

DOI: 10.7652/xjtuxb201606020

# 非破坏雷电流 A 分量作用下 碳纤维复合材料的动态特性

孙晋茹, 姚学玲, 许雯珺, 陈景亮

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

**摘要:** 建立了碳纤维复合材料(CFRP)雷电冲击特性的实验平台,通过实验验证和对 CFRP 等效电路模型的分析,提出了采用两电极测试系统,通过检测流经 CFRP 层合板的脉冲电流和其两端的动态电压,研究了 CFRP 动态特性的测试方法,分析了在雷电流 A 分量作用下 CFRP 的动态特性。实验结果表明:在峰值时间为  $30.2\ \mu\text{s}$ 、半峰值时间为  $72.2\ \mu\text{s}$  的非破坏雷电流 A 分量冲击作用下,碳纤维复合材料具有较强的导通能力,并且随着脉冲电流强度从 5 A 增加至 100 A,其电阻由  $20\ \Omega$  减小至  $2\ \Omega$  左右,即具有显著的非线性;CFRP 试品两端的电压先于电流达到峰值,材料整体显示出一定的电感效应。利用建立的 CFRP 层合板的等效电路模型,对 CFRP 在雷电流冲击下表现出的动态电阻非线性、电感特性、高导电微碳纳米管(MCNT)夹层对材料动态伏安特性的影响等现象进行了合理的解释。研究结果为 CFRP 的电气特性、树脂热降解、温度场分布以及热失重等研究提供了必要的理论支撑,同时为 CFRP 在航空航天领域的广泛应用奠定了坚实的基础。

**关键词:** 碳纤维复合材料;非破坏性冲击电流测试;动态阻抗特性;非线性;电感特性

**中图分类号:** V258;TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)06-0130-06

## Dynamic Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Polymer under Non-Destructive Lightning Current A Component

SUN Jinru, YAO Xueling, XU Wenjun, CHEN Jingliang

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** An experiment platform is established to measure lightning impulse characteristics of carbon fiber reinforced polymer (CFRP), on which the experimental circuit and structures of CFRP are developed to propose a suitable two-electrode testing method. The dynamic characteristics of CFRP under non-destructive lightning current A wave ( $T_p=30.2\ \mu\text{s}$ ,  $T_d=72.2\ \mu\text{s}$ ) are investigated. The experimental results show that the carbon fiber composite material has a strong conduction capability under lightning impulse, and its impact resistance exhibits significantly nonlinearity, and a close relationship between surface coating materials and internal layer-structures is revealed. Considering the internal ply structure, surface material and conductivity of carbon fibers, micro carbon nanotubes layers and polymer, the lightning conducting model of CFRP is established. The inductance characteristics, nonlinear dynamic resistance characteristics as well as the linear trend in dynamic V-I characteristics can be well ex-

收稿日期: 2016-01-03。 作者简介: 孙晋茹(1991—),女,博士生;姚学玲(通信作者),女,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477132);陕西省创新团队资助项目(2012KCT-07);中央高校基本科研业务费资助项目(xkjc 2014006)。

网络出版时间: 2016-03-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160311.1717.006.html>

plained.

**Keywords:** carbon fiber reinforced polymer; non-destructive impulse testing methods; dynamic impedance characteristics; non-linear characteristics; inductance characteristics

雷电是一种高电压大电流的自然放电现象,其存在会对航空航天飞行器的安全运行造成极大危害。飞机遭雷击概率和气候条件、飞机机型、飞行高度等多种因素有关,一般来说,飞机遭雷击概率为每 3 000 h 左右 1 次<sup>[1-2]</sup>。雷电对飞机产生的直接损伤表现为当雷电电弧附着时伴随产生的高温、高压冲击波和电磁力对飞机造成的燃烧、熔蚀、爆炸、结构畸变和强度降低等效应<sup>[3]</sup>。

