

碳纤维复合材料雷电注入试验研究

碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) 因为其优异的结构性能而被广泛应用于航空领域。但CFRP材料的电导率显著低于传统金属材料,更易在雷电冲击作用下受到损伤。因而,为满足飞机在雷电环境下的防护设计要求,需要开展试验来测试碳纤维复合材料的损伤特性。采用组合模拟雷电流分量A、B和C*,对复合材料试验件采用火焰喷涂铝和敷设铜网两种防护方式,然后对试验件进行雷电直接注入试验研究,试验后通过采用超声扫描得到试验件的损伤情况,并进行对比分析。试验结果表明采用火焰喷涂铝防护方式的复合材料层合板损伤面积均值为13 680 mm²,小于采用敷设铜网防护方式的雷电损伤面积均值17 958 mm²。两者损伤深度占总厚度比为2/5~3/5,试验件没有被击穿。

刘辉平¹ 段泽民^{1,2} 司晓亮² 李志宝² 仇善良²/1.合肥工业大学电气学院
2.强电磁环境防护技术航空科技重点实验室

0 引言

碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) 是一种已普遍应用于航空航天领域的复合材料。相较于传统金属材料,CFRP材料在力学性能上具有高强度、低密度的优点。同时,CFRP材料相比传统的金属材料具有更低的电导率,其导电性能不佳。当飞行器在雷雨天气中飞行时,遭受雷击的问题不可避免,CFRP材料对雷电更加敏感,损伤更为严重。因而雷电防护设计是飞行器设计的一项重要内容,需对飞行器开展雷电防护试验验证以满足适航要求。目前,美国、法国已开展大量相关试验,并获得了充足的现场试验数据,为这些国家的飞行器雷电防护设计提供了技术支撑。我国在这方

面起步较晚,研究成果相对较少,与发达国家存在较大差距,这也成为制约我国飞行器设计与制造的重大技术瓶颈之一。

雷电流附着于复合材料表面产生焦耳热,能够造成复合材料基体熔融、烧蚀和纤维升华、断裂,目前对于CFRP材料雷电损伤问题的研究主要有两种方法:一是借助于有限元分析工具进行损伤的数值仿真计算;二是进行模拟雷电试验。相较于数值仿真计算,模拟雷电试验的结果更能真实反映雷电对CFRP材料的损伤情况,因而备受人们的关注。Y. Hirano通过试验研究了碳纤维层合板雷击损伤,认为CFRP材料损伤面积和损伤深度与电流峰值、电流的作用积分相关。P. Feraboli通过比较机械冲击损伤和雷击损伤来研究两种损伤机理的相对关系,其对比结果对深入研究复合材料雷击损伤具有一定的借鉴意义。目前试验研究多集中在对试验件施加单一的雷电波形分量,其波形参数没有达到SAE ARP5412A标准的要求。为了模拟真实运行的飞机遭受雷电冲击的情况,本文选取飞机上常见的层压结构平板试件,分别用火焰喷涂铝和敷设铜网的方式对其进行防护。利用组合波发生器产生的符合SAE ARP5412A标准的雷电流A+B+C*分量,对试验件进行雷电流直接注入试验,通过无损探伤检测得到损伤数据,用以验证不同防护方式下CFRP材料的雷电损伤特性。

1 试验方法

试验件按图1所示正常接入试验回



刘辉平/硕士研究生

关键词/Keywords

CFRP材料·
火焰喷涂铝·
铺设铜网·
损伤面积·
损伤深度·

预研基金项目资助 (9140A33010314HK85466)。

路,连接电流发生器高压端到放电电极。试验支撑装置置于绝缘试验台上,连接试验件时,采用双回路接地的方式减少电磁作用力。试验时控制装置依次导通放电开关 K_A 、 K_B 和 K_C ,电流分量A、B、C、C*和D以不同的组合方式放电,电流以等离子弧的形式注入,模拟大气雷电对试验件的雷电冲击。试验时,在试验电极与注入点表面安置直径0.1 mm左右的细小铜丝,放电电极球形。放电电极采用直径为50 mm的球电极,与试验件的距离约为50 mm,每一注入点放电1次,注入点为试验件的几何中心点。

