

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.08.021

环氧树脂基体中圆柱夹杂引起的界面残余应力研究

李蕊, 乔梦嫣, 杨佳, 贾佩星

(天津商业大学机械工程学院, 天津 300134)

摘要: 环氧树脂基复合材料中的填充物会引起界面残余应力, 这将影响复合材料的力学性能与使用寿命。将不同弹性模量或不同直径的圆柱金属丝作为环氧树脂基体中的填充物以制备试样。在显微光弹测试系统中获取平面偏振光场中试样的光弹条纹图, 同时利用 Berek 补偿器进行补偿获得非整数级次等差线条纹级次, 并结合试样界面处环向残余应力值等于径向残余应力值的弹性力学解对圆形界面处的残余应力进行测试。实验结果表明, 相同直径条件下, 随着圆柱夹杂弹性模量的增大, 圆柱体抵抗环氧树脂基体收缩变形的能力增强, 复合材料界面残余应力增大; 而随着圆柱夹杂直径的减小, 界面残余应力也增大, 同时发现夹杂圆柱体的弹性模量对复合材料界面残余应力的影响比夹杂圆柱体的尺寸对界面残余应力的影响更大。

关键词: 圆柱夹杂; 残余应力; 光弹法; 环氧树脂

中图分类号: O348.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)08-0101-04

Investigation of Interfacial Residual Stress Caused by Cylindrical Inclusions in Epoxy Resin Matrix

Li Rui, Qiao Mengyan, Yang Jia, Jia Peixing

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract : Fillers in epoxy-based composites can cause interfacial residual stress, which affects the mechanical properties and service life of the material. Cylindrical wires with different elastic modulus or diameters were placed as fillers in epoxy resin matrix to prepare samples. The photoelastic fringe pattern of the samples in plane polarized light field was obtained in the microscopic photoelastic measurement system. Meanwhile, the non-integral order isometric fringe order was obtained by using Berek compensator. The residual stress at the circular interface of the specimen was measured by combining the non-integral order isometric fringe order with the elastic mechanical solution (i.e. the annular residual stress is equal to the radial residual stress) at the interface. The experimental results show that with the increase of elastic modulus of cylindrical inclusion, the cylindrical resistance to shrinkage deformation of epoxy resin matrix increase, and the residual stress of composite interface increase. With the decrease of cylindrical inclusion diameter, the interface residual stress also increase. It was found that the elastic modulus of the inclusion cylinder had more influence on the interface residual stress than the size of the cylinder inclusion.

Keywords : cylindrical inclusion ; residual stress ; photoelastic method ; epoxy

树脂基复合材料具有一般材料无可比拟的优越力学性能和某些特殊功能^[1], 已广泛应用于航空航天、化工、机械制造、车辆、电子等行业。基体树脂的性能是决定树脂基复合材料性能优劣的关键因素之一。环氧树脂是一种开发最早、应用最广的复合材料树脂基体, 具有高粘接强度、低收缩率、良好稳定性等优良特性, 是目前复合材料最重要的树脂基体之一^[2]。界面作为复合材料中非常重要的微结

构, 其形成机理、结合方式、结合强度、应力传递等对复合材料的各种力学性能、局部裂缝、断裂等行为有着不容忽视的影响^[3-4]。在制备环氧树脂基复合材料过程中, 基体和填充物的热膨胀系数不同将导致界面产生热残余应力, 而基体固化交联体积发生收缩也会引起界面处的收缩残余应力^[5-6]。界面残余应力的存在会使基体的冲击性能、弯曲性能、疲劳强度、横向拉伸强度、压缩强度等下降, 甚至会引起基

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金计划项目 (2018 KJ226)

通讯作者: 李蕊, 博士, 讲师, 主要从事实验固体力学研究 E-mail: lirui@tjcu.edu.cn

收稿日期: 2019-06-05

引用格式: 李蕊, 乔梦嫣, 杨佳, 等. 环氧树脂基体中圆柱夹杂引起的界面残余应力研究 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(8):101-104.

