

文章编号: 1002-1582(2003)03-0365-03

# 碳纤维复合材料反射镜面板的铺层设计\*

赵洪波<sup>1</sup>, 马丽华<sup>1,2</sup>, 姜志<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068; 2. 空军工程大学 电讯工程学院, 西安 710077)

**摘要:** 从刚度设计的角度出发, 利用有限元法对用于某空间光学系统的碳纤维复合材料反射镜面板的铺层进行设计, 通过对角度相间步长为  $15^\circ$  的铺层所制作的各种面板进行静力学分析, 得出了在相同载荷的作用下, 采用  $[0^\circ/60^\circ/-60^\circ]$  的铺层形式的反射面板产生的变形最小的结论, 进而提出了在使用碳纤维复合材料制作空间光学反射镜时, 反射面板铺层设计的一般方法, 可以对碳纤维复合材料反射镜的制作提供一些参考。

**关键词:** 复合材料反射镜; 刚度设计; 有限元分析; 铺层

中图分类号: V445.8 文献标识码: A

## Design of panel layers on reflector with CFRP

ZHAO Hong-bo<sup>1</sup>, MA Li-hua<sup>1,2</sup>, JIANG Zhi<sup>1</sup>

(1. Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, Xian 710068, China)

(2. Telecommunication and Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xian 710077, China)

**Abstract:** FEA is used to design the layers of reflector panel made of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) in view of rigidity, which reflector is used in a space optical system. It is concluded that the deformation under the same load is the least when the laying way is  $[0^\circ/60^\circ/-60^\circ]$ , after static's analysis of some kinds of reflector panel, which is made of the layers whose angel step is  $15^\circ$ . So the common method is set forth to design the layers of reflector panel when a space optical reflector is made of CFRP. It can be as a reference to make the reflector by CFRP.

**Key words:** composite materials; rigidity design; FEA; panel layers

## 0 引言

随着空间光学的发展和复合材料在宇航中的广泛应用, 也引发了世界各国的科研工作者对使用复合材料来制作轻量化空间光学反射镜镜体的探索, 并已取得了重大的成就, 尤其以碳纤维复合材料反射镜制造技术的发展最为迅速, 成绩亦最为显著。轻量化反射镜镜体主要有夹层式、开放式和半开放式三种形式的结构, 其中夹层结构是一种最有优势的结构<sup>[1]</sup>。

从反射镜的功能角度看, 保证镜面的面形是结构设计中的关键所在, 而对于具有夹层结构形式的复合材料反射镜来说, 反射面板的力学性能, 特别是镜体的刚度将直接影响着镜面面形, 所以复合材料反射镜反射面板的铺层设计不但要遵循强度的设计原则, 还更要遵循刚度的设计原则。本文主要用有限元法对蜂窝夹层结构形式的碳纤维复合材料反射镜面板在满足一定的刚度条件的铺层设计, 并提出其设计的一般方法。

## 1 碳纤维复合材料反射镜反射面板的刚度设计原则、力学计算方法及材料选择

碳纤维复合材料反射镜反射面板的刚度直接影响着镜面的面形, 反射镜的面形指标对面板提出了需要满足的刚度指标, 因此面板的刚度设计是制作碳纤维复合材料反射镜的首要任务。

(1) 反射面板在外加载荷的作用下不允许产生塑性变形, 否则就有了永久的变形, 反射面板一旦出现永久变形就意味着结构产生了永久的损伤; 即使是反射面板的弹性变形也应当满足反射镜的面形指标, 同时变形不应严重改变外部载荷或内力的分布。

