

文章编号 1004-924X(2006)01-0048-06

轻型反射镜镜体结构参数的分析

张 舸, 赵文兴

(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:从理论上计算了空间遥感相机常用的四种镜体材料—ULE、Zerodur、铍(Be)和碳化硅(SiC)的结构参数。根据计算结果比较了这几种材料的性能,最后比较了两种轻型反射镜结构—对称夹心结构和底面开口结构。理论计算表明:SiC是较优异的空间用反射镜材料,对称夹心结构是较理想的镜体结构。根据理论计算所得结构参数并结合实际制作了直径为500 mm的对称夹心结构碳化硅质轻型镜体。

关键词:轻型反射镜;结构参数;对称夹心结构;底面开口结构

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A

Analysis on structural parameters of light-weighted mirror

ZHANG Ge, ZHAO Wen-xing

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

Abstract: By theoretical calculating, the structural parameters of four kinds of materials used in fabricating light-weighted mirror for space camera were analyzed. These materials are ULE, Zerodur, Be and silicon carbide (SiC). The properties of the four kinds of materials were compared with each other. Then two kinds of light-weighted mirrors with sandwich and open back structures were also compared. The results show that the better material for space mirror is the SiC and the better structure for space mirror is sandwich structure. The SiC mirror with $\phi 500$ mm and sandwich structure according to the structural parameters was fabricated.

Key words: light-weighted mirror; structure parameters; sandwich structure; open back structure

1 引言

随着科学技术的不断发展,人们需要获得更加详细的光学图像信息,这样,必然需要制造更大型的太空光学遥感相机。对于太空光学遥感而言,相机的增大无疑会成倍地增加其质量以及系统的复

杂性,从而会导致巨额的发射费用。目前太空系统的发射费用约为2~3万美元/kg,光学系统减轻100 kg的质量,有效载荷就能够减少250~300 kg^[1],其结果不但节省了上千万美元的发射费用,而且使大型太空遥感相机结构更加紧凑。所以,减轻太空遥感相机的质量,或者说减轻相机中主要器件—反射镜的质量,已经成为目前研制

大型空间遥感相机的一项重要工作。本文针对反射镜轻型镜体的主要结构参数进行了分析,以助于轻型反射镜镜体的设计与制造。

2 目前空间遥感相机中使用的几种主要镜体材料

目前空间遥感相机中使用的镜体材料主要有

表 1 典型反射镜材料的物理性质

Tab. 1 Properties of typical mirror materials

	密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	弹性模量 $E(\text{GPa})$	泊松比 ν	热膨胀系数 $\alpha(10^{-6}/\text{K})$	导热率 $K(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$	比刚度 $(\text{GPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g})$	表面粗糙度 RMS(nm)
ULE	2.21	67	0.17	0.015	1.3	30.3	<0.3
Zerodur	2.53	92	0.24	-0.09	1.3	36.4	—
铍(Be)	1.85	287	0.07	11.3	216	155.1	<1.0
碳化硅 (RB-SiC)	3.04	340	0.14	2.4	170	111.8	>2.0
期望值	小	大	小	小	大	大	小

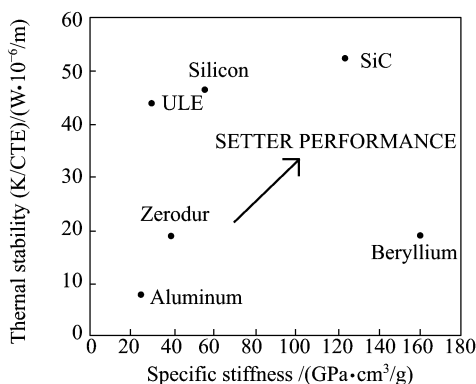


图 1 碳化硅与其他反射镜材料的性能比较

Fig. 1 Comparison among SiC and other materials

3 反射镜的形变

随着空间遥感相机口径的不断增大,作为其核心部件的反射镜的研制技术越显重要。反射镜口径增大带来的主要技术问题有:反射镜因自重而引起的镜面变形;反射镜因环境温度变化及镜体温度梯度的出现而产生的镜面热膨胀变形等。

