

超声 F 扫描检测碳/环氧复合材料层合板冲击损伤—电阻变化

谢小林^{1,2}, 廖嘉², 范红青², 王高潮², 权红英², 李志鹏²

(1 武汉理工大学材料科学与工程学院, 武汉 430070; 2 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

摘要: 利用超声 F 扫描方法检测了经不同能量冲击后的碳/环氧复合材料层合板, 并测量了复合材料冲击前后电阻。结合冲击能量、电阻变化、超声 F 扫描图像综合分析了冲击后碳/环氧复合材料的状况。结果表明, 超声 F 扫描能够确定碳/环氧复合材料冲击损伤能量阈值; 不同能量的冲击都会使碳/环氧复合材料的电阻发生变化, 但只有大于能量阈值的冲击才会在复合材料中产生损伤; 超声 F 扫描提高了基于电阻变化判断复合材料是否损伤的准确性。

关键词: 碳/环氧复合材料; 层合板; 超声 F 扫描; 冲击损伤—电阻变化

中图分类号: TH 878

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2009)03-0107-04

超声波检测方法在复合材料损伤检测中已得到广泛应用。它利用压电传输元件将超声脉冲传入构件中, 遇到损伤或缺陷产生界面反射, 或者引起声速和能量衰减的变化, 来达到检测损伤的目的。它可用于复合材料中孔隙含量、分层、层间疏松、胶接气孔和疏松、裂纹和夹杂等^[1]。其中, F 扫描, 也称特征扫描, 可准确定位复合材料层合板内部的损伤或破坏大小和位置。

碳/环氧复合材料层合板是以碳纤维/环氧树脂预浸料为原材料、按照一定角度铺层复合而成的复合材料。它具有高比模量、高比强度和耐高温、抗蠕变等特性, 在各个领域, 尤其是航空航天工业得到广泛的应用。碳/环氧复合材料层合板对冲击作用比较敏感, 当在受到外物冲击后很容易在材料表面或内部出现损伤。特别是, 层合板内部产生基体开裂和分层等损伤, 表面却几乎看不出损伤缺陷。这些内部损伤破坏将使层合板的力学性能严重退化, 强度可削弱 35%~40%, 导致承载能力大大降低, 对结构的整体破坏和失效形成潜在的威胁^[2]。

由于碳纤维具有导电性, 电阻率约为 0.0015Ω

·cm, 所以, 碳纤维体积含量超过 5% 的碳/环氧复合材料也具有导电性。碳/环氧复合材料导电机理为渗流理论即通过碳纤维之间的接触和渗流共同作用, 碳纤维之间接触的任何改变都会直接影响到表观电阻值。碳/环氧复合材料层合板受到外力损伤、破坏时, 会导致材料分层、碳纤维断裂, 这必然会引起材料电阻的变化^[3-6]。因此, 可以将碳/环氧复合材料作为材料本身力学、电学性能传感器, 通过材料电阻变化判断材料所受损伤、破坏程度。利用碳/环氧复合材料的这一特性, 可研制具有力学性能自诊断功能的复合材料。

本文通过测试不同能量冲击前后碳/环氧复合材料层合板电阻变化, 并结合超声 F 扫描图像, 检测层合板中的损伤, 为研究力学性能自诊断碳/环氧复合材料提供依据。

1 实验材料和方法

1.1 原材料和主要设备

原材料采用北京航空材料研究院研制的 G803/5224 碳纤维预浸料, 选用厚度为 0.2mm, 直径为 6mm 圆铜片作为电极材料; 设备主要有美国 Agilent 公司生产的 34907A 型多通道数据采集仪, 上海精密仪器制造厂生产的 YX-25 型 0.25MN 半自动热压机、南昌航空大学研制的超声 F 扫描仪及圆柱形落锤式冲击试验装置(冲击锤质量为 5kg 冲击头为半球状, 直径为 12.5mm)。

收稿日期: 2008-12-11; 修订日期: 2009-02-21

基金项目: 教育部无损检测技术重点实验室开放基金 (ZD200829004)

作者简介: 谢小林 (1974—), 男, 讲师, 博士生, 主要从事聚合物基复合材料研究, (E-mail) xx081@ qq.com

通讯作者: 范红青, 主要从事聚合物基复合材料研究, (E-mail) fhq81@ 163.com.

