

# 碳纤维增强复合材料反射镜的刚度分析

初昶波 周绍祥

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系,合肥 230027)

**摘要** 用有限元法对层合板结构和蜂窝夹层结构的两种复合材料反射镜的刚度进行分析计算,分析是以 Ex1522 环氧树脂为基体, M60J 碳为增强材料的平面反射镜为例进行的,分析包括不同铺层取向、顺序的层合板反射镜自重下的镜面变形;对蜂窝夹层结构反射镜,分别比较了以芳纶纸、玻璃布、耐久铝三种夹层材料的反射镜刚度,对比了碳纤维复合材料、钛金属、微晶玻璃为面板材料的反射镜刚度,讨论了不同蜂窝单元结构形状对反射镜刚度的影响. 分析表明,对于以 Ex1522 环氧树脂为基体, M60J 碳为增强材料的平面复合材料反射镜,要使其具有相对稳定的面形,应采用单元形状为正三角形铝蜂窝,前后面板各为 12 层 [90/45/0/-45]<sub>3</sub> 层合板的夹层结构.

**关键词** CFRC 反射镜;有限元分析;刚度

**中图分类号** TB332;O439 **文献标识码** A

## 0 引言

无论是对地观察,还是宇宙太空探索,都对光学仪器的分辨率提出了越来越高的要求,提高系统的光学分辨率最直接的方法是增大主反射镜的口径. 但是随着主反射镜口径的增加,包括次反射镜和附属信息处理设备在内的整个光学系统的质量必然大大增加,系统的复杂度和发射成本也将成倍增长. 因此,反射镜轻量化越来越引起人们的注意,现在已形成一个"轻量光学"的技术学科.

反射镜轻量化技术已经取得相当的进展,从低膨胀系数光学玻璃、轻金属铍、碳化硅到复合材料都已成为轻量化反射镜可选择材料,有的已经接近使用程度. 近几年,CFRC 轻型反射镜的技术已经有了突破,CFRC 已经成为最具潜力的轻质反射镜材料.

CFRC 的主要优点有:

1) 密度小. 制成的反射镜的质量是相同口径的传统材料反射镜的质量的几分之一乃至百分之一.

2) 比刚度大. 虽然 CFRC 单层的弹性模量具有方向性,但层合板的面内弹性模量仍能达到 100 GPa 以上.

3) 热稳定性好. 热膨胀系数小(略大于微晶玻璃),热导率较高,热变形小.

4) 可获得极光滑表面. 美国 CMA 公司,已经掌握了获得光学表面的工艺,其表面粗糙度达到了 0.7 nm rms<sup>[1]</sup>,优于哈勃望远镜主镜 2.4 nm rms 的粗糙度.

5) 工艺较为简单,制造成本较低. 利用一个制作精良的镜模可以复制几十个反射镜,质量一致,生产周期短,特别适合反射镜阵列的制造.

人们在 1980 前就已试制了 CFRC 反射镜,由于面形精度达不到光学要求,主要用于卫星天线,如西德的 Dornier 制作的第一个 CFRC 夹芯反射镜,面形误差为 100 μm rms,面密度约 1.8 kg/m<sup>2</sup><sup>[2]</sup>. 但是直到 2000 年,才由美国的 Peter C. Chen 解决了反射镜面板形状误差过大的问题. 他采用 M55J/Ex1515 复合材料并有一套优化的制作方案,样品镜的面形误差达到 0.2 ~ 1λ rms, λ = 632.8 nm<sup>[3]</sup>.

本文计算分析了 CFRC 反射镜的铺层顺序、结构形式、夹芯材料、面板材料、蜂窝单元形状对反射镜刚度的影响. 反射镜基体材料为美国 BRYTE Technologies, Inc. 出品的 Ex1522 环氧树脂,增强材料选用日本 Toray 公司出品的 M60J 宇航级细丝束高模量碳纤维.

