

文章编号: 1005-5630(2011)01-0024-05

用缓冲层结构抑制碳纤维表面复制中的纤维印透^{*}

姚有为, 杨夏军, 金慧俊, 刘宏颖, 穆宝忠

(同济大学 精密光学工程技术研究所, 上海 200092)

摘要: 针对碳纤维光学元件复制过程中的纤维印透现象, 提出了镍-环氧树脂-镍的缓冲层方法。以单向碳纤维材料为基底, 采用传统方法制备了碳纤维-环氧树脂-银膜结构的光学反射镜; 采用缓冲层方法, 制备了碳纤维-镍-环氧树脂-镍-银膜的光学反射镜。用台阶仪测试了这两种光学元件在垂直纤维方向和沿纤维方向的表面形貌。结果表明, 纤维印透现象主要发生在垂直于纤维方向, 在小尺度范围内, 缓冲层结构对纤维印透现象有明显的抑制作用, 碳纤维复制表面粗糙度振幅低于 50nm; 在大范围内复制表面仍存在突变, 但好于采用传统方法制备的没有缓冲层的反射镜。

关键词: 复制技术; 碳纤维; 纤维印透现象; 缓冲层

中图分类号: TH 743 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2011.01.006

Mitigating fiber print-through phenomenon by alleviation interlayer method in CFRP replication technique

YAO Youwei, YANG Xiajun, JIN Huijun, LIU Hongying, MU Baozhong

(Institute of Precision Optical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The method of interlayer alleviation to mitigate fiber print-through phenomenon in carbon fiber reinforced polymer (CFRP) mirror replication process was presented. Using traditional method and interlayer method in CFRP replication technique respectively, two mirror samples have been fabricated and measured by step tester along and perpendicular to the fiber direction. The results show the fiber print-through phenomenon is available perpendicular to the fiber direction. In small range area, the alleviation layer obviously mitigates the print-through phenomenon with the surface roughness less than 50nm. Although the surface error exists in large range area, it is still better than that by traditional methods.

Key words: replication technique; CFRP; fiber print-through; alleviation interlayer

引言

碳纤维复合材料具有质量轻、强度大、刚性好、在特定方向零膨胀等优点, 被广泛应用于空间结构器件和光学元件^[1-4]。在以纤维材料为基底的超薄光学元件复制技术中, 由于一直没能解决纤维印透现象 (fiber print-through)^[5], 制约了在精密光学领域的应用。例如, 嵌套式硬 X 射线天文望远镜的镜片只能

^{*} 收稿日期: 2010-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10773007, 10978002); 国际科技合作计划资助项目(2008DFA01920)

作者简介: 姚有为(1984-), 男, 上海市人, 硕士研究生, 主要从事 X 射线光学元件方面的研究。

通讯作者: 穆宝忠(1975-), 男, 山东莱州人, 副教授, 博士, 主要从事 X 射线光学方面的研究。

采用 Al、Ni 或玻璃等材料作为超薄基底,通过复制的方法制备出超光滑表面。如果采用碳纤维材料作为基底,望远镜将具有重量、强度、热应力等性能优势,但 print-through 现象的存在使光学元件的面形和表面粗糙度无法满足短波光学的要求。因此,消除 print-through 现象成为碳纤维材料光学元件研究的重点^[6]。目前,常采用在碳纤维材料与光学表面间添加树脂缓冲层的方法去减小 print-through 现象的影响,但树脂层的缓冲效果有限,厚度达到 0.25mm 的树脂层依然无法完全消除 print-through 现象,并且整个制备过程需要两次固化,工艺繁琐^[4-6]。文中提出了一种夹层缓冲层方法,以镍—环氧树脂—镍作为纤维与光学表面间的缓冲层,研究其对 print-through 现象的抑制。

