

光学零件制造工艺学

习题与实验

浙江大学 曹天宁 主编



责任编辑 邱锦来



科技新书目： 114-103
统一书号： 15033·5927
定 价： 2.50 元

库

光学零件制造工艺学

习题与实验

浙江大学

曹天宁 主编

光学零件制造工艺学

习题与实验

浙江大学 曹天宁 主编

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

金堂县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168 $\frac{1}{32}$ ·印张 $10\frac{1}{4}$ ·字数275千字

1985年12月重庆第一版·1985年12月成都第一次印刷

印数：0,001—2,550·定价2.50元

统一书号：15033·5927

前 言

本书是“光学零件制造工艺学”(机械工业出版社, 1981年版)的配套书。全书共编入106个例题、204个习题和27个实验, 可以用于课堂教学、实验教学、现场教学及工厂实习等教学环节。也可供从事光学工艺的工程技术人员与工人参考。

本书由浙江大学曹天宁同志主编。由北京工业学院查立豫同志主审。参加编写的同志有北京工业学院查立豫(第五章、实验七、实验八)、胡立山(第四章、实验六); 上海机械学院史大道(第十三章、第十四章、实验二十一至二十七); 天津大学程荫梧(第六章、实验九至十一); 浙江大学曹天宁(绪论、第一至三章、第七至十二章、第十五章、实验一至五、实验十二至二十、附录)。

本书在编写过程中得到有关兄弟院校、光学仪器厂和研究的热忱支持并提供宝贵的资料, 特在此一并致谢! 由于编写这种习题与实验是首次尝试、编者水平有限, 故书中缺点和错误在所难免, 希望广大读者批评指正。

目 录

绪言..... 1

第一篇 光学材料

第一章 光学玻璃..... 5

第二章 光学晶体与光学塑料..... 14

第二篇 光学零件的基本工艺

第三章 光学零件的技术条件与技术准备..... 19

第四章 光学零件毛坯及粗磨成型..... 27

第五章 光学零件的精磨..... 37

第六章 光学零件的抛光..... 53

第七章 光学零件的定心磨边..... 78

第八章 光学零件的胶合..... 84

第三篇 精密及特殊光学零件工艺

第九章 球面样板制造工艺..... 91

第十章 薄形零件及精密平面零件工艺..... 97

第十一章 非球面制造工艺..... 103

第十二章 晶体零件及塑料零件的制造工艺..... 110

第四篇 光学零件的特种工艺

第十三章 光学零件的表面镀膜..... 115

第十四章 光学零件的刻划和照相工艺..... 134

第五篇 光学零件工艺规程的编制

第十五章 光学零件工艺规程的编制..... 141

实 验

实验一	光学玻璃的折射率测量	153
实验二	光学玻璃的光学均匀性测量	158
实验三	光学玻璃的应力双折射测量	162
实验四	有色光学玻璃的光谱特性测量	169
实验五	石英晶体光轴及旋向的测量	176
实验六	用筒形金刚石磨轮铣磨球面	183
实验七	工艺因素对精磨面形精度的影响	192
实验八	工艺因素对高速精磨效率的影响	201
实验九	高速抛光工艺	210
实验十	工艺因素对抛光效率的影响	215
实验十一	光圈的识别与修正	225
实验十二	透镜的定心与磨边	234
实验十三	透镜的胶合	241
实验十四	球面样板曲率半径的测量与修磨	247
实验十五	薄形零件的上盘	252
实验十六	高精度平面的制造与检测	255
实验十七	直角棱镜的制造与检测	259
实验十八	非球面的检验与抛修	263
实验十九	光学晶体的研磨与抛光	268
实验二十	塑料透镜的本体聚合成型法	271
实验二十一	真空镀制光学薄膜	276
实验二十二	膜厚的控制与测量	280
实验二十三	用布鲁斯特角法测量光学薄膜的折射率	284
实验二十四	光学薄膜光谱特性的测定	288
实验二十五	用机械化学法制取分划	293
实验二十六	虫胶无底层复制工艺	298
实验二十七	圆光栅的精度检测	306

