

562252

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

高等学校教材



高精度及特种光学 零件制造与检测

GAOJINGDU JI TEZHONG GUANGXUELINGJIAN
ZHIZAO YU JIANCE

田守信 马仁勇 郭宝金

华中理工大学出版社

高精度及特种光学

零件制造与检测

田守信



华中理工大学出版社

高精度及特种光学零件制造与检测

田守信 马仁勇 郭宝金

责任编辑 常江南

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 8 字数: 195 000

1991年9月第1版

1991年9月第1次印刷

印数: 1—1 000

ISBN 7-5609-0587-0/TG·20

定价: 2.12元

内 容 简 介

全书共十章。包括高精度光学零件的毛坯复检；高精度平面、棱镜、球面光学零件的制造与检测；非球面光学零件的制造与检测；晶体光学零件、塑料光学零件、复制光学零件、纤维光学零件的制造；特殊形状光学零件的加工。

本书是高等院校“光学工艺与测试”专业本科生必修课教材。也可作为光学工艺研究人员，光学工厂的技术人员的参考书。

前 言

随着科学技术的发展，特别是激光的出现，空间光学的问世，各种高精度光学仪器应运而生。现代光学仪器不仅要求精度高、体积小、重量轻，而且要求能满足特殊用途。因而对高精度光学零件、非球面光学零件的需求量越来越大。有时还需要特殊材料、特殊形状的光学零件，这些光学零件用传统的材料和方法难以加工出来，甚至无法加工。因此，研究高精度及特种光学零件的加工工艺和检测方法，就成为光学零件加工领域的重要课题。

本书是高等工科院校“光学工艺与测试”专业的专业课教材。

全书共十章。包括高精度光学零件、薄形光学零件、非球面光学零件、特种材料(晶体、光学塑料、光学纤维和梯折材料)与特殊形状的光学零件的制造及其检测方法。全书重点在于阐述典型零件的加工方法及检验方法，旨在使学生学完本门课程之后，能了解这些光学零件的制造方法和检测方法，并能胜任光学零件加工工艺的研究工作。

本书由长春光学精密机械学院田守信副教授、上海光机所马仁勇高级工程师、长春光机所郭宝金高级工程师编著。其中第一章~第六章、第九章、第十章由田守信编写，第七章由马仁勇编写，第八章由郭宝金编写。

本书由北京理工大学查立豫教授审校，作者在此表示感谢。

对为本书提供加工实例的作者，在此表示感谢。

限于编者水平有限，书中难免会有缺点错误之处，诚恳地希望读者批评指正。

作者谨识

1990年12月 于长春

• i •

目 录

第一章 高精度光学零件毛坯的复检

- §1-1 光学玻璃的双折射值的测定……………(1)
- §1-2 光学玻璃的光学均匀性的测定……………(17)

第二章 高精度平面制造与检测

- §2-1 概述……………(32)
- §2-2 高精度平面制造中的粗磨、精磨与抛光……………(35)
- §2-3 分离器法加工高精度平面……………(39)
- §2-4 环状抛光盘法加工高精度平面……………(41)
- §2-5 薄片法卜里标准具的制造与检验……………(48)
- §2-6 液面法检验高精度平面……………(62)

第三章 高精度棱镜制造与检测

- §3-1 概述……………(65)
- §3-2 光胶法加工高精度棱镜的光胶工具……………(66)
- §3-3 高精度棱镜加工的检测方法……………(69)
- §3-4 高精度棱镜加工中的手修技术……………(79)

第四章 高精度球面的制造与检测

- §4-1 激光球面多光束干涉仪……………(85)
- §4-2 高精度大球面镜的磨制与检验实例……………(89)

第五章 薄形光学零件的制造工艺

- §5-1 薄形光学零件的上盘及其应用……………(97)
- §5-2 薄形光学零件加工中的“光圈”变形及其克服
方法……………(100)
- §5-3 几种薄形光学零件的加工方法……………(102)

第六章 非球面的制造与检测

- §6-1 概述……………(111)
- §6-2 回转二次非球面的加工与检验……………(117)
- §6-3 斯密特校正板的加工与检验……………(139)

