

文章编号:1007-1180(2011)05-0012-05

空间光学反射镜轻量化技术现状分析

陈 亚

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 随着空间光学遥感器分辨率的提高, 反射式空间光学主镜口径不断增大, 对反射镜进行轻量化设计已经成为空间大口径反射镜的关键技术。分别从材料选择、结构形式、制造工艺等方面对国内外空间光学反射镜的轻量化技术进行了系统的评述, 分析了空间轻质反射镜技术的现状和发展趋势, 并对今后的研究工作提出了建议。

关键词: 空间光学; 反射镜; 轻量化

中图分类号: TH703

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI20112805.0012

Analysis of Lightweight Mirror Technology for Space Optics

CHEN Ya

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: With the development of the resolution of spaceborne remote sensor, the diameter of primary mirror is becoming larger and larger. Now the mirror lightweight design has become the key technology in the large mirror engineering application. The technology to reduce the mirror mass for space optical systems in world has been summarized roundly in view of material choice, structural form and manufacture technology. Several suggestions are offered for the future research.

Keywords: space optics; mirror; lightweight

1 引言

近几年来,各国的遥感卫星和空间光学技术得到了迅猛的发展,而光学系统是空间遥感的重要有效载荷,其质量的大小决定了发射成本的高低,因此,必须在保证刚度和强度的前提下对空间光学系统结构进行最大程度的轻量化。其中,反射镜的轻量化是整个光学系统轻量化中最基本最重要的关键技术之一。

当将反射镜水平放置时,镜子由于自重引起的镜面变形量为:

$$\delta = K \frac{\rho}{E} \left(\frac{D^2}{h} \right)^2 \quad (1)$$

其中, K 是比例常数,它与镜子背部支撑点的数目与分布情况有关; ρ 是镜坯材料的密度; E 为弹性模量; D 为镜子的直径; h 为镜子的厚度。

由公式 (1) 可知,反射镜的镜面变形量将随着直径的四次方增加。如果再考虑到相应的机械结构的质量将增大,则整台仪器的质量将大幅度增加,因此,对空间光学反射镜进行轻量化研究是必要的。

2 反射镜材料

2.1 对材料的要求

轻质反射镜应可以通过光学加工获得符合系统质量要求的光学面形,并且反射镜的面形精度在空间环境工作中应能保持稳定。因此,要求轻质反射镜材料能达到如下几点性能要求:

- (1) 材料光学可加工性能。镜坯材料必须能适

应光学面形加工的要求,镜坯材料应微观结构均匀,能经受光学镀膜的工艺条件且易于与反射膜结合。

- (2) 材料热稳定性能。包括材料的低膨胀系数和良好的导热性能,这两种性能的结合有利于消除反射镜体中的温度梯度,使反射镜较快地实现热平衡。

- (3) 材料力学性能。材料的高比刚度有利于实现更高的反射镜轻量化率,对振动、冲击也具有更强的抵抗能力。

- (4) 材料化学稳定性和安全性。

现有的材料很难同时达到这些性能要求,选择材料时必须综合比较,选出尽量满足系统性能要求的材料。

2.2 轻质反射镜常用材料

目前常见的用作空间反射镜的材料主要有微晶玻璃 (Zerodur) 和碳化硅 (SiC)。表 1 列出了两种材料的性能参数^[1-3]。

由表 1 可知,微晶玻璃的热膨胀系数低,热变形小,素有零膨胀微晶玻璃之称,且价格相对便宜,工艺比较成熟,可以获得极高质量的光学表面,在现代空间光学系统中得到了广泛的应用;碳化硅的比刚度高于微晶玻璃,因此,用碳化硅作材料的反射镜轻量化率可以做得较高。随着碳化硅材料的制备和加工工艺日趋成熟,碳化硅轻质反射镜已经越来越多地进入到工程实际当中,碳化硅正在成为最具潜力的空间光学系统反射镜材料。

表1 两种常用材料的性能参数

材料	性能	密度 ρ (g/cm ³)	弹性模量 E (GPa)	热膨胀系数 α (10 ⁻⁶ /K)	热导率 λ (W/m·K)	比热 C_p (J/g·K)	比刚度 E/ρ
Zerodur		2.53	91	0.05	1.64	0.821	35.97
SiC		3.13	400	2.5	141	0.69	127.8