1 碳纤维材料的 print-through 现象

碳纤维材料(CFRP)是碳纤维丝和环氧树脂混合固化的两相复合材料,纤维直径为 $10\mu\text{m}$ 左右。采用碳纤维材料制作光学元件,通常采用复制的方法,基本流程如图 1 所示。首先制备超光滑光学表面作为母板,在母板表面镀光学薄膜,然后将超薄的基底(厚度约几百微米)粘在光学薄膜上,采用特殊工艺使薄膜随着超薄基底从母板上分离下来,得到厚度只有几百微米的超光滑光学元件。

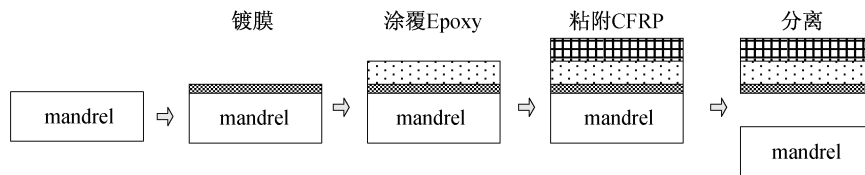


图 1 镜面复制技术工艺图

Fig. 1 Diagram of mirror replication technique

在理想情况下,分离表面复制了母板表面,粗糙度和面形与母板一致。但在以固化的环氧树脂(Epoxy)作为超薄基底的时候,复制后的表面存在纤维印透现象,表面粗糙度和面形与母板间存在较大的差异。这是因为在树脂固化的过程中,碳纤维和树脂的膨胀系数不同而导致的表面高低起伏。大量实验表明,print-through 导致的表面粗糙度波长(毫米量级)比纤维直径(微米量级)高几个数量级,因而 print-through 是树脂固化过程中大量纤维共同作用的结果。

2 夹层缓冲层方法

由于 print-through 现象是大量纤维共同作用的结果,因而碳纤维固化片样品表面粗糙度存在低频成分。并且在固化过程中,print-through 现象导致了表面应力集中,作为碳纤维复合材料基体的树脂存在细小裂纹,从而导致其表面高频粗糙度也很严重。针对这些缺陷,文中采用镍—环氧—镍夹层结构消除 print-through 现象。

如图 2 所示,缓冲层在光学反射层和碳纤维基底之间,采用常温固化树脂;碳纤维采用高温固化树脂预浸。在碳纤维固化成型过程中,缓冲层树脂会达到热变形温度而变得可塑,从而吸收碳纤维表面在固化过程中传递而来的应力,即用环氧树脂的可塑性和镍的硬度来分散表面的应力,降低高频粗糙度,减少表面出现裂缝的几率,从而达到综合消除 fiber print-through 现象的目的。

工艺过程如图 3 所示。首先加工超光滑玻璃基底作为母板(mmandrel),在母板上镀 150nm 厚的 Ag 膜,然后在 Ag 膜表面电镀 $15\mu\text{m}$ 厚的 Ni 层^[7-9]。以相同的工艺制备两块 mandrel-Ag-Ni 结构的基板。将两片基板的镍间填入环氧树脂,然后高温使环氧树脂固化。由于 Ag 膜与基板间的结合力很弱,可以较容易的将一侧的 mandrel 分离下来。然后,将已在环氧树脂中浸

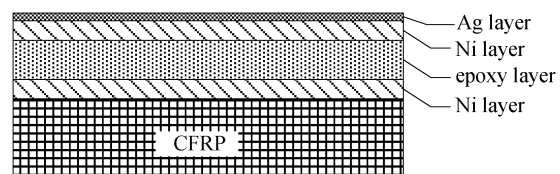


图 2 缓冲层结构示意图

Fig. 2 Diagram of alleviation layer structure

润过的碳纤维材料压在刚分离的表面上。待环氧树脂固化后,将另外一侧的 Mandrel 分离。通过以上流程,就可以制备出 Ag-Ni-epoxy-Ni-Ag-CFRP 的超薄光学元件。光学元件总厚度约 $110\mu\text{m}$,其中每层镍厚度 $15\mu\text{m}$,环氧树脂层厚度 $80\mu\text{m}$ 。

