文章编号:1002-1582(2001)06-0551-03

通光口径 2.16 m 天文望远镜凹双曲面主镜的磨制工艺

李德培

(中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所,江苏南京 210042)

摘 要: 2.16 m 光学望远镜是目前我国研制的口径最大的反射式天文望远镜,主镜通光口径为 2.16 m,边厚为 330 mm,重量约 2 200 kg,顶点曲率半径 R^0 = 12 960 mm,偏心率平方 e^2 = 1.095 134 7^[1],相对口径为 1/3,最大非球面度 $_{max}^0$ 21 µm。由于所用玻璃毛坯为原苏联制造,质量极差,通体充满气泡、结石、折叠,是块等外品。更致命的是磨出的 表面各处硬度不均匀,出现大面积、形状不规则的高、低区,不得不用手持小抛光盘进行手修,像雕刻一样去掉那些不规 则形状的硬的局部高,保留不规则的软的局部低(所谓修光程),并把它拼凑成一个较为接近的理想双曲面。可以想像得 出,这样做会遇到多麽大的困难。在大家的努力下,终于用手把它磨修到尽可能完善。最后望远镜在由该主镜、凸双曲 面副镜及熔石英像场改正镜组成的 R-C 卡塞格林 (Ritchey-Chretien Cassegrain)光学系统的焦面上拍摄了星团底片。经 鉴定委员会测试组专家测量后认为,在全视场(300 mm ×300 mm)内,不管是边、角还是中心像均很圆,暗星像直径达 0.18 mm。说明主镜的加工工艺是成功的,同时也说明凸双曲面副镜的加工、检验^[2],熔石英像场改正镜的设计^[1]、选料、加工^[3]及光学系统的调整^[4]也是成功的。

关 键 词:望远镜;天文望远镜;主镜;双曲面 中图分类号:TH706 **文献标识码**:A

The technology of the concave hyperbolic primary mirror of the effective aperture 2.16 m astronomical telescope

LI De-pei

(Nanjing Astronomical Instruments Research Center. Chinese Academy of Science, Nanjing 210042, China)

Abstract : The 2.16 m optical telescope is the largest astronomical reflecting telescope that we have researched and manufactured so far in China. The effective aperture of the primary mirror is 2.16 m, the edge thickness is 330 mm, the weight about 2.2 t, the vertex radius of curvature $R^0 = 12960 \text{ mm}^{[1]}$, the square of eccentricity $e^2 = 1.0951347$, the relative aperture 1/3 and the maximum aspheric departure ${}^0_{max} = 21 \,\mu\text{m}$. The optical blank was made in the late U. S. S. R. , the quality is very bad. The whole blank is full of bubbles, stones and fold. It is a substandard product. The fatal defect is the different hardness on the working surface that resulted in some large hollows with irregular shapes distributing on the surface after grinding. That forced us to use a small polishing tool to figure the surface by hand, something like carver to remove the high region and keep the low region unremoving (so-called figuring optical path difference). Finally turned it into a nearly ideal hyperbolic surface. You can imagine that a great difficulty it is ! We have been working hard using the hand of ordinary person to figure the surface as perfect as possible. Finally, at Ritchey-Chretien Cassegrain optical system 's (The optical system consists of the primary mirror, the second mirror and the fused quartz field corrector) focal plane takes a star cluster photograph. A member of the appraisement committee measured the linear size. In the whole field of view (30 ×30 cm) from center to edge and corner, the images are round. The diameters of dim stars are 0.18 mm. These show that the technology of primary mirror, the fabricate on and test of the second mirror^[2], the design of the fused quartz field corrector^[1], the select of the fused quartz material^[3] and its fabricating method, the alignment of the optical system^[4] are successful.

