

FIELD GUIDE TO
OPTICAL FABRICATION

Ray Williamson

光学元件制造技术

[美] 瑞·威廉森 著
田爱玲 苏俊宏 等 译



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

SPIE
PRESS

光学元件制造技术

[美]瑞·威廉森 著
田爱玲 苏俊宏 等 译



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

光学元件制造技术 / (美)威廉森著;田爱玲等译.
—杭州:浙江大学出版社,2016.6.

书名原文:Field Guide to Optical Fabrication
ISBN 978-7-308-15781-0

I. ①光… II. ①威…②田… III. ①光学元件—制
造 IV. ①TH74.

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 086165 号

© 2006 Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from SPIE.

Translated and published in China by special arrangement with SPIE Press, 1000 20th St. Bellingham, WA 98225.

Authorized Chinese-language edition.

浙江省版权局著作权合同登记 图字:11-2014-184 号

光学元件制造技术

[美]瑞·威廉森 著 田爱玲 苏俊宏 等 译

责任编辑 伍秀芳(wxfwt@zju.edu.cn)

责任校对 王文舟

封面设计 杭州林智广告有限公司

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 浙江时代出版服务有限公司

印 刷 浙江印刷集团有限公司

开 本 850mm×1168mm 1/32

印 张 4

字 数 108 千

版 印 次 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-15781-0

定 价 32.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行中心联系方式: (0571) 88925591; <http://zjdxbs.tmall.com>

译者序

光学元件制造技术是集光学、机械、材料、化学、数学、计算机、电子和控制于一体的综合交叉学科。它与光学设计、光学检测与光学仪器设计与装配组成了光学工程的基础理论体系,缺一不可。

科学和技术的发展越来越离不开光学仪器的辅助,而且随着人类向太空世界或微观领域的不断探索,各行各业对光学仪器的要求越来越高。光学元件是组成光学仪器的基础元件,其制造精度直接影响着仪器的光学性能。光学元件的几何质量与光学性能不仅与制造技术本身相关,而且与制作工艺编制的合理性直接相关。我们翻译本书主要有两个目的:①介绍美国在光学元件制造技术方面的理念,使国内同行了解国外的相关技术和工作方法;②强调光学制造技术不是一种简单的加工技术,它涉及多学科,而且其工艺研究是光学制造中不可或缺的一部分,必须引起光学技术工作者的足够重视。

原著是国际光学工程学会(SPIE)领域指导系列丛书之一,主要从光学设计、光学制造工艺和商务的角度,介绍了工艺、技术和商业决策等内容。全书共六章:第一章介绍了设计人员在设计过程中应该考虑哪些问题;第二章介绍了传统的光学元件制造方法;第三章介绍了光学元件的其他制造方法;第四章介绍了在工艺编制过程中需要考虑的因素;第五章介绍了对所制造的光学元件的评价技术;第六章介绍了与光学元件相关的材料特性。最后为公式汇总。本书从工程实际出发,可作为光学与仪器学科相关专业的本科生和研究生教材,还可作为从事光学制造专业相关工作的技术人员与技术管理人员的重要参考书。

本书第一章由田爱玲翻译,第三、六章由苏俊宏翻译,第二、五章由刘丙才翻译,第四章由朱学亮翻译。全书由田爱玲统稿。

本书获得西安工业大学专著出版基金资助。在翻译过程中,得到了光电工程学院、科技处等部门领导的大力支持;西安工业大学光电工程学院研究生刘剑、杨皓聿、李方方、田冰心、郭翔宇等在文档整理上付出了辛勤劳动,在此一并表示感谢。

在翻译过程中,我们忠实地遵循了原著的学术思想。鉴于译者学识疏浅,文辞的运用和语言的表达等不妥之处在所难免,书中也可能存在不少错误,恳请读者不吝赐教,并批评指正。

译 者

2016年4月于未央湖校区

常用符号变量

AOI	Angle of incidence 入射角
AQL	Acceptance quality level 合格质量标准
b	Bevel leg length radial to part diameter 沿径向的倒角长度
BFS	Best-fit sphere 最佳拟合球面
BK7	Schott glass type 517642 Schott 玻璃型号 517642
BRDF	Bidirectional reflectance distribution function 双向反射分布函数
C	Curvature, $1/\text{radius}$ 曲率, 半径倒数
$^{\circ}\text{C}$	Degree Celsius 摄氏度
CA	Clear aperture 有效口径(通光口径)
CGH	Computer-generated hologram 计算机生成全息图
CMM	Coordinate measuring machine 坐标测量机
CNC	Computer numerical control 计算机数字控制
C_p	Specific heat 质量定压热容, 比定压热容
CT	Center thickness 中心厚度
CTE	Coefficient of thermal expansion 热膨胀系数
D	Diopter, reciprocal meter, unit of focal power 屈光度, 米的倒数, 光焦度的单位
D	Thermal diffusivity 热扩散系数
Deg	Degree, angular 度, 角度
$\frac{dn}{dT}$	Change of index with respect to temperature 折射率温度比
DPTWF	Double-pass transmitted wavefront 双通透射波前
e	Natural logarithm base, ~ 2.718281828 自然对数的底, 约为 2.718281828

