

第十六章 透镜工艺装备

透镜的制造起源于古代。公元前 1200 年就在特洛伊和埃及发现用天然石英做成的透镜。1897 年 AG 克勒克与芝加哥大学协作制造了研究天文用的直径大到 40in 的物镜。这架望远镜装在威斯康新州威廉斯湾的耶克斯天文台上。一旦 40in 物镜修磨成功，克勒克就打算加工另一块 60in 物镜，但是一直未能获得成功。1896 年法国制造成功 50in 物镜，并在巴黎的世界博览会上展出，水平安装在展厅里。月亮与星星发出的光线经反射镜射入物镜。但是它从未公开露面，只有法国政府才知道它的用途。克勒克与他的同事采用了三种有意义的测试法：第一，他们利用一颗星星作光源，按刀口法调节赤道仪内的透镜；第二，在大约 75m 长的地下隧道里设计了一颗人造卫星；第三，他们研制了一台带有一块大的镀银光学平面的自准直光学装置，它可以将修磨的不规则误差放大一倍。

对初学者来说，透镜加工方法，大概限于 10 种左右，例如使用玻璃研磨磨具、样板来控制半径和抛光面质量等。这里不讨论先进的压模透镜毛坯大批量生产的方法，这种方法需要 5 只金刚石球面磨具和装在精密磨具里的透镜，透镜的研磨与抛光速度很快，只要 6~8min。

本章所述的方法已经沿用了 100 多年，而金刚石的铣磨则开始于 1914 年。但当试制新型仪器时，仍须采用这些传统工艺来加工透镜。

1. 锯料与滚圆

大于 8in 的透镜毛坯应该用第四章介绍的方法检验其均匀性。如果在较大的毛坯上用金刚石锯切小透镜，则应该先画出可以切割的小圆透镜数目，并留出足

够的锯切与滚圆余量。按照所画圆的形状切去多余部分形成八面体—减少滚圆时间。

具有接近完工直径的玻璃毛坯比大于该的片料玻璃要便宜得多。毛坯的滚圆直径尺寸须比车间蓝图所要求的尺寸大 0.8in。

玻璃毛坯的粗磨成型及滚圆工序决定于车间现有的设备。现代的斯德雷斯巴铣磨机是用真空吸盘装置（见第二章）进行磨圆及铣磨的。另一种方法是将已切割成八角形的毛坯先铣磨出两个球面，然后再磨圆。这种方法可以消除两个铣磨球面间明显的楔角。如果玻璃毛坯不易于定中心，使两个球面间会产生大的楔角。

第三种方法是用两个精密制造的薄的铜夹头，其外圆与螺孔同心。在加热板上预热八面体或圆形玻璃毛坯，加热板与金属基体间垫一张白色毛巾纸，不要使温度过高而烧焦毛巾纸。手应保持干燥，决不允许水或潮湿的手指接触热的玻璃。火石玻璃对热的波动性晚牌玻璃更敏感。

把带有金属螺栓的木柄插入凹槽夹具，用本生灯加热铜夹具，并在其里外四周涂以粘结沥青（见图 16.1）。藉助一块新的毛巾纸拿起加热的玻璃毛坯，并放在另一块毛巾纸上，然后把加热的铜夹头放在八角形毛坯的中心区域，用小尺定好中心并且用铅笔作上记号以便检验这时加过热的铜夹头很易被移动，必须在粘结夹头四周涂匀一圈沥青胶。如果不均匀，则再加一些热沥青胶。然后加热铜头，使夹头与玻璃边缘间的沥青胶流动，藉助于毛细管作用使胶渗到玻璃表面上。另外应有三只使玻璃零件初步定中心用的夹头，以便一只镜盘在冷却时，就可以粘结另一只透镜。