(2) 注意利用复合材料铺层的正交异性特性和结构的层压特性, 通过合理地选取铺层角、铺层比和铺层顺序, 以最小的质量代价达到所要求的刚度。

单向铺层的工程常数可依据组分材料的性能和组份的体积百分含量, 并利用细观力学分析方法给出的公式来预测<sup>[2]</sup>。

碳纤维增强树脂基复合材料单向铺层的工程常

\* 收稿日期: 2002-08-27; 收到修改稿日期: 2002-09-25

作者简介: 赵洪波(1972), 男, 吉林人, 西安光学精密机械研究所博士研究生、从事光学仪器结构工程分析研究。

数的预测公式:

纵向拉伸弹性模量

$$E_1 = E_t V + E_m (1 - V_t)$$

横向拉伸弹性模量

$$E_2 = \frac{E_f E_m (V_f + \eta_2 V_m)}{E_m V_f + E_f V_m \eta_2}$$

纵向泊松比

$$\nu_1 = v_f V_f + v_m (1 - V_f)$$

横向泊松比

$$\nu_2 = \nu_1 \frac{E_1}{E_2}$$

纵横剪切弹性模量

$$G_{12} = \frac{G_f G_m (V_f + \eta_{12} V_m)}{G_m V_f + G_f V_m \eta_{12}}$$

式中  $E_f$  为碳纤维拉伸弹性模量;  $E_m$  为基体拉伸弹性模量;  $v_f$  为碳纤维泊松比;  $v_m$  为基体泊松比;  $G_f$  为碳纤维剪切弹性模量;  $G_m$  为基体剪切弹性模量;  $V_f$  为碳纤维体积含量;  $V_m = 1 - V_f$  为基体体积含量;  $\eta_2$ ,  $\eta_{12}$  均由试验确定, 对于玻璃纤维/环氧树脂可取用 0.5; 对于碳纤维/环氧树脂可取用 0.97。

作为空间光学反射镜的反射面板必须具有足够的强度和刚度, 因此增强体碳纤维和基体树脂均选择为高模型, 具体性能参数如表 1 所示。

表 1 碳纤维和树脂的性能参数<sup>[2]</sup>

性能		符号	单位	碳纤维	基体树脂
密度		$\rho$	$\text{kg/m}^3$	1.93	1.24
拉伸模量	纵向	$E_1$	GPa	380	5.2
	横向	$E_2$	GPa	6.2	
剪切模量	纵向	$G_1$	GPa	7.6	1.92
	横向	$G_2$	GPa	4.8	
泊松比	主	$\nu_1$		0.20	0.35
	次	$\nu_2$		0.25	
比热容		$c$	$10^3 \times \text{J/(kg.K)}$	0.84	1.05
导热系数	纵向	$\lambda_1$	$\text{W/(m.K)}$	84	0.18
	横向	$\lambda_2$	$\text{W/(m.K)}$	8.4	
热膨胀系数	纵向	$\alpha_1$	$10^{-6}/\text{K}$	-0.3	22.2
	横向	$\alpha_2$	$10^{-6}/\text{K}$	3.1	
体积百分含量		$V$		0.60	0.40

利用工程预测公式算得的单向带的弹性常数为:  $E_1 = 230.08 \text{ GPa}$ ,  $E_2 = 12.97 \text{ GPa}$ ,  $\nu_1 = 0.26$ ,  $\nu_2 = 0.015$ ;  $G_{12} = 4.11 \text{ GPa}$ 。

## 2 反射镜面板模型的建立及其铺层设计

铺层设计是碳纤维复合材料反射镜面板设计中的最为关键性的设计工作之一, 它也是复合材料设计的特有的工作内容, 铺层设计的优劣在很大的程度上影响着镜体结构设计的成败。

面板铺层设计主要包括: 选取合适的铺层角, 确定各种铺层角的铺层百分比和铺层顺序三个内容。

有关面板铺层设计的一般原则如下<sup>[2]</sup>:

(1) 面板结构应采用均衡对称铺层, 以避免耦合引起翘曲。

(2) 在面板的铺层结构中, 任一铺层角的铺层, 其最小铺层百分比应大于或等于 6~10%。

(3) 同一铺层角的铺层不宜过多集中在一起, 超过四层易出现分层。

在某光学系统中, 拟采用碳纤维复合材料来制作主反射镜, 其结构形式为蜂窝夹层结构, 其中反射面板的直径为 300mm, 厚度为 1.92mm。由于面板的径厚比很大, 因此我们利用 ANSYS 的 SHELL99 模块进行分析<sup>[3]</sup>, 模型分为 24 层, 单层厚度为 0.008 mm, 共 3682 个节点。由于要与蜂窝胶结, 故支撑方式为周边环支撑模型; 由于此反射镜面板在加工与检测时, 重力加速度的方向与反射镜面板的轴向方向(即 Z 方向)一致, 故在 Z 方向上加载 1g 的加速度, 以计算反射镜面板的镜面在空间失重状态下的变形恢复量, 此恢复量由 PV 值和 RMS 值来表征。加载方式如图 1 所示。

反射镜面板

属于层合板, 层合板的力学性能不仅决定于单层板的性能和厚度, 而且决定于铺层的方向、层数和顺序。层合板可以分为对称层合板

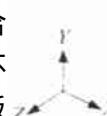


图 1 镜体反射面板的模型图

和非对称层合板, 对称层合板具有中面对称性, 在面内力作用下只发生面内变形而不发生弯曲变形; 在弯曲力矩的作用下只发生弯曲变形而不发生面内变形。非对称层合板不具有中面对称性, 在面内力、弯矩或二者同时作用下将呈现复杂的变形行为。对于反射镜而言, 反射镜的面形的大小是重要的设计指标之一, 因此, 为了使镜面的组合变形最小, 我们把复合材料反射镜的面板设计成对称层合板<sup>[4]</sup>。

由于反射镜面板的铺层共为 24 层, 为了保证在

镜面的法向方向上要求材料均匀以及铺层对称, 我们选择的铺层间角度相间的步长为  $15^\circ$  ( $360^\circ / 24 = 15^\circ$ ), 这样可以得到五种形式的铺层, 并利用有限元法对各种铺层形式的反射面板进行静力学分析, 通过镜面的面形变化来选择合适的铺层角。由于反射镜面板的铺层是对称层合板, 支撑方式是周边环支撑, 因此整个模型是  $XOY$  面对称的, 我们选定面板的法向方向为  $+Z$  的面为镜面。镜面的力学分析数据见表 2。

表 2 在各种铺层角下的反射镜面

板镜面的轴向变形 (单位: m)

铺层角	PV	RMS
铺层间角度相间 $15^\circ$	$4.5035e-9$	$1.4011e-9$
铺层间角度相间 $30^\circ$	$4.7997e-9$	$1.4178e-9$
铺层间角度相间 $45^\circ$	$4.6955e-9$	$1.3984e-9$
$[0^\circ/60^\circ/-60^\circ]_s$	$4.2643e-9$	$1.2687e-9$
$[0^\circ/-60^\circ/60^\circ]_s$	$4.3506e-9$	$1.2997e-9$
$[-60^\circ/60^\circ/0^\circ]_s$	$4.3506e-9$	$1.2997e-9$
$[-60^\circ/0^\circ/60^\circ]_s$	$4.5779e-9$	$1.3600e-9$
$[60^\circ/0^\circ/-60^\circ]_s$	$4.3859e-9$	$1.3302e-9$
$[60^\circ/60^\circ/0^\circ]_s$	$4.5803e-9$	$1.3809e-9$
$[90^\circ/-90^\circ]_s$	$4.9254e-9$	$1.3391e-9$
$[-90^\circ/90^\circ]_s$	$4.9254e-9$	$1.3391e-9$
$[-45^\circ/45^\circ]_s$	$6.2297e-9$	$1.8692e-9$
$[45^\circ/-45^\circ]_s$	$6.0255e-9$	$1.8398e-9$

