

铺层角度误差对 CFRP 平面反射镜面形影响研究

宫 鹏^{1,2},程路超^{1,2},董 健¹,何锋赞¹,陈 涛¹,刘震宇¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:为了解决 CFRP(carbon fiber reinforced polymer)平面反射镜在加工成型后的面形存在像散像差的问题,建立相关的理论模型以对其产生机理进行解释,并设计实验对模型进行验证。首先基于经典层合板的热效应理论,考虑到 CFRP 平面反射镜制造过程中存在铺层角度误差及温度变化等因素,推导了相关公式以说明当对称均衡铺层 CFRP 反射镜存在铺层角度误差时,在热效应的影响下会产生马鞍形的变形,即会导致面形出现像散像差。设计了相关实验,制备了两组铺层角度分别为 $[0^\circ 90^\circ 45^\circ -45^\circ]_{2s}$ 和 $[(0^\circ 90^\circ 45^\circ -45^\circ)_s]_2$ 的反射镜样片,并利用 Zygo 长波红外干涉仪($\lambda=10.6 \mu\text{m}$)对样片总体面形及像散像差进行检测。实验数据显示:第一组样片像散像差的 RMS 值平均为 0.034λ ,第二组样片像散像差的 RMS 值平均为 0.510λ 。证明了铺层角度误差是使反射镜产生像散像差的主要原因之一,而且像差大小会随着反射镜弯曲刚度准各向同性的提高而减小。

关键词: CFRP 反射镜; 像散像差; 对称均衡铺层; 铺层角度误差; 温度变化

中图分类号: O343.8 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0814003

Effect of ply angle misalignment on surface aberration of CFRP reflective mirror

Gong Peng^{1,2}, Cheng Luchao^{1,2}, Dong Jian¹, He Fengyun¹, Chen Tao¹, Liu Zhenyu¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to solve the problem that there exists astigmatism during the fabrication of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) reflective mirror, a theoretical model was established to explain the relations, and relative experiments were made to verify the model. First, from classical laminate thermal effect theory, ply angle misalignment and temperature variation during manufacturing process were considered. The corresponding formulas were deduced to demonstrate that the surface of CFRP reflective mirror existed astigmatism under thermal effect because of ply angle misalignment. Two groups of samples with respective ply sequence $[0^\circ 90^\circ 45^\circ -45^\circ]_{2s}$ and $[(0^\circ 90^\circ 45^\circ -45^\circ)_s]_2$ were manufactured and their astigmatism were measured with a Zygo long-wave infrared interferometer ($\lambda=10.6 \mu\text{m}$).

收稿日期:2019-03-11; 修订日期:2019-04-20

基金项目:国家自然科学基金(51675506)

作者简介:宫鹏(1994-),男,硕士生,主要从事碳纤维反射镜设计方面的研究。Email:gongpeng0010@163.com

导师简介:刘震宇(1972-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事拓扑优化领域方面的研究。Email:liuzy@ciomp.ac.cn

Experimental results indicate that average astigmatism RMS of the front group is 0.034λ , and average astigmatism RMS of the latter group is 0.510λ . It verifies that one of the main reasons causing astigmatism of CFRP reflective mirror is ply angle misalignment, and the degree of astigmatism will decrease by increasing quasi-isotropy of bending stiffness.

Key words: CFRP reflective mirror; astigmatism; balanced and symmetrical alignment; ply angel misalignment; temperature variation

0 引言

光学反射镜作为光学望远镜探测系统中的主要结构,无论在地基、空基还是天基系统中均有极大应用。在如今的光学观测指标逐渐提升和观测设备轻量化的要求下,光学反射镜已经朝着大口径、轻量化的方向发展,因此,反射镜的制造材料选择就显得极其重要。传统的用来制造光学反射镜的材料经历了玻璃、金属和 SiC 陶瓷三代^[1],但是三者都有各自的缺点,使得其应用场合受到一定的局限性。碳纤维增强聚合物(CFRP)材料作为 20 世纪中期兴起的一种新型材料,具有密度小、比模量高、强度高、热稳定性好、工艺简单、可设计性强等优点,成为了继三种传统材料后具有极大发展潜力的新型反射镜材料^[2-3]。

