配制化学试剂应具有相近的或连续变化的光学性质;4) 无色或浅色;5) 无毒或低毒;6) 无刺激或低刺激气味;7) 低粘稠度;8) 常温下液态;9) 对玻璃和膜系<sup>[8]</sup>腐蚀性小。

经过大量有机试剂的筛选,最终确立下面两种物质作为折射液配置成分,其物理化学性质如表 1 所示。

表 1 折射液成分

Table 1 Composition of refractive-index fluid

Property	Paraffin oil	Isopropyl myristate
Refractive index	1.470	1.430
Appearance	Colorless	Colorless
Odor	None	None
State of room temperature	Liquid	Liquid
Volatility	Low	Low
Toxicity	None	None
Viscosity	Low	Low

实验室内采用图 1 中流程方式进行折射率的配置,即首先对各组元进行折射率测试。然后根据推导(3)式进行体积比例的换算,最后经过组分体积的精密调整从而使折射液的折射率达到所要求的精度。

值得注意的是采用配比公式对折射液进行配置过程中发现理论计算值与实际测试值之间存在一定的差异。这是由于在公式推导的时候采用了配制前后体积未有变化近似进行推导,使得理论计算值与实测值之间存在一定的差异<sup>[9]</sup>。这种体积差异常用过量体积  $V_E$  表示<sup>[10,11]</sup>:

$$V_E = \frac{X_1 M_1 + X_2 M_2}{\rho} - \left( \frac{X_1 M_1}{\rho_1} + \frac{X_2 M_2}{\rho_2} \right), \quad (4)$$

式中  $X_1, X_2$  为构成溶液的二组分的物质的质量分数； $M_1, M_2$  为构成溶液的二组分的物质的分子量；

$\rho_1, \rho_2, \rho$  为构成溶液的二组分及混合液的密度。

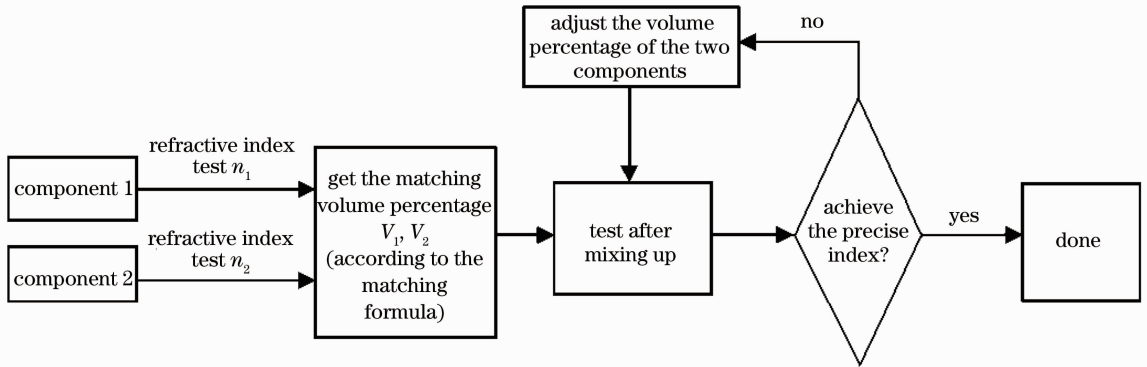


图 1 折射液配置流程

Fig. 1 Flow chart of making up the refractive index fluid

由过量体积  $V_E$  产生的误差必须通过二组分成分体积的精密调整进行修正，最终使折射液与熔石英的折射率相匹配。通过该方式可以配置  $n_D^{20^\circ\text{C}} = 1.4584 \sim 1.4587$  折射液，精度可达  $\pm 2 \times 10^{-5}$ 。

#### 4 折射液配性能分析

对于有机试剂来说，其折射率会随着温度的变化而变化。当温度升高时，折射率会逐渐减小，而温度降低时，其折射率会逐渐增大。因此在光学均匀性和应力测试过程中，需要对测试环境进行一定的控制。