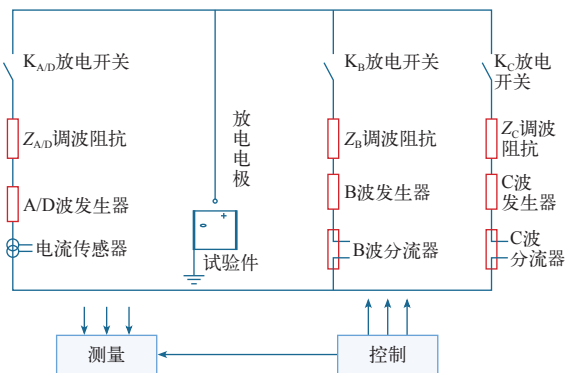


图1 雷电流直接效应试验原理

1.1 试验件

试验件板材种类分为敷设铜网防护方式和喷涂铝防护方式两种,每种各4件,都采用层压结构。敷设铜网防护使用MXB7701/7781, D4玻璃布,表面敷Loctite EA 9845 LC 030-040 AERO防雷击保护膜,铜箔厚度为0.127 mm。火焰喷涂铝防护使用MXB7701/7781, D4玻璃布,铝涂层厚度为0.254~0.305 mm,最大电阻为0.5 m Ω 。试验件铺层方式为[45/0/-45/90]_s,板厚2.41 mm,试验件结构尺寸如图2所示。

1.2 雷电分区

雷电区域划分是使航空器免受雷电直接和间接影响的一个功能性步骤。在进行航空器危险评定中应采用区域划分法,以确定对指定的航空器部件或部位进行适当防护。为了确保对某一特定雷电区的部件或结构的适当防护,应考虑系统或结构在该区域内的临界状态。飞机的雷电分区示

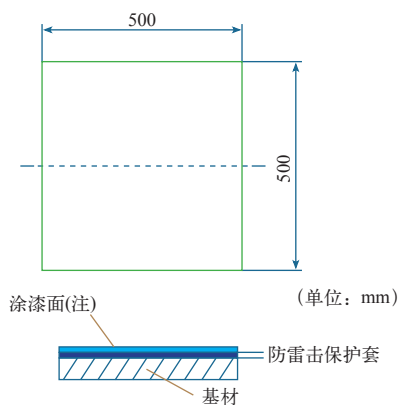


图2 试验件尺寸结构

意图如图3所示,本文中假定试层合板验件位于雷电1A区。

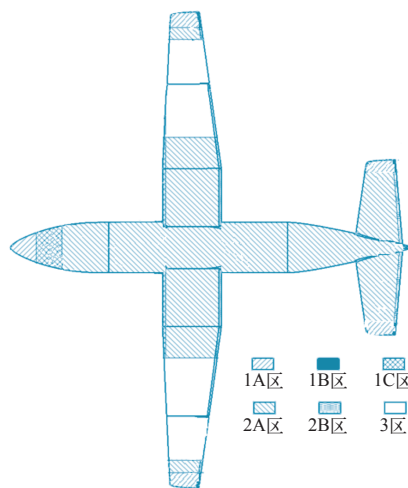


图3 飞机雷电分区示意图

1.3 试验波形

按照标准规定,对于雷电1A区,雷电流波形采用规定的电流分量A、B和C*;对于雷电1B区,雷电流波形采用规定的电流分量A、B、C和D;对于雷电2A区,雷电流波形采用规定的电流分量D、B和C*;对于雷电2B区,雷电流波形采用规定的电流分量D、B和C。本文中,对试验件注入A、B和C*电流分量的组合波形,模拟CFRP材料处于雷电1A区域时所遭受的雷击。试验波形采集如图4所示。

其中,雷电流A分量电流峰值 $I_p = 182.3$ kA,作用积分 $I^2t = 1.75 \times 10^6$ A²s;雷电流B分量平均电流 $I = 1.87$ kA,库仑量 $Q = 9.23$ C;雷电流C*分量