CFRP 复合材料制作的反射镜不仅能够满足反射镜的高精度要求,而且能够制造相较于传统材料口径更大的反射镜。CFRP 材料的热稳定性以及较低的热膨胀系数能够保证成品反射镜在使用过程中的性能稳定以免导致较大的面形变化使得光学系统精度下降甚至失效。美国海军研究实验室联合桑迪亚国家实验室和复合反射镜应用公司于 2014 年研制了口径 0.4 m 的应用于望远镜的 CFRP 反射镜,并对昼夜温差下面形的稳定性进行了研究^[4];Xu Liang 等人采取新的铺层方式及蜂窝支撑结构制作了面形精度(Root Mean Square, RMS)值为 $0.22\ \mu\text{m}$ 的 300 mm 口径反射镜^[5];杨智勇等人从碳纤维反射镜的制作工艺及精度出发,对模具使用、尺寸稳定性及纤维印痕等因素进行了探讨^[6],并就铺层设计及镜体固化对面形精度的影响进行了实验分析^[7];ThompsonS 等人采用有限元仿真方法对 32 种不同铺层下铺层取向误差导致像散像差的现象进行了验证^[8]。

文中从理论上分析了温度载荷下铺层角度误差

对 CFRP 反射镜面形误差尤其是像散像差的影响。基于经典层合板及其热效应理论推导了层合板和单层复合材料的等效热力矢量和等效热内力矩矢量关于材料属性和铺层角度的关系,并由此分析了反射镜铺层角度误差影响像散像差的机理。考虑到在目前的 CFRP 反射镜最常用的成型制造方法中,人工铺设环节的铺层角度误差无法完全消除,因此,进行相关实验对铺层角度误差引起像散像差的现象进行分析验证。实验采用 T700 单向预浸料作为实验材料,采取 $[0^\circ\ 90^\circ\ 45^\circ\ -45^\circ]_{2s}$ 和 $[(0^\circ\ 90^\circ\ 45^\circ\ -45^\circ)_s]_2$ 两种铺层方式,样品在由高温固化成型到降至室温的过程中,会因为温度变化导致的热效应而产生变形。之后用 Zygo 长波红外干涉仪对成品样片面形中的像散像差进行检测分析,由此验证制作过程中铺层角度误差对成型后反射镜面形误差中像散像差的影响,并且就如何减小像散像差提出解决方案。

1 经典层合板及热效应理论^[9-10]

从宏观力学角度分析复合材料的性能已经有了较为成熟的理论体系,无论是单层的性能还是层合板的性能都有着很好的理论基础。根据各向异性材料属性以及材料力学相关公式,可以得到关于单层复合材料的正轴应力-应变转换公式和偏轴应力-应变转换公式:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{1,2}$ 和 τ_{12} 为正轴应力; $\sigma_{x,y}$ 和 τ_{xy} 为偏轴应力; $\varepsilon_{1,2}$ 和 γ_{12} 为正轴应变; $\varepsilon_{x,y}$ 和 γ_{xy} 为偏轴应变; Q_{ij} 及

\bar{Q}_{ij} 为正轴模量和偏轴模量，两者均具有对称性，且对于同种材料均为常量，两者的转化关系如下所示：

$$\bar{[Q_{ij}]} = [T_\varepsilon]^T [Q_{ij}] [T_\varepsilon] \quad (3)$$

$$[T_\varepsilon] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & mn \\ m^2 & n^2 & mn \\ -2mn & 2mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： $m = \cos\theta$, $n = \sin\theta$, θ 为该层的铺层角度。方向不同的单层通过一定顺序的铺叠得到各种各样的层合板，对于具有 n 层结构的层合板，单层序号及沿着铺层方向的坐标定义如图 1 所示，取层合板中面为坐标平面。

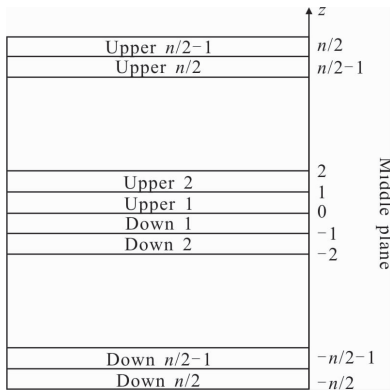


图 1 层合板结构及编号示意图

Fig.1 Structure and number image of laminate

一般层合板的设计为避免拉弯耦合引起的翘曲，需要保证面内刚度的各向同性，因此会采取对称均衡铺层，但无法同时保证弯曲刚度的准各向同性。弯曲刚度的准各向同性有利于减小层合板的非对称变形。如果层合板各方向弯曲刚度差异较大，在存在面外力矩时会产生很大的非对称面外变形。通过

