

DOI: 10.7652/xjtuxb201902011

碳纤维增强型复合材料在非破坏雷电流脉冲下的动态导电特性

孙晋茹, 姚学玲, 田向渝, 陈景亮, 吴翊

(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: 为了研究碳纤维增强型复合材料(CFRP)层合板在雷电流脉冲作用下的动态导通机制,建立了 CFRP 动态导电特性实验平台,通过研究非破坏性 10/30、20/60 及 40/120 μs 的雷电流脉冲作用下 CFRP 层合板的动态响应,分析了铺层结构、试样夹持方式及雷电流参数对 CFRP 动态导电特性的影响。研究表明:在 100~1 000 A 的雷电流作用下,受到内部铺层结构的影响,CFRP 层合板厚度方向电导率(10^{-3} S/mm)远小于平面方向电导率(10^0 S/mm),具有各向异性非线性电导率;CFRP 层合板表现出明显的电感效应,即动态电压超前于电流,动态伏安特性曲线中上升与下降阶段不重合;施加的雷电流上升速率越低、波长越长,CFRP 层合板动态电导率越大;CFRP 层合板在雷电流脉冲作用下所表现出的电感效应与碳纤维丝的电感特性密切相关。CFRP 动态导电特性及导通模型的研究能够为 CFRP 雷电直接效应热电耦合模型的建立以及 CFRP 性能优化和结构提升提供理论支撑。

关键词: 碳纤维增强型复合材料;非破坏性雷电流脉冲;动态导电特性;电感特性

中图分类号: TM863 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)02-0080-08

Dynamic Electrical Properties of Carbon Fiber Reinforced Polymer Subjected to Non-Destructive Lightning Impulse

SUN Jinru, YAO Xueling, TIAN Xiangyu, CHEN Jingliang, WU Yi

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

Abstract: To obtain the dynamic electrical properties of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) laminates subjected to a lightning current impulse, an experimental platform generating lightning current impulses of 10/30, 20/60 and 40/120 μs is constructed. The conduction mechanism of CFRP laminates and the effects of layer structure, sample clamping schedule and applied lightning impulse parameters on the dynamic electrical properties of CFRP are analyzed. The experimental results indicate that the in-thickness conductivity (10^{-3} S/mm) gets much smaller than the in-plane conductivity (10^0 S/mm) under the effect of lightning current of 100-1 000 A due to the anisotropic nonlinear conductivity affected by the internal layup structure of CFRP laminates. In addition, the voltage of CFRP sample reaches the peak value prior to the impulse current, the dynamic conductivity of CFRP laminates increases with the reduced rising rate and increasing duration of applied lightning current and the inductance properties of CFRP laminates closely relate to the inductive effect of carbon fibers. The dynamic electrical properties and

收稿日期: 2018-08-16。 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(51477132,51521065)。

网络出版时间: 2018-09-29 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180929.0704.002.html>

conduction model of CFRP laminates subjected to a lightning impulse can provide theoretical supports for the establishment of the thermo-electric coupling model of CFRP lightning direct effect, optimization and improvement of CFRP materials.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer; non-destructive lightning impulse; dynamic electrical properties; inductance properties

碳纤维增强型复合材料(CFRP)是一种以树脂、陶瓷、水泥、碳质或橡胶作为基体,碳纤维单丝为增强体的新型复合材料^[1]。近年来,CFRP以轻质、优越的机械性能和抗腐蚀能力等特点,在民用飞机、军用飞机、无人机及隐形机上的用量不断增加^[2]。波音787的主翼、尾翼、机体、地板等结构中50%使用CFRP,空客A350XWA上CFRP的使用比例达到53%^[3-4]。飞行器在运行过程中不可避免地会受到雷击的威胁,雷电冲击过程中伴随的雷电电弧附着及雷电流注入引起的高压冲击波、电磁力效应及热效应会造成机体材料的燃烧、熔蚀、爆炸和结构畸变^[5],对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,飞机每运行3kh将会遭到一次雷击^[6]。

由于CFRP材料内部一般由导电性良好的碳纤维单丝以及绝缘基体复合而成,材料具有复杂的双向异性^[7]。由于CFRP层合板的静态电导率(平面方向为 $10^2 \sim 10^4$ S/m,厚度方向为 10^{-4} S/m)及热导率($10^{-1} \sim 10^0$ W/m $\cdot$ °C)远小于铝、钛合金等传统金属材料相应参数(电导率为 $10^6 \sim 10^8$ S/m,热导率为 10^2 W/m $\cdot$ °C)^[8-9],这就使得CFRP材料在遭受雷击时,无法短时间内将大量电荷和热量转移及扩散,CFRP层合板局部温度急剧升高,从而导致纤维断裂、树脂热解、深度分层等严重损伤^[10],进而威胁飞机的运行安全。

