

# 模拟雷电流作用下单向碳纤维/环氧树脂 预浸料的电阻特性

陈坚, 傅正财\*

(上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

**摘要:** 为探究碳纤维/环氧树脂预浸料在雷电流作用下的电阻特性, 采用 10/350  $\mu\text{s}$  波形的低峰值模拟雷电流对单向碳纤维/环氧树脂预浸料进行模拟雷击试验, 并采用四电极法测量试验前后碳纤维/环氧树脂预浸料的直流 (DC) 电阻, 利用 SEM 和拉曼光谱对雷击前后碳纤维/环氧树脂预浸料微观形态、物相结构进行表征, 系统研究了受雷击后单向碳纤维/环氧树脂预浸料的 DC 电阻变化的原因。结果表明: 单向碳纤维/环氧树脂预浸料 DC 电阻不随雷电流峰值的增加单调变化, 而是呈先减小后增大的趋势, 这是碳纤维石墨化、环氧树脂绝缘性能劣化、碳纤维断裂、隧道效应等因素综合作用的结果。

**关键词:** 单向碳纤维; 环氧树脂预浸料; 直流 (DC) 电阻; 石墨化; 模拟雷电流; 损伤

**中图分类号:** TB332; V258 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2020)01-0082-07

## Resistance characteristics of unidirectional carbon fiber/epoxy prepreg subjected to simulated lightning currents

CHEN Jian, FU Zhengcai\*

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education,  
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to investigate the resistance characteristics of unidirectional carbon fiber/epoxy prepreg subjected to lightning currents, low simulated lightning currents of 10/350  $\mu\text{s}$  waveform were applied on the unidirectional carbon fiber/epoxy prepreg. The direct current (DC) resistance data of the unidirectional carbon fiber/epoxy prepreg before and after the tests were measured adopting the four-probe method. The SEM and Raman spectrum were used to characterize the morphology and phase structure of carbon fiber/epoxy prepreg before and after the test. The causes of the DC resistance change were analyzed. The results show that the DC resistance of the carbon fiber/epoxy prepreg does not change monotonously with the increase of lightning current, but tends to decrease first and then increase. This trend is the combined effects of graphitization, epoxy insulation deterioration, fiber fracture and tunnel effect.

**Keywords:** unidirectional carbon fiber; epoxy prepreg; direct current (DC) resistance; graphitization; simulated lightning current; damage

碳纤维/环氧树脂 (CF/EP) 复合材料由于质量轻、比模量高、耐腐蚀、成型方便被广泛应用于风力发电、航空、航天等领域<sup>[1-2]</sup>, 但与金属材料相比, 其电导率约为 Al 的 1/1 000, 导致在遭受雷击时 CF/EP 复合材料无法快速将雷电流导出, 雷击

附着点的温度迅速上升, 使复合材料所遭受的损伤比金属材料更为严重<sup>[3-4]</sup>。

由 CF/EP 复合材料层压板在雷击下的损伤日益受到关注。雷击 CF/EP 复合材料层压板是一个复杂的多物理场同步耦合的过程, 包含高温电弧加

收稿日期: 2019-01-10; 录用日期: 2019-02-27; 网络出版时间: 2019-04-16 11:01

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190412.001>

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC1501506)

通讯作者: 傅正财, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷电及其防护、高电压试验技术、电磁环境与电磁兼容 E-mail: zcfu@sjtu.edu.cn

引用格式: 陈坚, 傅正财. 模拟雷电流作用下单向碳纤维/环氧树脂预浸料的电阻特性[J]. 复合材料学报, 2020, 37(1): 82-88.

CHEN Jian, FU Zhengcai. Resistance characteristics of unidirectional carbon fiber/epoxy prepreg subjected to simulated lightning currents[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(1): 82-88 (in Chinese).

热周围空气产生的压力波、材料表面高温时的汽化、电流流经 CF 时的焦耳热(电阻热)效应及材料表面的电荷放电等<sup>[5]</sup>。研究表明, 焦耳热除造成表面烧蚀外, 由于雷电流进入材料并沿 CF 方向流动, 引起 CF 快速升温, 造成 CF 周围 EP 热解, 热解产生的气体滞留在铺层之间, 随着温度的升高气体压力进一步增大直至发生爆炸, 最终产生一种层压板所特有的损伤形式即分层损伤<sup>[6-7]</sup>。CF/EP 复合材料层压板的电阻特性不仅影响雷击时产生的焦耳热, 也影响基于该特性的各种结构健康监测装置<sup>[8-9]</sup>, 这类装置利用直流电阻的变化监测或预测层压板损伤程度, 对直流电阻的变化极为敏感。由于 CF/EP 复合材料层压板是由多张预浸料按照一定的铺层顺序铺装, 再通过后续加温加压固化成型得到。预浸料作为构成层压板的基础, 研究其在雷电流作用下的电性能变化, 是深入研究 CF/EP 复合材料层压板电阻变化、焦耳热效应和分层损伤的前提和基础。