1.2 复合材料层合板制备过程

将 G803/5224 预浸料按长 × 宽为 350mm × 350mm 裁剪, 按照经向进行铺层 (10 层), 并在 1, 2 层间和 9, 10 层间按矩阵等距离布设一定数量铜片电极 (电极一半位置露在试样表面), 然后放入热压机制备复合材料板材, 工艺参数为: 升温速度 1~3 (°C/min), 压力 0.6 ± 0.1 MPa 加压点 80~85°C, 130~135°C 保温时间 30min, 固化温度 180°C, 固化时间 120~150min, 自然冷却卸模温度 ≤ 60°C, 板材厚度约为 2.8mm, 碳纤维含量约为 60%。去掉毛边、飞刺, 将层合板切割成 250mm × 200mm 的试样。

1.3 性能测试与表征

模拟复合材料实际使用过程中, 四周简支状态, 将复合材料层合板试样放在铁环 (内、外径分别为 100mm, 120mm, 高为 10mm) 上, 冲击锤自不同高度对准铁环中心位置自由落体冲击试样不同区域并用 4 个电极点标注。以层合板下表面某一电极点为固定一极, 采用多通道数据采集仪分别测量层合板上表面不同电极间冲击前后的体积电阻值。利用超声扫描仪层合板受冲击区域进行扫描检测。层合板试样冲击实验装置示意图如图 1 所示

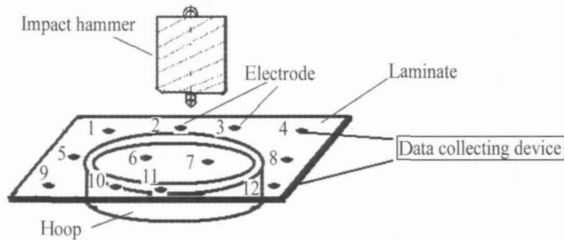


图 1 层合板试样冲击实验示意图

Fig. 1 Sketch map of composites impact experiment

2 实验结果与分析

2.1 不同能量冲击对复合材料电阻的影响

根据实验结果, 作出经不同能量冲击后碳纤维复合材料层合板电阻变化图如图 2。

由图 2 可以看出, 经 2.0J 能量冲击后复合材料层合板电阻变小, 尤其是离冲击点越近的电极点间电阻变小越厉害, 电极点 6 电阻下降 5.6%, 下降幅度最大。经 2.75J 能量冲击后复合材料层合板不同电极点间电阻变化则不一样, 冲击点周边的电极点间电阻都变大, 电极点 3 离冲击点最近, 电阻变大 7.8%, 增大幅度最大; 远离冲击点的电极点间电阻都变小或基本不变。经 3.5J 能量冲击后复合材料

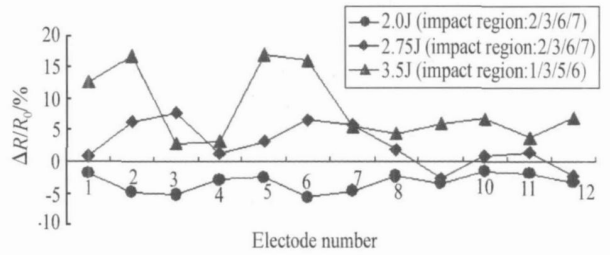


图 2 不同能量冲击后复合材料层合板电阻变化图

Fig. 2 Resistance change of composites after different energy impact

层合板电阻增大幅度较大, 最大幅度接近 20%。

另外, 实验中发现, 经 2.0J 和 2.75J 冲击的复合材料层合板目测看不到损伤, 但 3.5J 冲击的复合材料目测可见层合板上表面有轻微的凹陷, 下表面有几层纤维层分层、断裂破坏。

复合材料材料的电阻 R 可通过公式 (1) 计算:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1)$$