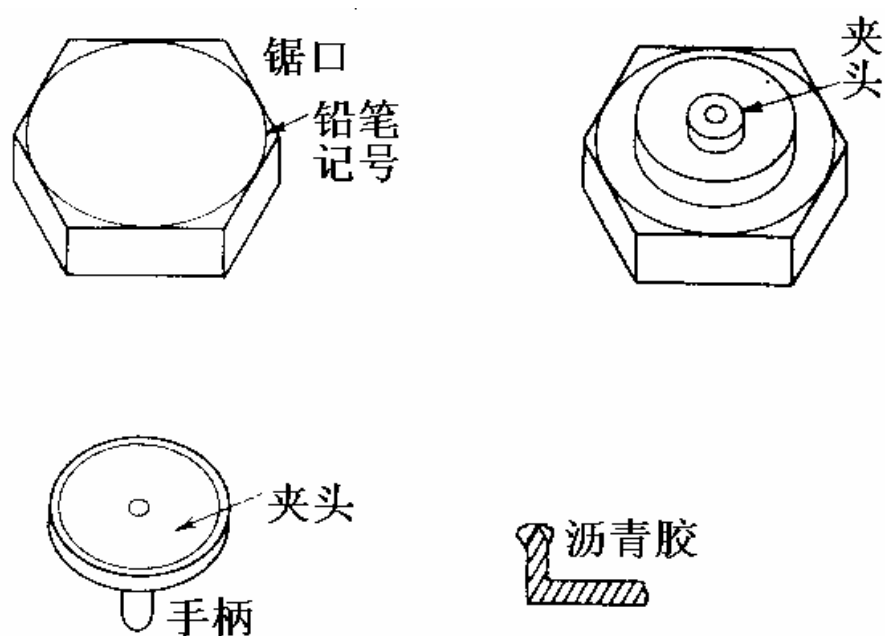


图 16.1 锯切玻璃毛坯，胶上夹头，以便磨圆与铣磨成型

胶结夹头前，加热玻璃毛坯及夹头

2. 初步磨圆

八角形的毛坯磨圆比圆毛坯磨圆更为困难，因为八角形毛坯有不均匀的边缘。开始磨边时玻璃毛坯要慢慢手动进给，直到听见旋转的金刚石砂轮第一次碰到玻璃毛坯的咔嚓声为止。如果进刀太快，刀与玻璃碰得太厉害，会使玻璃毛坯从铜夹头上掉下来。

在自动进给磨圆之前，将玻璃毛坯的横向走刀大小调到旋转磨轮的整个宽度。如果磨轮超出玻璃毛坯的任何一端，则当玻璃圆盘的移动超过进给的金刚石磨轮时会产生破边。走刀长度可用偏心臂（图 16.2）调整。为防玻璃从夹头上掉下而损坏玻璃零件，可在毛坯下的金属台面上放一橡皮垫。玻璃旋转时，用铅笔画一个圆来检验圆周的磨边情况。如果仍有铅笔记号存在，说明还未磨圆。用类似的方法将玻璃磨模铣削成形与磨圆。

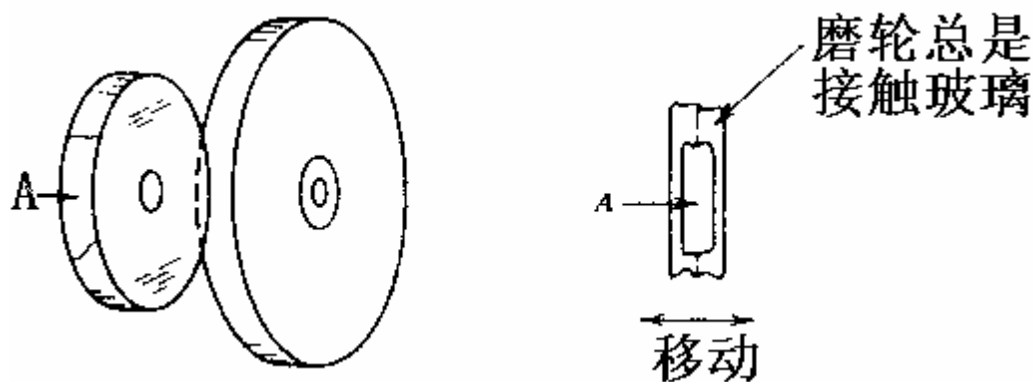


图 16.2 调整磨边机的偏心臂，使磨轮总是接触工件

3. 球面铣磨

虽然在第二章已讨论了玻璃表面的面形和要求半径铣磨成形的要点，但是没有讨论过加工方法。表 16.1 列出了铣磨机磨轮铣磨凹面或凸面时的倾角，这里给出计算倾角的公式：