与预浸料电性能相关的研究大多集中在温度变化<sup>[10]</sup>、预浸料尺寸和树脂含量改变<sup>[11]</sup>、添加其它材质<sup>[12]</sup>和外界应力改变<sup>[13]</sup>对直流电阻的影响。这些研究关注工艺和应力变化对电阻的影响, 并不关心雷击下的直流电阻变化。

本研究采用 10/350  $\mu\text{s}$  波形的低峰值模拟雷电流对单向 CF/EP 预浸料进行模拟雷击试验, 通过分析试验数据获得预浸料试验前后的直流电阻变化率与模拟雷电流峰值、电荷量和作用积分之间的关系, 利用 SEM 和拉曼光谱等表征手段, 对雷击前后 CF 微观形态和物相结构进行表征并讨论直流电阻变化的原因。研究结果为探究预浸料在雷电流作用下损伤提供基础, 有助于更深入研究 CF/EP 复合材料层压板雷击烧蚀特性和分层现象。

1 实验材料及方法

1.1 材料制备

研究所用材料为碳纤维/环氧树脂(CF/EP, TC33/SG12)单向预浸料, 树脂含量为 25wt%, 单层厚度为 0.135 mm, 面密度为 150 g/m<sup>2</sup>, 裁剪方向为单向预浸料中 CF 的方向, 即试样的长边和单向预浸料中 CF 丝的方向平行, 所制试样长宽为 320 mm×10 mm, 厚度约为 0.13 mm。将裁剪好的试样放入烘箱中进行成型固化。按照图 1 在固化后的试样上布置电极。采用四电极法测量试验前后的

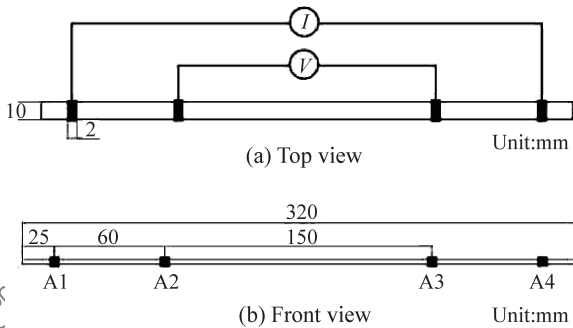


图 1 碳纤维/环氧树脂(TC33/SG12)预浸料直流(DC)电阻测量方法和电极布置

Fig. 1 Measurement method and electrodes layout of direct current (DC) resistance of carbon fiber/epoxy (TC33/SG12) prepreg

直流电阻, 图 1 中 A1 和 A4 为外电极, A2 和 A3 为内电极。

1.2 测试与表征

首先测量雷电流作用之前 A2A3 段的直流电阻  $R_0$ , 然后进行模拟雷电流试验。该试验有 9 个电流等级, 每个电流等级进行 3 次试验, 每个试样只进行一次试验, 总试验次数为 27 次。每次试验记录峰值电流, 并计算电荷量和作用积分。试验后再次测量 A2A3 段直流电阻  $R_1$ 。

图 2 为 TC33/SG12 预浸料雷击试验原理。模拟雷电流试验采用 10/350  $\mu\text{s}$  波形<sup>[9]</sup>, 实测电流波形见图 3。通过调整回路中电容(C)的充电电压可以获得不同峰值的模拟雷电流, 模拟雷电流通过高压电极从试样的 A1A2 之间注入, 从 A3A4 之间流出, 用罗氏线圈(Pearson 410)测量流经试样的雷电流。

CF/EP 复合材料层压板的雷击损伤试验采用的电流一般为 10 kA 以上量级<sup>[15-16]</sup>。考虑到层压板是由多张预浸料堆叠制成, 试验时预浸料能承受的电流远小于层压板可以承受的电流, 且试样由预浸料裁剪得到, 其通流能力不如完整的预浸料, 因此试验中 10/350  $\mu\text{s}$  波形时的最大模拟雷电流定为 350 A。