3 轻量化结构形式

目前,空间轻质反射镜常用的镜体结构形式为蜂窝夹心结构、背面开口结构以及泡沫夹心层结构,图 1~3 为几种结构的示意简图。

蜂窝夹心结构的形状、大小、蜂窝隔板、反射板、背板的厚度都会影响反射镜的刚度。在可比条件下,封闭式结构的刚度高于背部开口结构;但背面开口结构的轻量化率要高于背部封闭的蜂窝夹心结构。无论是蜂窝夹心结构还是背面开口结构都有

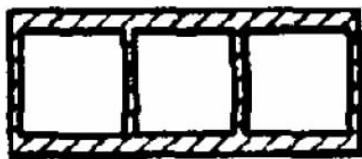


图1 蜂窝夹心结构

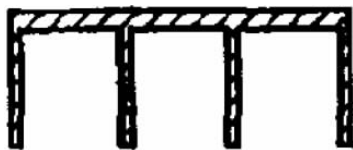


图2 背面开口结构

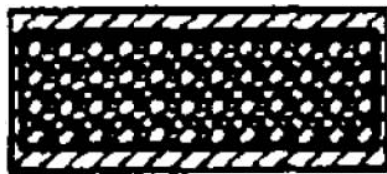


图3 泡沫夹心层结构

蜂窝单元, 蜂窝状轻量化孔的形状主要有三角形孔、四边形孔、六边形孔、扇形孔、圆形孔、异形孔及各种孔的混合使用^[4-6]。它们的形式如图4所示。

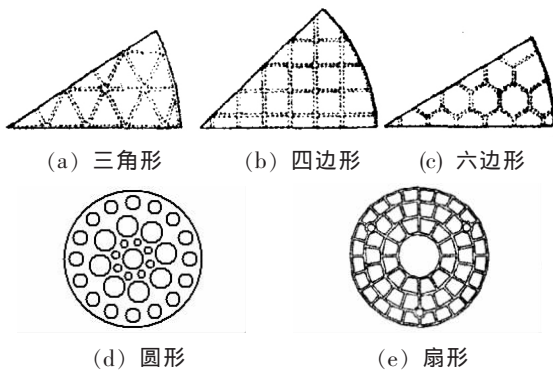


图4 常用轻量化孔示意图

轻量化孔的疏密程度和布局需按照光学系统对主镜的面形要求来整体考虑。其中圆形孔易于加工, 但是轻量化率比较低; 扇形轻量化孔一般应用于带有中心孔的圆形反射镜的轻量化, 根据其加强筋排布的不同又可分为连续加强筋式和断续加强筋式的轻量化孔。三角形孔、四边形孔和六边形孔这3种轻量化孔的工艺性相差不多, 但三角形围成的空心面积所需的边长最长, 四边形其次, 六边形最小。对于相同直径的圆形镜体, 三角形轻量化方式的镜

体质量最大, 轻量化程度最低, 因此, 三角形轻量化孔镜体的质量面积密度最大, 在其他几何尺寸保持不变的情况下, 与三角形轻量化镜体具有相等质量密度的实体镜体的厚度就越大, 其面型精度就越高, 这可以由以下几点来得到证明^[7]:

(1) 由抗弯刚度公式可以证明:

$$t_s = W/A\rho \quad (1)$$

W/A 为面积密度, ρ 为材料密度, t_s 为等效实体厚度。

$$I_s = t_s^3/12 \quad (2)$$

I_s 为单位宽度惯性矩。

$$D_s = EI_s/(1-\nu^2) \quad (3)$$

E 为材料的弹性模量, ν 为材料的泊松比, D_s 为镜体的抗弯刚度。

当 t_s 较大时, 相应的 I_s 也较大, 从而 D_s 较大, 镜体本身抵抗外力变形刚度越大, 因此自重变形较小, 面型精度就较高。

(2) 从下述镜体变形公式也可证明:

$$\delta_{PV} = C_1 QR^4/Et_s^3 \quad (4)$$

$$Q = \rho t_s$$

即

$$\delta_{PV} = C_1 \rho R^4/Et_s^2 \quad (5)$$

C_1 为与支撑方式有关的常数, R 为镜体的半径, Q 为自重均布载荷, δ_{PV} 为面型的 PV 值。

由公式可见, 镜体面形的 PV 值随厚度 t_s 的增大而减小。由此可以看出, 三角形轻量化孔在与六边形及四边形孔保持相同的几何尺寸的情况下, 其面型精度要优于后两者, 尽管其质量较大, 但与后两者相比, 增加的重量也不超过 10%。