Key words: telescope; astronomical telescope; primary mirror; hyperbolic

1 粗磨成型(主镜结构见图 1)

原苏联 20 世纪 50 年代后期制造的主镜毛坯为 2 210~2 220 mm,厚度为 410~419 mm,重约 360 0 kg。提出定货后, 不到半年就运到中国,可见是库房内剩余的料,质量很差,是同时熔化了五埚,选其中三埚线膨胀系数 比较接近的浇铸而成,



* 收稿日期: 2001-05-22

作者简介:李德培(1933-),男,中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所研究员,主要从事大型军用光学和天文光学元件及其系统的加工、检验、装调、测量等方面的研究。

419mm,要减薄到 330 mm,采用了 350 mm ×25 mm 金刚石砂 轮 60[#]进行铣磨。砂轮线速度为 26 m/s,主轴转速为 1.4 r/ min。经试验认为,当进刀量为 1 mm 时,玻璃磨削量为 10 mm³/s 较安全,故以此为准计算,给出在不同直径处(线速不 同)砂轮进刀的速度值,并按表1进行操作。

表1 边距与进刀量

边距/mm	0	30	100	200	300	400	500	650	700	850	950	1000	1100
进刀量/ mm ·s ⁻¹	2.0	2.8	4.0	4.0	5.6	5.6	5.6	8.0	8.0	11.2	16.0	16.0	16.0

每磨一刀(即玻璃厚度去掉 1 mm),需要 3 h22 min,每班 8 h,约可磨 2 刀,最后共磨了 89 刀,用了约 60 个工作日。所用 冷却液代号为 741,它可使玻璃磨削量得到提高。现在看来这 种硬磨的办法不是好方案,它是把玻璃全部磨成了粉。以后遇 到毛坯厚的情况可用锯将多余的一片锯下来。

(2) 在背面画 18 个不通孔及中孔的初步位置。用划线法 定出 18 个不通孔的位置, 画出中孔范围。

(3) 用中孔内的玻璃做挖不通孔的工艺试验。

(4) 挖不通孔。不通孔直径为 170 mm。由于划线有误 差,故先挖成 130 mm,留出余量进行修正。同样,深度要求为 200 mm,也是挖到180 mm留有余量。平均每天可挖取一个不 通孔。方法是先用大小不同的、车制的套钻在玻璃上加金刚砂 套料,把不通孔部分分割成 70 mm 的中心柱及 110 mm 玻璃 套管(见图 2)。用 200 r/min 的转速,60[#]的金刚砂,用 2.5 h的 时间约可切深到 190 mm。然后用工具敲打,取去中心柱及玻璃 套管成 130 mm 的不通孔,待进一步精确修磨。

(5) 切中心孔。中孔直径要求 为 550 mm,也是要留有余量。用套 料工具以 87 r/min,60[#]砂和主轴转, 速 1.4 r/min,切成 530 mm,然后用 特制的行星运动磨头精确扩孔至公

差尺寸。 550 mm 的公差为 + 0.34

~ + 0.37 mm(配合面),这是因为行

11

图 2 在不通孔处先 切成中心柱及套管

星运动磨头砂轮上下运动有限磨不到底,还留了一段(非配合 面),等主镜翻身后再磨的缘故(见图3)。关于行星运动磨头参 看文献[5],这是为磨不通孔专门设计制造的。

(6) 用中孔定位。磨镜坯外圆 柱面及凹槽。磨好后的示意图如图 4所示。

首先用 350 mm ×25 mm、60[#] 金刚石砂轮磨柱面,用了11刀,磨 凹槽用了 29 刀,然后换用 350 m ×20 mm、120[#]树脂金刚石砂轮; 匀磨削。

(7) 精磨 18 个不通孔。前 面已提到 130 mm 不通孔位置 不准确,需要扩孔精磨。可分以 下几步:

右	I	
m	图 3 中孔下端未磨到	
均	翻身后再磨去	
	¢2197.6mm	

1

·				26 E
	1/,		- "	
Ý.	<i>\$</i> 2144.	.9mm	;	°а
1	1/1	00 //	-[:	ᅙᄇ
, } .		11 11		