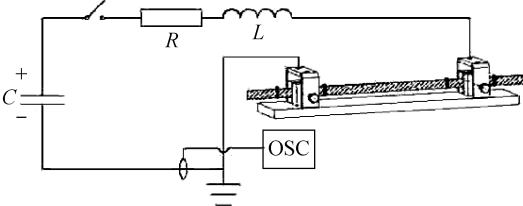


图 2 TC33/SG12 预浸料雷击试验原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of TC33/SG12 prepreg lightning test

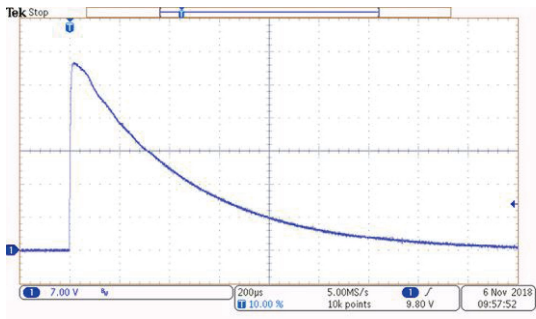


图 3 雷击试验时流经 TC33/SG12 预浸料的实测电流波形  
Fig. 3 Measured current waveform flowing through TC33/SG12 prepreg during lightning test

采用 SEM (Hitachi-3400N) 对雷击试验前后 TC33/SG12 预浸料的表面和截面进行观察；采用拉曼光谱仪 (Zolix Finder Vista) 测试 TC33/SG12 预浸料雷击试验前后的拉曼光谱。

2 结果与讨论

2.1 TC33/SG12 预浸料雷击试验现象

图 4 是 350 A 的 10/350  $\mu\text{s}$  雷电流注入 TC33/SG12 预浸料时观察到的现象。实验中发现，随着模拟雷电流峰值的增加，A2A3 段的起烟现象越来越明显，这是由于试验时电流沿着 CF 丝的方向流动，引起 CF 丝的快速升温，包裹 CF 丝的 EP 热解起始温度约为 600 K，在焦耳热的作用下 EP 被加热，进而分解产生气体。

图 5 为雷击试验前后 TC33/SG12 预浸料表面微观形貌。由图 5(a) 可见，EP 在 CF 丝上分布并不均匀，局部位置出现树脂堆积，这可能是预浸料生产过程中的工艺造成。由图 5(b) 可见，当 350 A 的 10/350  $\mu\text{s}$  模拟雷电流流经 TC33/SG12 预浸料后，

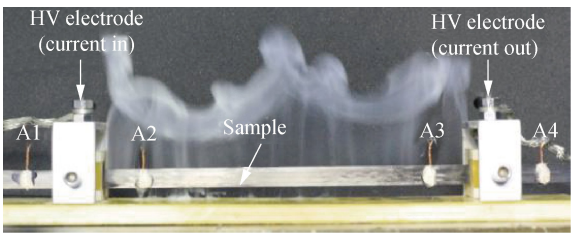


图 4 雷电流(10/350  $\mu\text{s}$ , 350 A)注入 TC33/SG12 预浸料时观察到的现象  
Fig. 4 Observed phenomena when lightning current (10/350  $\mu\text{s}$ , 350 A) is injected into TC33/SG12 prepreg (HV—High voltage)

CF 丝表面出现明显变化，从图 5(b) 可以看到，原本包裹在 CF 丝表面的树脂明显减少，少量残留树脂附着在 CF 丝表面，局部位置没有任何树脂包裹及断裂的 CF 丝。流经每一根 CF 丝的电流有所不同，产生的焦耳热也各不相同，这是试验后 CF 丝表面树脂形貌差异的主要原因。