Li Rui, Qiao Mengyan, Yang Jia, et al. Investigation of interfacial residual stress caused by cylindrical inclusions in epoxy resin matrix[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(8):101-104.

体产生裂缝至开裂^[7]。因此,对环氧树脂基复合材料的界面残余应力进行测试分析具有重要意义。

目前,光弹性法、拉曼光谱法、包埋应变片法、声发射法、云纹干涉法、光纤光栅法等多种方法已被成功用于测试树脂基复合材料界面残余应力^[7-9]。这些方法中,只有光弹性法可实现无损性、全场性和直观性应力检测。光弹法是树脂基复合材料残余应力测试方法中优势较为明显的一种方法。笔者主要工作为分析金属圆柱体夹杂/环氧树脂界面残余应力的分布规律。首先将圆柱体金属丝置入环氧树脂基体以制备试样;接下来利用安装有 Break 补偿器的偏光显微镜对圆柱体夹杂引起的环氧树脂基界面残余应力进行观测;最后分析界面残余应力与圆柱体夹杂弹性模量和尺寸的关系。

1 实验原理

环氧树脂是一种典型的应力双折射材料,将环氧树脂基复合材料置于平面正交偏振光场中,可得到表明试样主应力方向的等倾线与表明试样主应力差的等差线。依据公式(1),利用等差线条纹级次可计算主应力差值^[10]:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{nf}{d} \quad (1)$$

式中: n 为条纹级次; f 为材料条纹值,实验中所用环氧树脂的材料条纹值为 $f=11 \text{ N}/(\text{mm 条})$; d 为试样厚度。对于含圆柱体夹杂的环氧树脂材料,测试其界面残余应力有两个关键问题:1. 如何确定非整级次条纹的条纹级次;2. 如何从主应力差中分离主应力。

笔者实验所使用显微光弹测试系统如图1所示。该系统由偏光显微镜(Olympus, BX53型)、Berek 补偿器(Olympus)和计算机构成。

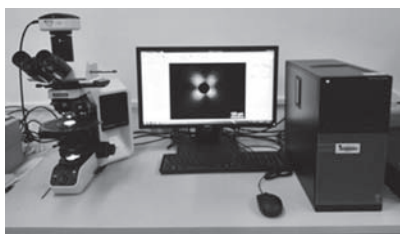


图1 显微光弹测试系统

虽然在平面偏振光场中难以读出非整级次条纹,但是可采用旋转 Berek 补偿器的办法补偿光程差,进而计算界面处的非整级次条纹级次。其具体计算方式为:首先确定测试点;然后旋转 Berek 补偿器至测试点光强最弱,得到旋转角度 θ_1 ;接下来,

向相反方向旋转 Berek 补偿器旋钮至测试点光强最弱,得到旋转角度 θ_2 ;重复进行上述步骤若干次,获得 θ_1 和 θ_2 的平均值 $\bar{\theta}_1$ 和 $\bar{\theta}_2$,根据公式(2)可得到旋转角度的整体平均值 θ ;根据随补偿器提供的 $\theta-\lambda_0$ 表可查得补偿光程差 λ_0 ;最后根据公式(3)计算获得条纹级次 n 。

$$\theta = \left| \frac{\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_2}{2} \right| \quad (2)$$

$$n = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda} \quad (3)$$

由于圆柱体金属丝的几何形状规则,基体尺寸远大于金属丝直径,可认为界面处的残余应力是均匀分布的。当填充物的刚度较大时,其抵抗基体收缩能力较强,残余应力为压应力^[11]。则界面处的残余应力受力模型可简化为图2。



图2 界面处受力模型

由该模型的弹性力学解可知界面处环向应力和径向应力的关系^[11]: $\sigma_\theta = -\sigma_r$ 。若以 σ_θ 表示界面残余应力,结合式(1)~式(3),可得界面残余应力的计算公式(4):

$$2\sigma_\theta = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda} \times \frac{f}{d} \quad (4)$$