对对称均衡层合板的角度排布进行设计可以得到较为理想的弯曲刚度准各向同性的铺层顺序。夏瑜等人^[11]基于此，利用正则化刚度系数法和正则化几何因子法设计了 12 个角度下具有最佳弯曲刚度准各向同性的铺层顺序，并进行了有限元分析。

层合板的热膨胀效应作为材料的基本属性之一，在铺层设计中具有不可忽视的作用。通过引入等效热力矢量和等效热内力矩矢量来描述复合材料层合板在热效应下的本构关系，两者的表达式如下：

$$\begin{bmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n [T_\varepsilon]^T [Q_{ij}] \begin{bmatrix} \alpha_L \\ \alpha_T \\ 0 \end{bmatrix} h \Delta T \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n [T_\varepsilon]^T [Q_{ij}] \begin{bmatrix} \alpha_L \\ \alpha_T \\ 0 \end{bmatrix} h z_k \Delta T \quad (6)$$

式中： α_L 、 α_T 为单层复合材料两个主方向的热膨胀系数； $\varepsilon_{x,y}$ 和 γ_{xy} 为偏轴热应变； ΔT 为温度的变化量； h 为单层的厚度； z_k 为各单层的 z 坐标。

2 角度扰动导致的热应力及其变形分析

根据上文得到的等效热力矢量以及等效热内力矩矢量，可得单位温度变化下单层的等效热力矢量的 3 个分量表达式：

$$\begin{cases} N_x = [m^2(\alpha_L Q_{11} + \alpha_T Q_{12}) + n^2(\alpha_L Q_{12} + \alpha_T Q_{22})] h \\ N_y = [n^2(\alpha_L Q_{11} + \alpha_T Q_{12}) + m^2(\alpha_L Q_{12} + \alpha_T Q_{22})] h \\ N_{xy} = [mn(\alpha_L Q_{11} + \alpha_T Q_{12} - \alpha_L Q_{12} + \alpha_T Q_{22})] h \end{cases} \quad (7)$$

对公式(7)进行整理可得：

$$\begin{cases} N_x = [(\alpha_L Q_{11} + \alpha_T Q_{12} - \alpha_L Q_{12} - \alpha_T Q_{22}) \cos 2\theta + (\alpha_L Q_{11} + \alpha_T Q_{12} + \alpha_L Q_{12} + \alpha_T Q_{22})] \frac{h}{2} \\ N_y = [-(\alpha_L Q_{11} + \alpha_T Q_{12} - \alpha_L Q_{12} - \alpha_T Q_{22}) \cos 2\theta + (\alpha_L Q_{11} + \alpha_T Q_{12} + \alpha_L Q_{12} + \alpha_T Q_{22})] \frac{h}{2} \\ N_{xy} = [(\alpha_L Q_{11} + \alpha_T Q_{12} - \alpha_L Q_{12} - \alpha_T Q_{22}) \sin 2\theta] \frac{h}{2} \end{cases} \quad (8)$$

对于理想的对称均衡铺设层合板，其面内刚度为各向同性且不存在拉弯耦合。此外，由于关于层合板中面对称的两层具有相同的角度排布，因此两者在面内各方向的热力分量相等，这就使得整个层合板的等效热内力矩矢量为零，故不存在弯曲效应。在

上述条件下，给予某一层一个角度扰动，保持其他铺层的角度铺设依然为理想状态，在只施加温度变化的条件下对由此产生的等效热力矢量和等效热内力矩矢量进行分析。将单层的等效热力矢量公式(8)改写成如下形式：

$$\begin{cases} N_x = \frac{1}{2} h [A \cos 2\theta + B] \\ N_x = \frac{1}{2} h [-A \cos 2\theta + B] \\ N_y = \frac{1}{2} h A \sin 2\theta \end{cases} \quad (9)$$

其中
$$\begin{cases} A = \alpha_L Q_{11} + \alpha_T Q_{12} - \alpha_L Q_{12} - \alpha_T Q_{22} \\ B = \alpha_L Q_{11} + \alpha_T Q_{12} + \alpha_L Q_{12} + \alpha_T Q_{22} \end{cases}$$