3.1 镜体的自重变形

当镜体水平放置时,其自重引起的镜面中心

ULE、Zerodur、铍(Be)和碳化硅(SiC),其物理性质如表 1 所示。

与玻璃材料和金属铍相比,碳化硅材料具有明显的综合优势,密度低、比刚度高、热膨胀系数小、导热性能良好、可得到较好的抛光表面,而且无毒、不需特殊设备,如图 1 所示。与其他材料相比,SiC 是一种非常理想的空间遥感相机反射镜基体材料。

最大变形量为^[2]:

$$\omega_{\max} = \frac{qa^4}{64D} \left(\frac{5+\nu}{1+\nu} \right), \quad (3)$$

式中, q 为镜面单位面积的质量, a 为反射镜半径, ν 为反射镜材料泊松比, D 为抗弯强度。对于弹性模量为 E 、厚度为 t 的实心镜体:

$$D = Et^3 / (1 - \nu^2), \quad (4)$$

因此

$$\omega_{\max} = \frac{3}{16} \frac{q}{E} (1 - \nu^2) \left(\frac{5 + \nu}{1 + \nu} \right) \frac{a^4}{t^3}, \quad (5)$$

若镜面厚度为 t , 镜面单位面积质量可表示为

$$q = \rho t$$

因此

$$\omega_{\max} = \frac{3}{16} \frac{\rho g}{E} (1 - \nu^2) \left(\frac{5 + \nu}{1 + \nu} \right) \frac{a^4}{t^2} = C \frac{a^4}{t^2}. \quad (6)$$

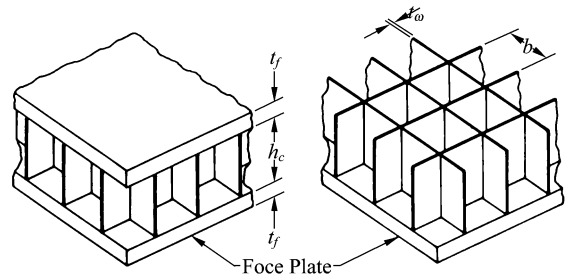
式中系数 C 是与镜体材料有关的常数。从式(6)可以看出,反射镜口径对其自重变形影响非常大,口径变大,镜面变形成四次方增长。另外当增加镜体尺寸时,若要使镜子中心的最大变形量不变,则其厚度 t 成平方的变化,那么镜体质量就会大幅度增加,而且整个相机的紧凑性也会受到影响,而且镜体的支撑结构等其他配套设施的质量也会相应增加,最终导致巨额的发射费用,因此有必要对镜体实施轻量化措施。

3.2 镜体的热膨胀变形

镜体在调试或工作过程中,由于周围环境的影响,会使镜面上存在温度梯度,从而使镜面产生热膨胀变形。要解决这个问题,可以选择导热系数大、热膨胀系数小的材料使其温度梯度能较快的消失,或者是热膨胀变形较小。轻量化后的反射镜镜体,镜面厚度小,热容量小,当温度变化时,镜体的温度很快达到一致,可以更有效地解决反射镜的热变形问题。

4 轻型反射镜的结构形式及结构参数

空间遥感相机反射镜的轻型结构有很多种(图 2)^[3],目前国内外所普遍使用的主要有底面局部开口结构如图 2(b)(由于底部开口非常小,因此可近似为对称夹心结构,如图 2(a)的形式)和底面开口结构如图 2(c),本文主要对图 2 中的(a)和(c)即对称夹心结构和底面开口结构这两种结构进行讨论,其结构参数如图 3。