2.2 TC33/SG12 预浸料电阻变化率与模拟雷电流参数关系

每次试验后根据下式计算注入试样 A2A3 段的电荷量：

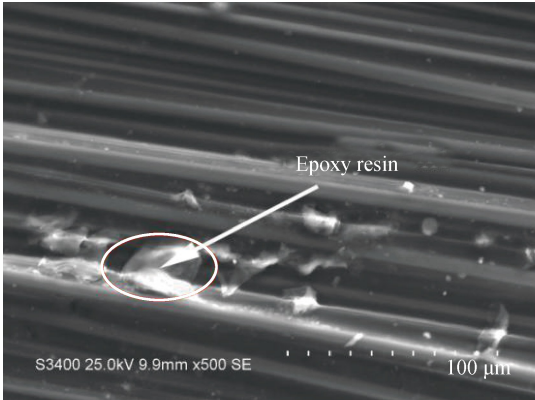
$$Q = \int |i| dt \tag{1}$$

作用积分  $E_s$ ：

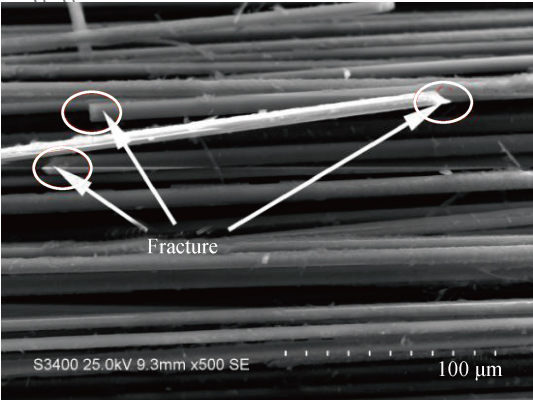
$$E_s = \int i^2 dt \tag{2}$$

式中： $i$  为流经试样的模拟雷电流； $t$  为电流波形的持续时间。同一波形同一电流等级的试验前后电阻采用以下方式得到：采用 3 个试样，每个试样进行一次试验，取 3 次试验的平均值。

CF 丝在预浸料中的分布并不均匀<sup>[17]</sup>，相同尺寸试样的电阻彼此之间存在差异，因此采用电阻变



(a) Before test



(b) After test

图 5 雷击试验(10/350  $\mu\text{s}$ , 350 A)前后 TC33/SG12 预浸料表面微观形貌

Fig. 5 Surface microstructure of TC33/SG12 prepreg before and after lightning test (10/350  $\mu\text{s}$ , 350 A)



化率来评价雷击对电阻的影响。电阻变化率按下式计算:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R_1 - R_0}{R_0} \tag{3}$$

式中:  $R_0$  为试验前的直流电阻;  $R_1$  为试验后的直流电阻;  $\Delta R = R_1 - R_0$  为实验后的直流电阻与实验前的直流电阻的变化。

图 6 为不同峰值雷电流作用后 TC33/SG12 预浸料的直流电阻变化率。从图 6(a)可以得到, TC33/SG12 预浸料直流电阻的最小值出现在 160 A 附近, 比试验前直流电阻值减小了约 1.48%。雷电流峰值小于 160 A 时, 直流电阻与雷电流峰值呈负相关, 电流峰值越大直流电阻越小, 直至最小值, 相应的电阻变化率由 0 变化到 -1.48%, 呈反向增大; 雷电流峰值大于 160 A 时, 直流电阻与雷电流峰值呈正相关, 直流电阻从最小值开始增大, 相应的电阻变化率由 -1.48% 开始随电流的增大变化到 0 再逐步增大。从图 6(b)可以得到, TC33/SG12 预浸料直流电阻变化率最小值处的电荷量为 0.057 A·s。从图 6(c)可以得到, TC33/SG12 预浸料直流电阻变化率最小值处的作用积分为 5.13 A<sup>2</sup>·s。根据式(1)得到, 不同的峰值电流下有近似相同的作用时间, 因此图 6(a)与图 6(b)有类似的变化规律。

2.3 TC33/SG12 预浸料中 CF 的石墨化对直流电阻的影响

图 7 为雷击试验前后 TC33/SG12 预浸料的拉曼光谱。可知, D 峰表征的是边缘无序排列程度、低对称碳结构及晶格缺陷, 出现在 1 360 cm<sup>-1</sup> 左右; G 峰是由于晶格面内 C—C 键的伸缩振动引起的特征谱线, 表征了材料的石墨结构<sup>[18]</sup>, 出现在 1 590 cm<sup>-1</sup> 左右。

图 8 为雷击试验前后 TC33/SG12 预浸料的拉曼光谱按 Gaussian 曲线拟合结果, 表 1 为曲线拟合之后的光谱参数。由表 1 可见, 雷击试验后 D 峰和 G 峰向低波数移动, 半高宽(FWHM)减小。雷击试验前后 D 峰的积分强度 ( $I_D$ ) 和 G 峰的积分强度 ( $I_G$ ) 二者的比值  $R = I_D/I_G$  分别为 3.28 和 2.30, 雷击试验后  $R$  值也减小。研究表明, D 峰和 G 峰半高宽的减小及 D 峰与 G 峰积分强度比的降低代表 CF 材料中 C 结构有序化程度的提高, 呈石墨化趋势<sup>[19]</sup>, 而石墨化程度的增强被证明有助于提高 CF 的导电性<sup>[20]</sup>。

