

•结构与工艺•

薄型光学零件加工中难点的研究

李晓奇¹, 梁琳麟²

(1. 长春理工大学 光电信息学院光电工程分院, 长春 130012; 2. 中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

摘要: 一般将厚度与长度(或直径)的比值小于1:10的光学零件称为薄型光学零件,有时可达到1:40以上,所以薄型零件加工的难点是光圈变形的问题,而面形精度要求高就更难加工了。加工中引起光圈变形的原因主要包括胶结变形、热变形和应力变形,所以薄型光学零件加工的难点即是如何消除或减小这些变形,从而得到所需的高精度的薄型零件。文中主要阐述了上述三种变形产生的原因和解决方法,对实际生产具有一定的指导作用。

关键词: 薄型光学零件; 胶结变形; 热变形; 应力变形

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-06-0082-05

Research on Thin Optical Elements Processing Difficulties

LI Xiao-qi¹, LIANG Lin-lin²

(1. College of Optical and Electronical Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China;

2. Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

Abstract: The optical elements with the thickness and length or diameter ratio less than 1:10, or some-time 1:40, are called thin optical elements. So the processing difficulty of the thin optical elements is aperture deformation, and high precision surface processing requirements make the processing work more difficult. The aperture deformation reasons in processing main include cementation deformation, thermal deformation and stress deformation. So the difficulty of thin optical elements processing is how to eliminate or reduce the deformations to get the needed high precision thin elements. The reasons and solutions of the above three kinds of deformation are introduced to provide a certain guidance to the actual production.

Key words: thin optical elements; cementation deformation; thermal deformation; stress deformation

随着现代光电仪器的不断发展,对光学零件的要求也越来越高。光学仪器中使用薄型光学零件的地方越来越多,甚至在某些特定条件下,必须使用薄型光学零件。

薄型光学零件是指厚度与长度(或直径)比一般小于1:10,有时达到1:40以上。如上海光学仪器厂生产的台式投影仪中的半透反光镜,其尺寸为22 mm×32 mm×0.8 mm,其厚度与长度比为1:40;又如金相显微镜中的半透反射镜,其厚度为1.5 mm,椭圆长轴为29 mm,短轴为20.5 mm,而 $N=0.5$, $\Delta N=$

0.1,平行度为10 s,两面抛光。加工这样的薄型光学零件是很困难的。薄型光学零件加工困难的原因主要在于各种变形,包括胶结变形、热变形、应力变形等^[1-2],文中重点阐述的是变形的来源及如何解决以上各种变形。

1 胶结变形

胶结变形主要是由于粘结胶固化后与玻璃的收缩率不同,而对零件产生了一定的拉力,使零件

收稿日期:2016-10-08

作者简介:李晓奇(1983-),女,吉林省长春市人,硕士,讲师,主要研究方向为光学工程;梁琳麟(1992-),女,辽宁锦州人,学士,主要研究方向为光电工程。

表面产生了变形。解决的方法即选择适合的上盘方法,减少粘结胶对零件表面的拉力,下面介绍几种常用的胶结变形小的上盘方法。

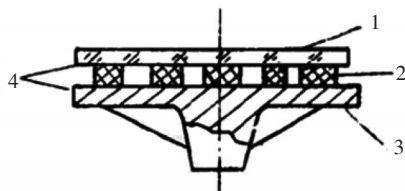
1.1 浸蜡法上盘

成盘加工薄型光学零件,常采用浸松香蜡上盘方法,对克服变形有比较满意的效果。这种方法是将零件擦干净后,放到垫板上(垫板最好使用熔石英玻璃,零膨胀系数玻璃等低膨胀系数材料)将垫板加热,其温度以能使松香蜡充分熔化为宜,温度升至合适时停止加热,用细棍沾少量熔化的配比适宜的松香蜡,逐个点在零件和垫板相接触的地方,这时松香蜡液因毛细现象逐渐进入零件与垫板之间,待垫板同零件自然冷却至室温,即可以进行细磨和抛光。