$$\sin T = D / 2R$$

式中 T 是磨轮的倾角；D 为测量磨轮边缘的直径（凹球面用外直径；凸球面用内直径）；R 为要求的曲率半径。

表 16.1

		R 太深	R 太浅
凹面	磨轮	上轴	下轴
	透镜	下轴	上轴
凸面	磨轮	下轴	上轴
	透镜	上轴	下轴

斯德雷斯巴铣磨机的操作方法已在第二章叙述过，这里不再重复。

有两点必须特别注意：第一，球径仪百分表的半径读数与名义值的偏差必须

在 0.25mm 以内；第二，铣磨球面的第二面时必须控制球径仪读数与玻璃的厚度。通常在测量透镜厚度之前，将百分表上述方法（见图 16.3）仔细地铣磨好两个球面，一般透镜厚度比上公差大 0.008in 左右已经足够。

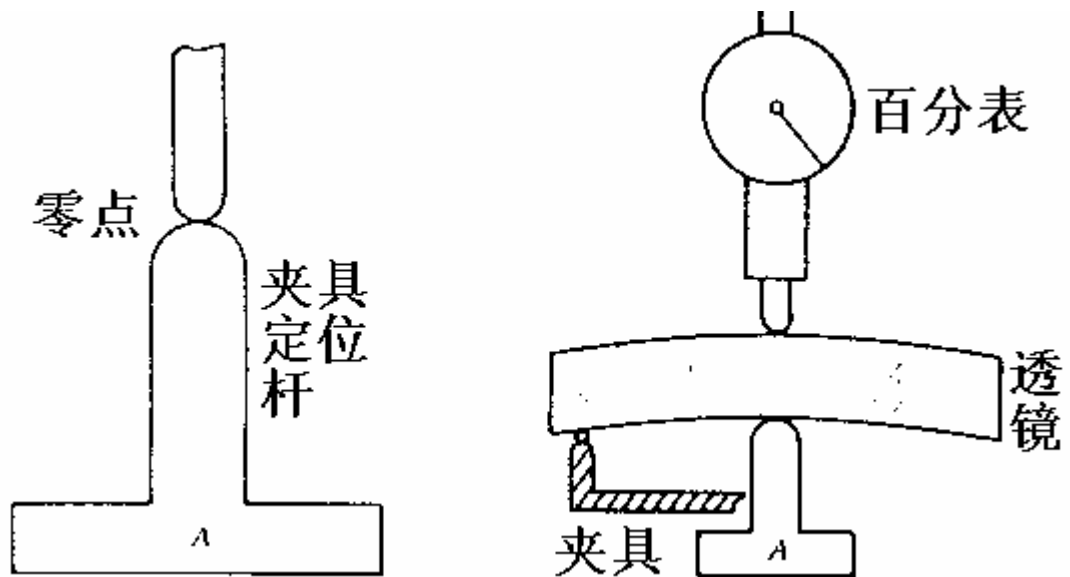


图 16.3 铣磨时检验透镜厚度的装置

铣磨第一面及磨圆后，将玻璃毛坯放在斯德雷斯巴铣磨机的真空夹头上仔细定中心，并用百分表测量真空吸盘上的玻璃毛坯。将玻璃圆盘在真空吸盘作几个方向运动，使其偏差为零，最后再定位并锁紧。定中完成后用类似的方法加工第二面。

玻璃磨具的每个面必须依次铣磨。有些初学者可能不理解为什么不用已经调整好的铣磨球面的位置来铣磨磨具。那是因为金刚石磨轮对相反的面形具有不同的倾斜角度之故。

4. 散粒磨料研磨

在用金刚石磨轮铣磨的透镜表面上可以看到很细的螺纹状纹路。根据加工装置的几何，这些表面实际上是一个椭球面，配置常出现中心凹包或中心凹陷，

如果透镜口径为 2in，一次只能加工一个透镜，铣磨机的痕迹一般可用 250 号砂磨掉。对于用激光光学零件，则需要除去约 0.008in 厚的玻璃层。这是因为金刚石磨轮的磨痕会从透镜表面 向内延伸，结果在电子线路中会引起电子噪声。小的透镜通常用沥青胶多片上盘，根据透镜直径的大小将三块、七块等透镜胶成一盘。图 16.4 表示透镜上盘的几种方法：第一种上盘的模具是制造一块相反面形的球面，并用蜡纸粘住细磨抛光的透镜。要注意用螺栓将相反面形的金属夹具固定在凸球面模上，并同样地细磨抛光球面。第二种方法是用沥青胶团将透镜固定在凸球面或凹球面模具上。这是一种传统的方法。