由于 A、B 均只与材料属性有关,因此,对于单层复合材料其等效热力矢量在不同方向上的分量只与铺层角度相关。

当某一层存在微小的角度扰动时,由于其他对称的层产生的力矩依旧处于平衡状态,因此,只考虑与扰动层关于中面对称的另一层与扰动层之间的关系。当扰动层存在角度 $\Delta\theta$ 的扰动时,其两个主方向上的面内等效热力矢量可写成如下形式:

$$\begin{cases} N_x^* = \frac{1}{2} h [A \cos 2(\theta + \Delta\theta) + B] \\ N_y^* = \frac{1}{2} h [-A \cos 2(\theta + \Delta\theta) + B] \end{cases} \quad (10)$$

而其与相对应的未扰动层的面内等效热力矢量的差为:

$$\Delta N = N^* - N = \begin{cases} [A(\cos 2(\theta + \Delta\theta) - \cos 2\theta)] \frac{h}{2} \\ [-A(\cos 2(\theta + \Delta\theta) - \cos 2\theta)] \frac{h}{2} \end{cases} \quad (11)$$

显然有 $\Delta N_x = -\Delta N_y$, 并且由此产生的等效热内力矩矢量为:

$$\Delta M = \Delta N \cdot z = \begin{cases} [A(\cos 2(\theta + \Delta\theta) - \cos 2\theta)] \frac{h}{2} z \\ [-A(\cos 2(\theta + \Delta\theta) - \cos 2\theta)] \frac{h}{2} z \end{cases} \quad (12)$$

同样的有 $\Delta M_x = -\Delta M_y$, 这样的面外力矩会使层合板产生马鞍形的变形,对于光学反射镜来说即会产生像散面形误差。

由公式(11)还可以得出面内等效热力矢量 N 关于铺层角度 θ 的灵敏度为:

$$\begin{cases} \frac{dN_x}{d\theta} = -hA \sin 2\theta \\ \frac{dN_y}{d\theta} = hA \sin 2\theta \end{cases} \quad (13)$$

显然当 $\theta = \pm 45^\circ$ 时面内等效热力矢量及由此产生的力矩对于角度扰动最敏感,当 $\theta = 0^\circ, 90^\circ$ 时敏感性最小。文中采取 $[0^\circ \ 90^\circ \ 45^\circ \ -45^\circ]_2$ 和 $[(0^\circ \ 90^\circ \ 45^\circ \ -45^\circ)]_2$

两种铺层顺序,一方面是考虑到这 4 个角度的排布具有代表性且在理想对称均衡铺层下两者的表现相同,而且通过经典层合板理论计算可得:第一组铺层相对于第二组铺层具有更好的弯曲刚度准各向同性,另一方面,由敏度分析可见,将 0° 铺层放在外侧可以获得鲁棒性更好的结果。Shun Tanaka 等人^[12]基于 XN60/NM31 复合材料利用实验和有限元计算方法进行了数个具有代表性的角度下,铺层角度误差对 CFRP 反射镜热变形敏度的分析,得到了相同扰动下,当其存在于 45° 铺层时的整体变形要比存在于其他角度铺层时大的结论。

3 铺层角度误差对面形影响的实验分析

目前复合材料层合板成型工艺有热压罐成型工艺、RTM 成型工艺、LCM 成型工艺和 RFI 成型工艺等。文中实验采用 T700 碳纤材料制备的单向预浸料作为实验材料,制备两组铺层角度分别为 $[0^\circ \ 90^\circ \ 45^\circ \ -45^\circ]_2$ 和 $[0^\circ \ 90^\circ \ 45^\circ \ -45^\circ]_s$, 直径为 70 mm 的 CFRP 平面反射镜,每组各有 3 个样片。采用复印模具表面法及热压罐成型工艺制作相应铺层角度的反射镜,模具材料选择上采用微晶玻璃。在之前的研究中^[13]已经表明:模具材料主要导致的是像差中的球差,且可以控制在较小的范围之内,因此,可以认为作为像差的主要组成部分的像散主要是由铺层角度误差所致。实验用裁剪机及干涉仪实物如图 2 所示,整体工艺流程如图 3 所示。