(a) 对称夹心结构 (b) 底面开口结构
(a) Sandwich (b) Open back

图 3 具有正四边形蜂窝内芯的轻型反射镜

Fig. 3 Light-weighted mirror structures with square rib pattern

弯强度的影响是相同的^[6]。因此本文作者认为应该根据反射镜的外形尺寸和支撑结构来选择轻量化蜂窝单元的形状。

4.2 镜面厚度

在对反射镜镜面的粗磨、精磨、抛光等过程中,需要对其施加一定的压力,如果镜面太薄,则压力会使反射镜镜面产生均匀性的网格效应,使加工后的反射镜镜面面形分布图呈现与蜂窝单元相对应的、周期性的枕形变形。加工过程中,为了使轻型反射镜单个蜂窝单元的最大变形量 δ_c 达到一个允许值,就必须设计相应的镜面厚度 t_f 。根据 Baren's 的推论^[2]可知:

$$\delta_c = \psi(P/D)b^4 = \psi \left[\frac{Et_f^3}{12(1-\nu^2)} \right]^{-1} Pb^4, \quad (7)$$

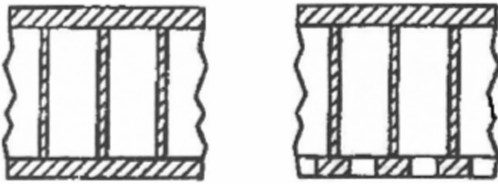
式中, P 为加工反射镜镜面时均匀分布于一个蜂窝单元上的压力, b 为轻型反射镜蜂窝内接圆直径, ψ 是与轻型反射镜蜂窝单元形状有关的形状因子,对于不同的形状,它的取值不同:

$$\psi_{\text{square}} = 0.00126 \quad \psi_{\text{triangle}} = 0.00151 \quad \psi_{\text{hexagonal}} = 0.00111$$

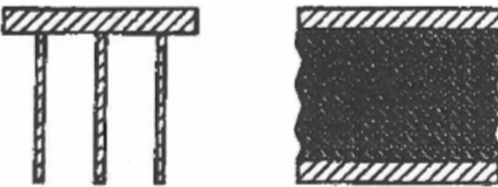
如果定义 $\xi = E/12(1-\nu^2)$ 为材料因子,那么:

$$\delta_c = \frac{\psi Pb^4}{\xi t_f^3}, \quad (8)$$

从上式可以看出,一旦确定了轻型反射镜蜂窝单元结构及尺寸和加工镜面时施加的压力,那么在满足一定 δ_c 值的条件下镜面厚度是随着材料因子的增大而减小的。由于轻型反射镜蜂窝单元形状分别为正四边形、三角形和正六边形时的 ψ 值相差非常小,本文以正四边形为例进行讨论,取 $\psi = 0.00126$ 。假设加工反射镜镜面时施加的压力约为 67 kPa , 轻型反射镜蜂窝内接圆直径为



(a) 对称夹心结构 (b) 底面局部开口结构
(a) Sandwich (b) half-open back



(c) 底面开口结构 (d) 泡沫夹心结构
(c) Open back (d) Foam sandwich

图 2 轻型反射镜结构形式

Fig. 2 Light-weighted mirror structures

4.1 轻量化蜂窝单元形状的选择

轻型反射镜的蜂窝单元几何形状有正六边形、正四边形和三角形等几种。许多科学家也研究了这些几何形状对轻型反射镜结构强度的影响,得出的结论不一^[4-5]。不过目前比较倾向的观点是蜂窝单元的几何形状对反射镜自重变形和抗

40 mm,要使 δ_c 值 $< \lambda/10$ ($\lambda = 633$ nm),则各种材料制作的反射镜所需的镜面厚度如表 2 所示。从表中可以看出,由于铍和碳化硅的材料因子值比较高,它们所需的镜面厚度相对较薄,而且对应的单位面积质量也较小。此外,碳化硅与铍相比不具有毒性,故 SiC 是轻型反射镜非常理想的候选材料。

表 2 各种材料反射镜的镜面厚度

Tab. 2 Thickness of mirror front faces

反射镜材料	ULE	Zerodur	铍(Be)	碳化硅(RB-SiC)
材料因子 $\xi(\times 10^9)$	5.75	8.14	24.03	28.90
所需镜面厚度 (cm)	0.81	0.72	0.50	0.47
单位面积质量 (g/cm ²)	1.79	1.82	0.925	1.43