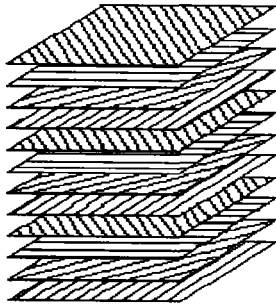
## 1 铺层设计及刚度分析

铺层设计又称作层合板设计,就是根据单层的性能确定层合板中各个铺层的取向、铺层顺序、各定向层相对于总层数的百分比和总层数等. 图 1 是 [90/45/0/-45]<sub>3</sub> 层合板铺层示意图.

表 1 CFRC 反射镜基体和增强体材料的力学参量

材料	密度 /10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	弹性模量 /GPa	泊松比	剪切模量 /GPa
EX1522 环氧树脂	1.46	4.002	0.48	1.352
M60J 碳纤维	1.94	588	0.22	221.3

注: Ex1522 环氧树脂数据来自网站 <http://www.brytotech.com/pdf-ds/ex1522ds.pdf>, M60J, 碳纤维数据来自网站 [http://www.rkgruppen.se/english/produkter/kolfiber\\_torayca.htm](http://www.rkgruppen.se/english/produkter/kolfiber_torayca.htm)

图1 [90/45/0/-45]<sub>3s</sub>层合板铺层示意图Fig. 1 [90/45/0/-45]<sub>3s</sub> laminate layer sketch map

CFRC 层合板铺层设计遵循的一般原则如下:

- 1) 铺层取向过多会造成设计工作的复杂化,如需要设计成准各向同性板,可采用  $\pi/4, \pi/3$  两种取向;
- 2) 除特殊需要外,一般铺成均衡对称层合板,以免固化后因拉剪、拉弯耦合引起翘曲;
- 3) 任一铺层方向的铺层,最小铺层百分比大于或等于 6% ~ 10%;
- 4) 各定向铺层尽量沿厚度方向均匀分布,为了避免分层,每一单层组中单层数一般不超过 4 层;
- 5) 层合板中如含有  $\pm 45^\circ, 0^\circ, 90^\circ$  层,应尽量使  $45^\circ$  层之间用  $0^\circ$  层和  $90^\circ$  层隔开,也使  $0^\circ$  层和  $90^\circ$  层用  $45^\circ$  层隔开,以降低层间应力<sup>[4]</sup>.

根据前人经验,设纤维/树脂体积比为 67%,共 24 层<sup>[3]</sup>;同时设 CFRC 单层厚度为 0.1 mm. 反射镜工作环境下的面形和受力状况要求反射镜面板内各个方向刚度相同,并要避免镜面的翘曲,因此有限元计算分析采用准各向同性层合板模型.

就 24 层的准各向同性层合板而言,符合上述设计原则的铺层方案太多,无法一一进行计算比较. 实际设计中,另外采用特殊设计原则,即 1) 单层组数最多,即每一单层组中单层数最少,即等于 1; 2) 对称层中用重复的单层组铺层.

基于上述原则,对于  $\pi/4, \pi/3$  两种取向的准各向同性层合板,分别有 6 和 8 种铺层顺序. 用有限元软件分析这 14 种铺层顺序的自重变形:模型采用 shell99 单元,平面圆  $\phi 200$  mm,三角形自由网格,边界条件为周边固定. 有限元模型如图 2 所示.

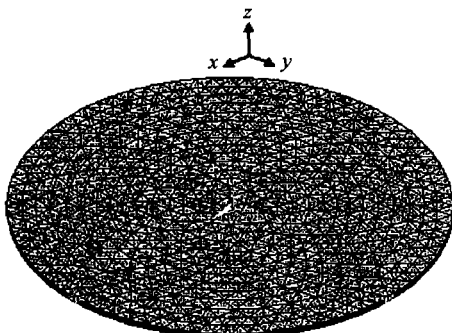
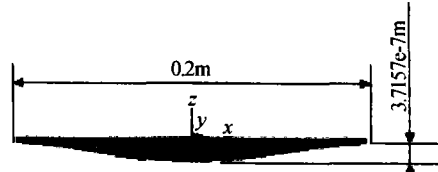


图2 层合板反射镜有限元模型

Fig. 2 FEM model of laminate mirror

考虑反射镜模型既定的边界条件和受力状况, $z$  向位移量是决定反射镜面形变化的主要因素,因此只对  $z$  向位移量进行分析,下同. 层合板反射镜 [90/45/0/-45]<sub>3s</sub> 的镜面变形见图 3. 所有 14 种铺层顺序的层合板反射镜的自重变形见表 2.