公式中 ρ 为材料电导率, L 为电极间距离, S 为电流截面积。冲击实验中, ρ 保持不变, L 变化很小, 也可认为不变, S 的变化会引起 R 变化。

在较小能量的冲击下, 如 2.0J 复合材料中碳纤维之间接触点更多, 电流截面积 S 增大, 根据公式 (1) 可推算, 复合材料电阻 R 下降。这是因为较小能量的冲击, 不但没有造成复合材料层合板分层损伤, 反而使碳纤维层接触更紧密, 纤维之间接触点更多, 从而使材料电阻下降。随着能量的增加, 如 2.75J 冲击会使复合材料层合板在冲击点周围可能会产生分层损伤, 纤维之间接触点减少, 电流截面积 S 减小, 从而引起材料电阻 R 上升。另一方面, 远离冲击点的部位, 冲击作用并没有产生损伤, 反而使碳纤维之间接触点更多, 从而使材料电阻下降。并且, 在某个区域存在平衡点, 即电阻维持不变。

当然, 较大能量的冲击, 如 3.5J 能够导致复合材料层合板产生破坏性损伤, 使碳纤维之间的接触点大量减少, 电流截面积 S 减小, 从而引起复合材料电阻 R 明显变大。

从图 2 还可以看出, 不论电阻增大还是减小, 离冲击点越近, 电阻变化幅度越大。这是因为冲击能量以冲击点为中心向四周呈放射状扩散, 离冲击点越近, 冲击作用越明显。

2.2 超声 F 扫描检测复合材料冲击损伤情况分析

当冲击能量为 2.75J 时, 虽然目测看不出层合板上、下表面有损伤, 但从图 3 可以看出, 复合材料层合板由上至下厚度为 1.98mm 处开始出现分层损

伤。换句话说, 2.75J 是碳 / 环氧树脂材料层合板冲击损伤阈值。因为层合板受冲击时, 类似于弯曲试验, 上表面受压应力, 下表面受拉应力, 材料发生弯曲变形, 而且, 上半部发生形变比下半部要小些。因此, 当冲击能量短时间内被材料吸收后, 层合板恢复原状时, 在层合板下半部分容易发生分层损伤。

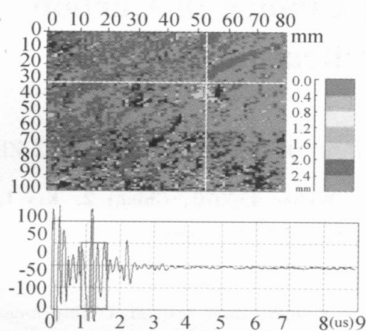


图 3 2.75J 能量冲击后复合材料超声 F 扫描图

Fig. 3 Ultrasonic F-scan graph of composites after 2.75J impact

冲击能量从 2.75J 开始, 每次增加 0.25J, 逐渐增加。当冲击能量为 3.5J 时, 目测可看出层合板上表面有轻微的凹痕, 但下表面开始明显出现纤维层断裂。从图 4 也可以看出, 复合材料层合板由上至下厚度为 1.51mm 处开始直至下表面出现分层损伤, 材料损伤厚度部分比 2.75J 冲击时增加了 0.47mm, 材料被破坏。这是因为碳 / 环氧树脂材料脆性较大, 超过冲击损伤阈值的冲击能量对复合材料损伤更大。

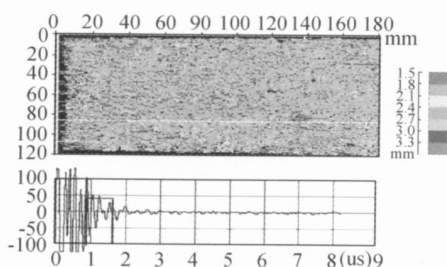


图 4 3.5J 能量冲击后复合材料超声 F 扫描图

Fig. 4 Ultrasonic F-scan graph of composites after 3.5J impact

2.3 超声 F 扫描对提高复合材料自诊断可靠性的作用

碳 / 环氧树脂材料是通过碳纤维之间的接触和渗流作用来导电的, 碳纤维之间接触的任何改变都会直接影响到表观电阻值。碳 / 环氧树脂材料层合板受到冲击时, 会导致碳纤维之间接触点的变化, 从