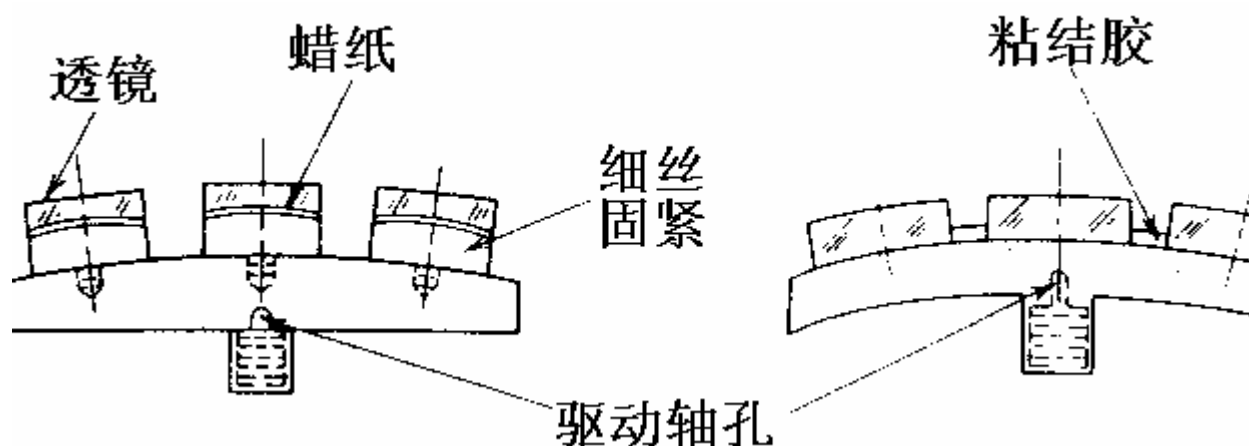


图 16.4 光学零件上盘的两种方法

加工大型零件时要检验透镜两个球面的平行度。将透镜放在按 120° 分开的三个球上，三个带塑料套的定位销起着止推支承作用。在透镜一侧边加压时，用百分表检验其偏心，用手工修磨透镜第一面的楔角，并在楔角的最高一端施加压力。加工时用垫以毛毡的铝夹具固定透镜，透镜四周绕两圈胶带纸。这样的镜盘也可以用于机器研磨与抛光。检验透镜的偏心夹具如图 16.5 所示。