附 录

附录一	散粒磨料的种类及粒度号.....	313
附录二	光学零件加工余量.....	315
附录三	习题答案.....	319

绪 言

“光学零件制造工艺学”是一门实践性很强的学科，它与光学工业的生产实践与光学技术的科学研究实践有着密切的联系，单凭课堂讲授不可能获得可靠和牢固的知识，必须通过习题、实验与生产实习等环节才能巩固、加深与扩大课堂所学的知识。有不少教学内容，例如机床结构及操作方法、仪器的功能及使用方法、光圈的识别及修正等，只有通过实验、实习才能达到事半功倍的效果。因此，我们根据多年来积累的教学资料与实践经验，编写了“光学零件制造工艺学”教材的配套书——“光学零件制造工艺学习题与实验”。

习题与实验是本课程的重要教学环节，是理论联系实际的过程。具体的目的如下：

1. 通过习题例题及实验指导书加深、扩大教材[⊙]中阐述的内容，弥补教材的不足之处，并且注意吸取新的材料与新的工艺。

2. 通过习题练习，巩固所学知识；学习利用理论知识和工艺手段解决实际问题的方法，提高解决实际问题的能力；正确解释复杂的工艺现象，提高认识工艺本质的水平。

3. 通过实验、掌握光学加工机床、仪器、工具与材辅料的功能、使用与作用原理；训练光学加工与光学精密测量的技能；培养正确获得工艺和测量数据的能力、培养验证工艺现象、分析工艺问题与解决工艺问题的能力。本书总共编入27个实验，除教学大纲规定的选做9个实验之外，又搜集了各院校可能开设的一些实验。显然，对于光学工艺的教学实习亦能起到指导作用。

⊙ 教材系指“光学零件制造工艺学”——机械工业出版社，1981年版。

在解题、实验及光学车间实习时要注意下列问题：

1. 光学工艺的习题求解要根据题目给定条件，求出最佳答案。工艺问题往往较为复杂，解题必须抓住主要矛盾。例如，一片弯月形透镜，欲选择光学定心磨边时的粘结面，若根据磨边时不易产生崩边和胶合面表面质量要求稍低为理由则应该将凹面作为粘结面，但是，如果该镜片定心要求高、二球面的曲率半径又超过所选定心仪物镜的工作距离，则应以凸面作粘结面，以保证定心要求，因为定心精度比崩边、凹面表面质量更为重要，或者说对成象质量影响更大。

2. 在解题运算与实验数据处理时应正确取舍有效数字。凡末位数字有 ± 1 的误差，或者其下一位（已舍去）的误差不超过 ± 5 时的数字称为有效数字。有效数字是指一个数中表示数的大小的几位，但不包括用来指示小数点位置的0。例如0.0340cm的有效数字是340三位，它等于0.340mm，或等于340 μm ，或等于 $340 \times 10^3 \text{nm}$ 。但是，不能写成 $3.4 \times 10^{-2} \text{cm}$ ，或0.34mm。或 $3.4 \times 10^2 \mu\text{m}$ ，或 $3.4 \times 10^5 \text{nm}$ 。否则，精确度就降低了。加减运算时，各数所保留的小数点后的位数应与各数中小数点后位数最少的相同。例如将12.45、0.0053、1.632三个数相加，其和应为14.09。而不应为14.0873。在乘除运算中，各因子保留的位数，以有效数字最少的因子为准，所得之积或商也与各因子一致。例如将0.0152、23.42、1.3249三个数相乘，应以0.0152三位有效数字为准，即

$$0.0152 \times 23.4 \times 1.32 = 0.469$$

计算平均值时，如为四个数或四个以上的数相平均，则平均值的有效数字位数可以比原来的位数多一位。

3. 在做实验读取数据时应估读到最小一格的分数。例如测微鼓轮上每小格为0.01mm，应估读到0.001mm。例如读数18.367，其有效数字为五位，最后一位是不准确的。

4. 注意实验室或车间中的机床、仪器与光学零件的安全。

(1) 机床开动前应检查机床的运动是否会造成机件的碰

撞。

(2) 使用仪器时应等准备工作做好后再接通电源，电源接通后，不宜忽开忽关。关掉以后，应等灯管冷却后才能再打开，否则容易损坏灯泡。使用激光电源时，应注意激光管的阳极与阴极的接线，不可接错，用后及时关断。