根据查阅的应力测试仪器资料，其测试单色光波长有 193, 589.3, 632.8 nm 等不同波长；而对光学均匀性测试时，其波长为 632.8 nm。有机试剂及其混合液如同玻璃一样，具有一定的色散性。因此需要对其色散度进行分析与测量，以适应不同波段下折射率同玻璃的匹配。

##### 4.1 折射率随温度变化

一般测量温度每增加(减少)1 K，液体有机化

合物的折射率就减少(增加)  $(3.5 \sim 5.5) \times 10^{-4}$ ，所配置折射液折射率随温度增大线性减小。

折射率温度系数是光学晶体的重要参数<sup>[12]</sup>，当熔石英光学玻璃处于不同环境温度下，其折射率也发生线性的变化，其变化数量级为  $10^{-5}$ 。图 2(a) 所示为康宁公司生产的 HPFS 8650 熔石英的温度变化曲线，折射率随温度的变化曲线  $\Delta n / \Delta T = -0.00001006 \text{ K}^{-1}$ 。

以美国 Cargille 公司生产的 50350 型熔石英折射率匹配液为例，其折射率  $n(589.3 \text{ nm}, 25^\circ\text{C}) = 1.4587$ ,  $\Delta n / \Delta T = -0.000386 \text{ K}^{-1} (15^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C})$ ，其曲线如图 2(a) 所示。因其配制温度为  $25^\circ\text{C}$ ，而玻璃测试温度为  $20^\circ\text{C}$ ，所以在该测试温度下与熔石英玻璃折射率比较有一定的偏差。

采用自制折射率液(配制温度为  $20^\circ\text{C}$ ) 在  $3^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$  温度下测试其折射率的变化，如图 2(b) 所示，由曲线可以看出折射率与温度为线性关系，并随温度的增大而减小，用最小二乘法对其进行拟合

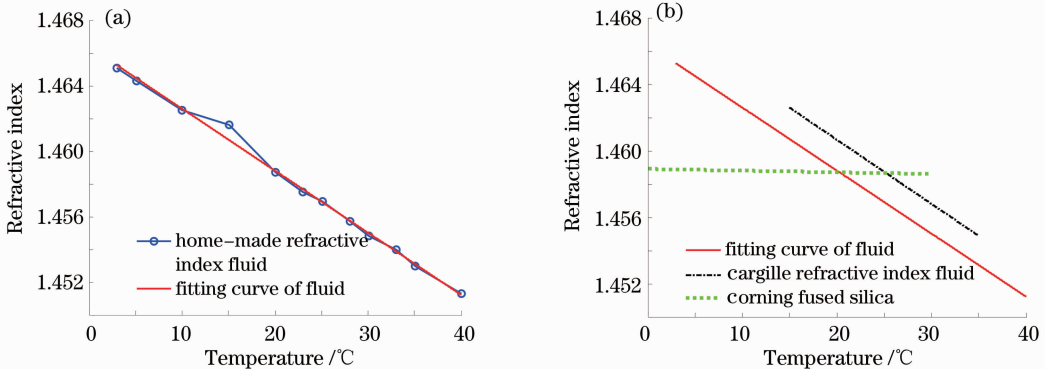


图 2 (a)自制折射液的折射率随温度的变化;(b)自制、进口折射液与玻璃的折射率随温度的变化

Fig. 2 (a) Refractive-index variation of home-made refractive-index fluid with the temperature; (b) variation of refractive index among home-made liquid, cargille liquid and corning fused silica with temperature

得  $\Delta n/\Delta T = -0.000379 \text{ K}^{-1}$ 。

从图 2(a)中可以看出,熔石英与光学玻璃折射率曲线在温度 20 °C 相交,玻璃折射率随温度变化比折射率液小了一个数量级,折射液对温度稳定性要求更高。因此实际在对光学玻璃应力均匀性及光学均匀性测试时,为了使折射液的折射率保持在要求精度范围须保证实验室温度的稳定性。