由于CFRP材料在雷击下可能发生的严重损伤,CFRP材料雷电直接效应的多场耦合物理过程成为了诸多研究的关注重点。一些研究中进行了10kA以上量级的雷电流冲击损伤实验^[11-13],另一些从热电耦合、热力耦合等方面建立了用于研究CFRP雷击损伤的仿真模型^[14-16]。飞行器实际遭雷击时,雷电与CFRP的相互作用过程是一个复杂的物理过程,涉及到雷击先导、雷电附着、雷电流在材料表面的流光/散流、热电烧蚀、散热降温等物理过程。其中,雷电流在层合板中的散流路径及焦耳热的产生与CFRP层合板本身的动态导电特性关系密切,同时也会对CFRP层合板的雷击损伤效应产

生显著影响。

在CFRP层合板导电特性的研究中,Todoroki等基于混合材料导电特性研究了不同碳纤维体积分数的CFRP层合板沿纤维方向和垂直纤维方向的静态直流电导^[17]。文献[18]发现正交铺层层合板的电导率优于单向铺层结构,并且CFRP层合板的体电导率主要取决于在相邻铺层之间的界面处由纤维重叠产生的导流路径的数量。Haider等在不同电流密度条件下研究了不同铺层结构CFRP层合板的导电各向异性和非线性行为^[19]。目前,很少有研究涉及CFRP在雷电流作用下的导通模型和动态阻抗特性^[20]。CFRP层合板动态导电特性研究的缺失导致在大多数热电耦合仿真研究中,CFRP层合板一般被设置为各向异性的纯电阻模型,而CFRP层合板在雷电流下的等效阻抗非线性和电感效应并未在仿真模型中体现^[21-22]。此外,在以往研究中,CFRP层合板厚度方向的电导率大多采用直流静态导电参数^[15-16],但CFRP在直流电压作用下的导电模型是否适用于雷电流注入下的动态导通过程仍有待于进一步研究。

本文建立CFRP动态导电特性实验平台,通过对不同波形参数的雷电流脉冲作用下CFRP层合板动态导电特性的实验研究,分析了影响CFRP动态导电特性的因素。在此基础上,探索CFRP在雷电流作用下的内在导通机制,研究结果能够为CFRP材料的结构研究和CFRP层合板的设计优化奠定一定的理论基础。CFRP层合板动态导通模型在CFRP雷电直接效应热电耦合模型中的应用能够提高仿真研究结果的准确度,便于对CFRP雷电损伤机理进行分析。

1 实验方法和实验平台

1.1 实验样品

采用3种不同类型的碳纤维增强复合材料层合板,实验样品的具体参数如表1所示。

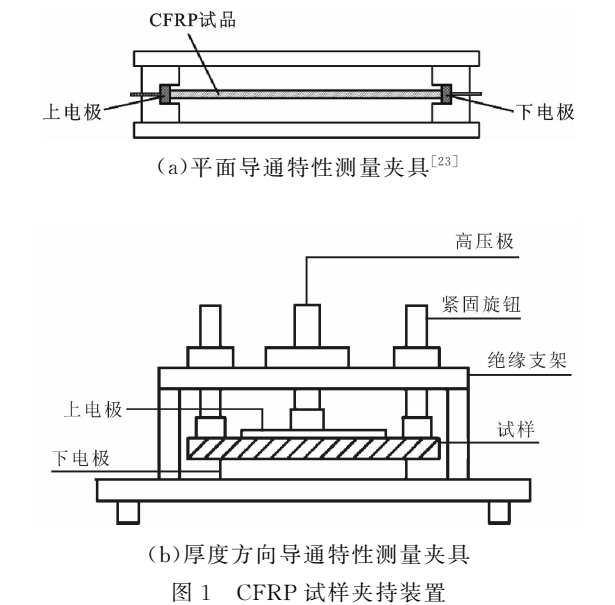
1.2 实验夹具的设计

采用沿层合板平面长度方向、平面宽度方向及厚度方向3种夹持方式进行实验,分别测量0°、45°及

表 1 实验样品参数

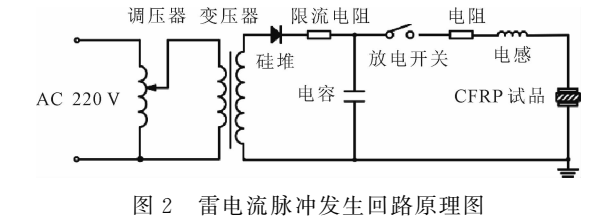
编号	长度,宽度,厚度/mm	材料牌号	铺层结构
S1	150, 100, 4.0	CCF300/5228A	[0/90F] ₁₆
S2	100, 100, 3.6	T300/3021	[0] ₂₄
S3	100, 100, 3.6	T300/3021	[45] ₂₄