(3) 操作仪器的运动部件（例如导轨上的仪器部件的滑动）时，用力要适当。特别要注意手轮的锁紧装置，在未松开锁紧装置之前，切勿旋转手轮。

(4) 光学零件的抛光表面任何时候均不可直接用手触摸，只能用手拿住磨砂面。镀膜的光学表面，不要轻易去擦，以免损伤膜层。

(5) 加工光学零件用的磨料、抛光液是严格按种类、粒度分别使用的，切勿混用或玷污。它们在使用时所需的揩布甚至水龙头也是一一对应分开的。

3. 在下列各句的空格内填入适当的冠词，并写出该冠词的汉语意思。

1. A (the) new book has been published. (新)
 2. The (the) old man is very kind. (老)

3. The (the) big house is very nice. (大)
 4. The (the) small child is very cute. (小)

5. The (the) short man is very funny. (矮)

6. The (the) tall man is very handsome. (高)
 7. The (the) young man is very smart. (年轻)

8. The (the) old man is very wise. (老)

9. The (the) young man is very handsome. (年轻)
 10. The (the) old man is very wise. (老)

第一篇 光学材料

第一章 光学玻璃

光学玻璃具有一般玻璃的一切通性及本身的特性。玻璃的物理、化学性质与玻璃结构紧密联系。研究玻璃结构及成分对从本质上了解光学玻璃的性质及加工过程的物理-化学现象有重要的指导意义。

玻璃的结构学说主要有微晶说与不规则网架学说。微晶说认为玻璃的微观构造存在晶体结构，即近程有序；不规则网架学说认为玻璃的宏观构造存在无规则的网架，即远程无序。玻璃结构的具体描述随玻璃的组成而异。玻璃的组成形式中，对于无色光学玻璃通常以氧化物表示之。

无色光学玻璃基本上是以二氧化硅 SiO_2 为基础，与其他氧化物构成多组分硅酸盐玻璃。 SiO_2 在玻璃中以共价键连接、以 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 负离子硅氧四面体为基本结构单元而存在，称为玻璃的生成体。以玻璃生成体为基础根据其他氧化物含量的多少将无色光学玻璃分成两大类。以 $\text{R}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ 为基本组成的光学玻璃称火石类(F)玻璃，以 $\text{R}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 为基本组成的光学玻璃称冕牌类(K)玻璃。无色光学玻璃中的氧化物成分除了基本组成的成分外，为了降低熔炼过程中熔体的粘度，为了提高玻璃的化学稳定性，为了消除气泡、结石、增加透明性等，在玻璃中需加入其他氧化物，形成了无色光学玻璃的复杂氧化物成分。

复杂氧化物成分决定光学玻璃的物理化学性质，由于玻璃中的氧化物在熔炼中互相作用而改变了本身的结构状态，所以，氧化物单独存在时的性质与处于玻璃体中时的性质是不同的，我们

称氧化物在玻璃中的性质为氧化物部分性质。玻璃中各氧化物部分性质能以确定的数据表示。

以光学玻璃的折射率 n_D 和中部色散 (n_F-n_C) 与其化学成分的关系为例说明氧化物部分性质在玻璃的物理性质理论计算中的作用。已知玻璃的氧化物组成及各氧化物的部分性质，可以用捷姆金娜(Л. И. Демкина)加和性公式来计算玻璃的折射率 n_D 和中部色散 (n_F-n_C) 。捷姆金娜公式如下：

$$n_D = \frac{\sum \frac{P_i}{S_i} n_{Di}}{\sum \frac{P_i}{S_i}} \quad (1-1)$$

$$n_F - n_C = \frac{\sum \frac{P_i}{S_i} (n_F - n_C)_i}{\sum \frac{P_i}{S_i}} \quad (1-2)$$

式中 $n_D, (n_F - n_C)$ ——玻璃的折射率、中部色散；

P_i ——玻璃中某氧化物的百分含量；

S_i ——玻璃中某氧化物的修正系数；

$n_{Di}, (n_F - n_C)_i$ ——玻璃中氧化物的折射率、中部色散。

表1-1列出捷姆金娜从硅酸盐玻璃研究中确定的12种氧化物结构系数(即修正系数)及氧化物折射率、中部色散值。表中 SiO_2 、 B_2O_3 和 PbO 氧化物，因为有不同的结构形式存在，故有不同的结构系数和部分性质。在具体的玻璃中以哪种结构存在或各种结构同时存在的比例关系，应按理论分析与经验确定之。