#### 4.2 折射率随波长变化

光学玻璃由于存在色散,故其折射率随着测试波长的变化而变化,通常这种变化采用经验公式给出<sup>[13]</sup>,且不同型号的玻璃波长与折射率的关系也有微小的不同;同样,折射液也有自身的折射率色散曲线。因光学玻璃材料在进行应力及光学均匀性测试时采用的单色光波长不同,因此须对折射液的色散曲线进行测定。

由 Corning 公司给出的 HPFS 8650 Fused Silica 折射率随波长变化关系(Polynomial equation)可以表示为(5)式,其中各系数取值如表 2 所示。

$$n^2 = A_0 + A_1\lambda^4 + A_2\lambda^2 + A_3\lambda^{-2} + A_4\lambda^{-4} + A_5\lambda^{-6} + A_6\lambda^{-8} + A_7\lambda^{-10} + A_8\lambda^{-12}. \quad (5)$$

表 2 HPFS 8650 公式系数

Table 2 Coefficient of HPFS 8650 formula

$A_0$	2.104025406	$A_4$	$8.435237228 \times 10^{-5}$
$A_1$	$-1.456000330 \times 10^{-4}$	$A_5$	$1.681656789 \times 10^{-6}$
$A_2$	$-9.049135390 \times 10^{-3}$	$A_6$	$-1.675425449 \times 10^{-8}$
$A_3$	$8.801830992 \times 10^{-3}$	$A_7$	$8.326602461 \times 10^{-10}$

折射液由二元有机组分构成,根据摩尔折射度具有近似可加性这一特点对二组分及其混合液在各种波长下的折射率进行计算。Vogel 方法是通过对组成介质的分子进行计算,得到介质摩尔折射率的一种方法,此方法属于基团贡献法<sup>[14,15]</sup>。计算中利用 Vogel 方法得到两类有机试剂分别在 656.3, 589.3, 486.1 nm 波长的折射率。然后计算两种有机液混合后的混合液在三种波长下的折射率值。最后根据 Cauchy 色散公式拟合出折射液的色散曲线,

$$n(\lambda) = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4. \quad (6)$$

利用 Cauchy 公式<sup>[6]</sup>对混合液的折射率进行最小二乘拟合,最终得到混合液折射率随波长变化的色散曲线(图 3,折射液与熔石英玻璃在波长为 589.3 nm 下匹配):

$$n(\lambda) = 1.4423346 + 6971.2408603/\lambda^2 - 4.822483871759131E + 8/\lambda^4. \quad (7)$$

对折射液色散曲线进行测试,色散 Cauchy 公

式为

$$n(\lambda) = 1.44672993 + 4041.44930104/\lambda^2 + 38688220.78168749/\lambda^4. \quad (8)$$

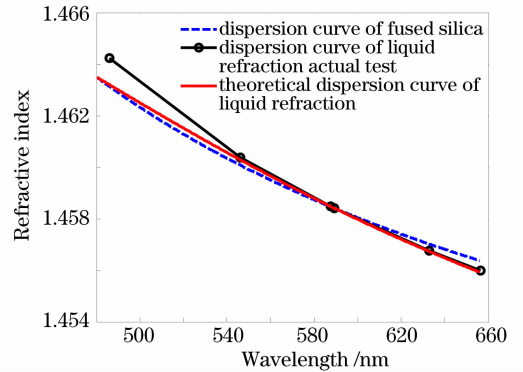


图 3 熔石英与折射液理论、实测色散曲线

Fig. 3 Dispersion curve of fused silica, theoretical and actual test of the liquid

