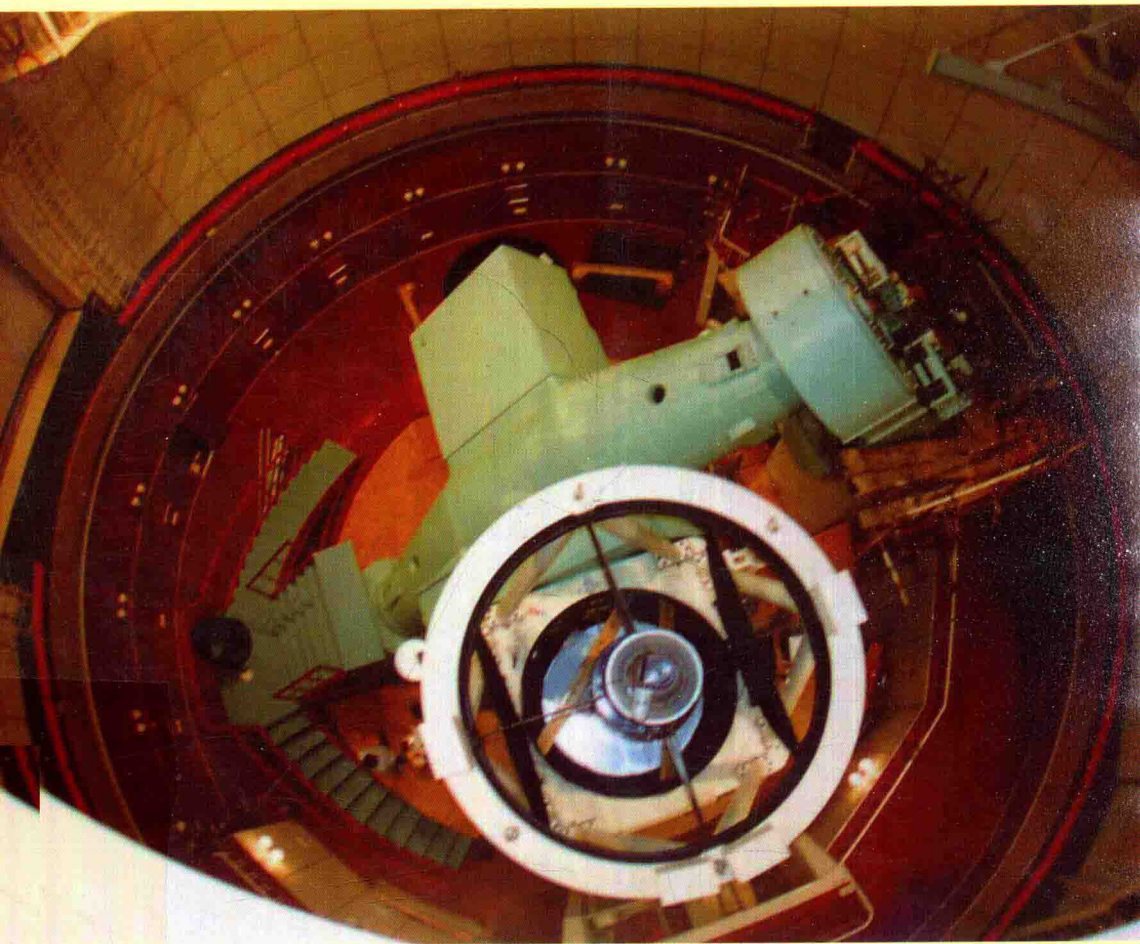


中国科学院国家天文台
天体物理技术与方法丛书

天文光学非球面技术和 系统调整

李德培◎著



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

中国科学院国家天文台天体物理技术与方法丛书

天文光学非球面技术和系统调整

李德培 著



中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

天文光学非球面技术和系统调整/李德培著. —北京:
中国科学技术出版社, 2015. 2

(中国科学院国家天文台天体物理技术与方法丛书)

