

DOI: 10.7652/xjtuxb201802016

# 冲击电流作用下碳纤维复合材料的导电特性

曹传亮, 孙晋茹, 许雯珺, 陈景亮, 姚学玲

(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:** 针对碳纤维复合材料(CFRP)在航空航天领域应用时的雷电损伤机理以及无损检测的问题,建立了 CFRP 非破坏性冲击动态伏安特性测试平台,对碳纤维复合材料的动态伏安特性的测量方法进行了研究。通过对流经 CFRP 上动态电流以及两端动态电压的测试,研究 CFRP 在非破坏脉冲电流作用下的动态伏安特性。研究发现:冲击电流的幅值、波形以及测量电极均会对 CFRP 的动态伏安特性产生比较明显的影响。随着冲击电流幅值的增加,CFRP 的动态伏安特性曲线在电流上升阶段出现明显的向上偏移;在电流下降阶段,其所对应的动态伏安特性曲线会向下偏移直至趋于重合。当施加在 CFRP 上的冲击电流的持续时间变长时,明显看出 CFRP 的动态伏安特性上升阶段和下降阶段所包围的区域逐渐减小。当测量电极尺寸增加时,流过 CFRP 上的动态电流幅值增大了 15%,其动态伏安特性曲线会逐渐向下移动,且随着冲击电流幅值增加,不同测量电极所对应的伏安特性曲线逐渐接近。研究结果为碳纤维复合材料在雷电直接作用时其导电行为以及损坏机理的研究提供了一定的实验基础与理论依据,为碳纤维复合材料的无损检测提供了新的实验思路。

**关键词:** 碳纤维复合材料;冲击电流;动态伏安特性;无损检测

**中图分类号:** V258;TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)02-0103-07

## Conductive Properties of Carbon Fiber Composites under Impact Current

CAO Chuanliang, SUN Jinru, XU Wenjun, CHEN Jingliang, YAO Xueling

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

**Abstract:** A dynamic volt-ampere characteristic test platform of CFRP is established and the dynamic volt-ampere characteristic measurement method of carbon fiber composite is studied to solve the problem of lightning damage mechanism and non-destructive testing of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) in aerospace applications. The dynamic voltammetry behavior of CFRP under non-destructive pulsed current is studied by testing the dynamic current flowing through CFRP and the dynamic voltage at both ends. It is found that the amplitude, waveform of impact current and measurement electrode have significant effects on the dynamic voltammetry behavior of CFRP. With the amplitude of impact current increasing, the dynamic voltammetry characteristic curve of CFRP shows a significant upward shift in the current rise phase; the dynamic amplitude of the dynamic voltammetry curve will shift downward until it tends to overlap in the current falling stage. When the wavelength of the impulse current applied to the CFRP becomes longer, it is clearly observed that the surrounded zones by ascent stage and descent stage

收稿日期: 2017-07-18。 作者简介: 曹传亮(1993—),男,硕士生;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专项资金资助项目(xkjc2014006)。

网络出版时间: 2017-11-28

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20171128.1540.002.html>

of the dynamic volt-ampere characteristic of the CFRP becomes smaller. When the measured electrode size increases, the dynamic current amplitude flowed through the CFRP increases by 15%, and the dynamic voltammetry characteristic curve gradually moves down. When the impact current amplitude increases, the dynamic voltammetry characteristic curves with different measured electrodes are getting closer. These results provide a certain experimental basis and theoretical basis for the study of the conductive behavior and the damage mechanism of the carbon fiber composite material in the direct action of the lightning. It also provides a new experimental idea for the non-destructive testing of the carbon fiber composite.