浸蜡上盘过程是一个加热和冷却的过程,尤其是在此过程中还有松香蜡的凝固作用,上盘前和上盘后的零件内部应力状态是不同的。因此浸蜡上盘法也存在变形。实践表明,用这种浸蜡上盘法磨平面(例如磨 $\Phi=30\text{ mm}$, $d=2\text{ mm}$ 的平面; $\Phi=50\text{ mm}$, $d=3\text{ mm}$ 的平面)零件,精度达到 $\theta=5''\sim 10''$, $N=2$, $\Delta N=0.2$ 是不困难的。

1.2 软点胶上盘法

对于大口径高精度薄型零件可以采用软点胶法上盘,用软点胶上盘可减少胶结变形。它是采用软的粘结胶,甚至是纯柏油胶做成的点子胶,并先粘在粘结膜上,均布并保持一定的距离。然后压平点胶,涂上少许苯或汽油,再把零件对准放上,不加外力,依靠零件自重使之自然粘合。这种方法常用于平面或球面的薄型光学零件。图1所示的是用软点胶上盘加工薄型平面的情况。

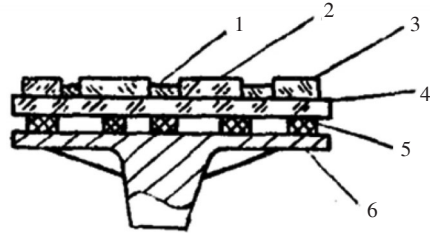


1-零件;2-软点胶;3-粘结膜;4-底胶

图1 软点胶上盘

1.3 浮胶上盘法(也称假光胶上盘法)

这种方法使零件贴置面与粘结平板不形成光胶那样的接触,又不渗入胶,主要依靠零件侧面胶结力来上盘的。这种方法适用于小直径高精度的零件及形状不对称的薄型平面零件。浮胶上盘方法如图2所示。



1-松香蜡;2-零件;3-保护块;4-粘结平板;5-点胶;6-粘结膜

图2 浮胶法上盘

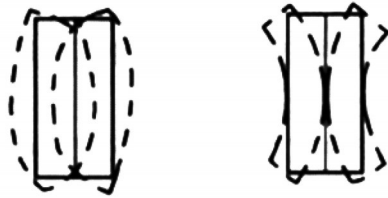
粘结平板具有 $1/2\sim 2N$ 的平面度,零件贴置在平板上,应看到均匀、明显的光圈,零件贴置后,将熔化的松香蜡(松香与蜡的比例为3:1)浇在零件空隙间,高度为一半多一点为宜。松香蜡温度不宜过高,以免蜡渗入贴置面。利用这种方法加工 $\Phi=150\text{ mm}$, $d=5\text{ mm}$ 的扇形光学零件,精度可达到0.5光圈。

1.4 光胶法上盘

光胶法完全克服了胶结变形,比以上方法具有更高的加工精度。光胶法要求光胶工具的工作面与零件的贴置面均具有很高的面形和粗糙度,两个表面要经过精细清洁之后再贴合,以使两面的距离达到分子吸引力作用的范围内,即两个表面靠分子吸引力而结合。

光胶件的变化趋势如图3所示。光胶件对温度比较敏感,当周围介质温度高于两光胶件温度时,则产生低光圈变化趋势,如图3a所示,当周围介质温度低于两光胶件温度时,则产生高光圈的变化趋势,如图3b所示。高光圈变化趋势更易造成边缘开胶,这就是为什么光胶件耐急冷比耐急热性能差的原因。耐急冷性能差,虽然是光胶件的缺点,但可以利用这一特性,排除气泡或打开不合格的零件,并且不会使表面有所损坏。光胶件应尽量避免高