ISBN 978-7-5046-6821-9

I. ①天… II. ①李… III. ①天文光学

IV. ①P1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 228587 号

责任编辑 赵 晖 夏凤金

封面设计 杜 宇

版式设计 世纪佳想

责任校对 赵丽英

责任印制 张建农

出 版	中国科学技术出版社
发 行	中国科学技术出版社发行部
地 址	北京市海淀区中关村南大街 16 号
邮 编	100081
发行电话	010-62103130
传 真	010-62173081
投稿电话	010-62103352
网 址	http://www.cspbooks.com.cn

开 本	720mm × 1000mm	1/16
字 数	450 千字	
印 张	24.5	
版 次	2017 年 1 月第 1 版	
印 次	2017 年 1 月第 1 次印刷	
印 刷	北京玥实印刷有限公司	

书 号	ISBN 978-7-5046-6821-9/P · 190
定 价	87.00 元

如有缺页、倒页、脱页, 请联系本社发行部调换

中国科学院国家天文台天体物理技术与方法丛书

编 委 会

主 编：苏定强

副主编：崔向群

编 委（按姓氏笔画排序）：

王兰娟 甘为群 叶彬浔

南仁东 阎保平

《天体物理技术与方法丛书》序

除了太阳系内的天体，过去和现在人类都无法到达那里，对它们的研究是通过望远镜的观测进行的，望远镜的使用开创了现代天文学，为了纪念1609年伽利略开始用望远镜观测天体400年，2009年被定为国际天文年。望远镜口径越大收集的光越多，衍射限制的分辨率也越高。400年来不仅望远镜的口径越做越大，而且在技术和方法方面有一系列重大的进展：从单纯观测天体的像，发展到观测天体的光谱（多色测光相当于低分辨光谱），它可以使我们了解天体的化学成分、物理状态、视向速度，这是天体物理学研究最重要的手段。以光谱观测为主，发展了多种的终端仪器。对天体辐射的接收由肉眼发展到底片，近三十多年又发展到CCD，它的量子效率比底片高得多。上世纪80年代发展的主动光学，使光学红外望远镜的口径突破了5~6米，增大到上世纪90年代的8~10米，现正在向30~40米迈进。还发展了自适应光学、斑点干涉和光干涉等高分辨技术。1931年央斯基发现了来自天体的无线电波，第二次世界大战后射电望远镜包括综合孔径、甚长基线干涉仪（VLBI）、接收机技术，以至整个射电天文学蓬勃发展起来了。1957年苏联成功发射了第一颗人造卫星，此后望远镜又从地面发展到空间，波段又从可见光、一些红外窗口和射电发展到整个电磁波段，特别是X、 γ 波段对高能天体物理学研究有重要意义。除电磁波外，对来自天体的宇宙线（多种粒子）的探测和研究也是天体物理学的重要内容。还应当指出，利用气球和火箭的观测也取得了一些重大成果。对以上各种观测得到的数据要做许多处理，为此发展了相应的方法和软件。各波段巡天和其他观测所得到的数据量是极大的，将它们处理、归档放到网上，就相当于在网上建立了一个天文台，这就是虚拟天文台。天文望远镜和技术、方法是天体物理学研究的基础。

上世纪50年代以来，中国研制了多个望远镜和仪器，对多种天文技术和方法作了研究，这些工作是在十分困难的条件下进行的，改革开放前，绝大多数科技人员没有读研究生和出国学习的机会，当然改革开

放后情况是完全变了，不过经费仍然是很少的，只是到了近十年才有了较大的增加，我国的科技人员和工人就是凭着为了科学和民族的振兴在这些领域取得了多项成果，并有不少创新。这里仅举一个近的例子：2008 年建成的大天区面积多目标光纤光谱望远镜（LAMOST），就是我国创新的、世界上口径最大的大视场望远镜，配有 4000 根光纤和 16 台光谱仪，这样大规模的有缝光谱巡天是空前的，当前世界上好几个项目也正在计划沿着这个方向去做。通过 LAMOST 的研制，我国掌握并发展了大望远镜的关键技术——主动光学，基本上具备了研制 30 米级光学红外望远镜的能力。