用自制玻璃 24 面体定 不通孔方位。将24面体固定在

图 4 磨主镜外圆后的结果 特制支架上,并固定在玻璃中孔

内的主轴上,旋转24面体,使某面方向与任一不通孔方向重合。 首先主轴外脱离立式车床,放置自准直望远镜进行监测,然后将 24 面体与主轴固定,与毛坯无相对移动及转动,用 24 面体监测 磨制 18 个不通孔的方位,最后达到图纸所要求的角度公差 ±

用行星磨头扩孔并精磨配合柱面。所谓行星磨头就是 砂轮除本身自转外还能公转,公转半径可调。金刚石砂轮为 62 mm,60[#],8 000 r/min。先用行星磨头将与主轴对称的两个 不通孔上端精确磨成圆,测量两圆直径及两圆边缘的距离,可获 得两个不通孔的中心距离(磨完第一个不通孔上端后,借助于 24 面体监测,旋转主轴 180°,再磨对称的不通孔上端),然后用 此法校正中心距,最后满足图纸半径方向允差 ±0.3 mm 的要 求。扩孔直径与深度顺序如下:公转速度用 33.3 r/min,依次磨 170 mm × 20 mm, 155 mm × 70 mm, 151 mm × 100 mm,

149.5 mm ×185 mm,若遇到实心 处则换用 14.5 r/min 的速度,磨成 阶梯状。 140 mm ×200 mm 钻杆 的机动进刀为 0.533 mm/min,此时 玻璃最大磨削量为 24 mm³/s。用 规则的金刚石砂轮磨定位面,用树 脂砂轮修整、用废 SiC 砂轮倒角,用 锥形工具磨锥孔及阶梯,直至图5 所示。这样将18个不通孔一一挖 磨修完。

(8) 翻身。用专用工字钢吊具 (见图 6),把镜坯吊起翻身,翻身后 镜子的背面在下 ,正面朝上 ,仍用行 星运动砂轮磨中孔的残留部分,并达 到图纸要求。

(9) 借助专用靠模铣磨比较球 面。仍用减薄时应用的金刚石砂轮, 从内向外逐渐铣磨。专门的机构保证 了砂轮走出规定的圆弧,再加上主轴 的旋转,可以把镜面磨出既定的球面。 这一步共磨了 43 刀。倒角后运至专 用的 2 m 磨镜机上。先是背面朝上 用组合工具细磨,然后用大抛光盘抛 图6 专用工字钢吊具

光背面、涂保护漆后再翻身、镜面朝上。



图 5 18 个不通 孔剖面示意图



2 细磨、抛光、修改

在 2.5 m 立式车床上,经由靠模控制的磨头铣磨后的球面, 其精度是不高的,还要用组合工具细磨。组合工具的做法首先 是将铝圆切割成圆片(注意不能用铸铝),经进一步车加工、倒 角、背面胶上一层柏油、将正面摆在镜子上、中孔部份不放铝圆、 排满整个表面,共用了121块铝圆,然后将大的铝磨盘加温后压 在各铝圆背面,接触处柏油溶化,经一段时间后取下来,各铝圆 便都胶在大磨盘上了。铝圆正面的包络为现在的镜面形状。

用组合工具进行细磨,逐渐换砂,磨到所要求的曲率半径为 止。曲率半径的测量是先磨制一个 300 mm 的样板,用比较法 测量,测定主镜的曲率半径。在磨制过程中,若曲率半径不对 (玻璃镜面总是在下面的,不可能把镜子放在上面磨),可以视情

1 。

6 m n

况在镜面和组合工具之间的中央或外带加垫一定厚度的纸片, 将组合工具背面加温水(或把整个磨盘放入水池加温),使柏油 稍软,把磨盘压在镜面上,改变铝圆包络形状,有纸片处铝圆压 入柏油层,等冷却后再进行细磨。结果表明,被压入柏油层的铝 圆在最初磨制时不起磨削作用,此带就逐步变高了。细磨过程 中的清洁工作是很重要的,不要划伤镜面。