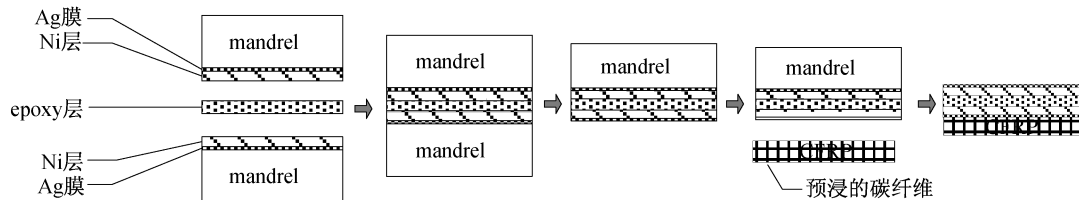


图 3 采用缓冲层结构的复制流程

Fig. 3 Replication process using alleviation layer structure

3 实验结果讨论

采用 Veeco Dektak 6M 探针式台阶仪对样品进行扫描测试。该台阶仪只能进行一维测试,因而现采用经向和纬向分别扫描、多次扫描的方法来观测样品的表面形貌。由于碳纤维固化工艺不够成熟导致样品面形不佳,故存在大曲率半径的弯曲。这些弯曲不是由于 print-through 造成的,不在研究范围之内,因而文中对测试数据进行拟合,先描述表面形状,再根据拟合数据与实测数据之间的差值来判断表面形貌以及 print-through 现象的差异。

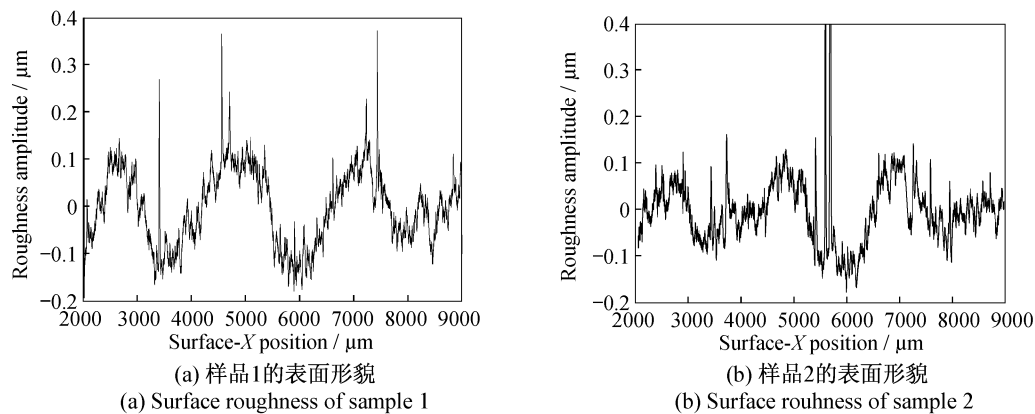


图 4 垂直于纤维方向表面形貌结果

Fig. 4 Surface roughness perpendicular to fiber direction

采用单向的碳纤维预浸料作为基底,分别制备了不带缓冲层的样品和带有缓冲层的复制样品。没有缓冲层的镜片(Ag-Epoxy-CFRP)测试结果如图 4 和图 5 所示。图 4 为垂直于纤维方向的两个样品的表面形貌测试结果。

Mandrel 为粗糙度 1nm 的浮法玻璃,由于 fiber print-through 现象的存在,样品表面形貌不佳。从图中可以看出,表面粗糙度高频成分和低频成分都很大。其中,高频粗糙度主要是由于树脂在固化的过程中内应力很大,导致表面产生裂纹;低频粗糙度主要由于在树脂固化过程中的放热和收缩。碳纤维的热膨胀系数和树脂的膨胀系数不一致,而其本身不存在收缩。因而在大量纤维共同作用的情况下,表面产生了周期性起伏,周期长度约 2mm ,振幅