随着碳纤维复合材料技术的进步,碳纤维增强型聚合物复合材料(CFRP)在民用飞机、军用飞机、无人机及隐形机上的用量不断增长,波音 787 的主翼、尾翼、机体、地板等结构中 50%使用 CFRP,2014 年投入使用的空客 A350XWA 上 CFRP 的使用比例可达到 53%<sup>[4-5]</sup>。相比于传统的铝、钛合金,CFRP 的电传导性能差,CFRP 横向的电阻率达到  $10^{-1} \Omega \cdot \text{m}$  量级,深度和厚度方向的电阻率更大<sup>[6-8]</sup>,并且其电阻率与 CFRP 层合板的制作技术密切相关,低导电性使得 CFRP 在雷击时无法短时间将积累的电荷转移或扩散,导致 CFRP 局域温度急剧升高,会带来 CFRP 纤维断裂、树脂热解、深度分层等严重损伤<sup>[3]</sup>,进而威胁飞机的运行安全。

CFRP 问世以来,诸多学者主要关注其机械特性的研究,得到了机械冲击参量与 CFRP 的抗拉伸强度、抗压缩强度及损伤区域面积和深度之间的关系,以及 CFRP 损伤和分层断裂程度的表征<sup>[7-8]</sup>,并从力学和统计学角度,建立了 CFRP 变形、损伤及断裂的模型<sup>[9-10]</sup>。针对雷电流对 CFRP 的直接效应这一多场综合作用问题,一些研究者从热电耦合、热力耦合等方面<sup>[11-13]</sup>建立了用于研究 CFRP 的雷击物理损伤的仿真模型。飞机实际遭雷击时,作为最先与雷电流冲击接触的部位,CFRP 的表面导电特性对雷电流的分散和传导至关重要。此外,CFRP 层合板在非破坏雷电流 A 分量冲击作用下的动态特性能够在一定程度上反映 CFRP 材料的雷击响应行为,然而 CFRP 动态特性的测试方法研究并没有得到必要的关注。文献[14-16]进行了 10 kA 以上量级雷电流冲击实验,但很少有研究涉及 CFRP 的表面特性和动态冲击特性对其雷击响应的影响,同时由于强度为 kA 量级的脉冲电流会在瞬间对 CFRP 试样造成不可修复的损伤,不利于对 CFRP

在脉冲电流作用下的动态冲击特性进行重复和深入研究。

本文建立 CFRP 非破坏性雷电 A 分量的实验平台,通过对 CFRP 动态特性的实验研究,分析引起 CFRP 动态特性差异的影响因素,提出适合研究 CFRP 动态特性的测试方法,得到 CFRP 的动态阻抗随外施电流变化的规律。结合得到的实验波形数据和 CFRP 试样的表面覆层、内部夹层和板内铺层模型,阐释 CFRP 在雷电 A 分量作用下的内在导通机制,为 CFRP 材料的结构研究和 CFRP 层合板的设计奠定一定的理论基础。同时,也可为 CFRP 树脂热降解、复合材料的温度场分析以及材料的热失质量等模拟研究提供必要的数据支撑。

1 实验准备和实验方法

1.1 实验样品

实验样品的技术参数如表 1 所示。

表 1 实验样品的技术参数

| 编号 | 长,宽,高/mm  | 结构及工艺特点                                                     |
|----|-----------|-------------------------------------------------------------|
| 1  | 100,150,5 | [45/0/-45/90] <sub>4s</sub> ,表层涂敷微碳纳米管 MCNT                 |
| 2  | 100,150,5 | [45/0/-45/90] <sub>4s</sub> ,表层、1/2 层间铺敷 MCNT               |
| 3  | 100,150,5 | [45/0/-45/90] <sub>4s</sub> ,表层、1/2 层间、2/3 层间铺敷 MCNT        |
| 4  | 100,150,5 | [45/0/-45/90] <sub>4s</sub> ,表层、1/2 层间、2/3 层间、3/4 层间铺敷 MCNT |

1.2 实验电极和测试电路

为获取 CFRP 层合板的动态特性,本文采用文献[17]的三电极测量系统。图 1 中电极 A 为直径 74 mm 的铜圆盘,电极 B 为直径 50 mm 的铜圆柱,电极 C 为内径 54 mm、外径 74 mm 的圆环状铜电极。

选择合适的电路元件参数,图 1b 电路可以产生满足 SAE APR 5412 标准<sup>[18]</sup>的电流 A 分量。采用罗氏线圈、分压器和泰克 MDO3012 示波器就可获得 1 组雷电流 A 分量和 CFRP 样品两端电压的波形,从中分析 CFRP 动态特性与外施电流之间的关系。