**Keywords:** carbon fiber composite; impact current; dynamic voltammetric behavior; non-destructive testing

碳纤维复合材料(CFRP)以其轻质、优越的机械性能和抗腐蚀能力而被广泛应用于航空航天、汽车制造等行业<sup>[1]</sup>。由于飞行器在高空飞行过程中难免会遭受雷电的冲击,雷电流的幅值往往在几百千安培量级,会对飞行器造成严重损伤。

CFRP一般是由碳纤维单丝以及环氧树脂基体压制而成,由于碳纤维单丝具有良好的导电性能,其电阻率往往可以达到 $10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ 的量级,而环氧树脂的电阻率往往处于 $10^7 \Omega \cdot \text{m}$ 的量级,所以其特殊的内部结构导致其具有特殊的各向异性的导电性质<sup>[2]</sup>。CFRP在纵向(垂直于碳纤维单丝方向)和厚度方向的碳纤维单丝由于环氧树脂的隔离作用,所以CFRP纵向和厚度方向的导电性会明显减弱<sup>[3]</sup>。现在比较常用的2种CFRP的导电理论是渗流理论以及隧穿理论。渗流理论认为CFRP导电是由于当CFRP内部的碳纤维单丝的含量达到某一临界值(渗滤浓度)时,在材料内部的碳纤维单丝彼此相互接触而构成了稳定的导电网络,这种导电网络的构成进而导致CFRP在厚度以及纵向方向可以参与导电;隧穿理论认为CFRP内部的碳纤维单丝不可能完全接触以构成稳定的导电网络,而是依靠电子的隧穿效应跨越材料内部阻隔纤维之间的绝缘层来参与导电<sup>[4-5]</sup>。

近年来,国内外学者都将CFRP的性能研究作为重点研究对象,尤其在其电学特性方面的研究。文献[6]对碳纤维-环氧树脂层合板在升温过程中的电阻率进行了研究,发现CFRP的电导率随着温度的增加而逐渐增加,即CFRP具有负温度电阻系数(NCT)。CFRP在经过一段时间的连续疲劳测试之后,其直流电阻会出现明显的增加<sup>[7-8]</sup>。国内外学者根据CFRP的直流电阻特性以及碳纤维复合材料特殊的内部结构对CFRP损伤的自检测法进行了研究,发现当CFRP的内部结构发生损坏时,会对

其电阻造成不可恢复的改变,因此对CFRP损伤的自检测法是十分可行的<sup>[9-11]</sup>。

传统的CFRP损伤的自检测法只考虑了直流电阻的变化,将CFRP的阻抗性质看作是纯阻性的。根据先前的实验研究发现,CFRP在脉冲电流下的阻抗性质是感性的,因此当CFRP遭受雷击作用时,单独考虑直流电阻无法准确估计出材料是否已经失效,因为如果材料内部只是绝缘基体发生了破坏,那么其所对应的直流电阻一定会有所减小,只有当材料内部的纤维发生断裂时,材料整体的电阻才会增加。为了更好地了解CFRP在雷电直接作用下的损坏机理,帮助我们预测CFRP在高强度雷电流作用下的基本导电特性,对CFRP进行非破坏性冲击电流下的动态导电特性的研究是十分有必要的。本文在不同冲击电流作用下,对CFRP厚度方向上的动态导电特性进行了测试,进一步分析出在遭受雷击时CFRP导电的机理以及特性,为CFRP遭受雷电直接作用时导电模型的建立及纤维的断裂、绝缘基体的热降解等损伤的产生提供了理论依据,为CFRP损伤的自检测法提供了新的思路。

## 1 实验平台及实验方法

### 1.1 实验样品

实验所采用的样品为IM600/133碳纤维/环氧树脂复合材料,铺层方式为 $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{4s}$ ,样品长度为150 mm、宽度为100 mm、厚度为5 mm。材料的热电物理属性见表1。

CFRP通常是利用碳纤维预浸布使用平板硫化机压模固化而成,固化压力为0.5 MPa,固化温度曲线如图1所示<sup>[12]</sup>。

### 1.2 实验回路设计

本文共设计了3种不同波形的冲击电流波形,波形参数 $T_1/T_2$ 分别为4/10、8/20以及30/80。其

表 1 IM600/133 碳纤维复合材料的热电物理属性

| 密度/<br>$10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{mm}^3$ | 比热容/<br>$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ | 热导率/ $\text{W} \cdot (\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ |          | 电导率/ $\Omega^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ |          |                        |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------|-----------------------------------------|----------|------------------------|
|                                               |                                                                | 纤维方向                                                        | 纵向       | 纤维方向                                    | 纵向       | 厚度方向                   |
| 1.52                                          | 1 065                                                          | 0.008                                                       | 0.000 67 | 35.97                                   | 0.000 45 | $3.876 \times 10^{-6}$ |