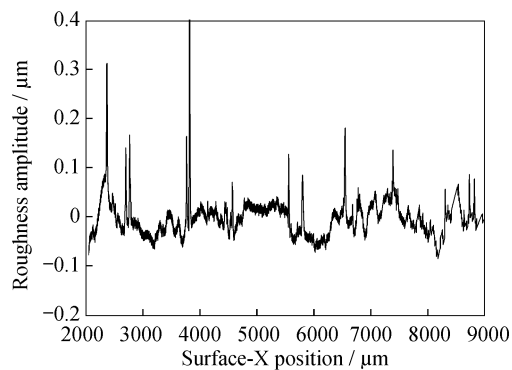


图 5 沿纤维方向的表面形貌(传统工艺)

Fig. 5 Surface roughness along fiber direction(traditional technique)

约 200nm。

沿纤维方向的表面形貌测试结果如图 5 所示。

图 5 表明,沿纤维方向,样品表面的裂纹依然非常多。这是由于树脂在固化过程中内应力集中导致的现象。但样品表面的高低起伏较图 4 小,这表明在纤维方向,碳纤维不存在大量纤维共同作用导致 print-through 现象的可能。

采用 Ni-epoxy-Ni 缓冲层,在垂直于纤维方向测试了两个不同位置的表面形貌,结果如图 6 所示。

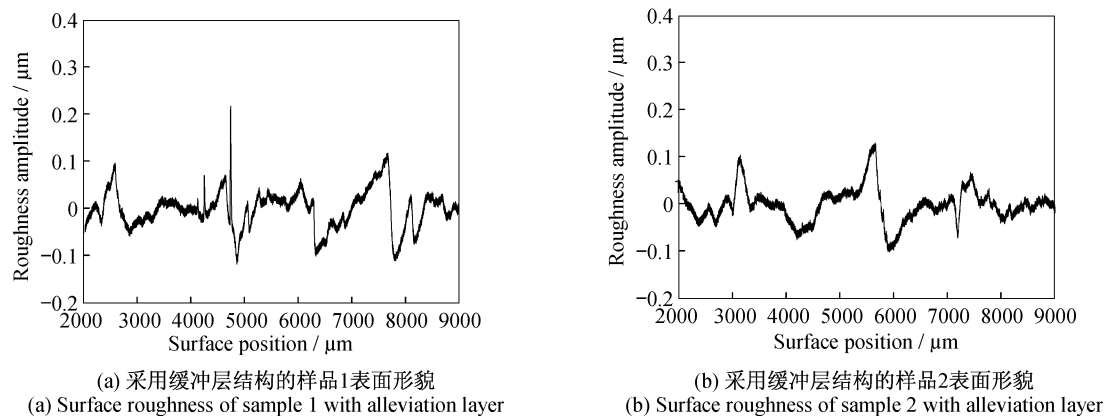


图 6 采用缓冲层结构的镜片在垂直纤维方向的表面形貌

Fig. 6 Surface roughness perpendicular to fiber direction with alleviation layer

图 6 表明,采用缓冲层结构后,高频粗糙度明显降低;样品表面的裂纹减少;表面粗糙度振幅在小区内比没有缓冲层结构的样品表面粗糙度振幅小,且相对平坦。

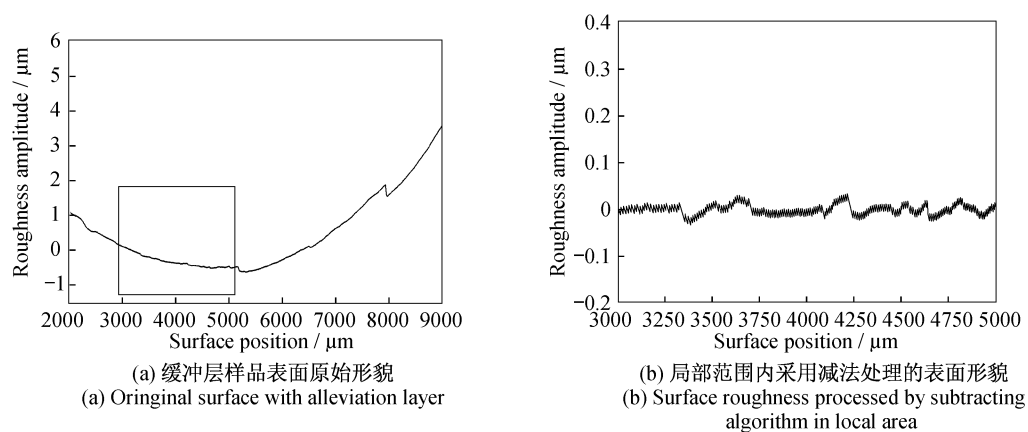


图 7 局部区域的纤维印透拟合

Fig. 7 Fitting of print-through in local area

为了更好地观察小范围内的样品表面形貌,对曲线的局部小区域进行拟合分析。如图 7 所示,对局部区域的曲线(框内的曲线)进行拟合并做减法处理,拟合采用 2 次函数的方法。拟合分析的目的是消除碳纤维固化片受热不均导致的局部表面弯曲;同时由于样品表面形貌存在突变,相对局部范围内的拟合可以降低表面突变对拟合曲线的影响。由于面形的突变区域很小,所以在局部区域内的拟合对表面形貌的影响很小。如图 7 所示,不考虑表面面形突变的情况下,纤维样品的表面形貌较好,粗糙度振幅小于 50nm。因此,夹层缓冲层可以明显缓解碳纤维在固化过程中产生的纤维印透现象,而较大区域的面形突变现象依然严重,有待进一步解决。

4 结 论

碳纤维一次成型过程中会发生表面纤维印透现象(fiber print-through),这种现象是制约其应用于短波光学的主要因素。文中提出了一种 Ni-epoxy-Ni 的缓冲层结构,利用不同环氧树脂间的热变形温度和固化温度以及镍的高硬度缓解 print-through 现象。实验表明,该结构有效改善了碳纤维光学元件的纤维印透现象,在局部区域内表面粗糙度明显降低。但在大区域内,表面形貌突变依然严重,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] SALMEN H, BECKER W, ABT B, *et al.* Development and production of lightweight CFRP carriers for the XMM Telescope X-Ray mirrors[J]. *SPIE*, 1994, 2011: 128—137.