光圈和塌边。



(a) $t_1 > t_2 < t_3$

(b) $t_1 < t_2 > t_3$

t_1, t_3 为光胶件两侧介质温度; t_2 为光胶件温度

图3 光胶件的变化趋势

如果温度是缓慢变化,光胶件本身内部温度均匀,但此刻温度与光胶时的温度不同,据国外学者的研究表明,对于光胶的两平面零件,随温度变化而引起的光圈变形可用下式计算

$$N = 2700 \cdot \Delta\alpha(\theta_t - \theta_0) \frac{D^2}{5d + \frac{1}{d}(E_1 d_1^3 + E_2 d_2^3) \left(\frac{1}{E_1 d_1 + E_2 d_2} \right)} \quad (1)$$

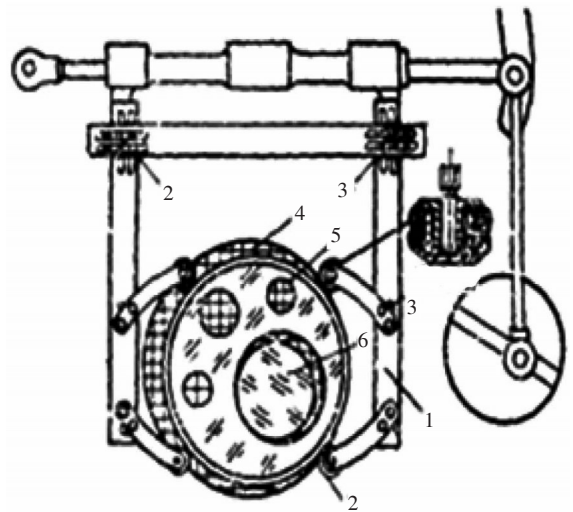
其中, N 为偏离平面的光圈数; θ_t 为光胶时的温度; θ_0 为变形时的温度; D 为零件直径; d_1, d_2 为两种零件的中心厚度; d 为零件的中心厚度之和; $\Delta\alpha$ 为两零件线膨胀系数之差; E_1, E_2 为两种玻璃的弹性模量。

由上式可知, $\Delta\alpha$ 愈大, 变形愈大。如果两光胶零件材料相同, 即 $\Delta\alpha=0$, 则 $N=0$, 这说明只要温度均匀变化, 不会改变光胶件的表面形状, 光胶件就像单块零件一样。光胶法不仅可以加工高精度面形的零件, 而且还可以加工秒角级平行度的光学零件^[3-5]。

1.5 分离器法上盘

分离器法也可以完全克服胶结而产生的变形, 主要用来加工高精度平面零件, 也可以用来加工薄型平面。

分离器是一种具有不同心的圆孔的玻璃圆盘, 其材料要求应力小, 膨胀系数小, 通常使用 K9、K4、QK2 等玻璃制作。分离器的基底平度要高, 厚度与直径比为 1:8~1:10 左右, 外径为 200~400 mm 左右。孔的面积占工作面积的 1/3~1/4。孔的边缘离分离器不小于 20 mm, 孔的直径比被加工零件大 5~10 mm。加工时把零件放到孔中, 如图 4 所示。



1-方形铁架; 2-橡皮滚轮; 3-调节螺钉; 4-抛光盘
5-分离器; 6-被加工零件

图4 蟹钳式分离器

采用分离器加工方法因研磨时的运动轨迹更复杂磨损易于均匀; 零件受力点降低, 减少了零件运动中的力矩影响, 较容易克服塌边; 压重可以自由外加, 便于配合修正光圈; 零件浮动, 没有胶结和其他加持变形; 抛光机主轴转速较慢, 从 $1.5 \sim 20 \text{ min}^{-1}$ (视分离器大小而定), 光圈的热变形很小^[6-8]。

1.6 增厚和“毛光”

所谓“毛光”即是将镜片的一个表面上盘, 另一面精磨抛光到肉眼看不到砂眼为止。在加工第一面时, 往往将零件厚度增加几毫米, 以保证第一面加工精度。贴置面进行“毛光”后, 粗糙度和平面性都提高了, 这样只要胶的硬度适当, 胶对零件的拉力就会显著减小。此外, 由于平面性好, 滴胶厚薄均匀, 有因为是光面, 峰谷的高度明显减小, 胶对零件的拉力也均匀了, 下盘后薄型光学零件的光圈变化小, 且能控制在一定的范围内^[9]。