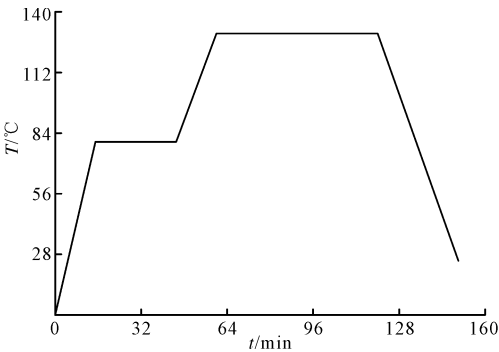


图 1 碳纤维复合材料的成型固化曲线

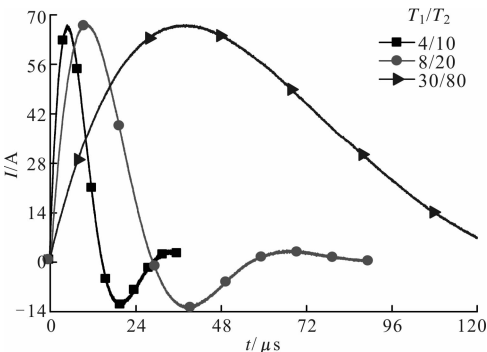


图 3 不同波形的冲击电流波形

中  $T_1$  为波前时间,表示冲击电流由 0 升至最大值的时间; $T_2$  为半峰值时间,表示冲击电流由 0 上升至最大值后下降至最大值的 1/2 所用的时间。

为了获得不同波形的冲击电流,本文采用文献[13]中的 RLC 回路来产生冲击电流,如图 2 所示,通过调节回路中的电感及电阻参数就可以获得不同波形参数的冲击电流。所选取的回路参数见表 2。测量得到的 3 种冲击电流波形如图 3 所示。

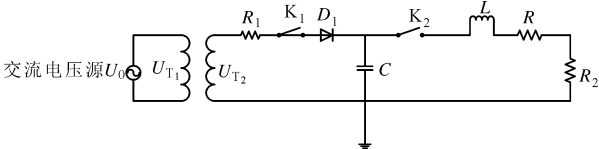


图 2 RLC 冲击电流发生回路

表 2 不同冲击电流发生回路的参数

| $T_1/T_2$ | $C/\mu\text{F}$ | $L/\mu\text{H}$ | $R/\Omega$ |
|-----------|-----------------|-----------------|------------|
| 4/10      | 8               | 1.9             | 0.42       |
| 8/20      |                 | 7.4             | 0.64       |
| 30/80     |                 | 125             | 4.3        |

图 3 中 3 种不同波形参数的冲击电流波的波前时间  $T_1$  和半峰值时间  $T_2$  分别为: $T_1=3.84 \mu\text{s}$ ,  $T_2=10.1 \mu\text{s}$ ; $T_1=7.72 \mu\text{s}$ ,  $T_2=19.6 \mu\text{s}$ ; $T_1=28.9 \mu\text{s}$ ,  $T_2=84.1 \mu\text{s}$ ,且反极性振荡均小于 20%,满足冲击电流波形的要求。

1.3 实验电极及夹具的设计

根据文献[14]可知,利用三电极系统测试出的实验结果与二电极系统的实验结果几乎一致,所以在本次实验中所采用的测量电极为二电极系统。为了研

究测量电极尺寸对 CFRP 的导电特性的影响,本文共设计了 3 种不同的电极尺寸,分别为  $150 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 、 $60 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  以及  $30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。

为了保证 CFRP 的表面与电极接触的紧密性,减小测量过程中的接触电阻,测量时在铜电极下覆盖一层相对柔软的铝箔,然后利用夹具将碳纤维复合材料与铜电极紧密的固定在一起。测量 CFRP 在冲击电流作用下导电特性的实验回路如图 4 所示。