4.3 轻量化度

轻型反射镜相对于相同尺寸实体结构减轻的质量,即轻量化度,轻量化度是与蜂窝结构的尺寸以及镜面厚度有着密切关系的。与相同厚度的实心结构镜体比较,轻型反射镜的轻量化度 τ 的表达式为^[7]:

$$\tau = mt_f/h + (1 - mt_f/h)\eta, \quad (9)$$

式中 h 为轻型反射镜的总高度,对于对称夹心结构 $m=2, h=h_s$;对于底面开口结构 $m=1, h=h_o$ 。 η 为筋实比,其表达式为

$$\eta = (2b + t_w)t_w / (b + t_w)^2, \quad (10)$$

式中 b 为蜂窝内接圆直径, t_w 为筋的厚度。在本文的讨论中设 $b = 40$ mm, $t_w = 4$ mm,因此 $\eta = 0.174$ 。

5 轻型反射镜的抗弯强度

空间遥感相机在装调、运输、发射等过程中会受到各种各样来自外界或是由于加速度而产生的力,因此作为相机主要器件的轻型反射镜必须具有足够的抗弯强度。

实心结构、对称夹心结构和底面开口 3 种结构轻型反射镜的抗弯强度的表达式可以统一为^[8]:

$$D = \frac{Et_b^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (11)$$

对于厚度为 t 的实心结构

$$t_b^3 = t^3, \quad (12)$$

对于对称夹心结构

$$t_b^3 = (2t_f + h_c)^3 - (1 - \eta/2)h_c^3, \quad (13)$$

对于底面开口结构

$$t_b^3 = \frac{(1 - \eta/2)(t_f^4 - \eta h_c^4/2) + (t_f + h_c)^4 \eta/2}{t_f + \eta h_c/2}, \quad (14)$$

式中 h_c 为筋高。

在相同抗弯强度下,可计算出 ULE、Zerodur、Be 和 SiC 这几种材料制作的实心结构镜体的径厚比(如表 3)。对于直径 500 mm 的实心结构镜体和直径 500 mm、蜂窝内接圆直径 40 mm、镜面厚度分别为 8.1 mm、7.2 mm、5.0 mm、4.7 mm 的 ULE、Zerodur、Be、SiC 制作的对称夹心结构及底面开口结构镜体在相同抗弯强度下的总厚度及总质量如表 4、5。

表 3 实心结构镜体的径厚比

Tab. 3 Ratio of diameter to thickness of solid structure

反射镜材料	ULE	Zerodur	铍(Be)	碳化硅(RB-SiC)
实心结构镜体 径厚比(d/t)	4.9	5.6	8.0	8.5

表 4 直径 500 mm 时三种结构镜体的厚度

Tab. 4 Thickness of three kinds of structures

反射镜材料	ULE	Zerodur	铍(Be)	碳化硅(RB-SiC)
实心结构 镜体厚度 t (mm)	101.3	90.0	62.5	58.8
对称夹心结构镜 体总厚度 h_s (mm)	141.6	125.8	87.4	82.2
底面开口结构镜 体总厚度 h_o (mm)	185.8	165.1	114.6	107.9

由表 3~5 中可以看出,对镜体实施轻量化后,在抗弯强度不变的条件下虽然其总厚度有所增加,但是反射镜的质量却降低了很多,这样就能够大大节约发射成本。而且对称夹心结构较底面开口结构而言轻量化程度还要高一些,可以更大的减轻反射镜的质量。另外,从表中还可以看出铍(Be)和碳化硅制作的反射镜不论是镜体总厚度还是镜体质量都明显优于其它两种材料,非常适合于制作轻型反射镜镜体。

上述讨论没有考虑轻型反射镜的支撑方式,若考虑支撑方式,轻型反射镜镜体的抗弯强度和

厚度应以支撑点的位置及受力状况来估算,进一步的详细信息应通过更严格的力学计算获得。

表 5 直径 500 mm 时三种结构镜体的质量

Tab. 5 Weight of three kinds of structures

反射镜材料	ULE	Zerodur	铍(Be)	碳化硅(RB-SiC)
实心结构 镜体质量(kg)	44.0	44.7	22.7	35.1
对应对称夹心 结构总高度的实 心结构质量(kg)	78.2	79.6	40.4	62.5
对称夹心结构 轻量化度(%)			73.15	
对应对称夹心 镜体质量(kg)	21.00	21.4	10.8	16.8
对应底面开口结 构总高度的实心 结构质量(kg)	102.7	104.4	53.0	82.0
底面开口结构 轻量化度 τ (%)			79.00	
底面开口结构 镜体质量(kg)	21.6	21.9	11.1	17.2