§6-4	凸轮仿形法加工非球面	(146)
§6-5	真空镀膜法加工非球面	(151)
§6-6	采用数控机床加工非球面	(157)
§6-7	用离子抛光法加工非球面	(160)
§6-8	双曲面透镜切削加工	(165)
§6-9	“全口径气垫非球面抛光盘”在 高精度非球面 抛光上的应用	(168)

第七章 晶体零件的制造与检测

§7-1	晶体零件的加工特点	(171)
§7-2	晶体定向	(172)
§7-3	晶体零件常用的加工方法	(177)
§7-4	典型晶体零件加工举例	(181)

第八章 塑料光学零件和复制光学零件的制造

§8-1	概述	(185)
§8-2	复制法制造光学零件	(191)
§8-3	塑料反射镜及校正镜的热压成型	(193)
§8-4	椭球面反射镜的复制	(201)
§8-5	透射式光栅的复制	(203)

第九章 光学纤维与梯折透镜的制造

§9-1	光学纤维概述	(206)
§9-2	光学纤维及其元件的制造	(209)
§9-3	光学纤维元件的测试	(214)
§9-4	梯折透镜的制造	(221)

第十章 特殊光学零件的制造

§10-1	三面弯月镜的加工	(226)
§10-2	外圆锥面反射镜的加工	(232)
§10-3	长圆柱形光学零件的端面加工	(237)
§10-4	球面棱镜的加工	(241)
	参考文献	(246)

第一章 高精度光学零件毛坯的复检

高精度光学零件的毛坯在加工前进行复检已成为加工高精度光学零件的一道工序，特别是大口径高精度镜面的加工，这一道工序是不可缺少的。

采用这道工序，并非对光学玻璃制造厂家不信任，而是由于在高精度镜面加工过程中，对光学玻璃的双折射值(应力)和光学均匀性要求比较高，倘若使用了不合要求的光学玻璃，即使采用了最先进的加工方法，加工者具有高超的技术，也会浪费很多工时，而无法获得高精度镜面。所以对高精度光学零件的毛坯进行复检是非常重要的。

复检的主要项目是，光学玻璃的双折射值和光学玻璃的光学均匀性。双折射值的大小代表了光学玻璃的内应力大小，光学玻璃的内应力大小影响光学零件的加工及其成像质量；光学玻璃的光学均匀性的好坏也影响光学零件的成像质量。

下边对这两项指标的复检方法，特别是我国光学车间常用的方法加以介绍。

§1-1 光学玻璃的双折射值的测定

一、概述

光学玻璃的双折射值是表示光学玻璃内应力消除程度的指标。

光学玻璃在没有应力状态下是各向同性的，即在光学玻璃的各个方向上测量的折射率、热膨胀系数等完全一样。光学玻璃具有的这种各向同性的性质，和它内部原子、分子的结构有关。未

经过退火的光学玻璃，因其内部存在着相当大的内应力，故为各向异性体。这个内应力主要是冷却过程中降温速度太快造成的。因此，光学玻璃必须进行退火，退火时按严格规定的条件缓慢降温。即使这样可以消除大部分应力，仍然还有一定量的残余内应力存在。因此，还要进行精密退火，进一步消除光学玻璃内应力。大口径高精度光学零件的毛坯玻璃的精密退火时间长达半个月或更长。这样的光学玻璃的内应力消除得比较好，但它的成本比较昂贵。

当使用存在有严重的内应力的光学玻璃来加工光学零件时，加工好的光学零件表面会随时间而慢慢地变形，有时在加工过程中，光学零件的光圈在盘上已符合要求，过了一段时间或下盘后光圈就变化了。这种变化对于高精度光学零件是绝对不允许的，它直接影响着成像质量。

许多精密光学仪器中的光学零件的精度就代表了仪器的精度，如干涉仪中的反射镜和参考反射镜；光谱分析仪中的法卜里标准具。可见光学零件的复检对于高精度光学零件的加工和使用是多么重要。