第6期

抛光时先用大抛光胶盘把镜面抛成球面,抛光盘的做法类 似于组合工具。先把柏油抛光胶做成方块状备用。在大抛光盘 上按一定排列画线,使抛光柏油块分布均匀(注意不能中心对称 分布,中孔部分不放柏油块),然后稍加热抛光盘,将抛光胶块按 所画线位置放入,胶牢后备用。抛光前将镜面擦拭干净,用肥皂 水均匀涂覆镜面,将抛光胶盘用专用工字钢吊具吊挂,放在大水 池浸入水中,用池中温水均匀加热抛光盘。将此抛光盘压在镜 面上,在不时移动、转动和冷却后取下来,这时大部分抛光胶块 与镜子形状吻合,但还会有一部分尚未压到。因此还要加温抛 光盘后再压。这样反复进行,直至全部胶块与镜面吻合为止。 在把镜面上肥皂水洗净后胶盘,待镜面冷却后在镜面上涂以氧 化铈抛光液即可以抛光。抛光成球面的目的是了解此镜坯的表 面抛光性能和软硬的一致性,看是否有其它情况发生。再就是 先抛光成最接近的比较球面,以便过渡到所需凹双曲面。用大 抛光盘抛修可得到一个轴对称的过渡球面。

修改时是用中型工具细磨中央及外带,使其非球面化。同 样,用中型抛光盘抛修^[6],尽可能少用小直径抛光盘,边修边检 直至完成。

加工过程中的检验是用 OFFNER 补偿阴影检验法检验,为此制做了专用的检验架子。作者采用 OFFNER 透镜与阴影仪,并被同时固定在架子的平台上,其相互位置、距离均需调准,并移动整个平台进行校准。

镜面在磨镜机上是采用摇板式 18 个支撑盘支撑,侧支撑 6 点。磨镜机上的 18 个支撑托盘位置不与镜子背后 18 个不通孔 对应,镜子检验时要把磨镜机主轴翻转成近似为水平,进行水平 光路检验。为了使侧支撑受力不集中在个别点,而采用把主镜 吊在钢带上进行检验,故每检验一次都是很麻烦的。后来为了 加工微晶玻璃主镜,才把厂房改造成了可以用做垂直检验的检 验塔。

抛修中遇到的主要问题及采取的措施:

(1)表面磨穿的气泡随时在增加,所以细磨结束抛光前,对表面上所有气泡及少量结石进行了扩孔处理。若不处理,在磨制过程中则会形成彗星状局部低带,有时范围可到1/3圆周长。处理的方法是用手持小马达,轴上装锥状杆,加金刚砂把磨穿的气泡扩孔,结石挖掉,扩孔如图7所示。这样虽然直径大了,但无尾巴。以后在抛修过程中随时增多,随时发现,随时扩孔,否则就有可能形成一个彗星状局部低的彗头,低的范围在阴影图中可达10mm以上,并拖

-7





图 8 表面硬度不一致 的高低分布图

一长尾巴,其危害的面积远远大于扩孔面积。共先后扩孔 358 个,最大直径为 8 mm。

(2) 进行手工局部抛修。如图 8 和图 9 所示,图 9 是镜面转了180 后拍摄的,图 8 和图 9 高低对应明显。图 9 故意贴倒,

便于对照高低区域分布。这是最初的两张阴影图照片。这些地 区差只有进行手修,进行手修是一件非常艰难的工作,先要把硬

部分的图形画在镜表面上,然后用小 抛光胶盘把这些不规则的、高的部分 逐渐抛低下去,不仅要与镜面其它低 的部分在同一个双曲面上,而且还要 保持镜面面形的平滑。要知道这是 波长级的高低,可以说已达到了人类 技艺的极限,再想提高精度实属不 易。



图 9 表面硬度不一致 的高低分布图

(3) 开始抛光时,镜子表面粗糙

度很差,好像蒙上了一层雾状物或网状物。因为是用中型抛光 盘抛修,镜面大部分区域暴露在空气中,一些不洁物及灰尘参加 了抛修过程,因此除在磨镜机上方罩上大块防尘布外,还要在主 镜四周加上像蚊帐的小防尘罩。管道出风口用泡沫塑料包好起 过滤作用。