而引起材料电阻变化。单纯利用碳 / 环氧树脂材料电阻变化这一依据来判断材料是否存在损伤或已破坏, 有可能会产生误判, 导致材料力学性能自诊断不准确。如图 2 所示, 2.0J 和 2.75J 冲击后的复合材料电极点 9 电阻变化幅度基本一致, 如果同时认定它们存在或不存在损伤, 都将发生误判。

超声 F 扫描图像可直观地反映复合材料中是否存在损伤, 并可确定损伤的大小和位置。本实验通过超声 F 扫描图像发现, 冲击能量为 2.75J 时, 复合材料中开始出现损伤, 如图 3 所示, 并据此可认定 2.75J 为复合材料的冲击损伤能量阈值。当能量等于或大于材料冲击损伤阈值时, 在复合材料内部或表面会产生冲击损伤或破坏。对于图 2 所示复合材料电极点 9 电阻变化情况, 可判断 2.75J 的冲击不但在材料中产生了损伤, 而且使电极点 9 电阻下降; 超声 F 扫描并没发现 2.0J 冲击的复合材料中存在损伤, 但也使电极点 9 电阻下降。

因此, 借助超声 F 扫描方法, 结合冲击能量、电阻变化、超声图像综合分析材料的状况, 能够确定碳 / 环氧树脂材料冲击损伤能量阈值, 可提高基于电阻法碳 / 环氧树脂材料力学性能自诊断的可靠性。

3 结论

(1) 碳 / 环氧树脂材料受到冲击时, 碳纤维之间接触点数量会发生变化, 从而使材料电阻发生变化。单纯利用复合材料冲击—电阻变化关系来判断复合材料损伤有可能会产生误判。

(2) 超声扫描可确定复合材料损伤的大小、位置, 能够确定碳 / 环氧树脂材料冲击损伤能量阈值, 提高了基于电阻变化判断复合材料是否损伤的准确性, 从而为研究利用电阻法对力学性能进行自诊断的碳 / 环氧树脂材料提供依据。

参考文献:

- [1] 陈祥宝. 复合材料结构损伤修理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 12-16
- [2] 崔海坡, 温卫东, 崔海涛. 复合材料层合板冲击损伤及剩余强度研究进展 [J]. 材料科学与工程学报. 2005. 23 (3): 466-472
- [3] LOUIS M, P. JOSHI S. An experimental investigation of through-thickness electrical resistance of CFRP laminates [J]. Composites science and technology. 2001. 41 (6): 56-65.
- [4] WANG Xiao-jun, WANG. Shou-kai CHUNG D D L. Sensing damage in carbon fiber and its polymer-matrix and car-

- bon-matrix composites by electrical resistance measurement [J]. Journal of Materials Science, 1999, 34(6): 82-89
- [5] 于杰, 王继辉, 王钧. 碳纤维树脂基复合材料导电性能研究 [J]. 武汉理工大学学报. 2005, 27(5): 24-26
- [6] PRASSE T, MICHEL F, MOOK G. A comparative investigation of electrical resistance and acoustic emission during cyclic loading of CFRP laminates [J]. Composites science and technology, 2001, 41(6): 81-88

Detecting Impact Damage—Resistance Change in Carbon Fiber /Epoxy-Matrix Laminate by Ultrasonic F-scan

XIE Xiao-lin^{1,2}, LIAO Jia², FAN Hong-qing³, WANG Gao-chao³, QUAN Hong-ying³, LI Zhi-peng³

(1. College of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Nondestructive Test (Nanchang Hangkong University), Ministry of Education, Nanchang 330063, China)

Abstract Impacted carbon fiber /epoxy-matrix laminates were detected by ultrasonic F-scan, their resistance were measured before and after they had been impacted separately. The status of impacted laminates were analyzed through synthesizing impact energy, resistance change and ultrasonic F-scan graph. The results show that ultrasonic F-scan can ensure impact damage energy threshold value of carbon fiber /epoxy-matrix laminates. The resistance of laminates can be changed after they have been impacted, but there are damage in them only after they have been impacted by exceed threshold energy. So ultrasonic F-scan can improve veracity of detecting impact damage in laminates by resistance measurement.

Key words carbon fiber /epoxy-matrix composites; laminate; ultrasonic F-scan; impact damage—resistance change