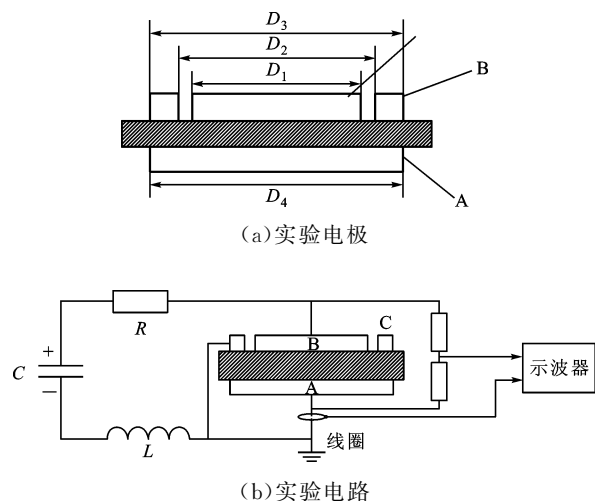


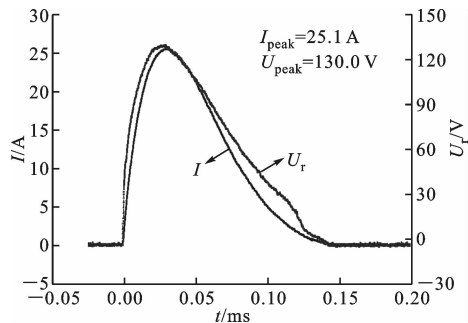
图1 CFRP动态特性的测量电极和电路

## 2 CFRP 动态阻抗测量实验结果

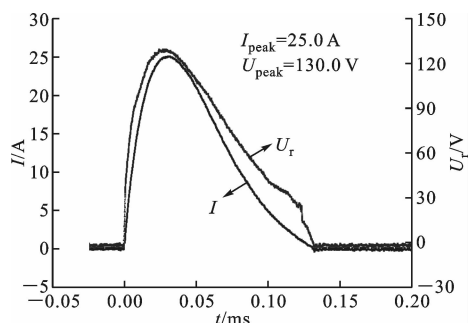
### 2.1 电极连接方式的选择

按图1电路对试样1进行实验,电极B接高压端,电极A接地,在电极C的不同电气连接下,放电电压为2 kV时测得的样品电压与电流波形如图2所示,其中 $I_{\text{peak}}$ 、 $U_{\text{peak}}$ 分别为电流、电压峰值。

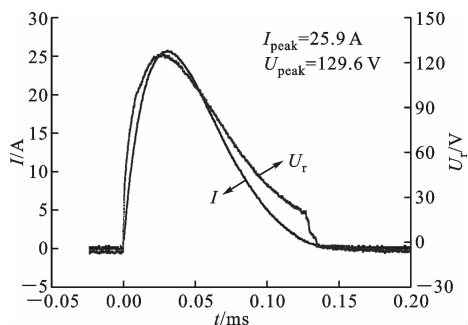
从图2可以发现,保护电极C不同连接方式下测试CFRP样品得到的电流和电压波形几乎相同,这一现象的产生是由于雷电流的特性和CFRP层合板材料本身的结构特点造成的。雷电流A波分量作用时间很短,其上升时间不超过30  $\mu\text{s}$ ,波尾时



(a) 电极C接地



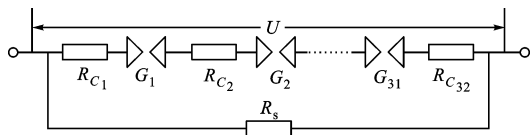
(b) 电极C悬空



(c) 电极C接高压端

图2 样品1在不同电极连接方式下实验波形的比较

间为70  $\mu\text{s}$ 左右,实验中放电电压设置为2 kV。在放电的瞬间,放电电压几乎全部施加在高阻状态的CFRP样品上,此时样品的等效电路如图3所示。