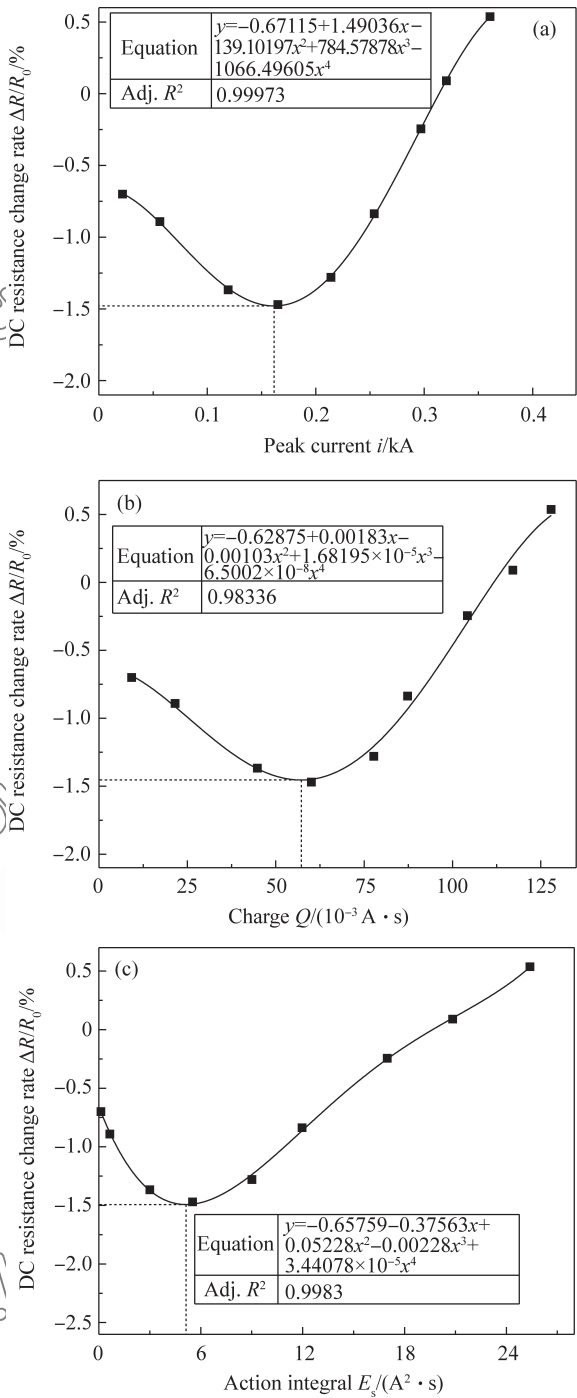


图 6 TC33/SG12 预浸料 DC 电阻变化率随峰值电流、电荷量、作用积分的变化曲线

Fig. 6 DC resistance change rate of TC33/SG12 prepreg with peak current, charge and action integral

2.4 TC33/SG12 预浸料中 CF 断裂对直流电阻的影响

图 9 为雷击试验后 TC33/SG12 预浸料截面微观形貌。可以看到, 多处包裹在 CF 丝周围的树脂消失, 相邻 CF 丝之间接触减少甚至出现空隙。图 5(b)



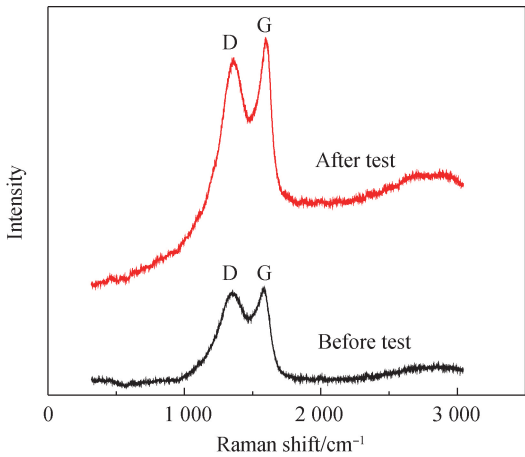


图 7 雷击试验(10/350  $\mu$ s, 350 A)前后 TC33/SG12 预浸料的拉曼光谱

Fig. 7 Raman spectra of TC33/SG12 prepreg before and after lightning test (10/350  $\mu$ s, 350 A)

中可见多处断裂的 CF 丝，CF 丝断裂减少了电流的流通路径，降低了 TC33/SG12 预浸料的导电能力。

2.5 隧道效应对 TC33/SG12 预浸料直流电阻的影响

隧道效应理论<sup>[21-22]</sup>认为当导体间的距离很近且只有很薄的聚合物将导体隔开时，自由电子能够在外界电场作用下越过聚合物隔离层，在相邻导体间移动，从而形成隧道电流。对于 TC33/SG12 预浸料，除了 CF 丝本身参与导电外，当 CF 丝之间的距离很小，只有很薄的树脂将其隔开时，在施加外部电压时容易形成隧道电流。