4 轻量化制造工艺

4.1 玻璃质材料

玻璃质反射镜的轻量化研制方法主要分为 3 类: 浇铸成型法、高温熔接或熔接物封接法、机械减重法。

浇铸成型法是在高温下将熔融的玻璃注入模具, 形成需要的反射镜坯形状, 待温度逐渐下降, 玻璃液转为固体而得到反射镜坯。浇铸成型法存在

的最大问题是制作过程中产生气泡，尤其是出现在反射面的气泡，它将使反射面难以达到规定的光学面形要求。

高温熔接法和熔接物封接法的共同特点是反射镜由反射板、底板和蜂窝夹芯层3部分组成。蜂窝夹芯层是轻型反射镜的骨架，制作符合刚性和减重要求的蜂窝夹芯层，是轻质反射镜研制的重要环节。该方法主要的不足之处是蜂窝单元的尺寸精确性和一致性差一些，同时，在焊接部位可能会有些缺陷，如气泡、气线等。另外，熔接后镜坯的精密退火工艺制约了残余应力程度，往往给后续镜面加工带来一定困难。

机械减重法包括机械钻铣减重法、水刀切割减重法和超声波减重法。水刀切割法的工作原理是：水在高压气泵的作用下产生数千 Kg/cm^2 的压力，高压水通过一毫米级孔径的喷孔产生一个高真空，将金钢砂磨料吸入水中，饱含金钢砂磨料的高压水流从喷嘴高速喷出，喷射到指定的地方实现材料的去除。超声波减重法是使磨料悬浮液中的磨粒在超声振动下的冲击、抛磨和空化作用下实现对镜坯的切削。由于利用超声波去除材料主要依靠磨粒瞬时局部的冲击作用，所以容易产生向镜面发展的微裂纹，且由于裂纹较深，不易处理。机械钻铣减重法则是通过金钢石钻头的高速机械转动对玻璃进行机械磨削，逐步在镜坯背部钻铣成各种形状的盲孔，实现减重，从而形成背部呈蜂窝状结构的大口径轻质反射镜坯。

为了适应大口径轻质反射镜加工的发展趋势，长春光机所光学技术研究中心在国内率先研制成功了新型的四轴 CNC 光学加工中心，其重复定位精度： X, Y 轴可达 0.012 mm ， Z 轴可达 0.004 mm 。其对称框架结构具有良好的力平衡性和精度保持性。数控坐标为 X, Y, Z, C 四轴数控，可任意三轴联动，主轴运转速度最高达 $15\,000 \text{ 转}/\text{min}$ ，根据工件的加工位置，主轴头可在 $Y-Z$ 平面内 $\pm 15^\circ$ 范围任意调整，以便主轴适应不同位置的加工需要。由该加

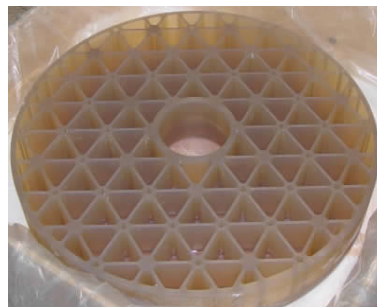


图5 $\Phi 1\,300 \text{ mm}$ 轻质反射镜

工中心研制出了国内尺寸最大的轻量化反射镜，直径达到 $\Phi 1\,300 \text{ mm}$ ，如图5所示。

4.1 碳化硅材料

SiC 反射镜坯体的制备方法主要有：反应烧结法 (Reaction bonded, RB)、常压烧结法 (Sintered)、热 (等静) 压烧结 (Hot press/Hot isostatic press, HP/HIP) 等，其工艺流程如图6~8所示，其中RB法是目前被多数国家采用的制造 SiC 反射镜坯体的优选方法。