在精确配置折射液之前,需明确折射液与熔石英在何种波长下的折射率的匹配关系,并提供熔石英波长与折射率关系曲线。

## 5 折射液精度与测试精度分析

### 5.1 折射液精度对光学均匀性测试的影响

平面干涉测量法是用平面干涉仪与标准平面镜的光程差与放入样品后的光程差的差值来计算样品的光学均匀性<sup>[16~18]</sup>。检测光路如图 4 所示。

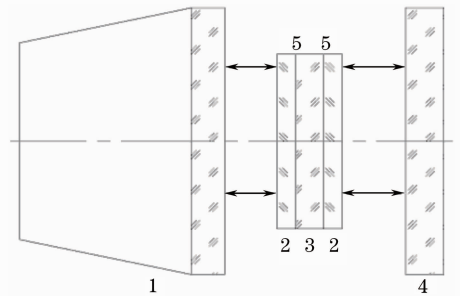


图 4 平面干涉测量原理图

Fig. 4 Sketch of oil-on-flat method

其中,1 干涉仪;2 贴置板;3 被测样品;4 标准反射镜;贴置板与被测样品间为 5 折射率液。光学均匀性计算为

$$\Delta n = \frac{\delta_m - \delta_c}{h}, \quad (9)$$

式中  $\Delta n$  样品折射率微差; $\delta_m$  放入样品后的光程差; $\delta_c$  贴置板与标准平面镜光程差; $h$  样品厚度。

若贴置板与被测玻璃间最大间隙为  $\Delta h_{\max}$ ,那么由于折射液折射率与被测玻璃折射率不匹配造成的光程差最大为  $(n_{\text{liquid}} - n_{\text{glass}})\Delta h_{\max}$ 。由此引入的误差

为 $(n_{\text{liquid}} - n_{\text{glass}}) \Delta h_{\text{max}}/h$ ，可以以此误差公式计算误差的分配。

### 5.2 折射液精度对应力测试的影响

对玻璃应力测试采用的应力仪，其对光线偏转要求：1) 光束角度对准误差： $90^\circ \pm 0.2^\circ$ ；2) 光束位置

对准误差： $\pm 0.1 \text{ mm}$ 。且光学镜头距离探头 100 mm。

选取曝光系统三种典型的带有曲率半径的加工后的光学玻璃作为分析对象如图 5 所示。其在折射液中浸前后的光路图如图 6 所示。

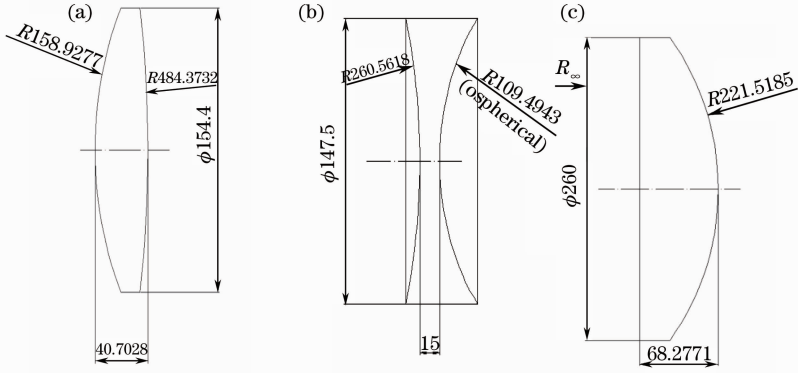


图 5 各透镜几何参数。(a)透镜 1 尺寸；(b)透镜 2 尺寸；(c)透镜 3 尺寸

Fig. 5 Dimension of various lenses. (a) Dimension of lens 1; (b) dimension of lens 2; (c) dimension of lens 3