编织结构铺层的 CFRP 层合板的动态导通特性。为降低测量结果的不确定度,每次实验前用砂纸对测量铜电极表面进行打磨。此外,在电极与试样之间覆盖多层导电性良好且质地柔软的铝箔,并利用夹具将 CFRP 层合板与铜电极紧密固定在一起,以减少电极与试样间接触电阻对测量结果的影响。



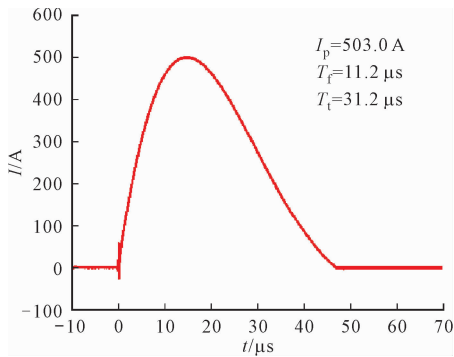
1.3 实验电路及测试方法

采用 10/30、20/60 及 40/120 μs 3 种不同波形参数的雷电流脉冲进行实验,发生回路原理如图 2 所示。

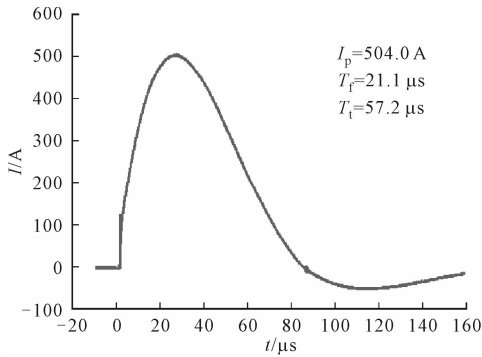


调节图 2 回路中的电容、电阻和电感,可以产生不同波形参数的雷电流波形^[24],实验所用雷电流脉冲波形及对应的调波元件参数如图 3 及表 2 所示,其中 I_p 为电流峰值, T_f 和 T_t 分别为雷电流波形的波前时间和波尾时间。

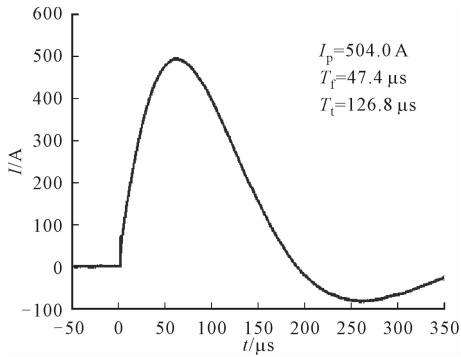
采用 Rogowski 线圈、脉冲分压器和泰克 MDO 3012 示波器,采集流过 CFRP 试样的雷电流和试样



(a)10/30 μs 雷电流波形



(b)20/60 μs 雷电流波形



(c)40/120 μs 雷电流波形

图 3 实验所用雷电流脉冲及其参数

表 2 不同雷电流发生回路的回路参数

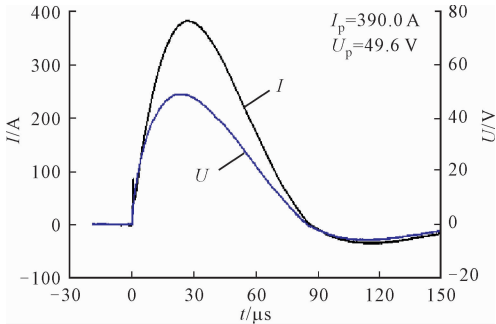
雷电流脉冲/ μs	$C/\mu\text{F}$	R/Ω	$L/\mu\text{H}$
10/30	14	1.0	9.9
20/60	14	2.0	39.5
40/120	28	2.0	79.1

两端的电压。本文测量了 CFRP 层合板在不同夹持方式、不同波形参数、不同峰值的雷电流脉冲作用下的动态阻抗特性,分析影响 CFRP 层合板动态阻抗特性的因素,从而探索 CFRP 在雷电流作用下的导通模型。考虑到测量结果的分散性,对每个测试点连续进行 3 次重复实验。