例如把“毛光”的薄型光学零件和不“毛光”的薄型光学零件作一个比较, 以长方形的光学零件为例, 未“毛光”的光学零件, 在盘上看, $N=3$, 下盘后看, $N=-3$ 变化 6 个光圈。“毛光”过的光学零件, 在盘上看 $N=-3$, 下盘后看, $N=-2$, 变化 1 个光圈。所以, 加工薄型平面光学零件时, “毛光”是很重要的。

2 热变形

光学玻璃是热的不良导体,当零件抛光一段时间后,由于零件与抛光盘的相对运动,会产生热量,这种热量使被加工零件上、下两个表面有一定的温度差异,产生温度梯度,从而导致零件表面面形发生微量变化,这种微量变化使零件表面产生突状变形,如图5所示。这种突状变形放置一段时间后会渐渐趋于变低。

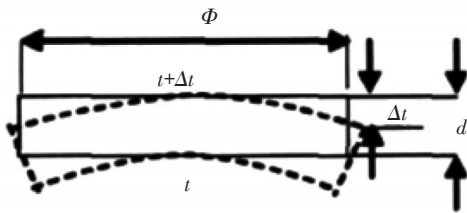


图5 零件温度升高产生的突状变形

如果抛光过程中零件表面温度升高,并且在平行平面的垂直方向上的温度分布呈线性,则在抛光表面微小变形量用下式表示

$$x = \phi^2 \alpha \Delta t / (8d) \quad (2)$$

式中, ϕ 为零件口径; α 为材料的线膨胀系数; d 为零件厚度。从上式可以看出,零件厚度越薄、直径越长,则变形量越大;温差越大,变形量越大;线膨胀系数越大,变形量越大。且表1中列出了两种材料在相同口径,厚度为5 mm和10 mm两种情况下,产生3种温差时零件面形的变化。

表1 上下表面温度0.1~1℃变化时 Δx 的变化量

材料	$\alpha \times 10^7$	ϕ / mm	d / mm	$\Delta x / \mu\text{m}$		
				$\Delta t = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Delta t = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Delta t = 1 \text{ } ^\circ\text{C}$
BaK7	65	50	5	0.041 0	0.203 0	0.410 0
			10	0.020 3	0.102 0	0.203 0
熔石英	2.1	50	5	0.001 3	0.006 5	0.013 0
			10	0.000 6	0.003 2	0.006 5

显而易见,同种材料,相同口径下,厚度越薄,变形量越大,所以高精度薄型光学零件的加工中热变形是不容忽视。

要想减小这种热变形,零件的厚度、口径不可改变,控制温差也很难,行之有效的办法就是使 α 很小,即选择膨胀系数小,应力小,光学均匀性好,

导热率高,杨氏模量高的材料,如石英玻璃、K4、微晶玻璃等等^[10-11],其中微晶玻璃又被称为零膨胀系数玻璃。

3 应力变形

光学玻璃虽然通过精密退火消除了大部分的应力,但还是有一部分残余应力存在,如果材料的均匀性不好,有较大的残存应力,会使零件的抛光面各处膨胀系数不一样,从而引起抛光零件光圈变形。薄型零件经过加工后光圈变形有以下几种现象:(1)盘上光圈少($N=2 \sim 3$),下盘之后光圈变多($N=7 \sim 8$)。(2)盘上光圈凸,盘下变成凹,但也不排除往凸方向变的可能。(3)盘上光圈少($N=1$),盘下不成圈,成为不规则的图案。第3种现象是加工者最困难、最棘手的问题,因为零件精度要求越高这种现象越严重^[12]。