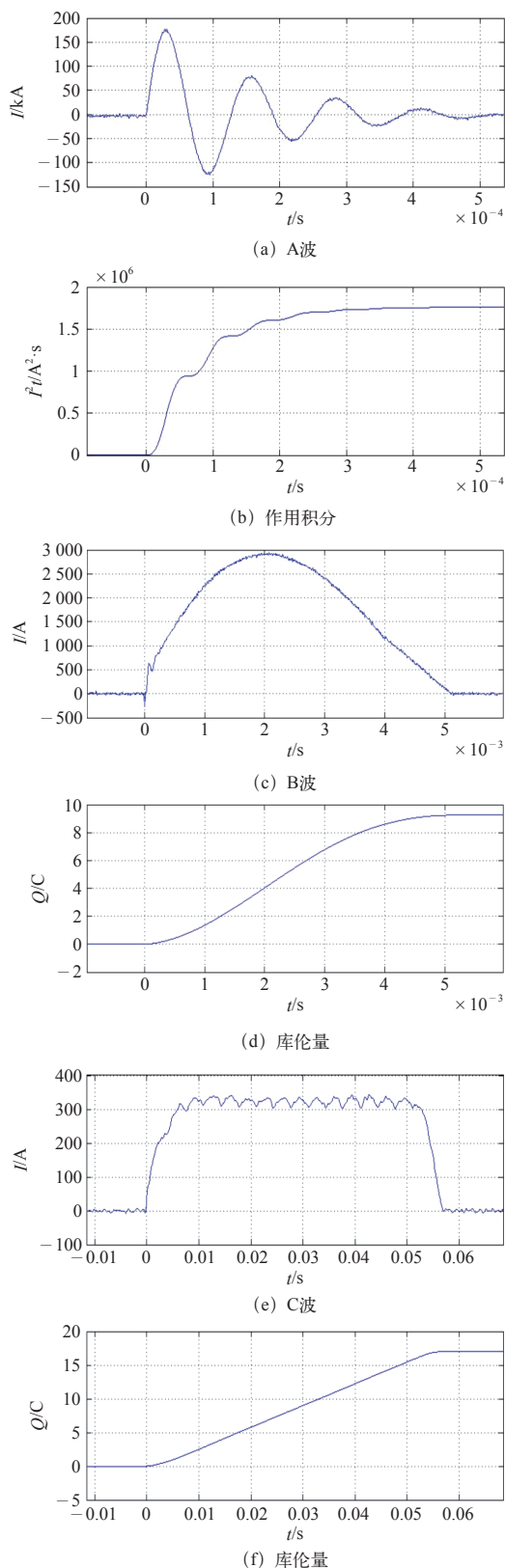


图4 雷电流组合波形

平均电流 $I=301.6\text{ A}$ ，库伦量 $Q=16.98\text{ C}$ 。

2 试验和试验结果

试验件安装完成后，在试验件几何中心位置注入雷电流，当模拟雷电流作用于试验件时，巨大的能量瞬间释放，试验现场如图5所示。雷电波形注入后，两种不同防护方式下的试验件损伤情况如图6所示。



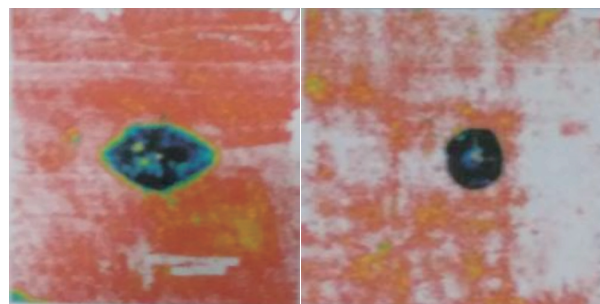
图5 试验时的图像



(a) 敷设金属铜网 (b) 火焰喷涂铝

图6 试验后的试验件局部图像

试验后，对试验件进行无损探伤检测，两种不同防护方式下的试验件检测如图7所示。其中，黑色区域代表损伤区域，对无损探伤图像进行处理，得到无损检测损伤面积和损伤深度，所有检测结果如表1、表2所示。