2 圆柱金属/环氧树脂界面残余应力测量

2.1 试样制备

采用天津市合成材料研究所生产的常温固化的环氧树脂,其中环氧树脂为 R332 (双酚 A),固化剂为 R332 (改性胺)。该常温固化树脂具有工艺简单、无需加热设备、固化时间短的优点。最主要的原因是,采用常温固化的环氧树脂制备材料,其界面热残余应力可以忽略,进而单一地研究固化收缩引起的残余应力。采用 $\varnothing 0.3 \text{ mm}$ 铝丝、 $\varnothing 0.3 \text{ mm}$ 铁丝、 $\varnothing 0.3 \text{ mm}$ 铜丝、 $\varnothing 0.25 \text{ mm}$ 铜丝和 $\varnothing 0.2 \text{ mm}$ 铜丝共5种材料作为填充所用的圆柱金属。采用如下流程制备试样:

(1) 固定圆柱金属。将长约为 10 mm 的5种金属丝分别垂直固定到各自的模具中。

(2) 配制环氧树脂。将常温环氧树脂 AB 胶按照质量为3:1的比值进行配比,用搅拌棒将其搅

拌均匀。

(3) 倒入模具。将配置好的环氧树脂缓慢倒入固定有金属丝的模具中,使其形成均匀的薄薄的一层。

(4) 固化。常温固化约 36 h,使试样完全固化。

(5) 脱模打磨。试样脱模后用砂纸进行打磨至其厚度约为 1 mm,如图 3 所示。

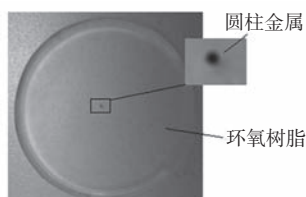


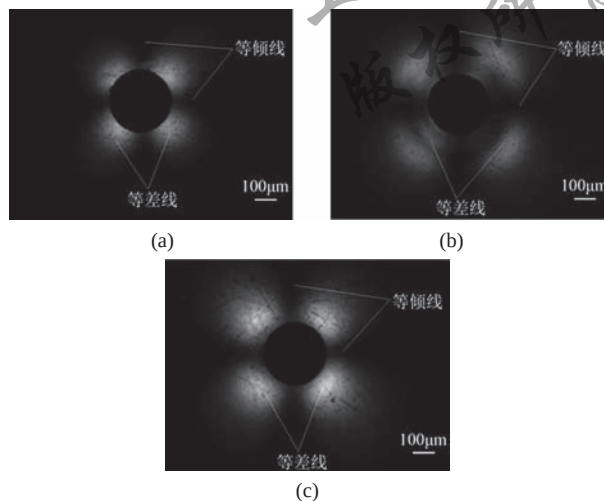
图 3 圆柱金属 / 环氧树脂试样

2.2 光弹性测试结果与讨论

利用图 1 所示系统获取制备好的试样中界面残余应力的光弹条纹图,并依据第一节所述原理计算界面残余应力值。

(1) 等尺寸不同金属的圆柱金属 / 环氧树脂界面残余应力。

将夹杂相同直径的铝丝、铁丝和铜丝的三种试样分别放于显微光弹测试系统进行观察,得到圆柱金属 / 环氧树脂光弹条纹图如图 4 所示。



夹杂圆柱: a—0.3 mm 铝丝; b—0.3 mm 铁丝; c—0.3 mm 铜丝

图 4 试样光弹条纹图

从图 4 可以清晰看出圆柱金属的界面及其光弹条纹。其中十字正交黑色条纹为等倾线,反映了界面残余应力的主应力方向。条纹为等差线,反映了残余应力的主应力差;等差线分布基本对称,说明第一节中假设残余应力均匀分布是成立的。同时等差线条纹越接近圆柱金属界面越亮,越远离界面越暗,说明距离圆柱金属界面越近处的残余应力值

越大,距离界面越远处的残余应力值越小;等差线条纹在远离界面的环氧树脂基体处为黑色的 0 级条纹,表明此处的残余应力为 0。

依据光弹性的原理,其条纹级次应该按照黄红蓝绿的方向递增。对比图 4 中界面处的条纹颜色,可看出铁丝 / 环氧树脂的界面残余应力最大,铝丝 / 环氧树脂的界面残余应力最小。根据公式 (4),实验计算出圆柱金属 / 环氧树脂的残余应力见表 1。