(4)因无恒温装置而用了空调机,对于这麽大的房间,实践证明这对于膨胀系数不是很小的大镜坯有害无益。房间温度波动大,镜坯温度梯度大,不能检验磨制。所以把车间所有的窗户均用砖砌起来以便保温,降低日温差。可是到了冬、夏二季只能停工,这是因为与它们相应的日平均温度分别为+6及+33,所以只好等待温度好的黄金季节(每年的4月~6月和10月~12月)靠自然恒温进行加工检验,这无形中又延误了加工周期。

(5) 由于是水平光路检验,所以空气层的温度梯度造成像 散现象,在进行干涉检验时尤为显著,这是无法克服的,只有改 为垂直检验才行。鉴于以上情况,后来光学车间修建了垂直检 验塔,还进行了恒温改造。

3 光学检验

对玻璃毛坯的要求及检验见文献[7]。 镜面抛修过程中用 OFFNER 补偿检验法。 这当中也曾用激光球波面干涉仪进行干涉 检验^[8],发现空气层的温度梯度引起像散严 重,无法应用。加工结束后拍摄了阴影图 (见图 10)是通过 OFFNER 补偿器拍摄的。 作者在曲率中心附近进行一维 HART-



图 10 用 Offner 补偿镜拍摄的 阴影图

MANN 检验,不加任何补偿装置。由于镜子存在地区差,所以 四个方向的数值不完全相同。四个方向的计算结果如下:

万回:均万根差为	/14.9;
方向:均方根差为	/ 1.4;
方向:均方根差为	/ 6.5;
方向:均方根差为	/5.3.
这些均方根差都是耶	(18个带计算的。

二维 HARTMANN 检验取点 326 个,用它计算的结果比前 者要客观多了,但仍为采样检验。计算结果如下(详见文献 [6]):

50%的光集中于 0.37; 70%的光集中于 0.52; 80%的光集中于 0.60; 90%的光集中于 0.77; 95%的光集中于 1.00; 99.7%的光集中于 2.3; 观、准确地评定镜头像质,而且也便于测试值和设计值进行比较。如果条件不具备,可以用模拟法测试,即模拟大口径物镜实际使用条件进行测试。为此,可以用大口径平行光管作为无穷远的物体对镜头成象,实测其像质。

3 两个设计方案的比较

	第一方案	第二方案
片数	6 片	7 片
光学长度	750. 36 mm	998.48 mm
工作距离	85.21 mm	36 mm
重量	58.38 kg	38.75 kg
重心(距前端)	160. 5 mm	370. 6 mm
像质(弥散斑 RMS)	6 µm	11 µm
材料	普通光学玻璃材料	普通光学玻璃材料
材料成本	较高	较低
加工成本	较高	较低

(上接第 550 页)

Tab. 1 results of lightweightted mirror

		Tishish di	Surface accuracy (P-V)		
workpiece	material	Lightweightting	design	actual result	
aspheric primary mirror size 610	zerobur	62 %	/10	/ 6 (in process)	
Scanning plane mirror size 400 ×266	zerobur	45 %	/ 10	/ 12	
strip plane mirror size 800 ×300	K4	70 %	/ 10	/ 10	

(上接第 553 页)

100%的光集中于 5.7;

镜面均方根误差为 /5(全口径)。

该镜坯由上海新沪玻璃厂提供,是用池炉熔炼的,是完整的 一块,其线膨胀系数 =0.76 ×10⁻⁷/ ,应力双折射为 1.5 nm/ cm。从这些数据可看出是一块较理想的坯料。但不幸的是光 学车间于 1990 年在起吊已粗磨成型好的这块镜坯时,由于钢丝 绳被卡断,致使玻璃被打碎,这一事故断送了主镜目前用微晶玻 璃的可能性。