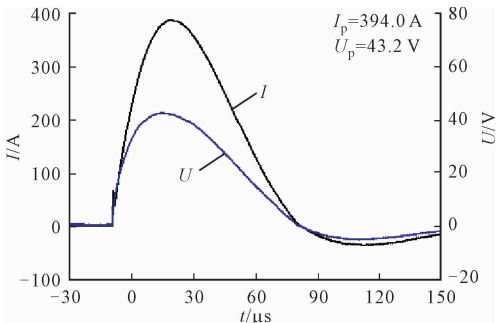
2 CFRP 动态阻抗特性实验结果

2.1 雷电流作用下 CFRP 动态响应

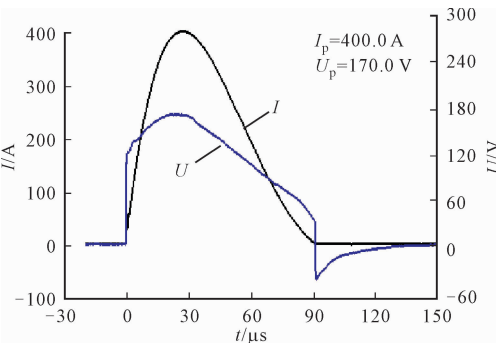
不同参数雷电流作用下,夹持方式和铺层结构对 CFRP 层合板的导电特性有所影响,但 CFRP 试样在雷电流作用下的动态响应存在着一些共同点。以试样 S1 为例,分别沿层合板平面长度、宽度及厚度方向施加 20/60 μs 雷电流脉冲时,对应的脉冲电流 I 与电压 U 波形如图 4 所示,其中 I_p 和 U_p 分别为电流峰值和电压峰值。



(a)平面长度方向



(b)平面宽度方向



(c)厚度方向

图 4 试样 S1 在不同夹持方式下电流和电压波形

从图 4 实验结果看出:在不同夹持方式下,试样电压与电流波形基本一致,流过 CFRP 层合板上的雷电流峰值滞后于施加在材料两端的电压峰值。以沿试样厚度方向的雷电流测试结果为例,对单次雷

电流作用过程进一步分析,得到 CFRP 层合板的动态伏安特性,如图 5 所示。

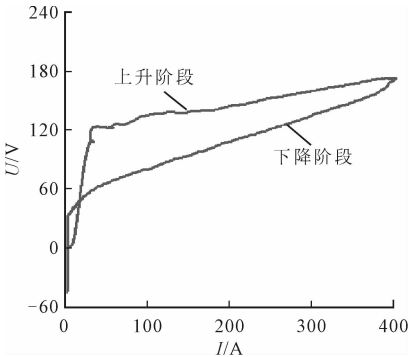


图 5 试样 S1 厚度方向动态伏安特性

从图 5 可以看出,CFRP 层合板动态伏安特性在雷电流的上升与下降过程中出现了明显的不重合现象,即在电流下降阶段,CFRP 层合板两端所承受的电压明显低于在电流上升阶段的电压。此外,在雷电流上升初期,当流过 CFRP 试样电流增加至约 30 A 时,层合板两端所承受的电压约为 110 V,而随着电流值增大至 400 A,层合板上的电压仅增加了约 60 V,表现出明显的非线性导电特征。

2.2 不同雷电流脉冲作用下 CFRP 动态阻抗特性

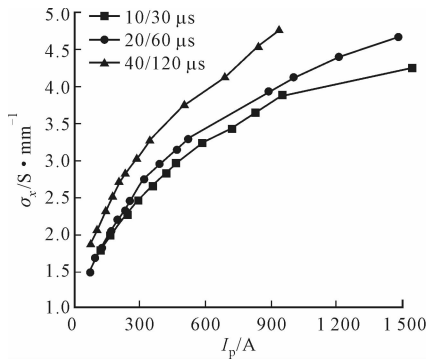
为量化比较不同波形参数、不同峰值雷电流作用下 CFRP 层合板的导电特性,暂且忽略电流和电压波形的相位差异,采用等效电导率 $\sigma = I_p/U_p$ 标志材料的导电性能。CFRP 层合板以 3 种不同方式夹持,通过调整施加雷电流脉冲的幅值,测量 CFRP 试样在不同波形参数、不同强度的脉冲电流作用下的等效电导率 σ ,得到 CFRP 动态导电特性随施加雷电流的变化,如图 6 所示。

从图 6 中 CFRP 试样在不同参数雷电流作用下的导电特性可以看出:

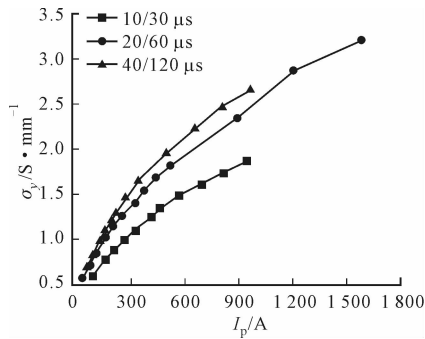
- (1)随着雷电流峰值的增加,CFRP 层合板的等效电导率逐渐增加,即具有显著的非线性特性;
- (2)CFRP 层合板在平面长度及宽度方向的电导率远大于厚度方向的电导率(数量级相差 10^3);
- (3)CFRP 层合板的等效电导率随施加的雷电流波形参数变化,雷电流上升速度越慢、持续时间越长,CFRP 材料的电导率相应越大。