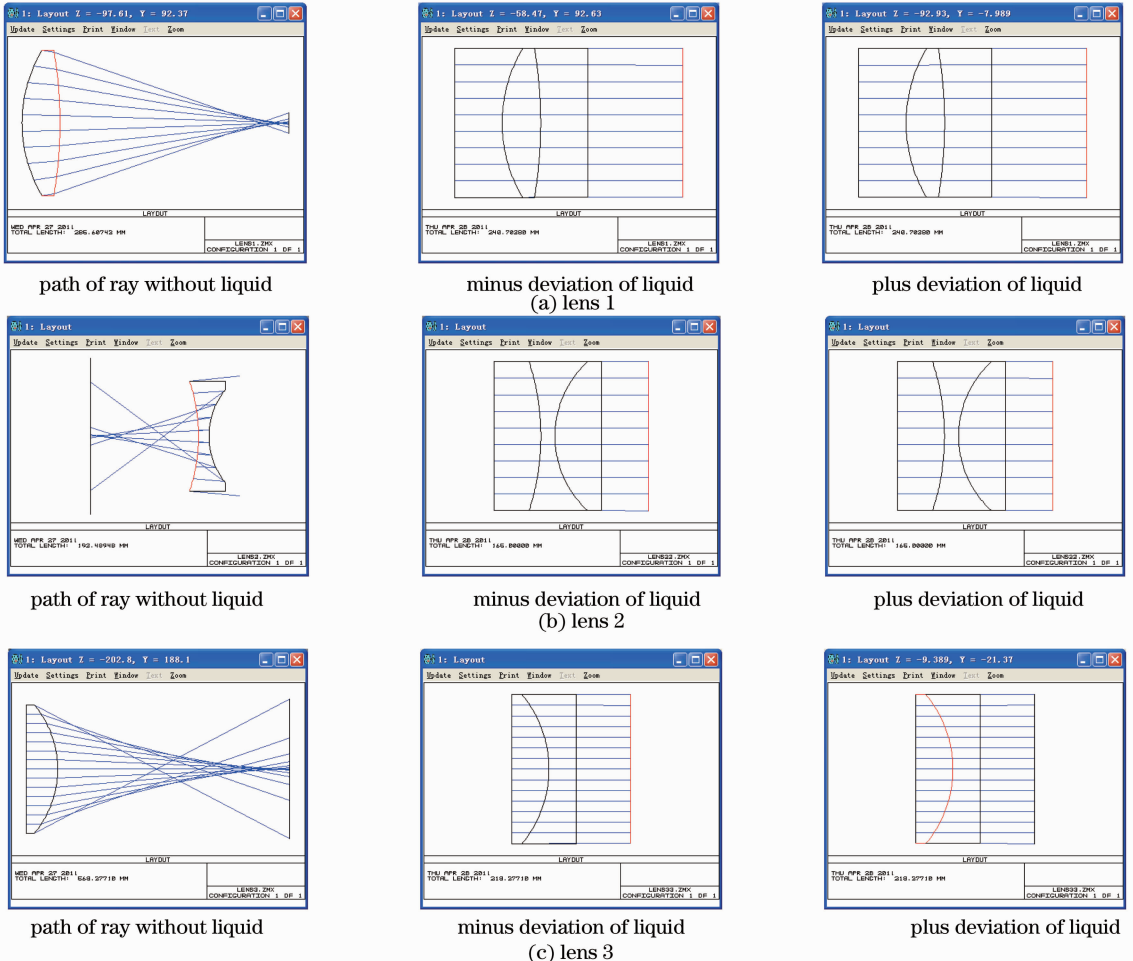


图 6 折射液浸没前后光路

Fig. 6 Path of ray when with or without the liquid



按照折射液折射率与光学玻璃折射率上下偏差  $1 \times 10^{-3}$ , 追踪透镜最边缘曲线, 经过分析可以得出光线最大位移量为 0.0974 mm, 光线偏折最大角度  $0.0588^\circ$ , 满足仪器使用要求。

### 5.3 折射液精度对玻璃透射率的影响

对粗磨后的熔石英玻璃、涂抹蒸馏水及涂抹自制

折射液玻璃进行光谱透射比测试(波长 450 ~ 700 nm), 如图 7 所示。粗磨后的毛坯玻璃光谱透射比在范围的透射比小于 20%; 涂水之后透射比为 50% ~ 65%; 涂抹自制的折射液透射比超过 97%, 满足仪器测试时要求的透射比精度。