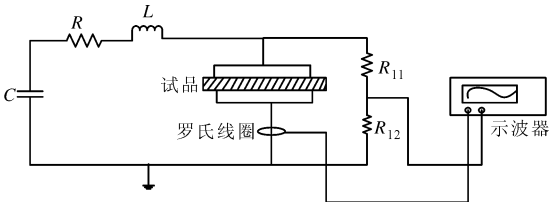


图 4 碳纤维复合材料导电特性的实验回路

1.4 实验方法及过程

本文对碳纤维复合材料厚度方向上的动态伏安特性进行了实验研究,分别在不同电流幅值和不同测量电极尺寸条件下,在碳纤维复合材料厚度方向上施加 3 种不同的冲击电流波形,从而获得了碳纤维复合材料厚度方向上的动态伏安特性曲线。

为了防止铜电极表面存在氧化,每次实验前首先进行电极的处理,用砂纸对铜电极表面进行打磨,消除铜电极表面氧化带来的实验误差,然后在铜电极下方敷设一层导电性良好而且质地比较柔软的铝箔,最后将电极放置在碳纤维复合材料表面并用实验夹具夹紧,进而消除接触电阻对碳纤维复合材料测试结果的影响。

按图 2 和图 4 连接电路,按表 2 中的  $R$ 、 $L$ 、 $C$  选

择电路参数即可获得不同的冲击电流波形,通过调整回路中电容的充电电压  $U_c$  就可以获得不同电流幅值的冲击电流。分别用罗氏线圈和脉冲分压器测量流经碳纤维复合材料的电流和其两端的电压。在不同电流波形作用时,分别在不同的电流幅值作用下测量碳纤维复合材料的动态伏安特性曲线。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 电流幅值对 CFRP 的动态伏安特性的影响

$T_1/T_2$  为 4/10 的冲击电流作用下,测量电极尺寸为  $60\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 。分别在不同的电流幅值下对 CFRP 的动态伏安特性进行了测试,电容上的充电电压  $U_c$  由 100 V 上升至 400 V,电流幅值对 CFRP 的动态伏安特性影响如图 5 所示。由图 5 可以看出:①CFRP 在冲击电流作用下的动态伏安特性曲线在电流的上升阶段和下降阶段表现出明显的不重合的现象,而且当电流上升段与下降段的电流相同

试品两端电压越小。随着电流的进一步下降,不同电流幅值所对应的动态伏安特性曲线会出现逐渐重合的趋势。

出现上述实验结果的原因是由于 CFRP 特殊的内部结构造成的,由文献[14]可知,CFRP 在冲击电流作用下的阻抗性质是感性的,所以 CFRP 的简化等效电路如图 6 所示。

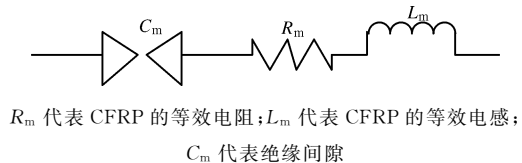


图 6 CFRP 的简化等效电路模型

当流过 CFRP 上冲击电流的瞬时值相同时,在电流上升和下降过程中,碳纤维复合材料上的电压可以表示为

$$U_1 = i_1 R_{m1} + L_m (di_1/dt) \quad (1)$$

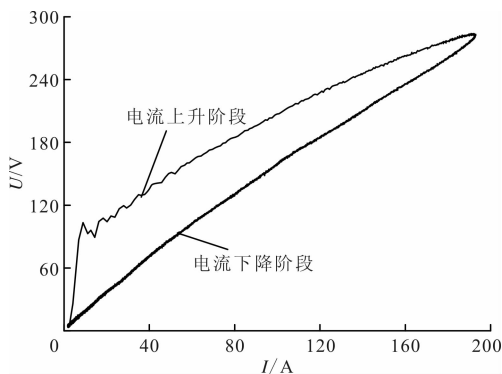
$$U_2 = i_2 R_{m2} + L_m (di_2/dt) \quad (2)$$