6 轻型反射镜对称夹心结构和底面开口结构比较

对称夹心结构和底面开口结构是轻型反射镜制作中比较常用的两种结构。

底面开口结构可以使质量减轻 50%, 制作和加工背部都比较容易, 厚度方向的热阻小, 能减小热形变。但是从上面的计算和讨论中可知在抗弯强度相同的条件下, 它所需的镜体总高度比对称夹心结构高, 而且在镜体总厚度相同的条件下, 它受力后变形量也比对称夹心结构大。

对称夹心结构可以使质量减轻 60% 以上, 受力后变形量小, 因此和底面开口结构比起来具有一定的优势, 但是制作和加工比较困难。目前国外利用消逝模技术已经能够解决对称夹心结构轻型反射镜的制作问题, 长春光机所采用类似于美国的“CERFORM”成型技术, 按照上述理论计算

数据并结合实际成功制作了双层夹心结构 SiC 轻型镜体。图 4 为反应烧结后的碳化硅质镜体。

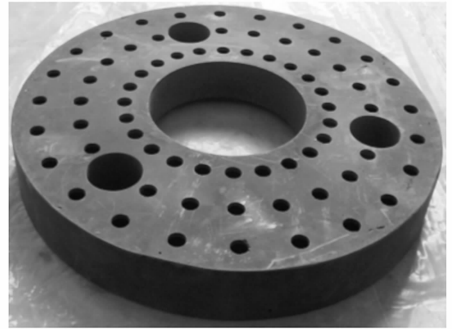


图 4 长春光机所制作的 $\phi 500$ 对称夹心结构轻型碳化硅镜坯

Fig. 4 Light-weighted SiC mirror blank with sand-wich structure made by CIOMP

7 结 论

本文介绍了空间遥感相机常用的四种反射镜材料, 对这几种材料制作的两种轻型反射镜结构——对称夹心结构和底面开口结构的结构参数进行了讨论。在抗弯强度相同的条件下, 计算了直径为 500 mm 的实心结构、对称夹心结构以及底面开口结构镜体的高度和重量。通过分析和比较可知, 用碳化硅制作的轻型反射镜在轻量化程度上的性能是非常优异的, 而且制作工艺简单, 成本低廉; 对称夹心结构在很多方面优于底面开口结构。根据理论计算所得数据并结合实际制作了对称夹心结构的碳化硅质轻型反射镜。

参考文献:

- [1] 马文礼, 沈忙作. 碳化硅轻型反射镜技术[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(2): 8-12.

- MA W L, SHEN M Z. Weightlight SiC mirror technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(2): 8-12. (in Chinese)
- [2] BARNES Jr W P. Optimal design of conic mirror structure[J]. *Appl. Opt.*, 1969, 8(6): 1191-1196.
- [3] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
YANG L. *Fabricate techniques in advanced optics*[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [4] BARNES Jr W P. Hexagonal vs triangular core lightweight mirror structure[J]. *Appl. Opt.* 1972. 11. 2748.
- [5] RICHARD R M, MAALVICK A J. Elastic deformation of lightweight mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 1973, 12: 1220.
- [6] SHENG S C F. Lightweight mirror structure best core shapes; A reversal of historical belief[J]. *Appl. Opt.*, 1988, 27(2): 354-359.
- [7] ENGLISCH W, TAKKE R. Ultra-lightweight quartzglass blanks[J]. *SPIE*, 1989, 1113: 190-194.
- [8] MEHTA P K. Flexural rigidity characteristics of light-weighted mirrors[J]. *SPIE*, 748, 1987: 158-171.

作者简介:张 舸(1980—),男,重庆荣昌人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学技术中心在读博士研究生,主要从事无机非金属材料方面的研究。E-mail:zz-gg7838@sina.com