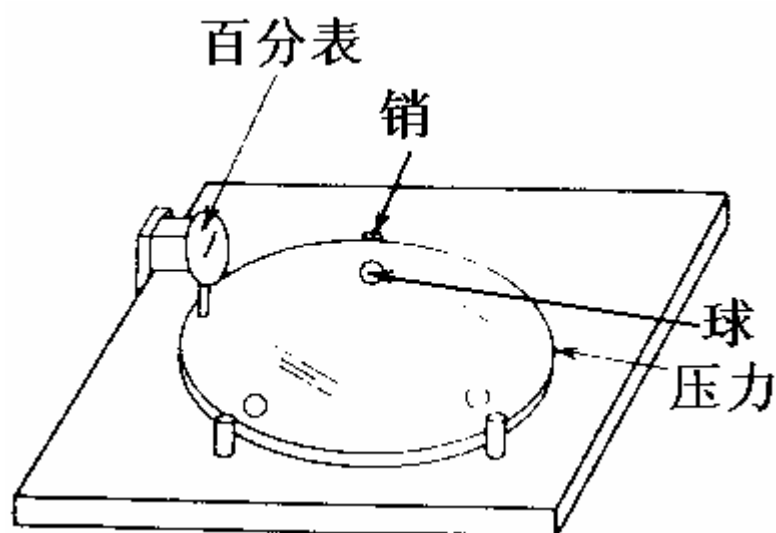


图 16.5 修磨光学零件平行度时的三球检验夹具

用散粒磨料研磨盘或单个透镜时要得到具有要求曲率半径的球面。在连续研磨中，细砂很难改变曲率半径，所以使用 95 号氧化铝金刚砂以前，145 号砂研磨以后必须达到球径仪的读数。依特克斯公司的 W.路普(Rupp)在 Applied Optics 1972 年 12 月号 2797~2817 发表的文章中已完整地报道了用细砂研磨球面的问题。散粒磨料研磨的光学表面可能达到 $1/8$ 波长。测试凹面反射镜的直径为 25cm，焦比为 $f/2.2$ 。用上磨模加工反射镜，磨模的随机动程（不对称）为 0~100mm；磨模转速为 30r/min；偏心臂转速为 5r/min。美国斯德雷斯巴公司制造了随机运动的研磨抛光机。早已发现，为了得到最佳的研磨效果，并不需要用先进的磨料悬浮液供给法使供给量为常量。在细磨表面上涂一层薄薄的石蜡，并用尼龙布抛光，则细磨的凹面镜可以实现罗契检验法。

研磨任何透镜到要求的曲率半径都需要上下轴交替研磨（见表 16.1）。当然面形太陡则球么仪读数太大，或大于要求的值；反之，表面太平坦则球径仪读数比要求值小。

注意凹磨模安装在上轴时，修磨深球面的方法，必须用手工进行，而不能用常规的机器研磨与抛光的）方法。这里不再讨论研磨时影响动程长度与速率的其它因素。按照正规的上下模位置（见表 16.1），用度动程的磨模可以将凹面和凸面修改成深球面。用表 16.1 说明其位置关系，快的动程修改浅的球面半径。无论速度与相对位置如何变化，修改深的球面零件总是很缓慢的。

5. 抛光磨具

如前所述，特别是对于深球面的透镜表面必须考虑铝球模的沥青胶厚度。图 16.6 表示制造单透镜时的夹持方法与特殊设计的胶模。图中螺栓孔里钻成可以与主轴连接或在机器的研磨与抛光时可以插入驱动凹坑。对于浅球面工件越接近工件越好，不要使抛光模与工件的斜度太大。

制作深凸球面和凹球面的抛光模不很容易。通常将抛光沥青胶冷却到粘稠状态，在热水中或用本生炉加热凹球模。将凸球模浸入沥青胶之前在金属模具上先涂一层薄的软蜡或松节油，然后在沥青胶中浸一段时间并稍冷，直到沥青胶达到 0.2in 厚。第二步是在镜盘上或单个大透镜上成型沥青胶。当不能用镜盘时，可以用其他有近似球面（ $\pm 0.04\text{in}$ ）的玻璃球模或铸铁模。另一个解决办法是在镜盘上垫以铝箔片。铝箔片用抛光粉浸湿，然后将热的粗成型的凸凸抛光模进一步成型。这层湿铝片很易从热沥青胶与镜盘间取下。制作大透镜样板时一般用玻璃磨模。沥青抛光模成型时，应将由于镜盘嵌入沥青而引起的凹坑烫平。

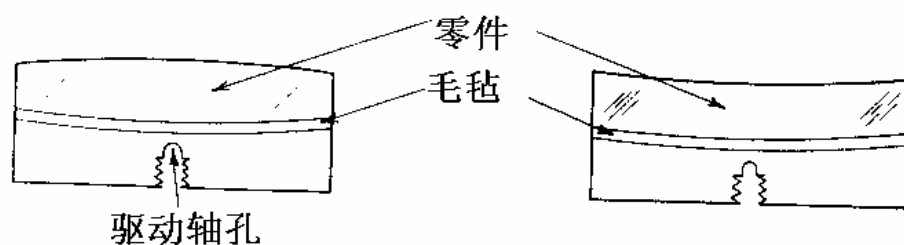


图 16.6 研磨抛光时，无应变增值持玻璃零件的透镜夹具设

计注意驱动轴放在靠近工件处易于将工件从抛光机的上轴换到下轴

下一步的操作是在抛光模上开出 1cm 见方的深方格槽。再将抛光模放在热水中加热，并用抛光操作烫平抛光模轮廓，直到表面均匀为止。然后再开一次槽，除去槽里的沥青胶。抛光模还应用尼龙布或金属线网压出方网格，从而制成了抛光凹面用的抛光模。