因此现在的 2 m 望远镜光学质量的提高就受表面硬度不一 致的原苏联毛坯的限制,这也是参加这一工作的所有同志尽了 最大努力才取得的结果,作者初次加工大型镜面就碰到玻璃表 面硬度不一致这样的棘手问题,而好的微晶玻璃毛坯又先后被 打碎,由此也就限制了 2.16 m 望远镜光学质量的进一步提高。 从 1993 年开始,又由作者负责加工了新副镜,作者计算了用

1 600 mm的凹球面进行了补偿检验,取得了较好结果^[2]。 1996年换上新副镜后并把所有镜面拆下来重新镀膜后,作者对 光学系统再次进行了调整^[4]。

1996年在2m望远镜的卡焦处,用300mm ×300mm大底 片进行拍照,对英仙座双星团曝光10min,经鉴定会测试组测量 后认为,底片四角及中心星像很圆,无彗差,暗星像直径为

4 设计结果的确定

根据以上的比较可以看出:两个设计方案均采用普通光学 玻璃材料,且各项指标都符合设计任务书的要求。从像质上看, 第一方案优于第二方案,但是第一方案所用的材料重量大于第 二方案,这是因为第一方案有四片玻璃的口径大于 300 mm(其 中一片口径为 400 mm),而第二方案只有一片口径为 400 mm, 其于口径均小于 240 mm。因此,第一方案的材料成本较高,相 应的加工成本也较高。评价一个设计方案不能单看像质,而应 该综合考虑材料成本,加工工艺等因素。因此,选第二方案作为 设计结果。这个设计结果顺利通过了设计评审。

致谢:在镜头(f = 600 mm, D = 400 mm, 2 = 2.59的光 学设计过程中,得到薛鸣球院士,余景池博导的具体指导,以及 孙侠菲,郭培基老师的热情帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 王之江.光学设计理论[M].
- [2] 郭培基.补偿法检测非球面的关键技术研究[D].长春:中国科学 院长春光学精密机械与物理研究所,2000.

上述工作结果表明:运用计算机控制钻铣轻量化加工工艺,可以 制造出高度轻量化的大尺寸镜坯,并能进一步加工出高精度轻 质反射镜。

参考文献:

- J Spangenberg-jolley, T Hobbs. Mirror substrate fabrication techniques of low expansion glasses[J]. SPIE, 1988,1013:198-203
- [2] 杨秉新,宋友贵,王友仁. 航天遥感仪器的反射镜轻量化的研究[J].中国空间科学技术,1993,(1):60-64

0.2 mm,有的为 0.18 mm。这一指标能适应台址和满足大多数 天文工作的要求。到目前为止,北京天文台用此设备经过多年 的应用及国际联合观测,已取得了一大批有影响的、优秀的天文 成果,使用效率在国内的几台望远镜中是最高的。

参考文献:

- [1] 苏定强,等. 中国 2.16 m 望远镜的主光路系统[J]. 中国科学(A 辑), 1989,11:1187—1196.
- [2] 朱政. 2.16 m 望远镜新副镜的加工工艺 [J]. 光学技术, 1998, (3):41-43.
- [3] 李德培.卡塞格林焦点熔石英像场改正镜材料的研究[J].天文仪器与技术,1995,17-21.
- [4] Li Depei. The alignment of the optical systems for the 2.16m astronomical telescope [J]. proceedings of SPIE, 2000,4231: 449-453.
- [5] 夏立新,等.玻璃镜坯上孔的机器磨削加工及其装置[J].光仪技术,1980,(2):40-45.
- [6] 李德培.圆锥曲线旋转面的加工与检验[J].光学技术,1982,(5): 2-8.
- [7] 李德培,等.天文光学对光学玻璃的要求及一些检测结果实例[J]. 玻璃技术,1991,(1):7→3.
- [8] 李德培,等.激光球波面干涉仪在天文光学中的应用[J].天文学报,1975,16(1):51-64.
- [9] 高必烈,等. 2.16 m 非球面主镜的二维哈特曼检验[J]. 光学学报,1985,5(10):9→15.