电压 $U$ 可认为是放电电压; $R_{C1} \sim R_{C32}$ 分别代表样品中32层高导电碳纤维层在厚度方向的等效体电阻;体电阻之间的间隙 $G_1 \sim G_{31}$ 代表碳纤维层之间的树脂粘合薄层; $R_s$ 代表电极B与C之间面电阻的动态阻抗

图3 放电瞬间CFRP层合板等效电路图

由于制作工艺的限制,材料表面层中不可避免地夹杂有绝缘介质成分,因此面电阻支路在放电瞬间是处于高阻状态的。由于雷电流脉冲的作用时间为 $\mu\text{s}$ 量级,并且脉冲强度不高(非破坏电流脉冲,100 A以下量级),雷电流脉冲在CFRP铺层(不管是微碳纳米管或其他高导电材料铺层)中的散流过程来不及进行或所占总电流的比例极小,也就是说可以基本不考虑CFRP表面对电荷短时间的分散和传导现象。在CFRP内部铺层被击穿后,样品的等效电路变为图4的形式,动态体电阻的下降使加在样品两端的电压下降,进一步提高了面电阻支路导通的难度。

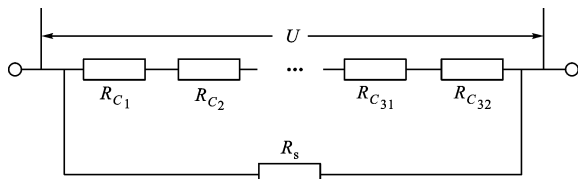


图4 树脂层击穿后CFRP层合板等效电路图

因此,研究中采用只保留A、B的两电极实验电路,如图5所示。在这种电极连接方式下电流波从样品中心注入,从底面流出,其主要目的是研究雷电流脉冲注入情况下,CFRP层合板的体电阻特性。

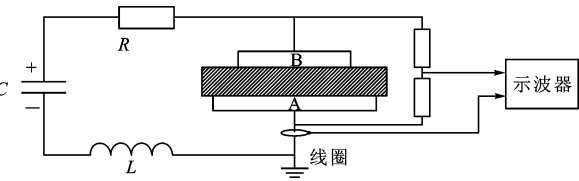


图 5 CFRP 动态阻抗两电极测量电路

2.2 雷电流实验波形

合理选择图 5 中的电路参数  $C$ 、 $R$ 、 $L$ ，可以产生满足 SAE APR 5412 标准<sup>[18]</sup>的电流 A 分量波形，如图 6 所示。图中短路电流波形参数为峰值时间  $T_p=30.2\ \mu\text{s}$ ，半峰值时间  $T_d=72.2\ \mu\text{s}$ ，实验所采用的雷电流强度低于  $10^2\text{ A}$  量级，不会对层合板样品造成实质性损伤。