(a) 敷设金属铜网 (b) 火焰喷涂铝

图7 无损探伤图像

由图7可知，当雷电注入层合板试验件表面时，敷设金属铜网防护方式的损伤面积近似于平行四边形，这是由于雷电流敷设金属网防护试

表1 铜网防护的试验件

试验次数	损伤面积/mm ²	损伤深度
1	15 485	2/5
2	17 115	2/5
3	20 592	3/5
4	18 639	2/5
平均值	17 958	2/5 ~ 3/5

表2 火焰喷涂铝防护的试验件

试验次数	损伤面积/mm ²	损伤深度
1	5 026	3/5
2	19 359	3/5
3	17 671	2/5
4	12 667	2/5
平均值	13 680	2/5 ~ 3/5

件受雷击后,雷电流扩散受网格影响,扩散趋势近似网格形状而造成的。火焰喷涂铝试件受雷击后,因铝层导电各向同性,雷电流扩散形式为均匀向四周分布,扩散形状近似圆形。

本文中,采用铜网防护方式的CFRP材料层合板和采用火焰喷涂铝防护方式的CFRP材料层合板各试验4次,为排除试验误差的影响,雷电损伤情况取各次所得试验损伤数据的平均值。其中,采用铜网防护方式的CFRP材料层合板其损伤面积最小值为15 485 mm²,最大值为20 592 mm²,损失面积的平均值为17 958 mm²;采用火焰喷涂铝防护方式的CFRP材料层合板损伤面积最小值为5 026 mm²,最大值为19 359 mm²,损失面积的平均值为13 680 mm²,从损伤面积的角度来说,前者总体的损伤情况比后者要严重。这是因为雷电流初始附着在试验件上时,火焰喷涂铝防护方式试验件的喷铝层电导率远远大于复合材料,且导电性能各个方向相同,雷电流首先在铝层中均匀传导,其后由于雷电电弧表面的加热方式产生热效应,导致铝层熔融、气化消失,然后雷电流附着于复合材料表面,通过电阻加热的方式产生焦耳热,从而造成复合材料基体熔融、烧蚀和纤维升华、断裂,形成损伤区域。而敷设铜网防护方式铜网镶嵌在复合材料表面,试验件表面较喷涂铝

防护方式粗糙,容易集聚电荷,所以其损伤面积比喷涂铝防护方式要大。

评价CFRP材料损伤程度有两个重要的指标,即损伤面积和损伤深度。其拥有不同的铺层方式,电导率呈各向异性。其中平面方向以碳纤维轴向的电导率最高,且明显高于厚度方向几个数量级。雷电流初始附着在试验件上时首先在平面方向扩散,其很难渗透到层合板试验件的深层,但如果试验件表面损伤,雷电流后续分量就可以传递到试验件更深的部分,严重时可能造成层合板试验件的击穿。由表1、表2可知,采用铜网防护方式的CFRP材料层合板其损伤深度占总厚度比约为2/5 ~ 3/5,与采用火焰喷涂铝防护方式的CFRP材料层合板损伤深度占比相同,可知其最大损伤深度约为1.446 mm,小于试验件厚度2.41 mm,试验件损伤深度最大层数约为5层,小于试验件总体的8层结构,试验件没有击穿,两种防护方式都能起到良好的防护效果。

3 结束语

本文选取飞机上常见的层压结构的CFRP材料平板试验件,采用标准的雷电流A+B+C*分量对处于1A区的试验件进行雷电流直接注入试验,对比分析了火焰喷涂铝防护方式和敷设铜网防护方式下的层合板防护能力。结果表明:

1) 采用火焰喷涂铝防护方式的CFRP材料层合板雷电损伤面积平均值为13 680 mm²,小于采用敷设铜网防护方式的CFRP材料层合板雷电损伤面积17 958 mm²,前者的防护效果优于后者。

2) 采用火焰喷涂铝防护方式的CFRP材料层合板损伤深度占总厚度比约为2/5 ~ 3/5,与采用敷设铜网防护方式的CFRP材料层合板损伤深度占比相同,其最大损伤深度约为1.446 mm,小于试验件厚度2.41 mm,试验件没有击穿。

3) 不同防护方式下的CFRP材料层合板雷电损伤情况不同,飞机复合材料选型需考虑多方面因素,以达到最优化的设计要求。

(收稿日期:2016-01-18) EA