例1-1 试说明玻璃的结构学说、玻璃结构与玻璃的物理化学性质的关系。

解 根据玻璃的结构学说，玻璃内部质点排列的特点是微观上的“近程有序”和宏观上“远程无序”。对玻璃结构具体描述随玻璃的组成而异。一般地说，玻璃结构近程类似于晶体的晶格结构，由各种原子团构成网架，包括三度空间的网架、两度和一度空间的网架(层状和链状结构)。各种原子团是玻璃的结构单

表 1-1 各种氧化物的结构系数及光学常数

氧化物及其形态	n_D	$(n_F - n_C) \times 10^5$	S	S 对应的分子团
SiO ₂ - I	1.475	695	60	SiO ₂
SiO ₂ - II	1.458	678	60	SiO ₂
B ₂ O ₃ - I [BO ₄]	1.61	750	43	(BO ₂)
B ₂ O ₃ - II [BO ₃]	1.464	670	70	B ₂ O ₃
Al ₂ O ₃	1.49	850	59	(AlO ₂)
Sb ₂ O ₃	1.98	1800	154	(SbO ₂)
As ₂ O ₃	1.57	1600	107	(AsO ₂)
PbO- I	2.46	7700	343	PbO·2SiO ₂
PbO- II	2.46	7700	223	PbO
PbO- III	2.50	11600	223	PbO
BaO	2.03	2280	213	BaO·SiO ₂
ZnO	1.96	2850	223	2ZnO·SiO ₂
CaO	1.83	1750	86	—
MgO	1.64	1300	140	2MgO·SiO ₂
K ₂ O	1.58	1200	94	K ₂ O
Na ₂ O	1.59	1400	62	Na ₂ O

元，构成三角体（如 [BO₃]）、四面体（如 [SiO₄]）等。还有一些离子（如Na⁺离子）孤立地在网架的间隙中。

对于化合物形成的玻璃，将引入的化合物分成三类：（1）能形成玻璃结构网架的称玻璃生成体。氧化物玻璃的生成体有SiO₂、B₂O₃、P₂O₅、GeO₂、As₂O₅等；它们一般形成三角体和四面体，组成连续的结构网架。（2）以孤立的原子（离子）处在玻璃结构网架以外的空隙中，称玻璃网架外体。氧化物玻璃网架外体中氧化物的阳离子具有较大的离子半径和较高的配位数，并且配位状态很少改变，部分性质也不变。网架外体氧化物有Li₂O、Na₂O、K₂O、CaO、BaO、ZrO₂、La₂O₃等。（3）根据玻璃成分的不同，可以进入网架也可以处在网架以外的空隙中称为中间体。在氧化物玻璃中，这些氧化物具有较高的电场强度，但氧化物本身缺少氧离子。因此当玻璃中“游离”氧多余时，能形成四面体[RO₄]进入网架，而与硅氧四面体组成均匀统一的结构网架。不然则以更高的配位数处于网架的间隙之中。中间体氧化物

根据不同配位状态应具有两种部分性质，两者之间的转变随玻璃中“游离”氧的数目（即碱金属及碱土金属氧化物特性与含量）而变化。属于这些氧化物的有： MgO 、 ZnO 、 Al_2O_3 、 Ga_2O_3 、 TiO_2 等。它们形成四面体进入网架的可能性是不一样的，有以下次序： $\text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Ga}_2\text{O}_3 > \text{TiO}_2 > \text{MgO} \geq \text{ZnO}$ 。这主要决定于形成四面体所要求的阴、阳离子的半径比及碱金属、碱土金属氧化物给出“游离”氧的能力。此外，玻璃中常用氧化物 PbO 则称为高极化率氧化物，它在玻璃中的部分性质随本身含量和玻璃中其他成分含量而变化。

不同氧化物在玻璃中具有不同的结构状态，不同的结构状态赋予玻璃不同的物理性质。玻璃生成体的配位状态和化学键性质对物理性质起着决定性作用。其他氧化物的部分性质基本上不变。常见部分性质变化的有 SiO_2 、 B_2O_3 、 PbO 。网架外体及中间体氧化物以离子键形式与形成体结合，或者填充网架空隙，键力较弱，影响了玻璃的物理化学性质。