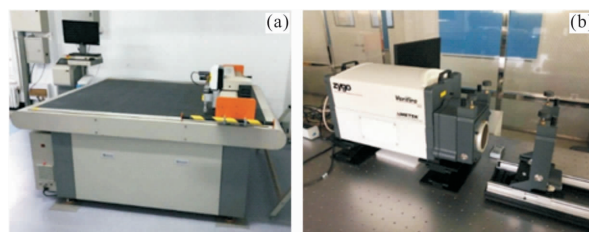


图 2 实验用裁剪机(a)及干涉仪(b)实物图

Fig.2 Pictures of cutting machine(a) and interferometer(b)

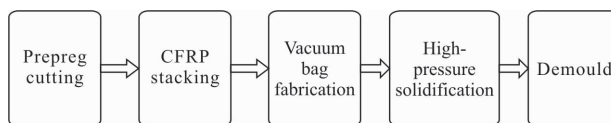


图 3 CFRP 反射镜工艺流程

Fig.3 Technology process of CFRP reflective mirror

固化过程中预浸料中的热固性树脂在 120 °C 时开始由液态固化成型，文中以固化成型后的时刻定义 CFRP 反射镜处于无温度变化的零应力状态。成型之后在降至室温的过程中，温度的下降会对反射镜产生热效应，其面形会因此发生变化。由于在人工铺层的过程中总会存在无法避免的微小角度误差，因此在整个反射镜的制作成型过程中相当于对有铺层角度扰动的反射镜施加温度载荷，由上面理论分析的结论可得，成品反射镜面形中必然存在像散像差。

Zernike 多项式^[14]是光力学分析中用来对镜面面形进行插值拟合的公式，不仅可以利用其正交性将面形变化分解成各种基本变形的叠加形式，还可以通过设置不同项的系数来专门研究特定项的像差，其表达式如下：

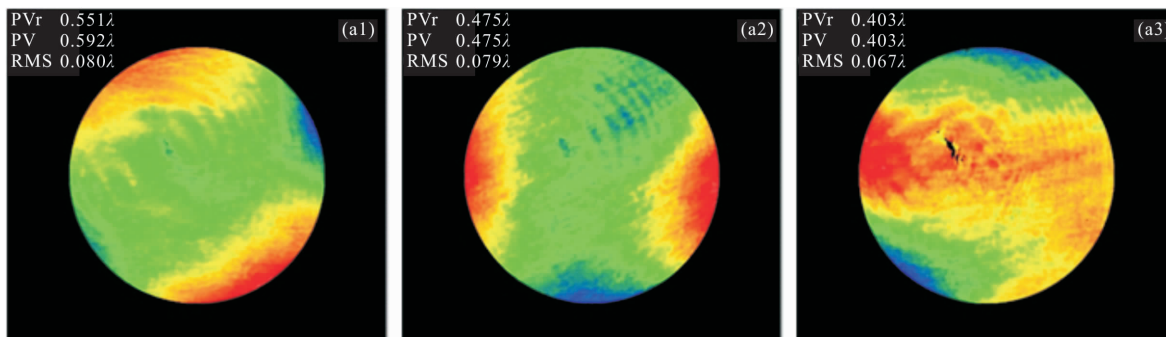
$$\phi(x,y)=\sum_{k=1}^m a_{ck}Z_k(x,y) \quad (14)$$

式中： Z_k 为第 k 项 Zernike 多项式； a_{ck} 为第 k 项系数； m 为项数。传统的面形检测技术主要有在镜面镀金

属层然后利用可见光进行检测和三坐标测量的方法，前者会导致反射镜产生额外的球差，后者则无法达到很高的精度。实验采用的 Zygo 长波红外干涉仪 ($\lambda=10.6 \mu\text{m}$) 不仅可以对成品反射镜样片面形中的 RMS 值进行检测而不产生额外像差，而且具有极高的精度。