本丛书的作者都是这三五十年来在我国天文望远镜和技术、方法领域中做了很多工作的专家，丛书最大的特点是大多数作者在书中包括了很多本人和合作者的研究和工作成果，并有许多实例。不过，本丛书各本的情况也是有区别的，有的包括了作者参与的直到当前最前沿的工作，也有的由于作者年龄较高，参与的工作较早，国内外的最新进展包含得较少，另外，本丛书未能包括以上提到的天文望远镜、技术和方法的所有方面，这些是不足的地方。

最后，要感谢各位作者将自己的知识和心得无保留地奉献给了读者，感谢崔向群副主编实际上对本丛书做的大量的组织工作，也向做了很多具体工作的林素女士表示感谢。

苏定强

2012 年 6 月

前 言

本书是笔者多年来为科技人员、技术工人、研究生讲课的讲义及逐年发表过的文章，经笔者进一步整理、补充、删节而成的。众所周知，对于一些“敏感课题”及“涉密范畴”的内容，暂时不能公开收录。对于有些只适合身教，而不适合言传的，也未写入。本书内容多是诸篇著作的汇总、串连。具体篇名列于每章末的参考文献，它们阐述得比较详尽。

初稿的第五章请陶春先生根据笔者1972年的油印本及图，完成了打印稿。其余均为笔者2004年起为了有针对性地学习Word、AutoCAD、PhotoShop等，自己边撰写、边整理、边修改而完成。本书的绝大部分均为笔者50余年亲身经历的工作，或是笔者自己加工的记录；有的是笔者组织的项目，经本车间众多工人、技术人员实践而完成，可以说都是第一手材料，可以直接拿来应用。本书稿偏重于实际操作能力的提高及寻求解决具体问题的办法。

有关光学方面的理论著述及工艺方面的最新近展，如离子束抛光技术、磁流变抛光技术、应力盘抛光技术等可以从众多国内外文献中找到。

笔者认为应重视技术传承问题，工作人员应该了解本单位（或本领域）在以往的工作中，哪些是成功的，哪些是有缺陷的，走过哪些弯路。我们应该吸取成功的经验，避免失败的教训或缺点的重演，只有这样才能发挥群体力量，体现单位的实力。否则只是体现个人水平，可能又再重复前人走过的老路。可前人后来已经改正了缺陷，为什么我们不关注呢？因此“传承与创新”、“传承与发展”及“质量与效益”之间的关系，是值得关注的！本书部分地涉及了这些内容。譬如笔者一直认为：设计人员在设计磨镜机前，要亲自参加磨制工作（如两个月），征求各方面意见后，再实际绘制整体工作总图，征求意见，定稿。否则只从机械设计看，可能

是无可挑剔；但从光学工艺看不实用，会犯低级错误！因为设计人员没有掌握特殊矛盾。设计天文望远镜也是一样，要有用它的经历，这些都值得借鉴。

光学加工有很多题材，对于不是笔者亲身经历过的，就没有介绍，请见谅。应同事们的要求与催促，希望为单位留下一些可供参考的资料。笔者从2004年起就着手边学习软件的应用边整理，直至2008年才完成初稿。整理时才发现以前对资料的积累不够重视，很多都找不到了，照片也没有，这是教训。希望同事们每完成一件工作，都要有一个小结，记取经验与教训！

本书介绍了各种常用光学非球面的原理、加工、检验方法及检测装置，这些都是笔者参加工作以来，经过实践的经验总结，顺便也提到了与检验有关的设计问题、装备问题及对图纸的合理要求。因此，还可看出技术传承的重要性。

对于新参加工作的技术人员、技术工人、基层领导干部有极好的应用及参考价值，使他们能各取所需，可以少走弯路，利用成熟的经验直接指导生产，提高工作效率。对于已有一定生产规模的单位，更可以从中总结出适用的生产工艺路线、装调步骤，改善设备、提高质量、更合理地完成产品的制造，创造更多价值。对于从事这一领域的教学人员，由于教学关系，他们较少参加生产实践，本书是个很好的补充。对于专业教材的改进有很大帮助，使学生在走出校门之前对非球面就有个全面了解。