2.3 不同铺层结构 CFRP 动态阻抗特性

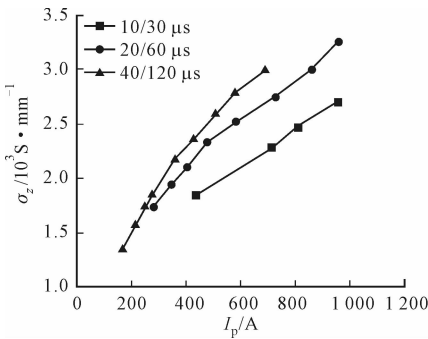
CFRP 层合板因铺层结构不同,对雷电流脉冲有着不同的响应。其中,层合板 S2 为 0° 铺层结构,在沿长度方向夹持时,能够测得电流沿纤维铺层方向(即纤维轴向)的电导率,而沿宽度方向夹持对应于电流垂直于纤维铺层方向(即纤维径向)的电导



(a)平面长度方向等效电导率



(b)平面宽度方向等效电导率



(c)厚度方向等效电导率

图 6 试样 S1 等效电导率随雷电流脉冲强度的变化

率。试样 S3 的平面电导率为 45°铺层结构层合板的平面导电特性。在 10/30 μs 雷电流作用下,不同铺层结构 CFRP 试样的等效电导特性见图 7。

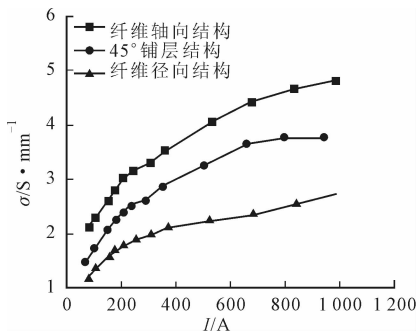


图 7 不同铺层结构 CFRP 试样的电导率

从图 7 看出:在 CFRP 层合板中,沿纤维轴向的导电特性最好,沿 45°铺层方向次之,垂直于碳纤维铺层方向的导电性能最差。值得注意的是,不同于平面方向与厚度方向电导率的差异,在同一平面内,沿不同方向的电导率之间没有数量级上的差异。

3 分析与讨论

3.1 铺层结构对 CFRP 导电特性的影响

从 2.1 节和 2.3 节的实验结果看出:CFRP 层合板厚度方向的电导率远小于平面方向的电导率,并且沿平面不同方向的导电特性也有所不同,这一现象与 CFRP 层合板内部铺层结构密切相关。

CFRP 层合板是由碳纤维单丝和基体材料复合、模压固化而成,但层合板内部纤维单丝不是完全平直排列,弯曲的纤维会导致纤维之间的随机接触,实际纤维排布如图 8 所示^[17]。

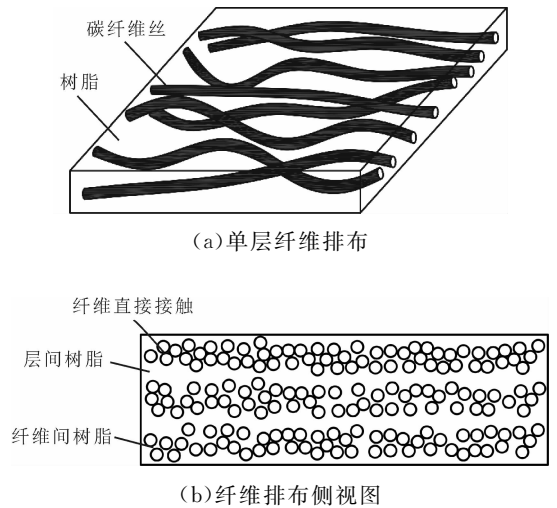


图 8 CFRP 层合板内部纤维排布示意图^[17]

在层合板平面方向同一纤维铺层内,碳纤维单丝之间以两种不同方式相互联系,一种是纤维与纤维彼此直接接触,另一种就是碳纤维单丝之间被很薄的绝缘基体分离。电流在层合板平面方向的传导主要依靠纤维单丝构成的导电网络,只是在不同铺层结构中,导电路径有所不同^[25-26]。

对于层合板在纤维轴向的导电性,由于电流能够沿整条纤维丝传导,因此相比于其他纤维铺层方向电导率最高,并且层合板纤维轴向的电导率可以根据碳纤维的体积密度计算得到^[17]。当沿 CFRP 试样平面中其他方向注入电流时,例如沿 45°方向和 90°方向时,电流除了可以通过纤维之间的随机接触点导流外,在雷电流伴随的较高施加电压的作用下,纤维丝间的树脂薄层的导电性能会有所提升,

因此树脂薄层可以连通近似平行分布的纤维单丝,构成完整的导电通道。例如,电流沿垂直于 0° 纤维铺层方向导流时,电流传导路径如图9所示。不同铺层结构层合板的平面电导率与 0° 铺层结构试样中的纤维轴向电导率相比并无数量级上的差异。