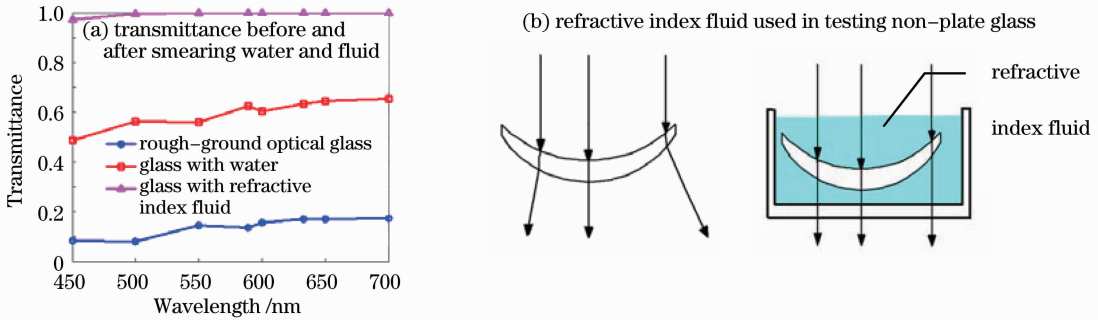


图 7 折射液用于应力双折射的测试

Fig. 7 Refractive index fluid is used in stress-induced birefringence test

## 6 结 论

根据熔石英应力与光学均匀性测试需求, 提出一种用于测试用折射液配制方法。采用该方法配制的折射液与熔石英光学玻璃折射率匹配精度可达  $\pm 2 \times 10^{-5}$ ; 可对粗磨光学玻璃在 450 ~ 700 nm 光谱范围透射比从原来低于 20% 提高到 97% 以上; 经测试其具有无色无味、腐蚀性小、挥发性小、长时间保存折射率精度保持较好的优点。本文给出的折射液配比方法不仅适用于文中给出的两种成分的折射液配比, 也可以推广到用于其它玻璃材料(如氟化钙<sup>[19]</sup>)测试用配比方案, 因此该配比方法具有较广的适用性。

### 参 考 文 献

- 1 Yuan Qiongyan, Wang Xiangzhao. Recent development of international mainstream lithographic tools [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(1): 57~64  
袁琼雁, 王向朝. 国际主流光刻机研发的最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(1): 57~64
- 2 Ying Jianxin, Zhang Bin, Cui Xin *et al.*. Influencing factors of transmittance of laser transparent ceramics [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(3): 581~585  
应建新, 张彬, 崔鑫等. 透明陶瓷透光性能的影响因素[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(3): 581~585
- 3 Yang Wenku, Deng Wenrong, Yang Yujing. Homogeneity test set of large scale and high precision optical glass [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 1998, **19**(6): 638~640  
杨文库, 邓文荣, 杨宇晶. 大尺寸高质量光学玻璃均匀性的检测装置[J]. *仪器仪表学报*, 1998, **19**(6): 638~640
- 4 469-103 National Optical and Photonics Standardization Technical Committee. GB/T7962. 9-1987 colourless optical glass test methods[S]. Standards Press of China, 1987