图3 层合板[90/45/0/-45]<sub>3s</sub>的镜面变形Fig. 3 Deformation distribution of [90/45/0/-45]<sub>3s</sub>.

laminate mirror

表2 14种铺层顺序的层合板反射镜的自重变形

铺层顺序	PV/m	RMS/m
[0/60/-60] <sub>4s</sub>	3.8332e-7	1.6927e-7
[0/-60/60] <sub>4s</sub>	3.8604e-7	1.7285e-7
[6/0/-60] <sub>4s</sub>	3.8070e-7	1.6596e-7
[60/-60/0] <sub>4s</sub>	3.8008e-7	1.6533e-7
[-60/0/60] <sub>4s</sub>	3.8472e-7	1.7187e-7
[-60/60/0] <sub>4s</sub>	3.8123e-7	1.6761e-7
[0/45/90/-45] <sub>3s</sub>	3.8209e-7	1.6803e-7
[0/-45/90/45] <sub>3s</sub>	3.9281e-7	1.7672e-7
[45/0/-45/90] <sub>3s</sub>	3.8786e-7	1.7085e-7
[45/90/-45/0] <sub>3s</sub>	3.7728e-7	1.6324e-7
[-45/0/45/90] <sub>3s</sub>	3.9788e-7	1.7922e-7
[-45/90/45/0] <sub>3s</sub>	3.8889e-7	1.7197e-7
[90/45/0/-45] <sub>3s</sub>	3.7157e-7	1.6053e-7
[90/-45/0-45] <sub>3s</sub>	3.8395e-7	1.6958e-7

从以上反射镜的变形结果看,在自身重力作用下,采用 [90/45/0/-45]<sub>3s</sub> 铺层顺序的层合板反射镜变形最小;此种铺层方式适合于 M60J/Ex1522 复合材料,直径  $\phi 200$  mm,厚度为 2.4 mm 的准各向同性反射镜.

## 2 不同结构和材料的刚度分析

### 2.1 层合板结构反射镜和蜂窝夹层结构反射镜比较

蜂窝夹层反射镜模型采用 shell91 单元,由于软件中 shell91 单元模型对反射镜面板层数的限制,计算中反射镜模型上下面板均取 6 层,夹层为正六边形铝蜂窝,蜂窝的力学参量见表 7,铺层顺序为 [0/60/-60/0/60/-60/C<sub>12</sub>]<sub>s</sub>. 层合板反射镜模型 [0/60/-60]<sub>2s</sub> 同样采用 shell91 单元. 设 CFRC 单层厚度为 0.2 mm,其他尺寸参量和边界条件同上. 蜂窝夹层结构的有限元模型和两者的变形结果分别见图 4 和表 3.

从以上数据来看,蜂窝夹层反射镜的刚度要比相同面板材料和几何参量的层合板反射镜大接近一个数量级. 因此,蜂窝夹层结构是设计反射镜时优先考虑的结构形式.