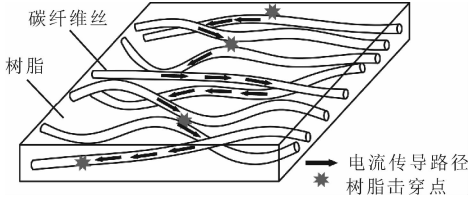


图9 电流沿垂直于纤维方向导电路径示意图

在CFRP层合板的厚度方向,由于纤维铺层之间有导电性能很差的较厚的树脂层,因此CFRP层合板厚度方向的电导率明显低于平面方向的电导率(数值上低3个数量级)。

一些热电耦合仿真研究中采用CFRP材料在直流下的静态导电参数,即沿纤维轴向和径向的电导率分别为 10^2 S/mm和 10^{-3} S/mm量级,而沿层合板厚度方向的电导率为 10^{-6} S/mm量级^[16]。这是因为,纤维间树脂薄层在施加较低直流电压下仍处于高阻状态,因此测得的CFRP层合板中沿纤维径向的直流静态电导率很低。本文的实验和分析表明:在雷电流作用下,CFRP层合板沿铺层纤维轴向和径向的电导率没有数量级上的差异,均为 10^0 S/mm量级,这与直流静态导电特性差异很大。因此,在CFRP材料雷电直接效应热电耦合模型中,采用直流电阻参数进行计算可能会引起仿真结果失真。

3.2 CFRP层合板的电感效应

在雷电流作用下,CFRP层合板两端电压波形的相位超前于电流,且其动态伏安特性在雷电流的上升与下降过程中不重合。此外,对于同一种铺层结构材料,雷电流上升速率越低、持续时间越长,CFRP层合板动态电导率越大。这些现象可以解释如下。根据电流相量的表达式

$$\dot{I} = \dot{U} / (R_m + jX_m) \quad (1)$$

假设电压 U 的相位角为 φ_1 ,电流 I 的相位角为 φ_2 。根据实验结果,CFRP层合板两端电压超前于电流,即 $\varphi_1 > \varphi_2$ 。因此,试样阻抗 $Z_m = R_m + jX_m$ 的相位角可以表示成 $\varphi_3 = \arctan(X_m/R_m) = \varphi_1 - \varphi_2 > 0$,即CFRP层合板在雷电流作用下表现出的阻抗性质为电感性。从宏观来看,CFRP层合板可以看作电阻和电感的串联网络,如图10所示。

试样两端电压可以写成

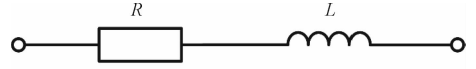


图10 CFRP层合板等效电路

$$U = iR + L(di/dt) \quad (2)$$

因此,在雷电流上升和下降过程中,CFRP层合板两端承受的电压分别为

$$\left. \begin{aligned} U_1(t) &= i_1 R + L(di_1/dt) \\ U_2(t) &= i_2 R + L(di_2/dt) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

在雷电流上升与下降过程中电流相同的情况下,即 $i_1 = i_2$ 时,上升与下降阶段电压差为

$$U_1(t) - U_2(t) = (i_1 - i_2)R + L(di_1/dt - di_2/dt) \quad (4)$$

上升过程中 $di_1/dt > 0$,电流下降中 $di_2/dt < 0$,因此有 $U_1 - U_2 > 0$,即电流上升过程中的电压大于下降过程中的电压,导致伏安特性曲线出现不重合现象。

此外,对于不同波形参数的雷电流脉冲,由于电压相位超前于电流,CFRP层合板两端电压达到峰值时刻,电流仍处于上升阶段,因此对于10/30、20/60及40/120 μ s 3种雷电流波形,均有 $di/dt > 0$ 。当电流幅值相同时,雷电流变化速率越低、持续时间越长, di/dt 越小,由式(2)计算得到的试样两端的电压就越低,试样的等效电导率越大。同时,随着雷电流持续流经CFRP层合板,外部电路持续注入的载流子引起材料内部树脂的导电性上升,因此同样有雷电流持续时间越长,材料等效电导率越大,即

$$\sigma_{40/120 \mu s} > \sigma_{20/60 \mu s} > \sigma_{10/30 \mu s} \quad (5)$$

3.3 CFRP层合板电感效应来源分析

碳纤维复合材料是由碳纤维单丝及基体材料复合而成,电流沿CFRP层合板平面方向导流时,虽然其导通路径中可能夹杂部分树脂薄层,但主体由碳纤维丝相互连接形成的导电网络构成。因此,CFRP层合板在雷电流作用下表现出的电感效应与碳纤维单丝的特性密切相关。碳纤维可等效看作近似平直的导线,具有一定的电感效应。参考平直导线的电感为