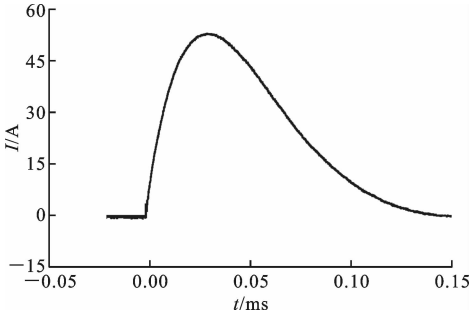


图 6 雷电流 A 波波形

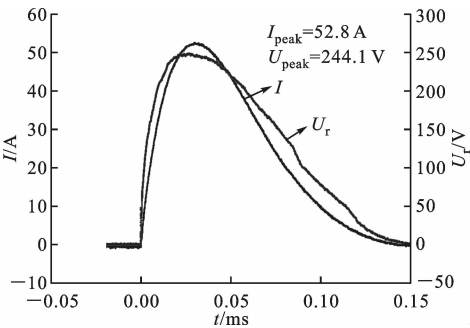
3 非破坏雷击实验的结果与分析

采用满足 SAE APR 5412 规定的雷电流 A 分量对 CFRP 进行实验，每组包含 3 个样品，对每个样品进行 2 次以上的重复实验。

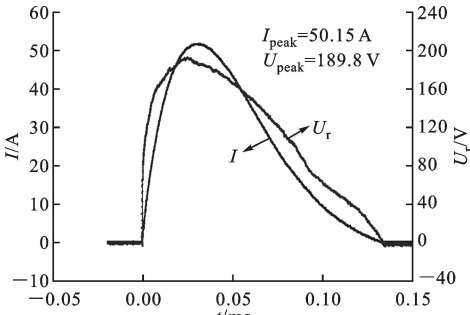
3.1 CFRP 层合板雷电冲击的实验结果

实验中测试的样品因其各自的制作工艺和铺层结构的不同，对脉冲电流有着不同的响应。图 7 为雷电流 A 分量作用下样品两端的电压和流过的雷电流的特性。

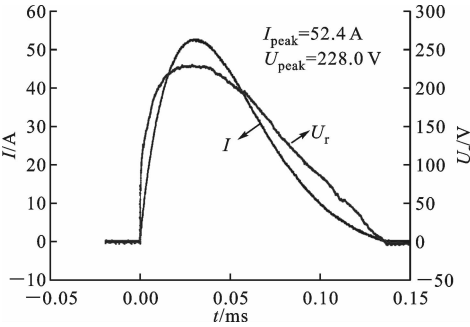
从图 7 可以看出：样品上、下两端的电压稍先于雷电流达到峰值，即存在明显的电感效应。



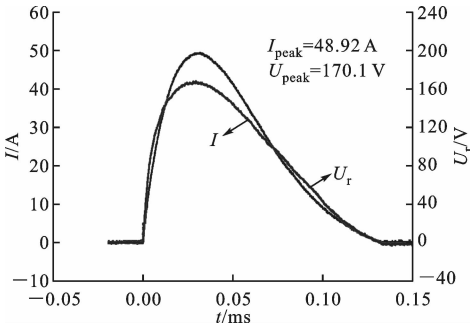
(a) 样品 1



(b) 样品 2



(c) 样品 3



(d) 样品 4

图 7 雷电流 A 分量作用下的电流电压特性

3.2 CFRP 层合板材料的阻性非线性

测量不同强度脉冲电流作用下电压波形峰值  $V_P$ ，使用  $R=V_{\text{peak}}/I_{\text{peak}}$  作为材料电阻特性的标志，得到 CFRP 样品随电流变化的冲击阻抗特性见图 8。

对实验结果分析发现，在雷电流 A 分量作用下，CFRP 层合板电阻处于  $\Omega$  量级，表现出优良的

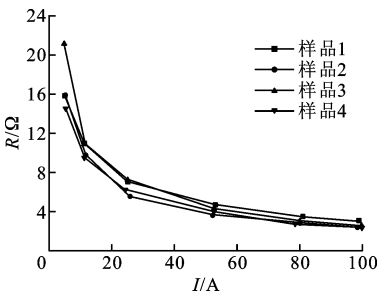
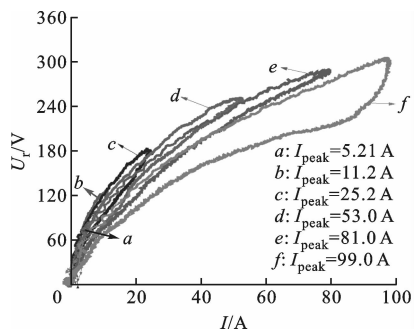


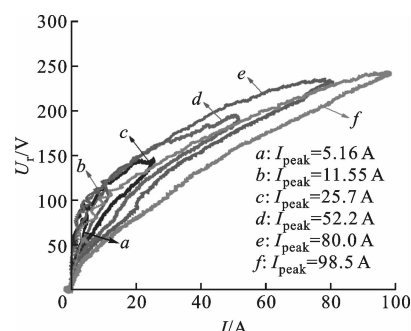
图 8 样品 1~样品 4 在冲击下的阻性特性变化

导电性,其电阻值随脉冲电流的增大而减小,显示出明显的非线性特征。在雷电流 A 分量冲击环境下,样品 1~样品 4 的体电阻差别不明显,即高导电层的加入对 CFRP 层合板厚度方向导电特性影响较小。