模拟雷电流注入时，由于 CF 丝之间的电流分布不均匀，当通过 CF 丝电流较小时，焦耳热效应产生的热量较少，该热量不足以使 CF 丝周围的树脂发生热解汽化，但会使其受热发生熔融。焦耳热作用下 CF 丝在直径方向发生膨胀<sup>[23]</sup>，使临近的 CF 丝之间的间距减小或增加接触面积，在施加相同的外部电场时，有更多的电子能够在临近的 CF 丝之间发生跃迁，从而增加预浸料的导电性，使 TC33/SG12 预浸料的直流电阻呈减小趋势。

当通过 CF 丝电流较大时，焦耳热效应产生的

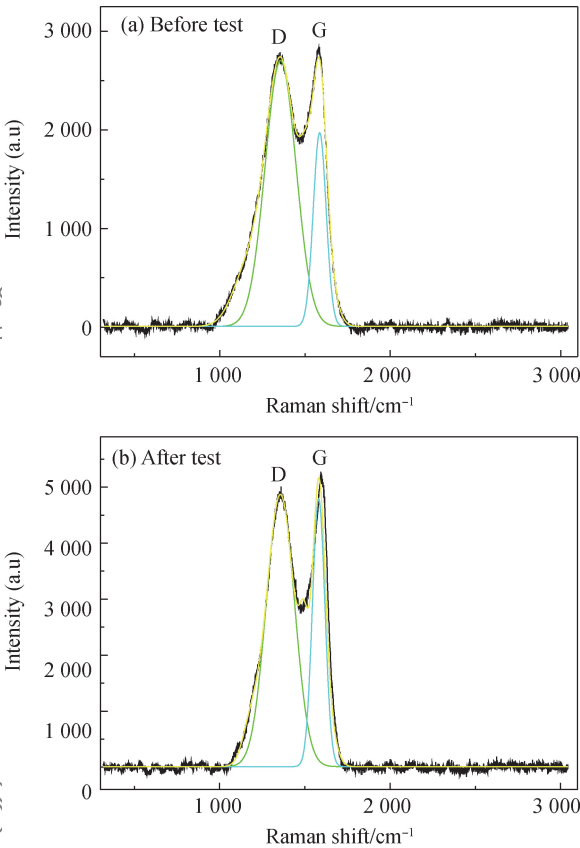


图 8 雷击试验(10/350  $\mu$ s, 350 A)前后 TC33/SG12 预浸料的拉曼光谱及其拟合曲线

Fig. 8 Original and fitted curves of Raman spectra of TC33/SG12 prepreg before and after lightning test (10/350  $\mu$ s, 350 A)

热量较多，此热量使树脂的温度升高并超过其热解汽化温度，最后生成气体从材料中逸出。在此过程中，CF 丝内部的杂质会受热排出，引起 CF 石墨化，增强导电性。树脂热解后气体的膨胀将引起 TC33/SG12 预浸料膨胀，这会增大 CF 丝之间的间距或减少接触面积，进而降低自由电子在相邻 CF 之间发生跃迁的可能性，使隧道效应减弱，减缓了 TC33/SG12 预浸料直流电阻变小的趋势，甚至出现直流电阻增大的现象。

2.6 EP 绝缘性能劣化对 TC33/SG12 预浸料直流电阻的影响

由于加工工艺的限制，TC33/SG12 预浸料中

表 1 雷击试验(10/350  $\mu$ s, 350 A)前后 TC33/SG12 预浸料拉曼光谱参数

Table 1 Raman spectra parameters of TC33/SG12 prepreg before and after lightning test (10/350  $\mu$ s, 350 A)

|             | D peak                       |                       | G peak                       |                       | R    |
|-------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|------|
|             | Raman shift/cm <sup>-1</sup> | FWHM/cm <sup>-1</sup> | Raman shift/cm <sup>-1</sup> | FWHM/cm <sup>-1</sup> |      |
| Before test | 1356.97                      | 213.07                | 1586.30                      | 89.16                 | 3.28 |
| After test  | 1356.47                      | 194.37                | 1580.96                      | 86.06                 | 2.30 |

Notes:  $R = I_D/I_G$ ,  $I_D$ —Intensity of D peak,  $I_G$ —Intensity of G peak; FWHM—Full width at half maximum.