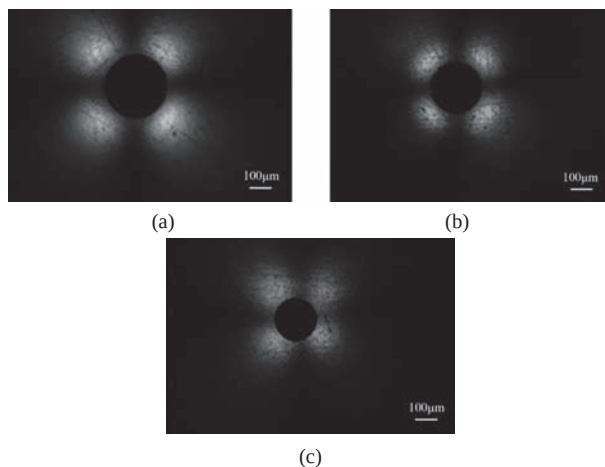
表 1 圆柱金属 / 环氧树脂的残余应力

圆柱金属种类	圆柱金属弹性模量 / GPa	界面残余应力 / MPa	平均界面残余应力 / MPa
Ø0.3 mm 铝丝	72	7.33	7.35
		7.34	
		7.37	
Ø0.3 mm 铁丝	206	10.56	10.57
		10.56	
		10.59	
Ø0.3 mm 铜丝	121	8.32	8.34

从表 1 可以看出,在圆柱金属直径相同情况下,铁丝 / 环氧树脂的界面残余应力值最大,铝丝 / 环氧树脂的界面残余应力值最小。这与图 4 的光弹条纹图反映的结果一致。同时可看出复合材料掺杂的圆柱金属材料的弹性模量越大,圆柱金属 / 环氧树脂的界面残余应力越大。这是因为,圆柱金属 / 环氧树脂冷却固化过程中,两者变形不协调,弹性模量越大,越不容易变形,抵抗基体收缩的能力越强,因此其残余应力越大。

(2) 不同尺寸同种金属的铜丝 / 环氧树脂界面残余应力。

将夹杂不同直径铜丝的三种试样分别放于显微光弹测试系统进行观察,得到的铜丝 / 环氧树脂光弹条纹图如图 5 所示。



夹杂圆柱: a—0.3 mm 铜丝; b—0.25 mm 铜丝; c—0.2 mm 铜丝

图 5 试样光弹条纹图

从图5可以看出每个金属丝残余应力的影响范围不同。根据公式(4),实验计算出的圆柱金属/环氧树脂的残余应力见表2。

表2 圆柱金属/环氧树脂的残余应力

圆柱金属种类	圆柱金属 弹性模量 / GPa	界面残余应力 / MPa	平均界面残余应 力 / MPa
Ø0.3mm 铜丝	121	8.32	8.34
		8.35	
		8.36	
		8.76	
Ø0.25mm 铜丝	121	8.78	8.78
		8.80	
		8.96	
Ø0.2mm 铜丝	121	8.99	8.99
		9.02	

从表2中可以看出,在圆柱金属为相同材料但不等径的情况下,夹杂Ø0.2 mm铜丝的铜丝/环氧树脂的界面残余应力最大,夹杂Ø0.3 mm铜丝的铜丝/环氧树脂的界面残余应力最小。同时可以看出在圆柱金属材料相同时,圆柱金属直径越大,圆柱金属/环氧树脂的界面残余应力越小。这有可能是因为基体收缩变形具有一定尺寸效应,也有可能是因为选用不同直径的金属丝其力学性能有一定差别。下一步工作拟采用全场变形测试手段来明确这一现象产生的原因。同时对比表1和表2发现,夹杂圆柱体的弹性模量对复合材料界面残余应力的影响比夹杂圆柱体的尺寸对界面残余应力的影响更大。