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - 0.75 \right) \quad (6)$$

式中: l 为碳纤维丝长度; r 为碳纤维丝半径(碳纤维丝直径 d_c 约为7 μ m); $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m为真空磁导率。以此计算得到长度为1 m的碳纤维单丝的电感约为2.5 μ H。在100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 3.6 mm的层合板中,若以2 $\times$ 100 mm作为单路平面导通路径的大致长度,则由单根纤维丝构成的等效导

电路径的电感约为 $2.5\mu\text{H}/\text{m} \times 2 \times 0.1\text{ m} = 0.5\mu\text{H}$ 。

但实际上,层合板平面方向电感效应是大量碳纤维导电通道电感并联的结果。假设尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 3.6\text{ mm}$ 的层合板内部约 50% 的碳纤维丝参与了导电路径的构建,那么对于碳纤维体积分数(f_c)为 60% 的 CFRP 层合板,当电流沿层合板平面导流时,并联的导电纤维根数约为

$$\frac{whf_c}{d_c d_c} \times 50\% = \frac{100\text{ mm} \times 3.6\text{ mm} \times 60\%}{7\mu\text{m} \times 7\mu\text{m}} \times 50\% \approx 2.2 \times 10^6 \quad (7)$$

式中: w 及 h 分别为 CFRP 试样的宽度和高度,并且假设碳纤维单丝占据空间的横截面是边长为 d_c 的正方形。当多条碳纤维丝并联时,一定程度上会使碳纤维层合板的等效电感量减少。根据我们对导线并联结构等效电感的工程经验,随着参与导电的导线根数增加,导线整体等效电感减小,但由于导线之间存在互感,当导线根数增加至一定量时,导线并联结构的等效电感趋近单根导线电感值的 60% 左右。由此估计碳纤维层合板平面方向碳纤维导电网络的等效电感约为 $0.5\mu\text{H} \times 60\% \approx 0.3\mu\text{H}$ 。在电流幅值为 400 A 的 $10/30\mu\text{s}$ 雷电流脉冲作用下,由于碳纤维导电网络的电感效应而产生的电压变化为

$$\Delta U = L \frac{di}{dt} = 0.3\mu\text{H} \times \frac{400\text{ A}}{10\mu\text{s}} = 12\text{ V} \quad (8)$$

实际测得 CFRP 试样两端的电压约为 30 V,即由于碳纤维导电网络存在电感效应而产生的电压降落大约占此时试样两端总电压的 40%。

此外,将层合板内部基体的树脂材料作为一种绝缘材料,在低电压作用下的电导率很低,而随着施加电压时间的增加,树脂层导电性不断提高,材料整体电导随之增加。

4 结 论

本文针对 CFRP 试样在非破坏性雷电流作用下的动态导电特性,研究了 CFRP 层合板铺层结构、电流传导路径及雷电流波形参数对 CFRP 动态导电特性的影响,并在此基础上探索了 CFRP 层合板在雷电流作用下的导通机制,得到的研究结论主要包括以下几个方面。

(1) CFRP 层合板厚度方向电导率($10^{-3}\text{ S}/\text{mm}$)远小于平面方向电导率($10^0\text{ S}/\text{mm}$),这一各向异性电导率来源于 CFRP 层合板的内部铺层结构。

电流沿层合板平面方向传导时(沿纤维轴向或垂直于纤维方向),导电网络主体由高导电碳纤维丝构成,碳纤维丝之间通过纤维直接接触或树脂薄层连通。厚度方向纤维层之间的低导电树脂层较厚,该方向电导率显著降低。

(2) CFRP 试样在雷电流脉冲作用下表现出电感效应,即动态电压波形相位超前于雷电流波形,并且动态伏安特性曲线中上升与下降阶段不重合。对于同一种铺层结构的 CFRP 材料,施加的雷电流上升速率越低、波长越长,CFRP 层合板电导率越大。层合板在雷电流脉冲作用下所表现出的电感效应与碳纤维单丝的电感特性密切相关。

(3) CFRP 层合板在雷电流脉冲作用下的动态导电特性和内部导通机制与直流电压作用下的静态电阻特性存在很大的差异。因此,有必要在非破坏性雷电流脉冲作用条件下,对 CFRP 层合板的各向动态导电特性及导通模型进行深入探索,为其在 CFRP 雷电直接效应热电耦合模型中的应用以及 CFRP 性能优化与结构设计提供实验与理论依据。

参考文献:

- [1] MAZUMDAR S K. Composites manufacturing: materials, product, and process engineering [M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press Ltd., 2002: 1-20.
- [2] MANGALGIRI P D. Composite materials for aerospace applications [J]. Bulletin of Materials Science, 1999, 22(3): 657-664.
- [3] BOEING. AERO — Boeing 787 from the ground up [EB/OL]. [2018-07-14]. http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html.
- [4] AIRBUS. A350 XWB family: the extra that makes the difference [EB/OL]. [2018-08-07]. <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a350xwb-family.html? namespace=s7viewers>.
- [5] RUPKE E. Lightning direct effects handbook [R]. Pittsfield, MA, USA: Lightning Technologies Inc., 2002: 19-25.
- [6] UMAN M A, RAKOV V A. The interaction of lightning with airborne vehicles [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2003, 39(1): 61-81.
- [7] CORUM J M, BATTISTE R L, LIU K C, et al. Basic properties of reference crossply carbon-fiber composite [R]. Oak Ridge, TN, USA: Oak Ridge National Laboratory, 2000: 7-27.
- [8] 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 & Manufacturing*, 2010, 41(8): 973-981.
- [9] WANG F S, DING N, LIU Z Q, et al. Ablation damage characteristic and residual strength prediction of carbon fiber/epoxy composite suffered from lightning strike [J]. *Composite Structures*, 2014, 117: 222-233.
- [10] PLUMER J A, ROBB J D. The direct effects of lightning on aircraft [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, 24(2): 158-172.
- [11] KAWAKAMI H, FERABOLI P. Lightning strike damage resistance and tolerance of scarf-repaired mesh-protected carbon fiber composites [J]. *Composites: Part A Applied Science & Manufacturing*, 2011, 42(9): 1247-1262.
- [12] CHEMARTIN L, LALANDE P, PEYROU B, et al. Direct effects of lightning on aircraft structure: analysis of the thermal, electrical and mechanical constraints [J]. *Journal Aerospace Lab*, 2012, 5: 1-15.
- [13] 姚学玲, 郭灿阳, 孙晋茹, 等. 碳纤维复合材料在雷电流作用下的损伤仿真与实验 [J]. *高电压技术*, 2017, 43(4): 1400-1408.
- YAO Xueling, GUO Canyang, SUN Jinru, et al. Damage simulation and experiment of carbon fiber composites subjected to lightning current [J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(4): 1400-1408.
- [14] NAGHIPOUR P, PINEDA E J, ARNOD S M. Simulation of lightning-induced delamination in un-protected CFRP laminates [J]. *Applied Composite Materials*, 2016, 23(4): 523-535.
- [15] DONG Q, GUO Y, CHEN J, et al. Influencing factor analysis based on electrical-thermal-pyrolytic simulation of carbon fiber composites lightning damage [J]. *Composite Structures*, 2016, 140: 1-10.
- [16] ABDELAL G, MURPHY A. Nonlinear numerical modelling of lightning strike effect on composite panels with temperature dependent material properties [J]. *Composite Structures*, 2014, 109(1): 268-278.
- [17] 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 & Technology*, 2002, 62(5): 619-628.
- [18] CHENG J, JI H, QIU J, et al. Role of interlaminar interface on bulk conductivity and electrical anisotropy of CFRP laminates measured by eddy current method [J]. *NDT & E International*, 2014, 68: 1-12.
- [19] HAIDER M F, MAJUMDAR P K, ANGELONI S, et al. Nonlinear anisotropic electrical response of carbon fiber-reinforced polymer composites [J]. *Journal of Composite Materials*, 2018, 52(8): 1017-1032.
- [20] 孙晋茹, 姚学玲, 许雯珺, 等. 非破坏雷电流 A 分量作用下碳纤维复合材料的动态特性 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 60(6): 130-135.
- SUN Jinru, YAO Xueling, XU Wenjun, et al. Dynamic characteristics of carbon fiber reinforced polymer under non-destructive lightning current A component [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 60(6): 130-135.
- [21] SUN J, YAO X, XU W, et al. Dynamic characteristics of carbon fiber reinforced polymer under nondestructive lightning current [J]. *Polymer Composites*, 2018, 39(5): 1514-1521.
- [22] 曹传亮, 孙晋茹, 许雯珺, 等. 冲击电流作用下碳纤维复合材料的导电特性 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(2): 103-109.
- CAO Chuanliang, SUN Jinru, XU Wenjun, et al. Conductive properties of carbon fiber composites under impact current [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(2): 103-109.
- [23] 贾玉玺, 董琪, 万国顺. 一种纤维增强复合材料的人工模拟雷击试验夹具和方法: ZL 201410261623.4 [P]. 2017-02-15.
- [24] 陈景亮, 姚学玲, 孙伟. 脉冲电流技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2008: 33-35.
- [25] TAIPALUS R, HARMIA T, ZHANG M Q, et al. The electrical conductivity of carbon-fibre-reinforced polypropylene/polyaniline complex-blends: experimental characterisation and modelling [J]. *Composites Science & Technology*, 2001, 61(6): 801-814.
- [26] WEBER M, KAMAL M R. Microstructure and volume resistivity of composites of isotactic polypropylene reinforced with electrically conductive fibers [J]. *Polymer Composites*, 2010, 18(6): 726-740.

(编辑 杜秀杰)