- [2] PAUSCBINGER D, EGLE W, NEUMANN W, *et al.* Production of thin-walled lightweight CFRP/EPOXY X-Ray Mirrors for the XMM telescope[J]. *SPIE*, 1993, 1742: 235—244.
- [3] BÖRRET R, GLATZEL H, SCHMIDT M. Manufacturing technologies for high throughput imaging X-ray telescopes; XMM CFRP technology compared to other X-ray systems[J]. *SPIE*, 1994, 2210: 348—359.
- [4] GONDOIN P, KATWIJK K V, ASCHENBACH B R, *et al.* X-ray spectroscopy mission(XMM)telescope development[J]. *SPIE*, 1994, 2209: 438—450.
- [5] HOCHHALTER J D, MASSARELLO J J. The origins of fiber print-through in lightweight composite optics[J]. *SPIE*, 2006, 6289: 628902-1—628902-12.
- [6] MASSARELLO J J, WELSH J S. Fiber print-through mitigation technique for composite mirror replication[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(12): 123401-1—123401-8.
- [7] ALTKORN R, HAIDLE R, CHANG J. Electroform replication of ultrasmooth mirrors for X-ray astronomy[J]. *SPIE*, 1992, 1779: 88—94.
- [8] PARESCHI G, CITTERIO O. Nickel-replicated multilayer optics for soft and hard X-ray telescopes[J]. *SPIE*, 2000, 4012: 284—293.
- [9] PARESCHI G, CITTERIO O. Replication by Ni electroforming approach to produce the Con-X/HXT hard X-ray mirrors[J]. *SPIE*, 2003, 4851: 528—537.

版 权 声 明

为适应我国信息化建设,扩大本刊及作者知识信息交流渠道,本刊已加入“万方数据千种精品核心刊”计划,被中国核心期刊遴选数据库收录,并通过万方数据资源系统及其镜像系统等对外提供无偿或有偿信息服务,其作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。本刊可免费提供作者文章引文统计分析资料。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将作适当处理。