将式(2)减去式(1)得

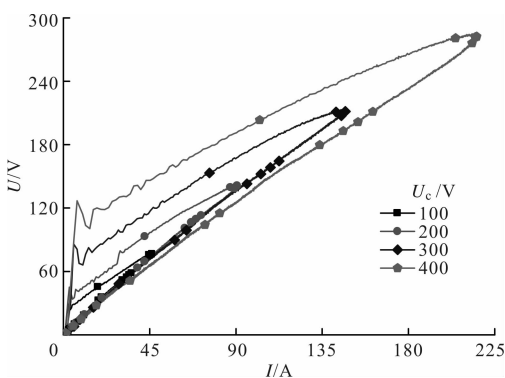
$$U_2 - U_1 = i(R_{m2} - R_{m1}) + L_m [(di_2/dt) - (di_1/dt)] \quad (3)$$

式中:  $R_{m1}$ 、 $R_{m2}$  分别代表 CFRP 在电流上升段与下降段的等效电阻;  $di_1/dt$ 、 $di_2/dt$  分别代表冲击电流上升段与下降段的电流变化率。

在电流流经 CFRP 的过程中,当电流值达到某一临界值时,CFRP 内部的纤维之间的树脂绝缘强度不断下降,绝缘基体中的泄漏电流逐渐增加,这就会导致绝缘基体的导电性能逐渐增大,进而导致材料的导电性能提高。但是,在电流上升的过程中,材料中的电子要从电场中吸收足够的能量来克服电子发生隧穿效应的势垒,此时材料中的载流子数的变化趋势是一个由少变多的过程;在电流下降过程中,当流过 CFRP 厚度方向上的电流值达到与上升过程中相同的电流值时,由于在电流上升过程中施加在材料上的电压不断增大,所以材料内部载流子数在电流上升过程中不断增加,当流过碳纤维复合材料上的电流值减小时,材料内部参与导电的载流子的能量逐渐消散,进而导致材料内部的载流子数减少。所以,在电流下降过程中,材料内部的载流子的变化趋势是由多变少的过程,但是无论电子的能量积累还是能量消散都需要一定的时间。在电流下降阶段材料内部载流子数将会大于在电流上升阶段载流子数,即 CFRP 在电流上升段的电阻要大于在下降段的电阻,有



(a) CFRP 动态伏安特性曲线



(b) 不同电流幅值下 CFRP 动态伏安特性曲线

图 5 电流幅值与碳纤维复合材料的动态伏安特性的关系

时,上升段所对应的电压值要高于下降段所对应的电压值;②随着冲击电流幅值的增加,其所对应的动态伏安特性曲线在电流上升过程中会向上移动,即试品两端电压升高;③在电流下降初期,电流幅值越大,其所对应的动态伏安特性曲线就越向下偏移,即

$$R_{m2} - R_{m1} < 0 \quad (4)$$

由于在同一冲击电流幅值作用下,冲击电流的电流上升频率要明显高于电流下降的频率,因此碳纤维复合材料在电流上升阶段的感抗要大于电流在下降过程中的感抗。例如,波形参数为 4/10 的冲击电流波形在电流上升段的电流变化率大约是下降段电流变化率的 2.5 倍,并且考虑到电流上升过程中  $di_1/dt > 0$ ,电流下降过程中  $di_2/dt < 0$ ,可得

$$(di_2/dt) - (di_1/dt) < 0 \quad (5)$$

式(3)中电流  $i$  与电感  $L$  的值均大于 0,可得

$$U_2 - U_1 < 0 \quad (6)$$

即当流过 CFRP 上冲击电流的瞬时值相同时,在电流上升段 CFRP 上的电压值要大于下降段 CFRP 上的电压值,所以产生了相同电流幅值时电流上升和下降过程中动态伏安特性不重合的现象。

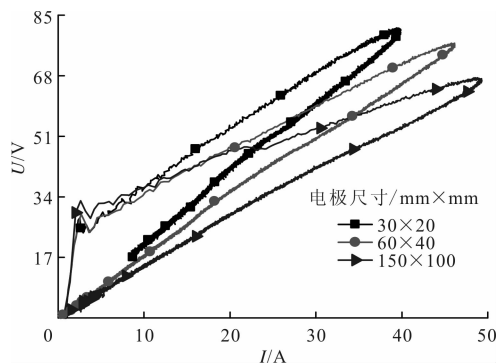
在电流上升阶段,随着电流幅值增大动态伏安特性向上移动,原因是由于电流幅值越大,电流变化率越大,CFRP 内部电感上的感应电压值增大,即  $U_1$  中的  $L_m(di_1/dt)$  增大,因此其伏安特性曲线向上移动。