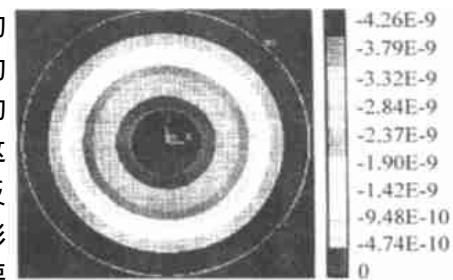
说明: 每一铺层的方向用纤维与  $X$  轴的夹角示出, 彼此间用“/”分开, 全部铺层用“[ ]”括上, 其中“ $s$ ”表示对称铺层。

从以上的分析数据看, 在相同载荷的作用下, 采用  $[0^\circ/60^\circ/-60^\circ]_s$  的铺层形式(如图 2 所示)的反射面板是产生变形最小的( $PV = 4.2643e-9m$ ,  $RMS = 1.2687e-9m$ ), 加载后的变形如图 3 所示。因此, 此种铺层方式适合于  $\phi = 300mm$ , 厚度为  $1.92mm$ , 铺层为 24 层的均衡对称的碳纤维复合材料反射镜的反射面板。

### 3 碳纤维复合材料反射镜反射面板铺层设计的一般方法

层合板的铺层设计就是指对铺层角、铺层比以及铺层顺序的选择。对于碳纤维复合材料反射镜反射面板的铺层设计, 除了要遵循层合板铺层设计的

一般原则外, 还要有一些特殊的要求。反射镜作为光学系统的最为重要的元器件, 其功能是成像, 这样就要对反射镜的面形有严格的要求, 碳纤维复合材

图 3 镜体反射面板受载后的变形图  
(铺层方式为  $[0^\circ/60^\circ/-60^\circ]_s$ )

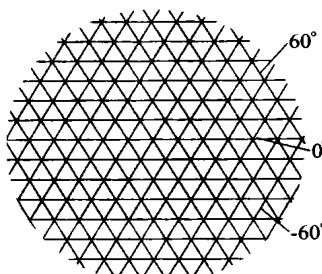
反射面板的刚度直接影响着镜面的面形, 因此对面板的刚度设计十分重要。具体设计的方法如下:

(1) 根据复合材料铺层设计的一般原则和反射镜的特殊要求, 结合具体的结构, 同时参考已选材料的性能参数及几何参数, 来确定铺层角的范围。

(2) 利用有限元分析软件对使用各种铺层方式来制作的反射面板进行分析, 包括静力学分析、模态分析和热分析。

(3) 对三种分析的数据进行处理。在静力学分析中, 挑出使反射面板面形变化最小的铺层方式; 在模态分析中, 挑出使反射面板基频最高的铺层方式; 在热分析中, 挑出使反射面板产生最小温度梯度的铺层方式。

(4) 分别对使反射面板面形变化最小的铺层方式, 对反射面板基频最高的铺层方式, 使反射面板产生最小温度梯度的铺层方式所制作的反射面板进行过载分析, 通过反射面板的面形最小、基频最高及温度梯度最小的原则最后确定其铺层方式。

图 2 镜体反射面板的铺层示意图(铺层方式为  $[0^\circ/60^\circ/-60^\circ]_s$ )

### 4 结束语

通过对某光学系统的碳纤维复合材料反射镜反射面板在各种铺层方式下的静力学分析, 得出最为适合反射面板面形要求的铺层方式, 进而提出碳纤维复合材料反射镜反射面板铺层设计的一般方法, 对碳纤维复合材料反射镜的制作提供一些参考。

#### 参考文献:

- [1] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 186—191.
- [2] 陈绍杰. 复合材料设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1990: 51—52, 104—106, 181—183.
- [3] 夸克工作室编. 有限元分析 ANSYS 和 MATLAB[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 526—541.
- [4] 姜委之, 赵时熙. 工程材料的力学性能[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000: 202—206.