从光学厂出厂的光学玻璃，都标定了应力等级，当然要选用高质量的光学玻璃作为加工高精度光学零件的毛坯，即使这样在加工前也要对毛坯的应力进行复检，做到心中有数。

光学玻璃具有内应力时，表现出各向异性。光通过这样的光学玻璃时，就像光通过某一各向异性的晶体一样，产生双折射现象，光被分解成两束光。这两束光在玻璃内传播速度不一样，即折射率不一样，折射方向也不一样。其中一束光遵守折射定律，称为寻常光或 o 光；另一束光不遵守折射定律，折射率随着折射光线的方向而变化，这束光称为非常光或 e 光。由于这两束光的折射率不一样，所以经过光学玻璃后两束光会产生一定的光程差。

光学玻璃的内应力越大，各向异性的程度越严重，这样，双

折射现象使玻璃内的 o 光和 e 光的折射率差越大。因此，这两束光经过光学玻璃后的光程差就越大。

光学玻璃的内应力，可以通过双折射现象来发现。光学玻璃内应力的大小可以用由于双折射现象而产生的 o 光和 e 光在玻璃内的光程差来衡量。

二、光学玻璃双折射的质量指标

光学玻璃双折射的质量指标用光线通过每 1cm 厚的光学玻璃时，由双折射现象所产生的 o 光和 e 光的光程差来表示。我国“无色光学玻璃”的国家标准 (GB903—65)，就是根据这个光程差规定把光学玻璃分为五类的，见表 1-1。

表1-1

类别	最大光程差 (nm/cm)
1	2
2	6
3	10
4	20
5	50

每一块出厂的光学玻璃毛坯都要经过双折射检验。检验时以光学玻璃毛坯的最大厚度方向中部的的光程差数值为准。

三、光学玻璃的双折射测量方法

1. 色序法

光线经过任一厚度为 l 的双折射物质时，所产生的寻常光和非常光的光程差

$$\delta = l(n_o - n_e) \quad (1-1)$$

式中，

n_o ——寻常光的折射率； n_e ——非常光的折射率； l ——被

测玻璃厚度 (cm)。

我们知道，光学玻璃的双折射质量指标是按光线通过每 1cm 厚的光学玻璃因双折射现象所产生的寻常光和非常光的光程差即 δ/l 来表示的，由 (1-1) 式可知：

$$\Delta = \frac{\delta}{l} = (n_o - n_e) \quad (1-2)$$

其中光程差 δ 的单位为 nm；厚度 l 的单位为 cm。

由物理光学可知，由双折射产生的寻常光 (o 光) 和非常光 (e 光) 是两束振动方向互相垂直的全偏振光。因此，光学玻璃双折射通常都是采用带有起偏振器和检偏振器的偏振仪来检验的。

图 1-1 是测量原理图。其中被测玻璃放在起偏振器和检偏振器之间。起偏振器和检偏振器的主平面互相垂直 (偏振器的主平面就是它所产生的偏振光的振动面)。如果在起偏振器和检偏振器之间不放被测玻璃，则从检偏器观察到的全是暗的 (或称为消光的)，即没有

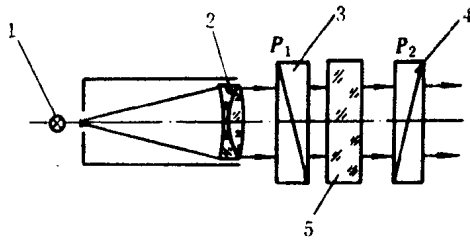


图 1-1 简式偏光仪原理图

1—光源；2—物镜；3—起偏振器；

4—检偏振器；5—被测玻璃

光通过。如果放在中间的被测玻璃没有双折射 (即没有内应力)，则同样得到全暗的视场。如果放在中间的被测玻璃有双折射现象 (即存在着内应力)，则通过起偏振器后的偏振光在玻璃内分成具有一定光程差的寻常光和非常光，这两束光再经过检偏振器，这时的视场就不再是全暗的了，而是呈某种干涉颜色。这个干涉颜色与被测玻璃所产生的两束光的光程差有关。根据所见到的干涉颜色，就可以知道光程差的大小。实践表明，这种图 1-1 所示的装置，仅在双折射的光程差达到 100nm 以上才呈现出较明显的颜色，一般在此值之下为铁灰、灰、浅灰颜色。然而多数玻璃