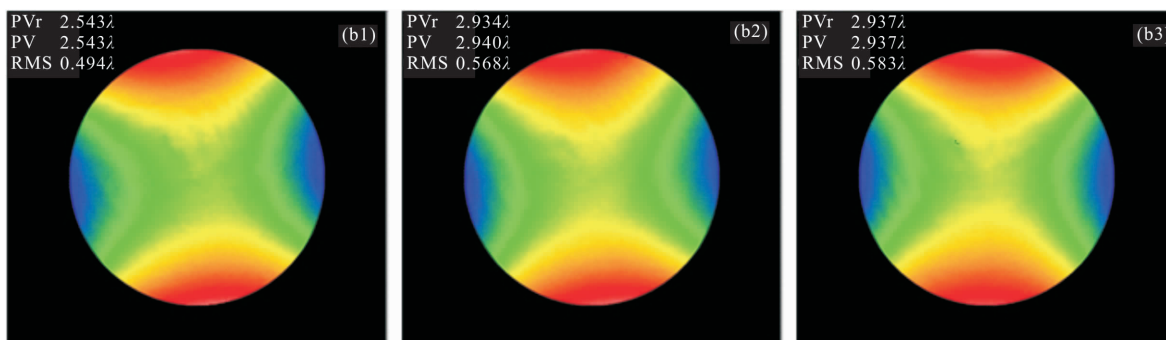
样片制作采用相同的预浸料，相同的加工条件，以及相同的实验人员以确保将外界因素对实验的结果影响为最小。实验样片总体面形检测结果的图片如图 4 所示，检测数据结果列于表 1 中，在同一图中绘出两组实验数据像散像差对应的 RMS 值进行对比，如图 5 所示。

由实验结果可见，每个样品的面形检测中均存在像散像差，且在控制其它影响因素相近的情况下，同一组的实验结果，包括总体面形 RMS 值及像散像差的 RMS 值均较为接近，因此实验结果具有较高的可信度。通常情况下平面反射镜的面形精度 $\text{RMS} < \lambda/20$ 时可以认为满足使用需求。由两组实验检测结



(a) 铺层角度为 $[0^\circ \ 90^\circ \ 45^\circ \ -45^\circ]_2$, (RMS 0.080λ, 0.079λ, 0.067λ)

(a) Group of ply alignment $[0^\circ \ 90^\circ \ 45^\circ \ -45^\circ]_2$, (RMS 0.080λ, 0.079λ, 0.067λ)



(b) 铺层角度为 $[0^\circ \ 90^\circ \ 45^\circ \ -45^\circ]_2$, (RMS 0.494λ, 0.568λ, 0.583λ)

(b) Group of ply alignment $[0^\circ \ 90^\circ \ 45^\circ \ -45^\circ]_2$, (RMS 0.494λ, 0.568λ, 0.583λ)

图 4 样片总体面形长波干涉仪检测结果

Fig.4 Total surface results tested by long-wave interferometer

果可见,图 4(a)的 RMS 值已经接近使用需求,可以通过进一步的优化使之满足精度条件。反观图 4(b)的 RMS 值则相对较大,无法满足实际应用。在铺层角度误差分布相近的情况下,两组铺层的差别在于弯曲刚度的不同,进而导致面外变形程度的不同,图 4(a)的弯曲刚度准各向同性要优于图 4(b),因此具有更好的实验结果。但这并不意味着图 4(a)的铺层顺序即为弯曲刚度最佳的铺层顺序,因此如何得到最优的铺层顺序以获得最佳的弯曲刚度和最小的面外变形仍是一个值得研究的问题。

表 1 两组样片长波红外干涉仪检测 RMS 值结果
Tab.1 RMS results of two sample groups tested by long-wave infrared interferometer

Group	Number	RMS of total surface/ λ	RMS without astigmatism/ λ	RMS of astigmatism/ λ
Fig.4(a)	1	0.080	0.042	0.038
	2	0.079	0.039	0.040
	3	0.067	0.044	0.023
Fig.4(b)	1	0.494	0.046	0.448
	2	0.568	0.036	0.532
	3	0.583	0.034	0.549

Notes: λ is the wave length of long-wave infrared interferometer.

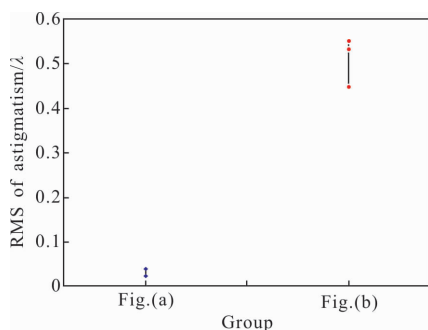


图 5 两组实验结果像散像差 RMS 值比较

Fig.5 Astigmatism RMS comparison of two experimental groups

4 结论

经过上述分析,得出如下结论:

(1) 文中从影响 CFRP 复合材料平面反射镜面形精度的因素出发,利用经典层合板热效应理论,得

出了在温度载荷下平面反射镜像散像差的产生主要是由于反射镜制造的铺层过程中存在无法避免的角度误差的结论。铺层角度误差的存在使得反射镜在温度载荷下会在垂直于镜面方向上产生两个相互垂直且方向相反的力矩,从而导致反射镜出现马鞍形的变形,即产生像散面形误差。