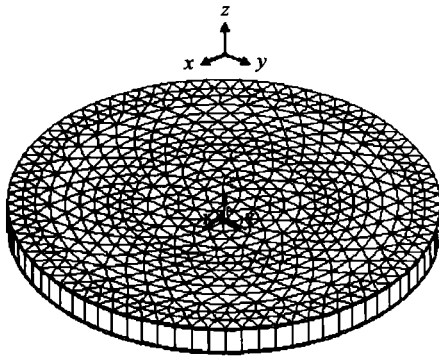


图4 蜂窝夹芯结构反射镜有限元模型  
Fig.4 FEM model of sandwich mirror

表3 层合板反射镜和蜂窝夹层反射镜自重变形

反射镜结构	PV/m	RMS/m
层合板结构	4.0784e-7	1.8254e-7
蜂窝夹层结构	5.2196e-8	2.8969e-8

2.2 不同芯材的蜂窝夹层反射镜的刚度分析

蜂窝夹层反射镜中,可用作芯材的材料有芳纶纸、玻璃布、耐久铝、复合材料等.本文选择前3种材料的标准芯材作为反射镜夹层,上下面板为6层的

M60J/Ex1522CFRC,其它参量和条件同上.反射镜夹层芯材参量<sup>[5]</sup>和有限元静态分析的变形结果见表4.

表4 蜂窝芯材参量和反射镜自重变形

材料	牌号	Ez /MPa	Gxz /MPa	Gyz /MPa	PV/m	RMS/m
芳纶纸	NF-1-4-48	90.0	49.0	30.0	2.8680e-7	1.6201e-7
玻璃布	GH-1-4.5-55	115	27.0	15.7	5.4102e-7	3.0315e-7
耐久铝	SYL-3-0.05/4-53	638	53.0	39.4	2.3639e-7	1.3339e-7

从以上数据来看,在芯材密度和网格大小近似的情况下,用芳纶纸和耐久铝做芯材的反射镜变形比较接近,都比较小;而玻璃布芯材的反射镜变形则较大.因此,反射镜芯材最好选用耐久铝,芳纶纸次之,最好不要用玻璃布.

2.3 不同面板材料的蜂窝夹层反射镜的刚度分析

为了比较不同面板材料的蜂窝夹层反射镜的刚度,芯材选用耐久铝 SYL-3-0.05/4-53,面板分别选用 M60J/Ex1522 CFRC、Be、Zerodur,3种材料的力学性能见表5,其中CFRC铺层顺序为[0/60/-60]<sub>2</sub>.

表5 反射镜面板材料的力学性能<sup>[6]</sup>

材料	密度 /10 <sup>3</sup> kg·m <sup>-3</sup>	Ex/GPa	Ey/GPa	Ez/GPa	$\nu_{xy}$	$\nu_{yz}$	$\nu_{xz}$	Gxy/GPa	Gyz/GPa	Gxz/GPa
CFRC	1.7816	138.92	138.92	11.96	0.332	0	0	52.158	3.802	4.765
Be	1.85		287			0.043			137.5839	
Zerodur	2.53		91			0.24			36.6935	

反射镜的几何参量、边界条件同上,有限元静态分析的变形结果见表6.从表中的数据结果看,

表6 不同面板材料反射镜的自重变形

面板材料	PV/m	RMS/m
M60J/Ex1522 CFRC	2.3639e-7	1.3339e-7
Be	2.4208e-7	1.3690e-7
Zerodur	3.2673e-7	1.8385e-7

M60J/Ex1522 CFRC是可以同Be媲美的材料,两者为面板的蜂窝夹层反射镜比Zerodur为面板的夹层

反射镜刚性好.

2.4 不同蜂窝单元形状的蜂窝夹层反射镜的刚度分析

反射镜芯材常用正六边形、正方形、正三角形3种蜂窝单元形状,如图5所示,其中阴影部分是计算元.蜂窝材料用铝,为了便于比较,设3种芯材的密度和网格壁厚 $t_s$ 均相同,网格宽 $c$ 和力学参量的计算结果见表7.