<i>E</i>	Young's modulus 杨氏模量
EFL	Effective focal length 有效焦距
ET	Edge thickness 边缘厚度
ETV	Edge thickness variation 边缘厚度变化
°F	Degree Fahrenheit 华氏度
FS	Fused silica 熔融石英
GPa	Gigapascals 百万帕斯卡, $1\text{GPa}=1\times 10^6\text{Pa}$
<i>h</i>	Height of surface form error normal to surface 垂直于表面的表面形状误差的高度
HF	Hydrofluoric acid 氢氟酸
HIP	Hot isostatic pressing 热等静压
H_K	Knoop hardness 努普硬度
IR	Infrared 红外
K	Kelvin, absolute temperature units 开尔文, 绝对温度单位
<i>k</i>	Thermal conductivity 热导率
mrاد	Milliradian 毫弧度
MRF	Magnetorheological finishing 磁流变抛光
MSDS	Material safety data sheet 材料安全数据表
<i>n</i>	Index of refraction 折射率
nm	Nanometer, 10^{-9}m 纳米, $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$
OPD	Optical path difference 光程差
OPL	Optical path length 光路长度
PSD	Power spectral density 功率谱密度
PV	Peak to valley 峰谷值
PVr	Peak to valley, robust (due to C. Evans) 鲁棒峰谷值(C. Evans 提出)
<i>r</i>	Radial distance from axis 离轴的径向距离
<i>R</i>	Radius of curvature 曲率半径
RMS	Root-mean-square 均方根
RSS	Root-sum-square 平方和根值
RWF	Reflected wavefront 反射波前

s	Sag 矢高
SCOTS	Software-configurable optical test system 可配置软件的光学测试系统
S-D	Scratch-dig (surface quality) 划痕-麻点 (表面质量)
SFE	Surface form error 表面形状误差
SPDT	Single-point diamond turning 单点金刚石车
SQ	Surface quality 表面质量
SSD	Subsurface damage 亚表层损伤
t	Thickness 厚度
T	Temperature 温度
t_c	Center thickness 中心厚度
t_e	Edge thickness 边缘厚度
T_g	Glass transition temperature 玻璃软化温度
TIR	Total internal reflection 全内反射
TIS	Total integrated scatter 总积分散射
TWD	Transmitted wavefront distortion 透射波前畸变
TWF	Transmitted wavefront 透射波前
UV	Ultraviolet 紫外
y	Radial distance from axis 离轴径向距离
z	distance along axis 沿轴距离
α	Linear coefficient of thermal expansion 线性热膨胀系数
α	Prism angle, wedge, or tilt 棱角, 楔角, 或者倾斜
α	Angular error from reference, as from 90 deg 与参考面的角度误差
δ	Beam deviation 光束偏离
θ_B	Brewster's angle 布鲁斯特角
θ_C	Critical angle 临界角
k	Conic constant 圆锥常数
κ	Thermal diffusivity 热扩散系数

λ	Wavelength 波长
μm	micrometer, 10^{-6}m 微米, $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$
μrad	Microradian, 10^{-6}rad 微弧度, $1\mu\text{rad}=10^{-6}\text{rad}$
ν	Abbé number; reciprocal dispersion 阿贝数; 色散率倒数
ρ	Specific gravity 比重
σ_f	Rupture strength 断裂强度
τ	Time 时间
ϕ	Diameter 直径
ϕ_{block}	Block diameter 镜盘直径
ϕ_{eff}	Effective diameter including spacing 包括间隔 的有效直径

目 录

第一章 绪 论	1
一、从功能需求到元件公差	1
二、有效口径	2
三、元件厚度与加工工艺的关系	3
四、平面度与透射波前的关系	4
五、表面的比例因子与波前	5
六、近轴光学中的楔角	5
七、表面质量与性能的关系	6
八、加工难易度与选材	7
九、抗压窗厚度	8
十、指标清单	9
十一、实际公差	10
十二、非球面的可制造性	11
十三、加工车间的选择	12
第二章 传统加工方法	13
一、传统加工过程	13
二、车间安全	14
三、元件的上盘布局	16
四、上盘方法	17
五、柏油上盘	18
六、点上盘	19
七、楔形上盘	20
八、锯切	21
九、研磨	22