在流过 CFRP 上冲击电流下降的初期,可以明显地看出随着电流幅值的增加,CFRP 的伏安特性曲线向下移动。其原因是:由于冲击电流幅值越大,CFRP 上所承受的电压也就越大,所以材料内部有更多的电子可以在电场中积累足够的能量而跨越电子发生隧穿效应的势垒,进而导致 CFRP 内部载流子数增多,使材料的电阻减小。随着电流的进一步下降,不同电流幅值的冲击电流所对应的伏安特性曲线趋于一致。这是由于随着电流幅值的下降,材料内部的电子无法从电场中获得足够的能量跨越势垒进行隧穿效应,从而导致材料的电阻回升,使不同电流幅值所对应的伏安特性曲线逐渐接近。

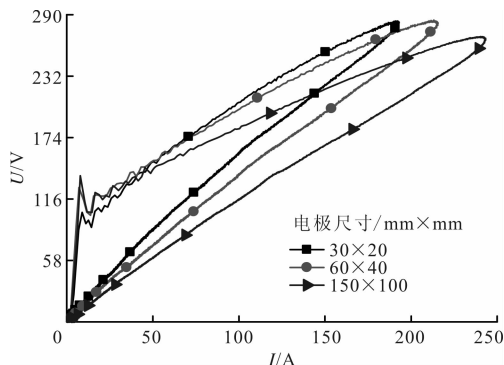
## 2.2 测量电极对 CFRP 的动态伏安特性的影响

在  $T_1/T_2$  为 4/10 的冲击电流作用下,不同测量电极对 CFRP 的伏安特性影响如图 7 所示。

由图 7 实验结果可以发现,测量电极尺寸越大,CFRP 的动态伏安特性的电流幅值就越大,当放电电压  $U_c$  均为 100 V 时,电极尺寸由 60 mm×40 mm 变为 30 mm×20 mm 时,其动态电流幅值增大了 15%。当放电电压  $U_c$  提高至 400 V 时,以上 2 种尺寸的电极测得的电流的增长率约为 11.9%。这说明冲击电流的作用面积越大,其电阻会出现明显减小的现象,且电流幅值的增长率逐渐减小。随着测量电极的增加,CFRP 的动态伏安特性曲线明



(a) 100 V



(b) 400 V

图 7 测量电极尺寸与碳纤维复合材料的动态伏安特性的关系

显整体向下移动。随着脉冲电流幅值的提升,不同测量电极尺寸所测得的动态伏安特性曲线逐渐接近。

3 种电极尺寸依次为 30 mm×20 mm、60 mm×40 mm 和 150 mm×100 mm,根据电阻的公式可知,材料的电阻与参与导电的导电面积成反比,所以当材料的测试电极尺寸增大时,相当于增大了材料的导电面积,从而导致 CFRP 电阻减小,造成式(1)和式(2)中的  $i_1 R_{m1}$  和  $i_2 R_{m2}$  部分减小,因此材料的伏安特性曲线会整体向下移动。

## 2.3 电流波形对 CFRP 的动态伏安特性的影响

冲击电流波形分别为 4/10、8/20 和 30/80,每次测量时冲击电流的电流幅值都相同。实验结果如图 8 所示。

由图 8 结果可以发现,随着冲击电流波形的持续时间增加,其所对应的 CFRP 的伏安特性向下移动,而且上升段与下降段所包围的面积宽度也明显减小。其原因是:随着冲击电流持续时间的增加,电流达到幅值的时间就会明显延长,最终导致了碳纤维复合材料内部的电子会从电场中积累更多的能量,这些电子有一部分沿着电场的方向进行移动而产生电流,另一部分沿着材料表面进行扩散,电子扩