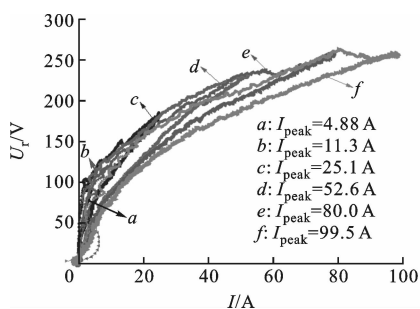
对样品的单次雷电 A 分量冲击过程进一步分析可得到如图 9 所示的碳纤维复合材料伏安特性。



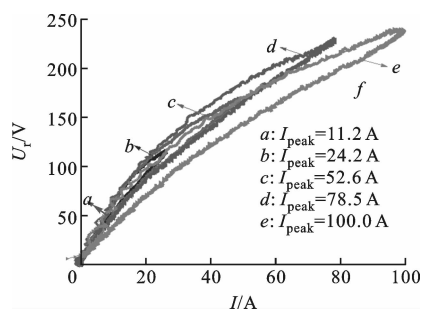
(a) 样品 1



(b) 样品 2



(c) 样品 3



(d) 样品 4

图 9 CFRP 样品的动态伏安特性

从图 9 可以看出:

(1)随着雷电流幅值的增加,电压的增加幅度逐渐减小,CFRP 呈现显著的非线性特性;

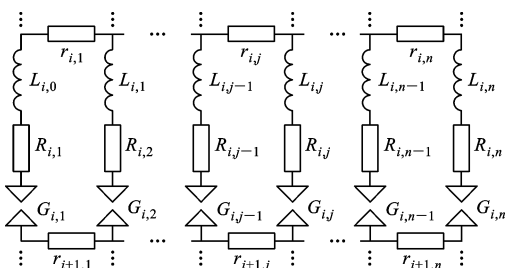
(2)在电流增大和减小的过程中,前后两个电压不相等,说明材料对脉冲电流的响应有一定延迟;

(3)样品上的电压稍先于雷电流达到峰值,即存在一定的电感效应;

(4)CFRP 内部的高导电 MCNT 夹层对材料的动态特性有着较明显的作用。

### 3.3 CFRP 层合板雷击实验分析

CFRP 层合板是由碳纤维束通过树脂铺层粘合压模成型的,铺层为短纤维与树脂组成的半导电结构。从电路等效角度出发,纤维束可以用大量小电阻等效,而铺层在脉冲电流流通情况下,可以等效为诸多短纤维电阻、电感与放电间隙的串联,如图 10 所示,同时每层纤维层也可等效为类似的电阻电感网络。



$L_{i,j}, R_{i,j}, G_{i,j}$  代表纤维之间树脂铺层的等效电阻、电感与放电间隙;  $r_{i,j}$  代表碳纤维束的电阻

图 10 CFRP 试品二维等效电路图

随着放电电压的升高,树脂绝缘层在逐渐升高的放电电压下击穿程度和击穿面积逐渐增加,随着树脂层绝缘强度的减弱与导通程度的增加,CFRP 层合板等效电阻会明显减小。由于碳纤维导电率很高,因此材料整体表现出的电感特性可视为层合板中每层树脂层等效电感的串联综合,因此测量结果中表现出的电感特性与碳纤维复合材料本身具有的内部夹层特性密切相关。特别是,在层间混入 MCNT 能够有效改善 CFRP 层合板内部纤维层间的导电特性,使 CFRP 材料动态伏安特性中的线性特征更加明显,材料对脉冲电流的响应延迟及电感效应均有不同程度减小,即内部夹层中的 MCNT 成分能够增强 CFRP 材料的动态线性特征。

## 4 结 论

(1)鉴于 CFRP 层合板的结构组成和雷电流 A

分量作用的特点,通过对电极形式和连接方式进行实验发现,CFRP层合板材料在非破坏性雷电A分量作用下的阻抗特性对测量使用的三电极连接形式不敏感,因此本文提出了简化的两电极测量电路进行CFRP动态阻抗特性研究。

(2)雷电冲击作用下,碳纤维复合材料所表现出的 $\Omega$ 量级的电阻反映了CFRP层合板在雷电流A分量作用下具有较强的导通能力。CFRP材料在雷电流A分量作用下的冲击电阻特征具有显著的非线性,源于碳纤维复合材料内部铺层的电气特性。