的双折射的光程差小于此值。因此，这种装置灵敏度低，测量精度差。但是这种简易的测量装置说明了测量光学玻璃双折射值的原理。

为了提高色序法的灵敏度，在上述测量装置中加上全波片，由此即成为全波片法(又称灵敏色法)。

图 1-2 为国产 WYL-2 型偏光仪的光学系统。其主要元件是处于相互正交的起偏器和检偏器，二者之间有一个用透明石膏为原料制成的全波片(也可采用云母或萤石)，其厚度刚好使透过光的双折射光程差等于 565nm (相当于绿光的波长)。

打开仪器光源 1(100 W 白炽灯泡)后，人眼通过检偏器 9 所见视场中干涉颜色为均匀的紫红色。将被测玻璃置于台面玻璃板 8 与检偏器 9 之间(轻的可放置于台面 8 上)，视场中干涉颜色将根据玻璃各部位双折射光程差的大小发生相应的变化。

通常这种偏光仪用于快速定性检验，根据干涉颜色的变化鉴定玻璃的退火质量。必要时也可根据干涉颜色与光程差之间的关系进行定量检验。

在正交的起偏器与检偏器之间放入双折射物质，视场中便会出现干涉色，一定的干涉颜色对应于一定的双折射光程差，其关

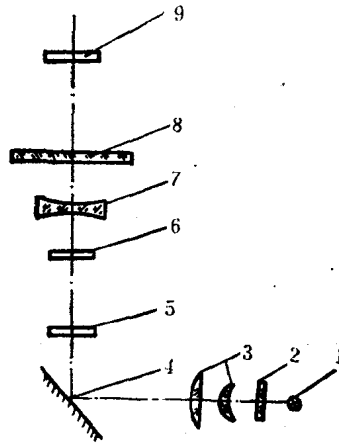


图 1-2 WYL-2 偏光仪
光学系统示意图

- 1—光源； 2—隔热片；
- 3—聚光镜； 4—反射镜；
- 5—起偏器； 6—全波片；
- 7—发散透镜； 8—台面玻璃板；
- 9—检偏器

系如表 1-2 所示。

表1-2

级序	光程差 nm	干涉色	级序	光程差 nm	干涉色	级序	光程差 nm	干涉色	级序	光程差 nm	干涉色
一 级	0	黑	二 级	381	麦黄	三 级	589	靛蓝	四 级	998	亮橙黄
	40	金属灰		306	黄		664	天蓝		1101	暗紫红
	97	炭灰		332	亮黄		728	淡青绿		1151	靛蓝
	158	灰蓝		430	褐黄		747	绿		1258	蓝绿
	218	淡灰		505	橙红		826	亮绿		1334	海蓝
	234	灰绿		536	火红		843	黄绿			
	259	灰		551	暗红		866	绿黄			
	267	黄灰		565	紫红		910	纯黄			
	257	浅麦黄		575	紫		948	橙黄			

由表 1-2 可知，当位于起偏器与检偏器之间的全波片的双折射光程差为 565nm 时，视场中的干涉颜色为紫红色。

如果在正交偏振器之间除了全波片外再附加一个晶体薄片，则二者的组合光程差 δ' 将大于或小于 565nm，这时，干涉颜色也将相应发生变化。根据表 1-2 得到组合光程差 δ' 的数值后，由以下公式①可算出附加晶体薄片的光程差 δ 。

(1) 当附加晶片的快轴与全波片的快轴互相平行时：

$$\delta = \delta' - 565\text{nm} \quad (1-3)$$

(2) 当附加晶片的快轴与全波片的慢轴互相平行时：

$$\delta = 565\text{nm} - \delta' \quad (1-4)$$

有内应力的光学玻璃也是双折射物质，将这样的光学玻璃放入偏光仪光路中也会引起干涉颜色的变化，就像上面所讲的附加

①公式中的 565nm 为全波片光程差的名义值。如已知全波片光程差的准确值，应以准确值代替公式中的 565nm。

晶片放入光路时的情形一样；只是由于光学玻璃中的应力分布不是均匀的，因此光学玻璃各点双折射光程差 δ 也不一致，结果视场中各点干涉色变化的情况也不相同。但对光学玻璃中某一确定点，按照上述方法查表 1-2 得到 δ' 后，再用公式 (1-3) 和公式 (1-4) 计算，同样可求得其光程差 δ 。