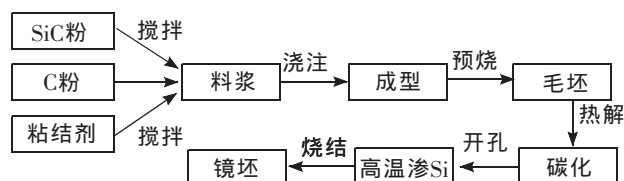


图6 反应烧结法

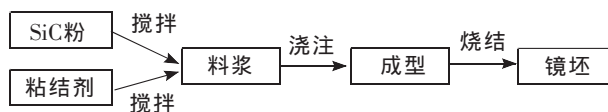


图7 常压烧结法

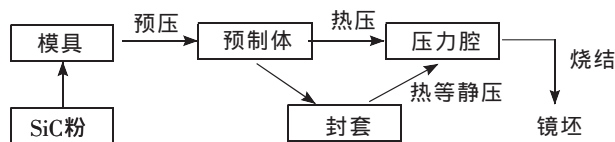


图8 热 (等静) 压烧结法

RB法制备 SiC 的研究始于20世纪50年代，由美国 Carbo-randum 公司的 P.Popper 等研究成功，其基本原理是：采用具有反应活性的液态 Si ，在毛细管力的作用下浸渗含 C 的多孔反射镜预制体，并与其中的 C 反应生成 SiC 。新生成的 SiC 原位结合预

制体中原有的 SiC 颗粒, 浸渗剂填充预制体中剩余的孔隙, 得到近乎完全致密的 Si/SiC 反射镜毛坯。

常压烧结法又称无压烧结法, 是美国 GE 公司 S.Prochazka 在 1974 年研制的, 即在高纯度的亚微米 SiC 细粉中同时加入少量的 B 和 C 作为烧结助剂, 在无任何外部压力的条件下, 将 SiC 粉末烧结成型。

热(等静)压烧结法是美国 Norton 公司的 R.A. Alliegro 等人开始研究 SiC 的 HP 法, 即通过施加单向压力或等静压力, 在合适的温度-压力-时间条件下将 SiC 粉末烧结成型。该方法广泛用于制造激光器件中的 SiC 光学元件。

对上述制备工艺的研究表明, 由于反应烧结碳化硅在反射镜毛坯制造性能、可测量性和低成本方面具有更大的优越性, 尤其是在大口径碳化硅反射镜方面, 因此, 反应烧结法是目前公认的制造碳化硅反射镜的优选方法。为了获得高质量的致密光学镜面, 通常采用化学气相沉积法 (CVD) 或化学气相

渗透法 (CVI) 在镜面上涂覆一层碳化硅或硅。

5 结 论

随着未来空间光学传感器分辨率的不断提高, 空间光学传感器反射镜的口径越来越大, 对其结构的轻量化要求越来越高, 对其适应空间环境变化的要求也越来越高, 这就进一步导致了材料选择、结构设计、加工方法等诸多方面的革新。与国际先进水平相比, 国内的空间光学系统反射镜轻量化技术水平还存在一定的差距, 今后应该着重加强以下两个方面的研究工作:

(1) 在材料选择方面应该积极探寻性能更加优良的反射镜材料;

(2) 对现有的轻量化结构设计进行更深入的研究, 使空间光学反射镜在保证稳定的面形精度前提下, 轻量化率能进一步提高, 降低成本, 提高生产效率, 以满足空间光学工程的需要。

参考文献

- [1] Zhang Y M, Zhang J H, Han J C, *et al.* Large-scale fabrication of lightweight Si/SiC ceramic composite optical mirror[J]. *Materials Letters*, 2004, 58: 1204-1208.
- [2] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 195-198.
- [3] Lee Y J, Joo H J. Ablation characteristics of carbon fiber reinforced carbon (CFRC) composites in the presence of silicon carbide(SiC) coating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004(180-181): 286-289.
- [4] 刘宏伟, 张芹, 丁亚林, 等. 基于有限元分析的长条状主镜支撑结构设计[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(6): 556-558.
- [5] 吴清彬, 陈时锦, 董申. 参数优化方法在轻质反射镜结构设计中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2003, 11(5): 467-470.
- [6] 闰勇, 金光, 杨洪波. 空间反射镜结构轻量化设计[J]. *红外与激光工程*, 2008, 2(1): 98-100.
- [7] Mehta P K. Flexural rigidity characteristics of light-weighted mirrors[J]. *SPIE*, 1987, 748: 158-171.

作者简介: 陈亚(1975-), 男, 汉族, 辽宁新民人, 学士, 副研究员, 1999年于长春光学精密机械学院获得学士学位, 主要从事大尺寸光学元件轻量化技术的研究。E-mail: chenya@ciomp.ac.cn