本书介绍的是基础知识，对于从事天文工作的专业人员，特别是使用望远镜的技术人员更是不可少的参考资料。书中90%以上为本人的实践经验与结果，或本人组织、负责研制的项目，写出了应关注的重点。偏重于动手实践，是笔者亲自加工得出的结论，写出的心得体会，很多都是开创性的工作，为新一代工作人员指出了工作方法与如何搞好科研工作的途径，为以后开创新工艺的研究打下基础。

随着科技的发展，各类非球面的研制、需求被提到日程上来，各种新的工艺方法正在世界很多国家的各科研单位研制中。因此，普及光学非球面的加工、检验、装调成为当务之急。本书稿的目的之一就是使大批有关

人员少走弯路，尽快掌握这一领域的基础知识。最后介绍了几个典型的天文仪器的装调方法，供有关机械设计人员、装调人参考。本书把理论部分放在附录中，有需要时可以参考。

初稿得到原天文光学技术研究所所长崔向群研究员（她于2009年当选为中国科学院院士）的肯定。又请陈小莲、左恒等同学协助排版，改画了一些图，刊印后发给了同事们应用、审阅，陆续收到了一些意见及建议。因此笔者又于2010年初根据大家的提醒及建议进行了修改，除发现一些笔误外，又加入了一些补充内容及照片，使其更加完善。书后又续写了附录，供有兴趣者参考，如果工作需要可以翻出来看看，知道公式的来源及检验的原理，这也是理论基础。笔者推导、录入公式时，花了不少时间，对每段都进行了仔细的核对。还简要介绍了各类代表性仪器的装调方法，写出了它们的特殊点，可供机械设计人员、装调人员参考。书中所有照片除署名者外均为笔者所摄。对引用的部分均注出了出处。

由于笔者才疏学浅，有些观点不见得正确，仅供参考。书稿虽经笔者进一步核对，错误在所难免，不当之处请予指正！

本书能够顺利出版，提供给读者参考，得到了中国科学院国家天文台天文光学技术研究所和南京中科天仪有限公司各级领导的允诺、鼓励与支持，给予足够的时间用于整理及写作。当然更要感谢出版社的全力支持，使得本书才能问世。

目 录

第一章 光学材料及常用辅料	1
一、反射镜镜坯材料的主要要求	1
二、反射镜镜坯材料	2
三、对折射材料的要求	14
四、常用主要辅料简介	15
第二章 非球面、常用非球面及其系统的光学性质	22
一、非球面分类	22
二、非球面应用几例	22
三、常用非球面及其系统的光学性质	24
第三章 二次曲线旋转面的数学表达式及其有关问题	36
一、三维坐标及二维坐标的表达式	36
二、二次曲线法线的性质	37
三、最接近比较球面 (the best fit sphere)	39
四、非球面度的有关问题	41
五、有中孔的凹非球面	44
六、离轴非球面镜	47
第四章 二次曲线旋转面加工综述及球面 R 的测量	50
一、镜坯的粗磨	50
二、较大型镜坯的粗磨成形要用到大型专用设备	50
三、中小型镜面精 (细) 磨及抛光修磨	57
四、球面镜曲率半径的测量	74
五、斯图尔德天文台镜面室的工作	82
六、光学工艺的最新方法	83