将沥青倒入凹槽中就可制作抛光凸面的抛光模，用接近理想面的模具或特殊的玻璃具成型，然后开出 0.4in 见方的格槽。透镜盘在底轴上旋转时，将抛光模加热使之成型。操作时应仔细，因为若镜盘太热，会使镜片走动而被破坏。在大量生产中，应用另外制作的球模成型抛光模。但无论采用哪种办法，用两道 95 号砂将镜盘重新磨一下是必要的。

6. 抛光

将抛光模在玻璃零件上抛一下，使表面吻合。首先用手试一下抛光情况，确定摆动时是否咬住，然后稍抛一段时间再检验一下粗抛光零件的外观，并用样板检验透镜的曲率半径。如果已磨得很仔细，并用电子球径仪检验过，则每快透镜应达到 2~3 个光圈以内（见第十五章）。如果透镜径样板检验是凹光圈，抛光模必须放在上面，并用度的动程；如果透镜是凸光圈，即使曲面半径增大，则可以用较短的动程，将镜盘放在主轴上进行抛光；如果由于抛光模与透镜接触太紧或太松，小球面在主轴上不易于加工，则必须改变透镜的动程与主轴的转速；如果用样板检验小镜盘的曲率半径时多于两个光圈，则最好重新磨砂，并用球径仪测量。当然，Accatron 电子球径仪读数更精确。以上是粗抛光时要检验透镜的主要原因。

如果透镜与样板吻合得很好，则继续抛光到符合要求为止，但在整个镜盘上很难加工到优于两个光圈（一个光圈为 0.5 波长）。

抛光几个小时以后，如果小方格槽已消失或者沟槽里填满了胶，则要重新修整抛光模。小球面零件经常是过凸（对样板），即使缩小动程与提高主轴转速也修正不过来。在这种情况下，可以将抛光模直径刮小到直径的 0.7，摆轴用短而快的动程。

按照一般规则，应在一整天内将透镜盘加工完毕。因为隔夜后透镜有变形的可能性，最好是前一天做好抛光模，第二天早上用 95 号砂镜盘重新磨一遍。

不均匀的抛光或单个零件镜盘和多只零件镜盘的横向走动会引起象散。用样板检验时发现马鞍形光圈或椭圆形光圈时，可以用下面几种方法修正象散。

- 1) 对马鞍形光圈，找到与样板最接近（较平坦）那部分带区，然后用手工抛光。抛光模在主轴上，转速为 50r/min，在两个较平坦的方向来回抛光镜盘。存在动程时，主轴可以不旋转（见图 4.2）。
- 2) 对椭圆形光圈，去掉所有附加的重量，提高抛光速度。
- 3) 由于玻璃表面与抛光模的紧密吻合，可能拖不动抛光模。这时应检验一下抛光模表面上的小方格是否仍然存在，如果消失了，则重新压制抛光模。

7. 检验

大多数初学者的困难是知道什么时候已经抛光好。大部分光学车间用 100W 白炽灯（现在已很少用）的暗箱观察灰斑，光道子及划痕，也可用磨砂灯泡。用棉花沾少量清洁液揩擦每块被检零件，观察者用 5*双目放大镜从中心扫描到边缘，

注意零件边缘处的灰斑（抛光不足的表面）。不走动的点可能就是砂眼（样板压痕）、灰斑或小气泡。也可以用氨基窗清洁剂观察反射象来检验表面。有许多操作者用手指来检验斑点，经常在零件的边缘发现许多聚集的干抛光粉和沥青胶，必须用丙酮将其擦掉。因为这些是不清洁的源泉。微粒落在光学表面上，就会嵌入沥青胶，检验未抛透的灰斑时，应用棉花渗些丙酮一遍又一遍地揩擦透镜。

在暗箱里装一只荧光灯用内眼检验未上盘的单个透镜的表面。

8. 再倒边与定心

加工完镜盘上透镜的一个面以后，在冷冻机或冰箱中冷冻一段短时间，使透镜与沥青胶或蜡纸脱开，用丙酮清洁零件，再检验倒角。如果要用 145 号砂和小的铸铁球模（凹）再倒一次角，则必须使倒角模的曲率半径小于球面零件的曲率半径。