十、曲面成型	23
十一、散粒磨料研磨	24
十二、磨料种类和等级	25
十三、固着磨料研磨	26
十四、倒角	27
十五、切割	27
十六、取芯和钻孔	28
十七、磨边	29
十八、无心磨边	30
十九、定心	31
二十、裂纹、破边、麻点	32
二十一、打标:倒角、点、箭头等	32
二十二、抛光	33
二十三、抛光剂	34
二十四、柏油模:沟槽和形状控制	35
二十五、抛光垫片	36
二十六、晶体成形和定向	37
二十七、晶体研磨	38
二十八、摆臂主轴加工	39
二十九、透镜棒的加工	40
三十、行星式抛光(环抛)	41
三十一、双面抛光	42
三十二、圆柱和环面研磨	43
三十三、车间内运输与存储	44
三十四、加工过程中的清洗	44
三十五、镀膜前的清洗	45
三十六、镀膜	46
三十七、装配	47
三十八、包装运输	48
第三章 其他加工方法	51
一、计算机数控加工	51

二、数控同步抛光机	52
三、数控带式机床	52
四、数控气囊抛光机	53
五、磁流变抛光(MRF®)	54
六、射流抛光(FJP)	55
七、单点金刚石车削(SPDT)	56
八、复制加工	57
九、注塑成型	58
十、热固性铸造和压缩成型	59
十一、热压成形	59
 第四章 工艺规划因素	 61
一、原材料及供应形式	61
二、毛坯尺寸	62
三、切割和取芯效率	63
四、高效生产和产量最大化	64
五、产量损失规划	65
六、工装容量:平面	66
七、楔形工装容量	67
八、工装容量:曲面	68
九、镀膜安排	69
十、各向异性	70
十一、光学元件内部应力	71
十二、作用于光学元件的应力	72
十三、热稳定时间	73
十四、热失效	73
十五、生产过程检验点	74
十六、镀膜后切割	75
十七、黏合剂	76
 第五章 评价技术	 79
一、抽样检验和合格质量标准(AQL)	79

二、产品表面质量	80
三、自准直仪法测角	80
四、矢高和球径仪	81
五、半径、不规则、离焦和面形	82
六、干涉仪	84
七、干涉装置	85
八、PV,RMS 和 PV_r	85
九、干涉条纹图	87
十、干涉条纹比例因子	88
十一、圆锥面和非球面	89
十二、尺寸和几何测量	90
十三、斜率评价方法	93
十四、斜率公差	95
第六章 材料特性	97
一、加工车间关注的材料特性	97
二、材料属性表	98
三、光学性能表	99
四、热属性表	100
五、物理特性表	101
公式汇总	103
参考文献	109
索 引	111

第一章 绪 论

一、从功能需求到元件公差

人们可以用积木构建很多东西,但是做积木的人不知道你想搭建什么,即使告诉他们也没有用。你真正需要的是积木能牢固地搭建在一起,所以你必须详细地给出积木的尺寸和公差。

通常情况下,如果技术人员对最终光学系统知之甚少(经常是有特殊原因的),而光学设计工程师对元件制造过程也所知不多时,那么,在最终确定一个设计之前,最好的做法是咨询一下相应的制造厂家。

系统设计中想要的功能参数并不能在光学加工车间全部测量到。因此对规格与功能、公差与性能、配置与成本之间关系的理解将影响到整个项目的成功。

形状、表面质量、长宽比、有效口径和中心偏差等指标直接且非线性地决定着元件的加工难度和成本,而这些加工难度和成本与系统性能没有直接的对应关系^[1]。

当设计师所选材料有限时,错误的选择可以使结果从可预期的成功变为高风险的冒险。以下是容易出现问题的材料的一些特征:

- 易潮湿
- 易断裂
- 屈服强度低
- 有毒
- 非常软或非常硬
- 可染色
- 具有较高的热膨胀系数
- 具有较低的热扩散系数

- 折射率温度比高

同时具有以上几种特征的材料尤其容易出现问題。

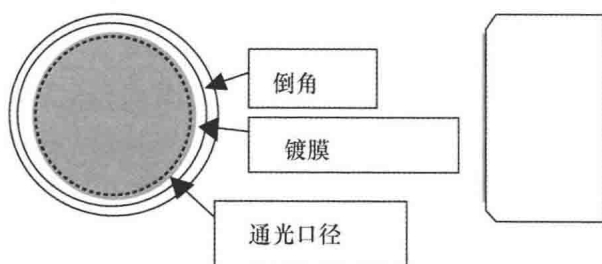
二、有效口径

有效口径(CA)或通光口径是指所有光学功能的公差和指标都有效的区域。

在加工过程中,不可避免地会产生边缘表面质量低于中心处表面质量的情况。边缘处可能存在表面质量差、形状有误差或破边现象,光照射到边界时就会产生散射、衍射或者渐晕现象。