第五章 刀口阴影检验	88
一、阴影检验特点概述	88
二、阴影检验法原理	89
三、阴影仪（刀口仪）简介	97
四、一种新型刀口阴影仪光源及刀口的研制	99
五、平面镜的瑞奇－康蒙（Ritchey－Common）检验法	104
六、各种非球面的检验	107
七、常用光学系统检验	117
八、阴影检验在选择光学材料及其他方面的应用	124
九、一些具体问题及措施	127
十、用化学法在镜面上镀银（Brashear 法）	135
第六章 自制的干涉检验仪器	140
一、平面干涉仪	140
二、激光球波面干涉仪	144
三、简易激光干涉仪	150
第七章 各种常用光学元件、光学系统的加工及检验	152
一、双分离物镜的加工	152
二、消球差单透镜的加工	168
三、施密特改正透镜的加工	175
四、马克苏托夫弯月镜的加工	183
五、平面镜、平行平晶、薄平面、锥体棱镜（合作目标）成对的加工检验	185
六、离轴抛物面的加工与检验	199
七、X 光透视摄影机	207
八、大屏幕投影电视机	209
九、红外测温仪	209
十、通光口径 2.16m 天文望远镜光学系统的加工与检验	210
十一、口径 1.05m 卡氏望远镜光学系统的加工	213
十二、大型天文光学镜面在磨镜机上的一种检测方案探讨	216

第八章 常用补偿检验法	223
一、马克苏托夫补偿检验法简介	223
二、奥夫纳补偿器	226
三、凸副镜的检验	228
四、扁球面的检验	240
第九章 光学系统调整基础及常用工具	247
一、常用光学零件的光轴调校	247
二、常用光学调整工具	248
三、光学调校的基本问题	254
四、天文望远镜光学系统通用调整方法	259
五、对于小型望远镜进行比较严格的批量调校	262
第十章 几个典型的光学系统调整方法实例	271
一、口径 60cm 中间试验望远镜光学系统的调整	271
二、HC-1 型人造卫星摄影机光学系统调校简述及四轴零点的 确定	276
三、多通道太阳望远镜光学系统调整原理与步骤简述	283
四、西班牙两台望远镜的光学调整	289
五、通光口径 2.16m 天文望远镜光学调整方法	295
六、 $\phi 65\text{cm}$ 水平式空间碎片望远镜光学系统调整	307
七、两台施密特光学系统调整方案与步骤	311
八、1/1.2/1.8m 近地天体施密特望远镜光学系统调整方法	315
附录 A 哈特曼 (Hartmann) 检验法	328
附录 B 球面及非球面基本公式的推导	345
附录 C 平面镜基本公式的推导	363

第一章 光学材料及常用辅料

说明：在光学天文望远镜中，少不了光学镜头，它们有的是折射镜，有的是反射镜。前者光线要穿过光学玻璃，后者光线只是从光学元件表面（镜面）反射，不穿过元件。所以对这二者有不同的要求。作为大型天文望远镜，由于口径大，只能用反射镜镜坯。

一、反射镜镜坯材料的主要要求^{[1],[8]}

在镀层表面对光线进行反射，并可作镜坯的材料称为反射镜镜坯材料。在选用反射镜镜坯材料时，应注意以下问题。

(1) 反射镜坯对材料内部透射无要求，只是靠近表面的某一深度层，要满足一定的光学条件及力学条件。所以，通体重量愈轻愈好。

(2) 微观结构好，抛光后可镀反光膜，表面散射光愈少愈好。

(3) 长期稳定性要好，否则抛修好的镜面，将随着时间的推移发生变形。

(4) 线膨胀系数 α 的值要小，且各处、各方向均匀一致，这样便于加工、检验及应用。

(5) 比刚度 E/ρ （杨氏模量/比重）要足够大，使由镜面受力后产生的变形较小，有利于镜子的轻量化，适合于制造大而轻的镜坯。如 SiC 就是较理想的材料。

(6) 有时 α 虽不理想，但材料的热导率高，有温差时很快能使镜坯通体温度平衡，也是有利的。

(7) 良好的化学稳定性：抗酸、碱、潮湿大气等的性能好，镜面在应用时能较少受环境的影响。

(8) 可精测内部应力，应力均匀性要好，应力值愈小愈好。

1) 应力均匀性的表示。光线透过有应力的玻璃时会形成双折射, 用穿过 1cm 厚材料时寻常光与非常光产生的光程差值代表应力的大小。若应力双折射最大值与最小值分别为 M 与 m , 则应力均匀性 K 为:

$$K = [(M - m) / M] \times 100\%,$$

显然 K 值愈小, 应力均匀性愈好。

2) 应力的计算。对于一块 K9 玻璃, 设光线传播方向垂直于应力方向, 假设经测定应力双折射引起的光程差为 7 nm/cm, 则此块玻璃单向应力值为:

$$F = 7 \text{ (nm/cm)} / 2.65 \text{ (nm} \cdot \text{cm/kg)} = 2.6 \text{ kg/cm}^2$$