在零件抛光表面与测量头之间垫一张透镜纸用分厘卡检验零件的厚度。

细磨与抛光透镜第二面的方法与第一面相同，第二面加工完毕后再检验一次透镜，然后用透镜纸包起来，准备下一上磨边。

为了去除两个表面间的斜楔，透镜需要定中心。透镜定中心至少有下列三种方法：定心的方法取决于现有的辅助设备和磨边机的型号。有的车间用老的定中心方法，即用粘结胶把透镜粘在小的铜夹头上定中心。夹头装在磨边机的主轴上，然后用木条移动透镜，直到 15ft (1ft=0.3m) 远的小光源的两个反射象重叠为止（见第二章）。

第二种方法是用可调换套筒。套筒交替地装在辅助设备与磨边机上。这是一种斯德雷斯巴方法，磨边变焦系统（见图 2.5）中的大、小透镜很方便。垫有透镜

纸的透镜胶在铜夹头上，透镜纸（保护抛光面）中心戳一个比铜夹头略小的洞。当透镜与夹头冷却到可以操作时，将夹头装在竖直放置的套筒上。同时使用下面两种方法定心：用百分表检验透镜端面的跳动；并用一只小的准直光源照明分划板的 20 $\times$ 显微镜找象定心，如果象保持不动，则偏心为零。这样的透镜就可以在磨边机上磨边了。当然，如果胶在铜夹头上的透镜的反射象摆动，则还要继续移动夹头上的透镜，继续定心。

第三种方法是用劳（LOH）厂或斯德雷斯巴套筒定中心（自动定中心），适用于小透镜（最大尺寸为 150mm）（参阅第二章）。这种自动定心机床有两个精密的钟形套筒中间，并藉助弹簧压力自动定好中心。对于大半径表面，机器要有特别大的主轴才能使透镜定好中心。这类机床可以在一个时间里同时完成几种操作。需要装配倒角的透镜，可以在一次操作中同时完成磨边与倒角。

9. 大量生产的方法

需要生产几千片或更多的透镜，诸如双筒望远镜、显微镜和大炮瞄准仪等光学观察仪器时，就要用特殊的方法生产。用热压毛坯与特殊的刚性夹具，用金刚石球面磨具铣磨球面，精磨透镜毛坯以后再进行抛光。用两种抛光材料——聚氨酯和 Transelco，在精确研磨过的球模上贴一层很薄（0.5mm 厚）的抛光材料就可以抛光。

高速抛光方法中一次抛光循环约 8~15min，然后用劳厂自动定心磨边机来定中心。

对于大量生产者，应买一套《光学车间手册》第一卷（Optical workshop notebook Vol. 1 J.B.豪斯顿（Houston）1974~1975 美国光学学会出版）。普鲁姆贝精密光学公

司的 J.L.普鲁姆贝 (Plummer) 介绍了现代化的大量生产方法。该手册语言通俗易懂, 适宜于初学者, 对光学工程师也有参考价值。

习题:

1. 抛光时产生象散表面的两个原因是什么?
2. 样板检验中如何用已抛光的凸样板检测与之相匹配的正在抛修中的凹样板?
3. 为确保抛光成完全抛光如何检验抛光面?
4. 叙述透镜上盘的一种方法。
5. 如何用细磨修正大透镜的偏心差?
6. 如何检验透镜的厚度?
7. 用斯德雷斯巴铣磨机铣磨透镜的第二面时, 如何定透镜的中心?
8. 叙述大球面透镜的定心法。
9. 柱面透镜能自动定中心吗?
10. 磨边时为什么需将磨轮全部磨到?

参考文献:

Ferson, F.B. and Lenart, P. "Lens Production," in Amateur Telescope Making, Book Three, A.G. Ingalls, Ed., Sci. Am., 163-199 (1953).

Horne, D.F. "Production of lenses in Quantity," in Optical Production Technology, Crane, Russak, New York, 1972, pp. 163-199.

Strong, J. "Laboratory Optical Work," in Procedures in Experimental Physics,

Prentice-Hall,Englewood Cliffs,NJ,1943,29-93.

Twyman,F. “Production of Lenses in Quantity,” in Prisms and Lens Making,Hilger and Watts,London,1952,pp.191-250.