(3)在非破坏性雷电流A分量冲击实验中,高导电MCNT夹层掺杂数量不同的CFRP层合板试样的体电阻的差别不明显,即高导电层的加入对CFRP层合板厚度方向导电特性影响较小,而CFRP材料动态伏安特性会受到内部夹层中的MCNT成分的影响。此外,由于CFRP材料中纤维与纤维之间的铺层电感作用,样品上的测试电压先于电流达到峰值,材料整体显示出一定的电感效应,而且在电流增大与减小过程中前后电压不重合,表明材料中的电介质对脉冲电流的响应具有延迟效应。

#### 参考文献:

- [1] GABRIELSON B C. The aerospace engineer's handbook of lightning protection [M]. Gainesville, VA, USA: Interference Control Technologies Inc., 1988: 4-16.
- [2] UMAN M A, RAKOV V A. The interaction of lightning with airborne vehicles [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2003, 39(1): 61-81.
- [3] PLUMER J A, ROBB J D. The direct effects of lightning on aircraft [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1982(2): 158-172.
- [4] ROESELER B, SARH B, KISMARTON M. Composite structures: the first 100 years [C]// 16th International Conference on Composite Materials. Kyoto, Japan: Japan Society for Composite Materials, 2007: 1-41.
- [5] MARSCH G. Airbus A350 XWB update [J]. Reinforced Plastics, 2010, 54(6): 20-24.
- [6] Toray Inc. Torayca T300 data sheet [EB/OL]. [2015-12-23]. <http://120.52.72.42/www.toraycfa.com/c3pr90ntcsf0/pdfs/T300DataSheet.pdf>.
- [7] TODOROKI A, TANAKA M, SHIMAMURA Y. Measurement of orthotropic electric conductance of CFRP laminates and analysis of the effect on delamination monitoring with an electric resistance change method [J]. Composites Science and Technology, 2002, 62(5): 619-628.
- [8] PARK J B, HWANG T K, KIM H G, et al. Experimental and numerical study of the electrical anisotropy in unidirectional carbon-fiber-reinforced polymer composites [J]. Smart Materials and Structures, 2006, 16(1): 56-57.
- [9] HITCHEN S A, KEMP R M J. The effect of stacking sequence on impact damage in a carbon fibre/epoxy composite [J]. Composites, 1995, 26(3): 207-214.
- [10] TODOROKI A, TANAKA M, SHIMAMURA Y. Electrical resistance change method for monitoring delaminations of CFRP laminates: effect of spacing between electrodes [J]. Composites Science and Technology, 2005, 65(1): 37-46.
- [11] OGASAWARA T, HIRANO Y, YOSHIMURA A. Coupled thermal-electrical analysis for carbon fiber/epoxy composites exposed to simulated lightning current [J]. Composites: Part A Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(8): 973-981.
- [12] DONG Qi, GUO Yunli, CHEN Jingliang, et al. Influencing factor analysis based on electrical-thermal-pyrolytic simulation of carbon fiber composites lightning damage [J]. Composite Structures, 2016, 140: 1-10.
- [13] DONG Qi, GUO Yunli, SUN Xiaochen, et al. Coupled electrical thermal pyrolytic analysis of carbon fiber/epoxy composites subjected to lightning strike [J]. Polymer, 2015, 56: 385-394.
- [14] FERABOLI P, MILLER M. Damage resistance and tolerance of carbon/epoxy composite coupons subjected to simulated lightning strike [J]. Composites: Part A Applied Science and Manufacturing, 2009, 40(6): 954-967.
- [15] HIRANO Y, KATSUMATA S, IWAHORI Y, et al. Artificial lightning testing on graphite/epoxy composite laminate [J]. Composites: Part A Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(10): 1461-1470.
- [16] FERABOLI P, KAWAKAMI H. Damage of carbon/epoxy composite plates subjected to mechanical impact and simulated lightning [J]. Journal of Aircraft, 2010, 47(3): 999-1012.
- [17] IEC. IEC 60093, Methods of test for volume resistivity and surface resistivity of solid electrical insulating materials [S]. Geneva, Switzerland: IEC, 1989.
- [18] Society of Automotive Engineers. ARP 5412A, Aircraft lightning environment and related test waveforms [S]. Warrendale, PA, USA: SAE, 2005.

(编辑 杜秀杰)