式中 2.65 是与玻璃品种有关的常数 (如: QK2 为 3.5、ZF2 为 2.2 等)。

(9) 要能耐电子、质子、宇宙线等的辐射, 这一点对于航空、航天类的仪器显得尤为重要。微晶玻璃似乎就不理想!

(10) 镜面可以加工成型, 硬度均匀一致, 否则极易产生不规则的地区差。

二、反射镜镜坯材料^[2]

1. 玻璃

(1) 普通玻璃: 如硬质玻璃。

(2) 光学玻璃: 一般用 K9、K4、QK2, 在温度范围 (20 ~ 120℃) 下, 它们的 α 值分别为 $76 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$, $49 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$, $35 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ 。

2. 金属

(1) 不锈钢。不锈钢表面可直接细磨、抛光, 图 1-1 左上为抛光好的平面镜, 右上为已经抛光好的球面镜, 下面为未磨制的毛坯。

(2) 铜镜 (青铜)。铜合金表面也可直接细磨、抛光, 但比较软。如古代铜镜。也可在其表面镀镍后, 再细磨、抛光。

(3) 铝。若用铝材作镜面, 如何解决其散射光成为一个关键问题。铝热膨胀系数大, 若在铝镜上镀铜、镀镍再细磨、抛光, 要注意镀层厚度, 因为这三种金属的膨胀系数不同。

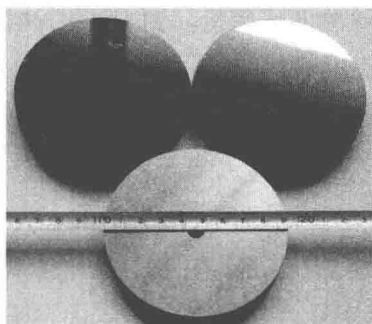


图 1-1 不锈钢镜坯

(4) 钼。钼也可以细磨、抛光。

(5) 铍。据介绍价格非常昂贵，且粉尘有剧毒！除非具有专业的防护措施，不要轻易碰它，以防患上严重的慢性肺病或癌症！这种材质是航天设备的首选材料，已用作航天支架及红外空间望远镜镜坯。有的单位在铍镜坯表面上镀镍，然后抛光镍层，成为镜面。但要注意用抹布擦拭铍镜基体时要戴防护手套。一般常用真空复制法得到镜面。近年来发现在低温下，它的各向异性，是值得注意的问题！

3. 碳纤维

是把碳的纤维按一定顺序排列，用环氧树脂作为黏合剂一层一层胶起来的实体。因为质轻牢固，常被用于航天仪器上。

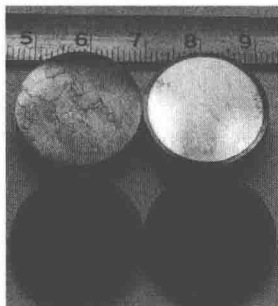


图 1-2 碳纤维镜坯

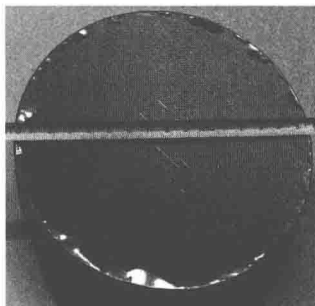


图 1-3 碳纤维结构明显

图 1-2 左上是经细磨抛光后的未镀铝；右上已镀铝；下为未加工的毛坯。可看出表面已磨出了纤维纹络。图 1-3 就更明显了，这是一块口径近

160mm、曲率半径约 1m 的凹球面镜，表面纤维结构很明显，它不能做镜面用。看来在制造过程中，要在各个方向铺设纤维，解决各向异性问题。磨穿的纤维纹络还是无法解决。