通常情况下,在边缘和通光口径之间允许有一个区域具有纯粹的机械特性。最好的通光口径是直径的80%~85%。考虑到重量或装配因素,则需要选择更大的通光口径。当指定的通光口径超过直径的90%时,就要仔细检查倒角和镀膜引起的边缘干扰。

当确定镀膜的孔径时,要记住最大和最小尺寸。对于口径在10~100mm之间的元件,夹具边缘应向倒角内侧延伸1mm。如果需要一个更宽的无镀膜边界则需详细说明。此外,由于夹具边缘的膜层性能变化,应使镀膜孔径至少要比光学通光口径大1mm。

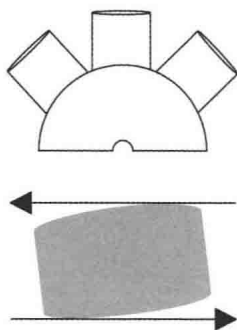


此外,有些棱镜的非斜面的内反射顶部边缘,是一个容易出问题和脆弱的区域。对顶部边缘角度精度的任何降低都会大大降低加工难度,缩短研制周期和压缩成本。

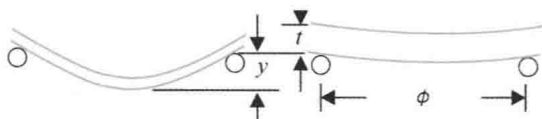
为了保持高斯和近高斯相干光束,通光口径必须至少是束腰直径的1.5倍。

三、元件厚度与加工工艺的关系

通常情况下,较厚的元件相对于薄的元件更容易加工,但边缘非常厚的凸透镜(由于存在稀疏的块状填充物)和双面研磨(研磨盘之间存在相互震动)的厚平元件除外。



增加厚度可以更好地散发加工热量,并以更大刚度抵抗来自加工、上盘和搬运过程中产生的应力。对于精密光学元件,常用的经验法则是把长宽比(ϕ/t)为 8 : 1 处定义为“曲线拐点”。



当边缘得到支撑时,一个给定直径的圆盘的偏离程度与所受压力成正比,与其厚度的立方成反比。

当加工薄元件时,下面几种上盘方法可使应力最小化:

- 对于作用力较小且角度公差在几弧分以上的零件可采用沥青上盘。

- 在蜡胶上盘前,在元件背面贴上电工胶带可以降低应力并更易控制角度和厚度。

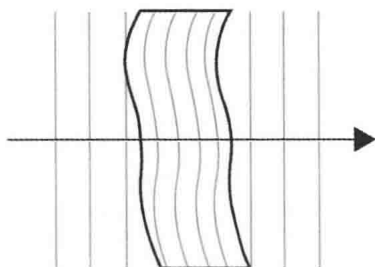
- 通过把薄元件连接到一个坚硬的基板上,光胶可以达到亚弧秒的角度公差和亚微米的厚度控制。

- 双面加工不仅无须上盘,还可以生产出高度平行且规格一致的光学元件,但得到的光学元件可能不是平面。

四、平面度与透射波前的关系

在实用商业干涉仪问世之前,将一个窗口的两个表面与一个参考平面进行比较,要比直接测量该窗口的透射波前变形(TWD或TWF)容易得多。然而,制造并保持薄片两面的平面度却并非易事。

上盘或镀膜应力会使元件产生一定的弯曲,该应力可以从抛光精磨表面(见泰曼效应)甚至在检测或安装的简单装夹中释放出来。



窗口用于透射光波时,薄片弯曲和弯曲度对于透射波前变形(TWD)的影响可以忽略,尤其对很薄的薄片。除非是对表面反射质量有功能要求,TWD是窗口的首选指标。

当固体标准具厚度严格一致时,它们可以承受的弯曲变形要比厚度各异的元件更多。对于窗口和固体标准具,尤其是对薄元件,TWD更是必要的技术参数。

有限半径的透镜存在半径公差,常为多个条纹,但是如果半径无穷大,则没有半径公差。通常,一个平晶表面用总峰谷值(PV)来表示表面形状误差,由此建立更严格的曲率公差。

如同在球面中一样,允许平晶透镜表面存在一个合理的公差可以节省大量的成本和工作量。正如 W. J. 史密斯所说,“……如果在一个系统对所有半径建立一个统一的公差,则这个统一的公差应该针对曲率而不是半径”。^[2]