3 结论

针对环氧树脂固化收缩引起的界面残余应力,研究了圆柱体夹杂/环氧树脂界面残余应力的分布规律。通过光弹性方法测试和对比不同弹性模量、不同直径金属丝的圆柱金属/环氧树脂的界面残余应力,明确了夹杂圆柱体的环氧树脂界面残余应力与圆柱体材料的弹性模量和圆柱体尺寸有关。尺寸相同情况下,圆柱体弹性模量越大,环氧树脂界面残余应力值越大;圆柱体材料相同情况下,圆柱体直径越大,界面残余应力值越小;夹杂圆柱体的弹性模量与其尺寸相比是影响复合材料界面残余应力的主要因素。

参考文献

- [1] 陈祥宝. 先进树脂基复合材料的发展[J]. 航空制造工程, 1998(3):3-7.
Chen Xiangbao. Development of advanced resin matrix composites[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 1998(3):3-7.
- [2] 郭战胜, 杜善义, 张博明, 等. 先进复合材料用环氧树脂的固化反应和化学流变[J]. 复合材料学报, 2004, 21(4):146-151.

- Guo Zhansheng, Du Shanyi, Zhang Boming, et al. Cure kinetics and chemorheological behavior of epoxy resin used in advanced composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(4):146-151.
- [3] 孙丽莉, 贾玉玺, 孙胜, 等. 界面强度对纤维复合材料破坏及力学性能的影响[J]. 山东大学学报: 工学版, 2009, 39(2):101-103.
Sun Lili, Jia Yuxi, Sun Sheng, et al. Influence of interfacial strength on fracture process and mechanical properties of fiber composites [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2009, 39(2):101-103.
- [4] 郭瑞泉, 刘景勃, 覃兰媚, 等. 微胶囊对环氧树脂力学性能的影响[J]. 合成树脂及塑料, 2017(2):16-19, 23.
Guo Ruiquan, Liu Jingbo, Qin Lanmei, et al. Effects of microcapsules on mechanical properties of epoxy materials[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2017(2):16-19, 23.
- [5] 何平笙, 周志强. 固化环氧树脂中残余应力的研究[J]. 工程塑料应用, 1987(1):33-37.
He Pingsheng, Zhou Zhiqiang. Residual stress in curing epoxy resin [J]. Engineering Plastics Application, 1987(1):33-37.
- [6] 孙曼灵. 热固性树脂基体的收缩与内应力[J]. 热固性树脂, 1993(4):49-55.
Sun Manling. Shrinkage and internal stress of thermosetting resin matrix [J]. Thermosetting Resin, 1993(4):49-55.
- [7] 杨博, 薛忠民, 阿茹娜, 等. 聚合物基复合材料残余应力的研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2004(2):49-52.
Yang Bo, Xue Zhongmin, Aluna, et al. Research progress of residual stress in polymer matrix composites [J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2004(2):49-52.
- [8] 祁一信, 鞠苏, 江大志. 基于FBGs的快速和常规固化环氧树脂基复合材料的固化残余应变研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018, 298(11):23-28.
Qi Yixin, Ju Su, Jiang Dazhi. Structure scheme of the ellipsoidal shell advanced composite rear pressure bulkhead[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2018, 298(11):23-28.
- [9] 赵燕茹, 雷振坤, 邢永明, 等. 单纤维树脂基复合材料界面热残余应力研究[J]. 工程力学, 2009, 26(5):251-256.
Zhao Yanru, Lei Zhenkun, Xing Yongming, et al. Study on interfacial thermal residual stress of single-fiber resin matrix composite materials [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(5):251-256.
- [10] 计欣华, 邓宗白, 鲁阳. 工程实验力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
Ji Xinhua, Deng Zongbai, Lu Yang. Engineering experimental mechanics [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2005.
- [11] Zhang Xiaochuan, Ji Hongwei, Qiao Zhixia. Residual stress in self-healing microcapsule-loaded epoxy[J]. Materials Letters, 2014, 137:9-12.