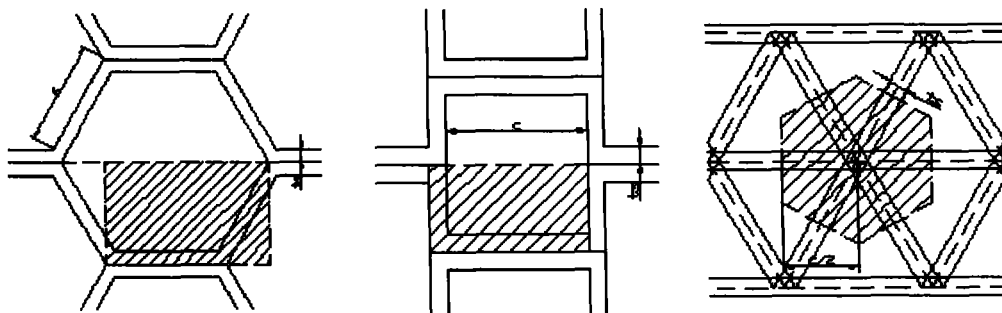


图5 3种蜂窝单元和相应的计算元  
Fig.5 Three honeycomb cells and their calculating cells

表7 3种等密度蜂窝的结构和力学参量

单元形状	c/mm	Ex/MPa	Ey/MPa	Ez/GPa	Gxy/MPa	Gyz/MPa	Gxz/MPa
正六边形	4	0	0	1.29	0	184.49	276.74
正方形	7.8193	0	0	1.2853	0	162.43	322.81
正三角形	9.1203	0	0	1.2853	0	242.74	215.77

反射镜面板材料用M60J/Ex1522 CFRC,铺层顺序为[0/60/-60]<sub>2</sub>.反射镜的几何参量、边界条件同上,有限元静态分析的变形结果见表8.

从以上数据看,当质量相等时,正六边形和正方形蜂窝的反射镜刚度相近,正六边形稍好;正三角形

蜂窝的反射镜刚度比前两者均大.

表 8 不同蜂窝形状反射镜的自重变形

蜂窝单元形状	PV/m	RMS/m
正六边形	5.2196e-8	2.8969e-8
正方形	5.3953e-8	2.9952e-8
正三角形	4.7214e-8	2.6116e-8

### 3 结论

本文分析了影响反射镜刚度的几个主要因素, 得到现有条件下提高 CFRC 反射镜刚度的一个优化方案: 蜂窝夹层结构; 上下面板各 12 层, 采用 [90/45/0/-45]<sub>3</sub> 的 M60J/Ex1522 复合材料; 夹层采用正三角形铝蜂窝.

#### 参考文献

- 1 Chen P C, Saha T T, Smith A M, *et al.* Progress in very lightweight optics using graphite fiber composite materials. *Optical Engineering*, 1998, **37**(2):669
- 2 Abt B, Helwig G, Scheulen D, *et al.* Composite technology for lightweight optical mirrors. *SPIE Advanced Technology Optical Telescopes IV*, 1990, **1236**:696
- 3 Chen P C, Bowers C W, Content D A, *et al.* Advanced in very lightweight composite mirror technology. *Optical Engineering*, 2000, **39**(9):2321
- 4 李顺林, 王兴业. 复合材料结构设计基础. 湖北: 武汉工业大学出版社, 1996. 200 ~ 201  
Li S L, Wang X Y. Design Basis of Composite Material Structure. Hubei: Wuhan Industry University Press, 1996. 200 ~ 201
- 5 工程材料实用手册. 北京: 中国标准出版社, 1989. 349-361  
Applied Manual of Engineering Material. Beijing: China Criterion Press, 1989. 349 ~ 361
- 6 杨力. 先进光学制造技术. 北京: 科学出版社, 2001. 195 ~ 197  
Yang L. Advanced Optical Manufacturing Technology. Beijing: Science Press, 2001. 195 ~ 197

## Stiffness Analysis of Carbon-fiber Reinforced Composite Mirror

Chu Changbo, Zhou Shaoxiang

Department of PMPI, USTC, Hefei 230027

Received date: 2003-03-10

**Abstract** The light-weight space optical mirror made of CFRC is a relatively new concept and has profound significance. The paper analyzes and compares the following factors which influence the stiffness of CFRC mirror: different layer sequences, mirror structures, honeycomb materials, face-plate materials, honeycomb cell shapes, etc. An optimized design to enhance the mirror stiffness is also given.

**Keywords** CFRC mirror; FEA; Stiffness



**Chu Changbo** was born in 1977 in Shandong Province. Now he is working towards the M. E. degree in University of Science & Technology of China, he is devoted to the concept research of smart space mirror system.