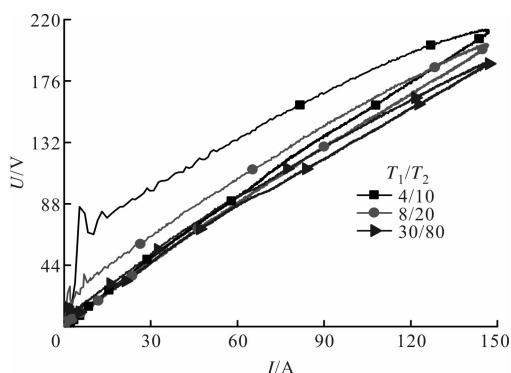


图8 电流波形与碳纤维复合材料伏安特性之间的关系

散到的区域的电势会明显提高,所以在扩散区域的电子能够继续在电场中吸收足够的能量,进而跨越在材料厚度方向上发生隧穿效应所需要的能量,最后参与到碳纤维复合材料的导电当中。因此,随着冲击电流持续时间的增加,碳纤维复合材料内部参与导电的电子以及等效面积都会增加。所以,冲击电流的持续时间越长,其所对应的CFRP的动态伏安特性会向下移动。

随着冲击电流的波前时间的增加,其电流变化率也会明显下降,这导致了CFRP内电感上所产生的反向电压值  $L_m (di/dt)$  明显减小,由于其电流作用时间较长,电子有更多的时间从电场中获得能量,即使是在电流下降阶段,其内部电子的能量会逐渐消散,但是由于电流作用时间较长的原因,材料内部的电子能量消散的速度也会比较缓慢。所以,随着冲击电流持续时间变长,在材料的等效电阻  $R_m$  的值会逐渐减小,而且电流上升段的等效电阻  $R_{m1}$  与下降段的等效电阻  $R_{m2}$  之间的偏差会逐渐减小,进而导致了  $(U_1 - U_2)$  的差值逐渐减小。因此,电流波形的持续时间越长,CFRP的动态伏安特性曲线在上升段与下降段所包围的面积宽度也会明显下降,即CFRP阻抗的非线性随着冲击电流的作用时间的增加而逐渐减弱。

### 3 结论

本文分别对碳纤维复合材料在不同冲击电流波形、电流幅值以及测量电极尺寸作用下进行了无损冲击实验,根据实验结果可以得出以下结论:

(1)在冲击电流作用下,CFRP的动态伏安特性曲线在电流的上升阶段与下降阶段表现出明显的不重合特性。随着电流幅值的增加,在电流上升阶段CFRP的动态伏安特性曲线向上移动;在电流下降阶段,动态伏安特性曲线出现先逐渐向下偏移再逐

渐趋于重合的现象。

(2)当电极尺寸由  $30\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  增大到  $60\text{ mm} \times 40\text{ mm}$  时,流过CFRP上的动态电流的电流幅值增加了15%。随着电极尺寸的增加,CFRP的动态伏安特性曲线整体逐渐向下偏移。随着电流幅值的增加,CFRP的动态伏安特性呈现逐渐接近的趋势,由于电子沿材料表面扩散的原因,其电流幅值的变化率由15%下降至11.9%。

(3)随着冲击电流持续的时间增加,CFRP的动态伏安特性曲线逐渐向下移动。CFRP的动态伏安特性曲线在电流上升段与下降段所围成的面积宽度逐渐减小,即碳纤维复合材料的动态伏安特性的非线性明显减弱。

### 参考文献:

- [1] YU Hong, HEIDER D, ADVANI S. A 3D micro-structure based resistor network model for the electrical resistivity of unidirectional carbon composites [J]. Composite Structure, 2015, 134: 740-749.
- [2] TAIPALUS R, HARMIA T, FRIEDRICK K. Short fiber reinforced PP/PANI-complex blends and their mechanical and electrical properties [J]. Applied Composite Materials, 1999, 6(3): 167-175.
- [3] CARMONA F, ELAMARTI A. Anisotropic electrical conductivity in heterogeneous solids with cylindrical conducting inclusions [J]. Physical Review: B, 1987, 35(7): 3284-3290.
- [4] VILCAKOVA J, SAHA P, QUADRAT O. Electrical conductivity of carbon fibers/polyester resin composites in the percolation threshold region [J]. European Polymer Journal, 2002, 38(12): 2343-2347.
- [5] CHEKANOV Y, OHNOGI R, GEOASA S, et al. Electrical properties of epoxy resin filled with carbon fibers [J]. Journal of Materials Science, 1999, 34(22): 5589-5592.
- [6] YASIN S F, ZIHLIF A M. The electrical behavior of laminated conductive polymer composite at low temperatures [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2005, 16(2): 63-69.
- [7] TODOROKI A, HARUYAMA D, MIZUTANI Y, et al. Electrical resistance change of carbon/epoxy composite laminates under cyclic loading under damage initiation limit [J]. Open Journal of Composite Materials, 2014, 4(1): 22-31.
- [8] VAVOULIOTIS A, PAIPETIS A, KOSTOPOULOS V. On the fatigue life prediction of CFRP laminates using the electrical resistance change method [J].