在进行光学玻璃双折射光程差测量时，应先将光学玻璃抛光（如果只经过细磨，应涂以与被测玻璃折射率相近的浸液），然后放入偏光仪台面玻璃上。通过检偏镜观察被测光学玻璃整个表面，根据干涉颜色定性地判断光学玻璃的退火质量。

如果被测试样放入光路后，视场的颜色基本不变（仍为紫红色）或者只有轻微的变化（由暗红到紫色），则说明光学玻璃退火质量良好。

如果试样的某些部位上的干涉颜色变化较大（例如出现绿色或黄色），则说明光学玻璃的退火质量差。

在对高精度光学零件毛坯复检时，还要进行定量检验。这时可一边将被测光学玻璃绕仪器的光轴转动，一边观察干涉颜色变化情况，找出干涉颜色变化较大的某一部位。当颜色由紫红变为蓝色时，色序升高；由紫红变成红色时，色序降低。由此可以确定出最高色序与最低色序两个位置（由其中一个位置到另一个位置，被测光学玻璃约需转动 90° ），然后参照下例，计算被测光学玻璃的双折射光程差。

例：被测光学玻璃某一部位在最高色序位置呈天蓝色，由表 1-2 查得被测光学玻璃与全波片的组合光程差 $\delta' = 664\text{nm}$ ，它显然是被测光学玻璃光程差与全波片的光程差相加的结果（被测光学玻璃快轴与全波片快轴互相平行）。将 δ' 代入公式 (1-3)，得到 $\delta = 664\text{nm} - 565\text{nm} = 99\text{nm}$ 。

被测光学玻璃转动 90° 后，同一部位将处于最低色序位置，通过检偏器所看到的干涉颜色为褐黄色，由表 1-2 查得被测光学玻璃与全波片的组合光程差 $\delta' = 430\text{nm}$ ，这一数值是全波片光

程差与被测光学玻璃光程差相减的结果（由于被测光学玻璃转动了 90° ，其快轴与全波片慢轴相互平行）。将 δ' 代入公式(1-4)，得 $\delta = 565\text{nm} - 430\text{nm} = 135\text{nm}$ 。

被测光学玻璃同一部位的光程差是一个固定值，然而测得的两个 δ 值却有相当大的出入，这是由人眼判断颜色的主观误差以及仪器误差等因素造成的。在实际测量工作中可取平均值作为最后结果，即

$$\delta = \frac{1}{2}(99 + 135) = 117(\text{nm})$$

式中， δ 是被测光学玻璃的整个厚度 $l(\text{cm})$ 内产生的光程差。假如被测光学玻璃厚度 $l = 6\text{cm}$ ，则被测光学玻璃的双折射值 $\Delta = 117/6 = 19.5\text{nm/cm}$ 。根据国家标准(见表 1-1)，可确定被测玻璃双折射值，即应力为 4 类。

为了减少测量时的计算工作量，可根据每台偏光仪中全波片的光程差准确值和表 1-2，事先算好各种干涉颜色所对应的被测光学玻璃光程差，列成表格形式(如表 1-3)，供测量时查对。

表1-3

最低色序位置		最高色序位置	
干涉颜色	光程差 nm	干涉颜色	光程差 nm
紫红	0	紫红	0
暗红	14	紫	10
火红	29	靛蓝	24
橙红	60	天蓝	99
褐黄	135	淡青绿	163
亮黄	233	绿	182
黄	259	亮绿	261
麦黄	284	黄绿	278
黄灰	298	绿黄	301