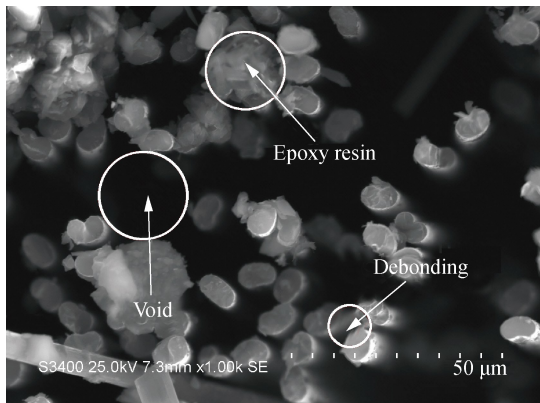


图9 雷击试验(10/350 μs, 350A)后 TC33/SG12 预浸料截面微观形貌

Fig. 9 Cross-section microstructure of TC33/SG12 prepreg after lightning test (10/350 μs, 350A)

CF 丝无法均匀分布在树脂中, 不同 CF 丝之间会出现交叉, 相邻 CF 丝之间的树脂厚度难以保持一致<sup>[17]</sup>。外施低压直流时, 部分 CF 丝之间由于树脂较薄, 容易出现隧道效应, 产生隧道电流; 部分 CF 丝之间树脂较厚则呈绝缘状态。

进行模拟雷电流试验时, TC33/SG12 预浸料中雷电流注入点和流出点两处的正面和背面都与高压电极(图 4)直接接触, 而正面和背面之间的 CF 丝无法与高压电极接触。由于导电性能差异或电流分布不均, TC33/SG12 预浸料表层 CF 丝与内部 CF 丝之间及其他相邻但间距较大的 CF 丝之间容易形成电势差, 当电势差超过树脂的击穿电压时将导致树脂被击穿, 使树脂绝缘性能劣化<sup>[24]</sup>, 且此过程不可逆。因此会增强 TC33/SG12 预浸料导电性。

TC33/SG12 预浸料流过不同峰值雷电流时, 其导电性将发生变化, 这种变化与隧道效应、CF 石墨化、EP 绝缘性能劣化和 CF 断裂等因素有关。在不同雷电流下, CF 都会出现石墨化, 因此会增加预浸料的导电性。模拟雷电流较小时, 隧道效应的增强及树脂绝缘的击穿会增加 TC33/SG12 预浸料导电性。模拟雷电流较大时, TC33/SG12 预浸料中 CF 的断裂、树脂的热解汽化、隧道效应的减弱甚至消失均降低了 TC33/SG12 预浸料的导电性。

### 3 结 论

(1) 碳纤维/环氧树脂(CF/EP, TC33/SG12)单向预浸料的直流电阻在雷击试验电流范围内存在最小值, 比试验前直流电阻值减小了约 1.48%, 直流电阻最小值出现在雷电流的 160 A 附近。雷电流

低于 160 A 时, TC33/SG12 预浸料的直流电阻随雷电流的增大而减小, 高于 160 A 时, TC33/SG12 预浸料的直流电阻随雷电流的增大而增大。

(2) 雷击试验后, TC33/SG12 单向预浸料拉曼光谱中的 D 峰半高宽和 G 峰半高宽均减小, D 峰的积分强度 ( $I_D$ ) 和 G 峰的积分强度 ( $I_G$ ) 的比值  $R = I_D/I_G$  由雷击前的 3.28 变为雷击后的 2.30, 说明雷电流会对 CF 的石墨化程度造成影响。

(3) TC33/SG12 单向预浸料直流电阻的变化是预浸料 CF 石墨化、EP 绝缘性能劣化、CF 断裂、隧道效应等因素共同作用的结果。

### 参考文献:

[1] LEON M, KIM B, HELGA P, et al. Materials for wind turbine blades: An overview[J]. Materials, 2017, 10(11): 1285-1308.

[2] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.

DU S Y. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12 (in Chinese).

[3] 尹俊杰, 李曙林, 姚学玲, 等. 含紧固件复合材料层压板结构雷击烧蚀损伤特征分析[J]. 复合材料学报, 2017, 34(1): 104-111.

YIN J J, LI S L, YAO X L, et al. Ablation damage characteristic analysis of composite laminate with fastener subjected to lightning strike[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(1): 104-111 (in Chinese).

[4] WOLFRUM I, SCHUSTER T J, KÖRWIEN T. Effects of heavy lightning strikes on pristine and repaired carbon composite structures[J]. Journal of Composite Materials, 2017, 51(25): 3491-3504.