- Composites Science and Technology, 2011, 71(5): 630-642.
- [9] BAERE I D, PAEPEGEM W V, DEGREECK J. Electrical resistance measurement for in situ monitoring of fatigue of carbon fabric composites [J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(1): 197-207.
- [10] TODOROKI A, TANAKA Y, SHIMAMURA Y. Delamination monitoring of graphite/epoxy laminated composite plate of electric resistance change method [J]. Composites Science and Technology, 2002, 62(9): 1151-1160.
- [11] CHEOLSEO D, LEE J J. Damage detection of CFRP laminates using electrical resistance measurement and neural network [J]. Composite Structures, 1999, 47(1/2/3/4): 525-530.
- [12] 董琪. 碳纤维复合材料雷击损伤实验研究与数值模拟 [D]. 济南: 山东大学, 2015: 11-12.
- [13] 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.
- [14] 孙晋茹, 姚学玲, 许雯珺, 等. 非破坏电流 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, 50(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, 50(6): 130-135.

(编辑 武红江)

(上接第 62 页)

- [3] WILKERSON J R, GARD K G, STEER M B. Electro-thermal passive intermodulation distortion in microwave attenuators [C]// Proceedings of the 36th European Microwave Conference, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 157-160.
- [4] ROCAS E, COLLADO C, ORLOFF N D, et al. Passive intermodulation due to self-heating in printed transmission lines [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2011, 59(2): 311-322.
- [5] SHITVOV A P, ZELENCHUK D E, SCHUCHINSKY A G, et al. Passive intermodulation generation on printed lines: near-field probing and observations [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(12): 3121-3128.
- [6] ZELENCHUK D E, SHITVOV A P, SCHUCHINSKY A G, et al. Passive Intermodulation in finite lengths of printed microstrip lines [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(11): 2426-2434.
- [7] POZAR D M. Microwave engineering [M]. 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011: 124-125.
- [8] BAHL I J, GUPTA K C. Average power-handling capability of microstrip lines [J]. IEE Journal on Microwaves, Optics and Acoustics, 1979, 3(1): 1-4.
- [9] 叶鸣, 贺永宁, 崔万照. 基于电热耦合效应的微带线无源互调机理研究 [J]. 电波科学学报, 2013, 28(2): 18-23.
- YE Ming, HE Yongning, CUI Wanzhao. Passive intermodulation mechanism of microstrip lines based on the electro-thermal coupling effect [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013, 28(2): 18-23.
- [10] JIANG J H, ZHANG S Q, WU S Z, et al. Prediction of passive intermodulation power level based on double exponential function model and genetic algorithm [C]// Proceedings of 2011 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 307-310.
- [11] ZELENCHUK D, SHITVOV A P, SCHUCHINSKY A G, et al. Passive intermodulation on microstrip lines [C]// Proceedings of the 37 the European Microwave Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 396-399.
- [12] HIENONEN S, RAISANEN A V. Passive intermodulation near-field measurements on microstrip lines [C]// Proceeding of the 34th European Microwave Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 1041-1044.
- [13] 林鑫海, 邹勇, 谢树民, 等. 多系统合路 POI 无源互调测量研究 [J]. 移动通信, 2016, 40(2): 32-36.
- LIN Xinhai, ZOU Yong, XIE Shumin, et al. Research on passive intermodulation measurement of POI [J]. Mobile Communications, 2016, 40(2): 32-36.

(编辑 刘杨)