4. 熔融石英^[3]

根据生产方法可分为以下几种：

(1) 真空电阻炉法：把连云港产的东海一级水晶料（公认是比较好的优质料）碎块，放入水中，人工挑选，将有杂质的剔除后，放入氢氟酸中浸泡。此时水晶变为不透明的大理石状，再放入水中挑选，然后粉碎成约为 0.03mm 直径的颗粒，装瓶待用。

将石墨料车制成圆柱形容器状，或将石墨板制成方形容器状，加入装瓶待用的料至一定厚度，将它们放入真空电阻炉中加温，边加温边抽真空，在小颗粒熔化的过程中，它们之间的空气被抽走，料层的厚度减小成凝块、成型，经过热处理后出炉，此产品可用于反射镜。由于内部存在颗粒状结构，若作为透镜，因存在散射光，不适用于做天文透镜（图 1-4）。

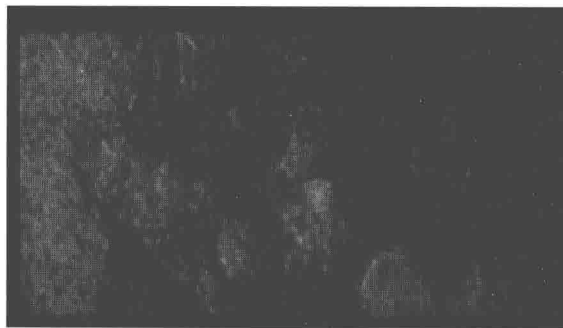


图 1-4 熔融石英颗粒状结构

(2) 固体气炼法：在一个类似车床的装置上，夹住一块原石英棒料旋转，用氢氧焰焊接，边加温边将瓶料滴漏下来，同时氢氧焰就把这些颗粒焊接到了石英棒料上，随着石英棒料的后退，就可以得到圆柱状的石英坯料，其直径受旋转装置的限制，若想得到大直径坯料，就要把所得圆柱料再次热压成大直径薄坯料。

从生产过程看，可以想象出会产生旋转性缺陷，这种产品内部除有颗

粒状结构外还有旋转条纹（见图 1-5），显然它也不可能用做折射光学材料。图 1-6 为更严重的旋转条纹。

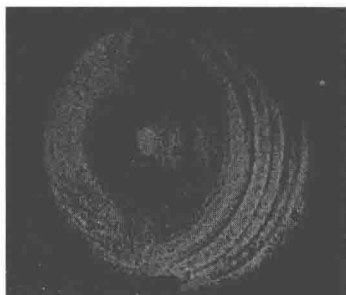


图 1-5 石英坯料内部旋转条纹



图 1-6 石英坯料严重旋转条纹

（3）氢气鼓泡带料法：将 TiCl_4 ， SiCl_4 通过一定蒸汽压力的氢气，用鼓泡带料法，将此气相混合料从燃烧器中心喷出，在高温下水解，形成均匀的 TiO_2 ， SiO_2 二元组分玻璃。虽然也是像固体气炼法装置那样“焊接”，但这种工艺方法生产出来的产品看不到颗粒状结构及旋转条纹（见图 1-7）。由于我们需要口径为 320 mm 的坯料^[3]，所以还要把长的圆柱料热压成大口径的毛坯。当时是从上海吴泾砖瓦厂拿到的坯料，请北京建材院压制。

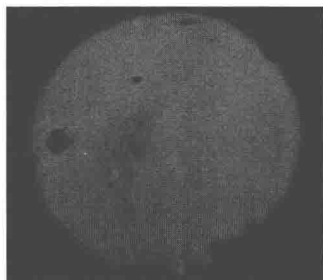


图 1-7 TiO_2 ， SiO_2 二元组分玻璃

要注意的是，当压型时下面要用一块整钢板垫底，绝不能用两块拼接，否则接缝会影响熔石英内部密度，造成不均匀“条纹”（图 1-8）。我们虽然把每块玻璃的两面都磨平了，可是内部密度还是不一致。