[5] CHEMARTIN L, LALANDE P, PEYROU B, et al. Direct effects of lightning on aircraft structure: Analysis of the thermal, electrical and mechanical constraints[J]. Aerospace Lab, 2012(5): 1-15.

[6] 刘志强, 岳珠峰, 王富生, 等. 不同防护形式复合材料板雷击损伤分区特性[J]. 复合材料学报, 2015, 32(1): 284-294.

LIU Z Q, YUE Z F, WANG F S, et al. Damage zoning characteristics of composite laminates with different protections subjected to lightning strike[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(1): 284-294 (in Chinese).

[7] LEE J, LACY T E, PITTMAN C U, et al. Thermal response of carbon fiber epoxy laminates with metallic and non-metallic protection layers to simulated lightning currents[J]. Polymer Composites, 2018, 39(s4): 2149-2166.

[8] SWAIT T J, JONES F R, HAYES S A. A practical struc-

- tural health monitoring system for carbon fibre reinforced composite based on electrical resistance[J]. *Composites Science and Technology*, 2012, 72(13): 1515-1523.
- [9] ROH H D, LEE H, PARK Y B. Structural health monitoring of carbon-material-reinforced polymers using electrical resistance measurement[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing—Green Technology*, 2016, 3(3): 311-321.
- [10] 李选, 吴旭, 杨斌. 碳纤维纱线及其织物的电阻与温度的关系[J]. *浙江理工大学学报*, 2011, 28(6): 871-874.
- LI X, WU X, YANG B. A study on the relationship between resistance and temperature of carbon fiber yarn and its textile structure[J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2011, 28(6): 871-874 (in Chinese).
- [11] 丁海滨, 曾竟成, 彭超义, 等. 碳纤维织物电阻特性研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2014(10): 58-61.
- DING H B, ZENG J C, PENG C Y, et al. Study on the resistance characteristics of carbon fabric[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2014(10): 58-61 (in Chinese).
- [12] ZHANG W, SILVA S. Alter the sheet resistance of carbon nanotube-coated cellulose fabric with argon plasma pretreatment[J]. *Micro & Nano Letters*, 2012, 7(8): 850-853.
- [13] TODOROKI A, YOSHIDA J. Electrical resistance change of unidirectional CFRP due to applied load[J]. *JSME International Journal*, 2004, 47(3): 357-364.
- [14] International Electrotechnical Commission. High-current test techniques: Definitions and requirements for test currents and measuring systems: IEC 62475: 2010[S]. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2010.
- [15] WANG F S, JI Y Y, YU X S, et al. Ablation damage assessment of aircraft carbon fiber/epoxy composite and its protection structures suffered from lightning strike[J]. *Composite Structures*, 2016, 145: 226-241.
- [16] 付尚琛, 周颖慧, 石立华, 等. 碳纤维增强复合材料雷击损伤实验及电-热耦合仿真[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(1): 250-259.
- FU S C, ZHOU Y H, SHI L H, et al. Experiment and electrical-thermal coupled simulation for lightning current damage of carbon fiber reinforced plastic[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2015, 32(1): 250-259 (in Chinese).
- [17] TODOROKI A. The effect of number of electrodes and diagnostic tool for monitoring the delamination of CFRP laminates by changes in electrical resistance[J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(13): 1871-1880.
- [18] WANG Y, ALSMEYER D C, MCCREERY R L. Raman spectroscopy of carbon materials: Structural basis of observed spectra[J]. *Chemistry of Materials*, 1990, 2(5): 557-563.
- [19] SADEZKY A, MUCKENHUBER H, GROTHE H, et al. Raman microspectroscopy of soot and related carbonaceous materials: Spectral analysis and structural information[J]. *Carbon*, 2005, 43(8): 1731-1742.
- [20] GUPTA A, DHAKATE S R, PAL P, et al. Effect of graphitization temperature on structure and electrical conductivity of polyacrylonitrile based carbon fibers[J]. *Diamond and Related Materials*, 2017, 78: 31-38.
- [21] SIMMONS J G. Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film[J]. *Journal of Applied Physics*, 1963, 3(6): 1793-1803.
- [22] HU N, KARUBE Y, YAN C, et al. Tunneling effect in a polymer/carbon nanotube nanocomposite strain sensor[J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(13): 2929-2936.
- [23] PRADERE C, SAUDER C. Transverse and longitudinal coefficient of thermal expansion of carbon fibers at high temperatures (300–2500 K)[J]. *Carbon*, 2008, 46(14): 1874-1884.
- [24] JI X, NI H, DAVID H, et al.  $I-V$  characteristics and electro-mechanical response of different carbon black/epoxy composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2010, 41(1): 25-32.