(2) 文中就如何分析解决实际制作过程中 CFRP 平面反射镜面形存在较大的像散像差的问题,设计制作了两种具有不同弯曲刚度的铺层顺序的反射镜。实验结果显示:弯曲刚度准各向同性较好的第一组像散像差平均 RMS 值为 0.034λ ,而第二组的像散像差平均 RMS 值为 0.510λ ,因此,在提升铺层取向精度的同时,通过设计铺层顺序获得更佳的弯曲刚度是解决像散面形误差的重要方法。

参考文献:

- [1] Wang Yongjie, Xie Yongjie, Ma Zhen, et al. Research progress of new space mirror materials[J]. *Materials Review*, 2016, 30(4A): 143-147, 153. (in Chinese)
王永杰, 解永杰, 马臻, 等. 空间反射镜新材料研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(4A): 143-147, 153.
- [2] Lin Zaiwen, Liu Yongqi, Liang Yan, et al. Application of carbon fiber reinforced composite to space optical structure [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(8): 1181-1185. (in Chinese)
林再文, 刘永琪, 梁岩, 等. 碳纤维增强复合材料在空间光学结构中的应用[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1181-1185.
- [3] Sugita S Awaki H, Kurihara D, et al. Studies of lightweight x-ray telescope with CFRP [C]//Conference on Space Telescopes and Instrumentation: Ultraviolet to Gamma Ray, Montreal, Canada: 2014, 914447.
- [4] Wilcox C, Santiago F, Jungwirth M, et al. First light with a carbon fiber reinforced polymer 0.4 meter telescope [C]//Conference on MEMS Adaptive Optics VIII, 2014, 897805.
- [5] Xu Liang, Ding Jiaoteng, Wang Yongjie, et al. The development of high precision carbon fiber composite mirror [C]//8th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies -Advanced Optical Manufacturing Technologies, 2016: 96831Z.
- [6] Yang Zhiyong, Zhang Jianbao, Xie Yongjie, et al. Influence of layup and curing on the surface accuracy in the manufacturing of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite space mirrors [J]. *Applied Composite Materials*,

- 2017, 24(6): 1447–1458.
- [7] Yang Zhiyong, Zhang Boming, Xie Yongjie, et al. Research progress on fabrication technology of space mirror using carbon fiber composite [J]. *Acta Material Composite Sinica*, 2017, 34(1): 1–11. (in Chinese)
杨智勇, 张博明, 解永杰, 等. 碳纤维复合材料空间反射镜制造技术研究[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(1): 1–11.
- [8] Thompson S, Bichonand S, Grant R. Influence of ply misalignment on form error in the manufacturing of CFRP mirrors [J]. *Optical Material Express*, 2014, 4(1): 79–91.
- [9] Li Shunlin, Wang Xingye. The Base of Construction Design of Composites [M]. Wuhan: Wuhan University of Industry Press, 1993. (in Chinese)
李顺林, 王兴业. 复合材料结构设计基础[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1993.
- [10] Jiao Guiqiong, Jia Purong. Composite Mechanics[M]. Xi'an: Northwestern University of Technology Press, 2008. (in Chinese)
矫桂琼, 贾普荣. 复合材料力学 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
- [11] Xia Yu, Zeng Chunmei, Guo Peiji. Lay-up design of quasi-isotropic CFRP mirror for active forming [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1885–1892. (in Chinese)
夏瑜, 曾春梅, 郭培基. 主动成型准备向同性 CFRP 复合材料反射镜的铺层设计 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1885–1892.
- [12] Tanaka S, Ikeda T, Senba A. Sensitivity analysis of thermal deformation of CFRP laminate reflector due to fiber orientation error [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(10): 4423–4426.
- [13] Cheng Luchao, Pan Hui, Xie Jun, et al. Study on power error of CFRP plane reflector caused by mold material [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2017, 40(1): 10–13. (in Chinese)
程路超, 潘辉, 谢军, 等. 模具材质对 CFRP 平面反射镜离焦面形误差的研究 [J]. *长春理工大学学报*, 2017, 40(1): 10–13.
- [14] Keith B, Victor L, Gregory J. Integrated Optomechanical Analysis [M]. Bellingham: The International Society For Optical Engineering, 2012.