比如当全波片光程差准确值为 565nm 时，用表 1-2 和公式(1-3)、公式(1-4)算出被测光学玻璃光程差 δ 的一系列数值。

例：全波片光程差为565nm，被测玻璃的某一部位在最低和最高色序位置分别为褐黄色和天蓝色，查表1-3，得到被测光学玻璃该部位的双折射光程差分别为135nm和99nm，其平均值为117nm，以此作为测量结果。

表1-2、表1-3都是用文字来描述每一种干涉颜色，这样就不容易做到十分准确，测量者要把一种具体的颜色与文字对号也会有一些困难。例如实际上看到的一种颜色究竟是“黄绿”还是“绿黄”，各个测量者可能做出不同的判断。此外，偏光仪的某些使用条件（全波片的光程差和光源色温等）的改变也可能引起干涉颜色的变化。

为了保证测量结果可靠准确，测量时可使用比色板。比色板由10~20片厚度不同的小云母片按它们产生的双折射光程差大小顺序排列而成。例如它们分别对应 $\lambda/8$ 、 $2\lambda/8$ 、 $3\lambda/8$ 、……、 $7\lambda/8$ 、 λ 的光程差（ λ 按560nm计算）。

采用比较测量法时，把比色板与被测玻璃并列放在偏光仪光路中，当比色板中的某一色的干涉颜色与被测玻璃某一部位的干涉颜色相同时，被测玻璃该部位的光程差与该色对应的比色板中光程差相同（比较时，色板与被测光学玻璃应同时处于最高色序位置，或同时处于最低色序位置）。

上述方法虽然测量精度较低，但在一般光学车间，有经验的技术工人可以判断出被测光学玻璃的应力等级，同时还可以观察到整个光学玻璃应力分布情况，这对选取光学玻璃毛坯是很有用的。

2. 1/4波片法

用1/4波片法测量光学玻璃双折射值的光学系统如图1-3所示。光学系统中主要元件是起偏器3和检偏器6以及1/4波片5。起偏器的位置固定不动，其偏振轴（即振动方向）与放被测件台面成 45° 角，也就是与水平面成 45° 角。

检偏器6可以任意转动，其转角由分度盘7指示，分度盘最

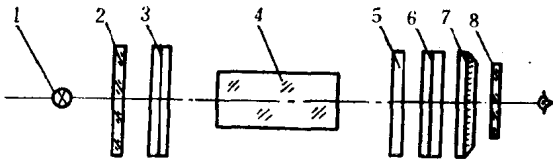


图1-3 读数偏光仪的原理示意图

- 1—光源；2—毛玻璃；3—起偏器；4—被测光学玻璃；
5—1/4波片；6—检偏器；7—分度盘；8—绿色滤光片

小格值为 1° 。当分度盘读数为 0° 时，检偏器与起偏器正交（即两者的偏振轴互相垂直），观察者看到暗视场，这一位置为检偏器的零位。

1/4 波片通常用云母片制成，其厚度所对应的光程差恰好为 1/4 波长。1/4 波片的一个主轴与起偏器的偏振轴平行。因此，当被测光学玻璃未放入光路时，无论正交偏振器之间有无 1/4 波片，都保持暗视场。

绿色滤光片 8 一般用有色光学玻璃制成，其透过光的波段在 540nm 附近。滤光片不用时可卸下。当被测光学玻璃光程差较大时，视场中出现干涉颜色而不利于观测，这时可将滤光片置入光路，以提高测量精度。

光线通过起偏器后成为直线偏振光。直线偏振光通过有双折射光程差的被测光学玻璃和 1/4 波片后，其振动方向将旋转一个角度，其角 θ 的数值(单位为度)与被测光学玻璃的双折射光程差 δ 成正比，其关系式如下：

$$\delta = 3\theta(\text{nm}) \quad (1-5)$$

如果被测光学玻璃不在光路中，则当检偏器处于零位（分度盘读数为 0° ）时，起偏器发出的直线偏振光完全不能通过检偏器，因此观测者看到的是暗视场。现在由于被测光学玻璃和 1/4 波片的作用，直线偏振光旋转了 θ 角，因此检偏器也必须作相应的旋转才能恢复暗视场，这时，可由分度盘 7 读出检偏器旋转