例1-2 试用玻璃结构理论解释光学玻璃精密退火过程中的折射率温度效应。

解 玻璃是按近程有序和远程无序规律进行内部质点排列的。每种氧化物以一定的结构状态存在于玻璃之中。但是，玻璃结构有序与无序区域的大小与多少、有序区域的内部结构，不仅与玻璃组成有关，而且与外界条件变化如温度变化有关。在一定的热处理条件下，玻璃产生折射率的微量变化，例如 SiO_2 在 $520^\circ\text{C} \sim 595^\circ\text{C}$ 时发生 $\alpha\text{-SiO}_2$ 转变成 $\beta\text{-SiO}_2$ 结构状态，显然它们在玻璃中的部分物理性质也发生改变。此外，温度升高，玻璃远程排列松弛，偏离折射率平衡状态愈远，因而也造成玻璃折射率的变化。

例1-3 一种冕牌光学玻璃，其配方按重量百分比为 SiO_2 : 58.5; B_2O_3 : 22.0; Al_2O_3 : 2.0; As_2O_3 : 0.3; ZnO : 2.5; K_2O : 14.7。 B_2O_3 在玻璃中 $[\text{BO}_4]$ 占23%、 $[\text{BO}_3]$ 占77%。实际的玻璃折射率为 $n_D = 1.4982$ 。试求这种玻璃折射率的计算值，并比较之。

解 利用公式 (1-1) 及表 1-1 中有关数据计算如下:

氧化物	P_i	S_i	P_i/S_i	$b_i=100 \times \frac{[P_i/S_i]}{\sum [P_i/S_i]}$	n_i	$\frac{b_i n_i}{100}$
1. SiO_2	58.5	60	0.9750	63.35	1.475	0.93441
2. $\text{B}_2\text{O}_3[\text{BO}_4]$	22.0×0.23	43	0.1177	7.65	1.61	0.12316
$\text{B}_2\text{O}_3[\text{BO}_3]$	22.0×0.77	70	0.2420	15.72	1.464	0.23014
3. Al_2O_3	2.0	59	0.0339	2.20	1.49	0.03278
4. As_2O_3	0.3	107	0.0028	0.18	1.57	0.00283
5. ZnO	2.5	223	0.0112	0.73	1.96	0.01431
6. K_2O	14.7	94	0.1564	10.16	1.58	0.16053
	100.0		1.5390	100.0		1.49816

\therefore 该玻璃的计算值为 $n_D = 1.4982$, 与实际值 1.4982 相比, 完全相同。

例 1-4 以 K9 和 F2 二个牌号玻璃为例说明冕牌玻璃与火石玻璃的基本组成, 并由基本组分决定了这两类玻璃的基本特性。

解 K9 玻璃按某一配方的主要成分为: $\text{SiO}_2: 69.13\%$; $\text{B}_2\text{O}_3: 10.75\%$; $\text{K}_2\text{O}: 6.29\%$; $\text{Na}_2\text{O}: 10.40\%$ 。按配方可作如下分析:

1. K9 是 $\text{R}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系统玻璃, SiO_2 为最主要成分。
2. SiO_2 在玻璃中的部分性质是密度低、膨胀系数低、折射率低、色散低、硬度高, 并且由于 SiO_2 形成硅氧四面体基本单元结构, 故稳定性好。显然, K9 玻璃也具有上述性质。
3. 冕牌类玻璃均具有 K9 玻璃的组成特征, 所以冕牌类玻璃均具有质轻、性硬、折射率低、色散小和化学稳定性高的特性。

F2 玻璃按某一配方的主要成分为: $\text{SiO}_2: 47.24\%$; $\text{PbO}: 45.87\%$; $\text{K}_2\text{O}: 6.39\%$ 。按配方可作如下分析:

1. F2 是 $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ 系统玻璃, SiO_2 和 PbO 为最主要成分。与 K9 比较, PbO 是组成中的突出成分。
2. PbO 在玻璃中的部分性质是密度高、膨胀系数高、折射率高、色散高、硬度低, 并且结构较不稳定。重金属氧化物 PbO 。