应力变形的情况较复杂,也是高精度薄型零件加工时不可忽视的变形,要想减小应力变形自然要选择高质量的光学玻璃。从光学玻璃厂出厂的光学玻璃,都已经经过质量指标的检验,可以选择合适的等级来使用。

若是生产高精度薄型零件除了要选择高质量的光学玻璃,还要对毛坯进行复检,这样做并非对光学玻璃厂家不信任,而是由于在高精度薄型零件加工中,对光学玻璃的双折射值和光学均匀性要求比较高,倘若使用了不合要求的光学玻璃,就是采用最先进的办法,加工者的技术再高超,也无法加工出合格的工件。所以在加工前,对选用的光学玻璃毛坯的应力双折射和光学均匀性必须进行复检。

4 结 论

主要阐述了薄型光学零件加工中的胶结变形、热变形和应力变形。并对如何解决这些变形提出了一些见解。胶结变形解决的方法即选择适合的上盘方法,减少粘结胶对零件表面的拉力,如浸蜡上盘法、软点胶上盘法、浮胶上盘法、光胶上盘法和分离器上盘法。热变形的解决方法即选择选择膨胀系数小、应力小、光学均匀性好、导热率高、杨氏模量高的材料,如石英玻璃、K4、微晶玻璃等。应力变形解决的方法是在加工前,对选用的光学玻璃毛坯的应力和均匀性必须进行复检。复检主要检测

光学玻璃的双折射值和光学玻璃的光学均匀性。

参考文献

- [1] 杨力,张雨东. 现代光学制造工程[M]. 北京:科学出版社, 2008.
- [2] 田守信. 高精度及特种光学零件制造与检测[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1991.
- [3] 张玉龙. 粘接技术手册[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2001.
- [4] 王岩. 介绍几种光学零件的胶合与修补[J]. 计量技术, 2004(12):58-59.
- [5] 陈玉华. 超薄形零件的制造[J]. 光学技术, 1995(2):40-41.
- [6] 彭利荣,马占龙,王高文,等. 超薄光学元件精密加工关键技术[J]. 中国光学, 2015(6):964-970.
- [7] 黄启泰,郭培基,余景池. 超轻超薄反射镜制造过程中的变形控制研究[J]. 光电工程, 2008(8):128-133.
- [8] Miller Steve, Angel Roger, Martin Buddy, et al. Fabrication of ultra thin mirrors for adaptive and space optics[J]. Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering:1997.
- [9] 苏瑛,丛丽艳,常阿娟,等. 增厚-光胶法控制超薄、变形平面零件的加工工艺研究[J]. 应用光学, 2009(1):93-95.
- [10] 杨根莲. 薄型零件的平面磨削加工[J]. 广西轻工业, 2011(7):53-54.
- [11] 王健,许乔,石琦凯. 薄型光学元件的数控抛光技术研究[C]//中国物理学会. 第六届全国激光科学技术青年学术交流会议论文集, 2001:4.
- [12] LIAO Wen-lin, DAI Yi-fan, XIE Xu-hui. Corrective capability analysis and machining error control in ion beam figuring of high-precision optical mirrors[J]. Optical Engineering, 2012.

《光电技术应用》期刊简介

《光电技术应用》期刊是中国电子科技集团公司主管,中国电子科技集团公司光电研究院主办,公开发行的学术性中文科技期刊。以光电技术为主要专业特色,传播光电技术、光电系统应用技术专业领域的先进科技信息,报道新型科技成果,推动工程技术交流,促进行业科技进步与发展。

期刊所设栏目主要有:综述,光电系统,光学设计,红外技术,激光技术,光电探测,光电器件与材料,信号与信息处理,电路与控制,测试、试验与仿真等。

期刊拥有优秀的编委会成员,审稿专家涉及光电技术的各个领域,具有审稿速度快、质量高,编辑人员具有较高的职业素质,工作认真负责、反馈速度快,期刊版面设计合理、美观大方,印刷质量好,出刊及时。

竭诚欢迎广大读者踊跃投稿。