- 469-103 全国光学和光子学标准化技术委员会. GB/T7962. 9-1987 无色光学玻璃测试方法[S]. 中国标准出版社, 1987
- 5 Liu Wanyu, Shi Guihua. Preparation of immersion oil with refraction index  $n^{22^\circ\text{C}} = 1.402 - 2.004$  [J]. *Geological Review*, 1964, **22**(4): 267~275  
刘万余, 石桂华. 折光率( $n^{22^\circ\text{C}} = 1.402 - 2.004$ )浸油配制方法[J]. *地质评论*, 1964, **22**(4): 267~275
- 6 Xu Guozhen, Wu Zhiqiang, Mao Lulu. Environmental refractive index fluid; China, 201010293378.7 [P]. [2011-01-05]  
许国珍, 吴志强, 毛露路. 环保化折射液; 中国, 201010293378.7 [P]. [2011-1-5]
- 7 Tan Qisheng, Xiao Xiaoping. On a mixture formula for the refractivity [J]. *J. Chongqing Teachers Collge (Natural Science Edition)*, 1993, **10**(6): 79~83  
谭奇生, 肖晓平. 关于二组液体混合物折射率混合规律[J]. *重庆师范学院学报(自然科学版)*, 1993, **10**(6): 79~83
- 8 Xue Chunrong, Yi Kui, Shao Jianda *et al.*. 193 nm fluoride high reflection mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2068~2072  
薛春荣, 易葵, 邵建达等. 193 nm 氟化物高反膜研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2068~2072
- 9 M. J. Buerger. The optical properties of ideal solution liquids [J]. *Immersion Liquids*, 1933, **18**(8): 325~334
- 10 Chen Jinzhong, Wang Jinben. Study of excess volumes and partial molar volumes of solution [J]. *J. Zhumadian Teachers College*, 1993, **8**(3): 18~21  
陈金洲, 王金本. 溶液过量体积与偏摩尔体积的研究[J]. *驻马店师专学报(自然科学版)*, 1993, **8**(3): 18~21
- 11 Ding Shujing. Excess volume model of binary liquid mixture [J]. *J. Chemical Industry and Engineering (China)*, 2004, **55**(7): 1041~1046  
丁舒静. 二元液体混合物的过量体积模型[J]. *化工学报*, 2004, **55**(7): 1041~1046
- 12 Kong Fanmei, Li Guohua, Song Lianke *et al.*. Measurement of thermal maximal birefringent index coefficients of Mica crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1190~1194  
孔凡美, 李国华, 宋连科等. 云母晶体最大双折射率温度系数的测定[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1190~1194
- 13 Li Jingzhen. Directory of Optics [M]. Xi'an; Shaanxi Science

- and Technology Press, 1986
- 李景镇. 光学手册[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1986
- 14 Vogel AI. Physical properties and chemical constitution [J]. *J. Chem. Soc.*, 1948: 1833~1854
- 15 Li Jia, Xu Xurong, Wang Jingbo *et al.*. Calculation of the refractive indices in all wavelength for the organic compound [J]. *Chinese J. Luminescence*, 1994, **15**(2): 102~106
- 李加, 徐叙谔, 王敬伯等. 有机材料在各种波长的折射率计算[J]. *发光学报*, 1994, **15**(2): 102~106
- 16 Guo Peijin, Yu Jinchi, Ding Zezhao *et al.*. Absolute testing method of the homogeneity of optical glass [J]. *Laser Journal*, 2003, **24**(3): 26~27
- 郭培基, 余景池, 丁泽钊等. 光学玻璃光学均匀性的绝对测量技术[J]. *激光杂志*, 2003, **24**(3): 26~27
- 17 Ren Huan, Yuan Jing, Xu Hua *et al.*. Optical homogeneity measure method analysis of optical material [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, **5**(6): 48~51
- 任寰, 袁静, 许华等. 光学材料光学均匀性检测方法分析[J]. *光学与光电技术*, 2007, **5**(6): 48~51
- 18 Andy Fanning, Joe Ellison, Dan Green. Polished homogeneity testing of corning fused silica boules [C]. *SPIE*, 1999, **3782**: 453~463
- 19 Dong Yongjun, Zhou Guoqing, Yang Weiqiao. Research and development of calcium fluoride crystals [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(8): 43~47
- 董永军, 周国清, 杨卫桥. 氟化钙(CaF<sub>2</sub>)晶体研发进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, **40**(8): 43~47

栏目编辑: 何卓铭