

不同防护形式复合材料板雷击损伤分区特性

刘志强, 岳珠峰*, 王富生, 姬尧尧

(西北工业大学 力学与土木建筑学院, 先进材料测试中心, 西安 710129)

摘 要: 基于 A+B+C+D 4 种标准雷电流波形的联合作用, 开展了不同防护形式复合材料板雷击试验。考虑放电通道物理特性, 分析放电通道与复合材料表面间的作用过程, 将复合材料表面损伤区域分解成初始附着区、附着传导区、附着扩展区、二次附着区和扫掠损伤区, 并对未防护基准件、局部喷铝、全喷铝防护件及铜网防护件 4 类板的各区域进行了损伤特性分析。结果表明: 复合材料表面损伤是强电磁场条件下放电通道热电物理特性与复合材料表面热电特性及电荷分布的共同作用结果; 复合材料表面铝层喷涂方式、厚度以及均匀程度均影响表面损伤的对称性和损伤分区特性; 铜网防护造成复合材料板表面粗糙使得表面损伤分区复杂; 表面电荷累积特性和分布的均匀程度直接影响二次附着区和扫掠损伤区的分布; 复合材料表面雷击损伤包括纤维升华、断裂、起毛, 基体炭化熔融、烧蚀, 材料分层、剥落以及防护材料的熔融汽化和断裂等。分析结果可以用于复合材料雷击防护定性设计。

关键词: 雷击试验; 复合材料防护; 放电通道物理特性; 雷击损伤区域划分; 多场耦合

中图分类号: TB332; V258⁺.3; O539 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2015)01-0284-11

雷电是常见的自然现象, 人们通过地面电磁场观测和人工火箭引雷^[1]等方式开展了大量的雷电物理特性研究, 包括雷电通道电磁场的近似计算^[2-5]和通道附近的等离子特性研究^[6-10]。飞机在起飞、降落和穿过积雨云过程中容易遭受雷击, 民航飞机平均每年会遭受一次雷击^[11]。美国在 20 世纪 80 年代通过 4 架飞机在空中的雷电闪击试验收集了大量雷电数据^[12]。Larsson 等^[11, 13-15]分析了雷电与飞机间的相互作用, 研究了飞机结构雷电初始附着、扫掠、传导和二次附着等基本过程。美国机动车工程师协会(SAE)通过大量试验观测编制了雷电流作用于飞机结构的标准波形^[16], 并给出了飞机雷击分区^[17], 用于制定飞机结构雷击试验方案。

复合材料因具有优异的比强度和比刚度而越来越被广泛地应用于飞机结构, 但也因其电磁屏蔽性能的缺失使得复合材料飞机更严重地暴露于雷电的威胁之下^[18]。Feraboli 和 Miller^[19]利用模拟雷电发生器开展了飞机复合材料结构雷击试验, 研究了

雷电流下复合材料的损伤阻尼与损伤容限特性。Hirano 等^[20-21]通过雷击试验和数值模拟 2 种方式对复合材料雷击损伤进行分析, 研究了雷电参数和试样尺寸等对雷击损伤的影响, 并将复合材料雷击损伤分成纤维损伤、基体退化和内部分层 3 大类。笔者所在项目组也通过数值分析^[22]和试验对飞机复合材料雷击问题开展了大量研究, 分析与试验结果吻合较好。

尽管国内外对雷电物理、雷电与飞机之间的相互作用以及复合材料雷击损伤特性已有大量研究, 但有关雷电流通道造成复合材料结构表面损伤的物理过程却鲜有描述。本文作者通过雷击试验, 参考 Larsson 等^[11, 13-15]关于相对运动中的雷电通道与飞机表面间相互作用的基本思想, 分析了未防护基准件、局部喷铝、全喷铝防护件及铜网防护件 4 类不同防护方式复合材料板与雷电流放电通道间相互作用的物理过程, 并建立了复合材料表面损伤区域与各物理过程间的联系, 为复合材料结构雷电防护定性设计建立了理论基础。

收稿日期: 2014-02-17; **录用日期:** 2014-05-12; **网络出版时间:** 2014-06-05 17:20

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/10.13801/j.cnki.fhclxb.20140605.004.html

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(B07050); 航空科学基金(2013ZF53068); 西北工业大学基础研究基金(JC20110257)

通讯作者: 岳珠峰, 博士, 教授, 长江学者, 博士生导师, 研究方向为先进材料物理性能。 E-mail: zfyue@nwpu.edu.cn

引用格式: 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.

1 试 验

1.1 试验件

试验件材料为碳纤维增强环氧树脂基复合材料 T700/BA9916,单层厚度为 0.125 mm,铺层方式为 $[45/0/-45/90/-45/0/45/0/45/90/-45/0]_s$,试验件尺寸为 500 mm×250 mm×3 mm。通过基准件、局部喷铝、全喷铝和铜网 4 种试验件研究雷击对复合材料损伤的影响,T700/BA9916 复合材料试验件尺寸及防护方式如图 1 所示。标示出了 4 种试验件的设计尺寸,其蒙皮厚度均为 3 mm。基准件和全喷铝的面板背视图特征不明显,未予以示出。全喷铝试验件的铝层厚度分别为 0.1 mm 和 0.2 mm,局部喷铝铝层厚度与全喷铝铝层厚度相同。铜网厚度为 0.2 mm,网格间距约 1 mm,详细的 T700/BA9916 复合材料试验件防护参数如表 1 所示。

1.2 雷击试验波形

SAE-ARP5412A 标准^[16]给出了适用于典型飞

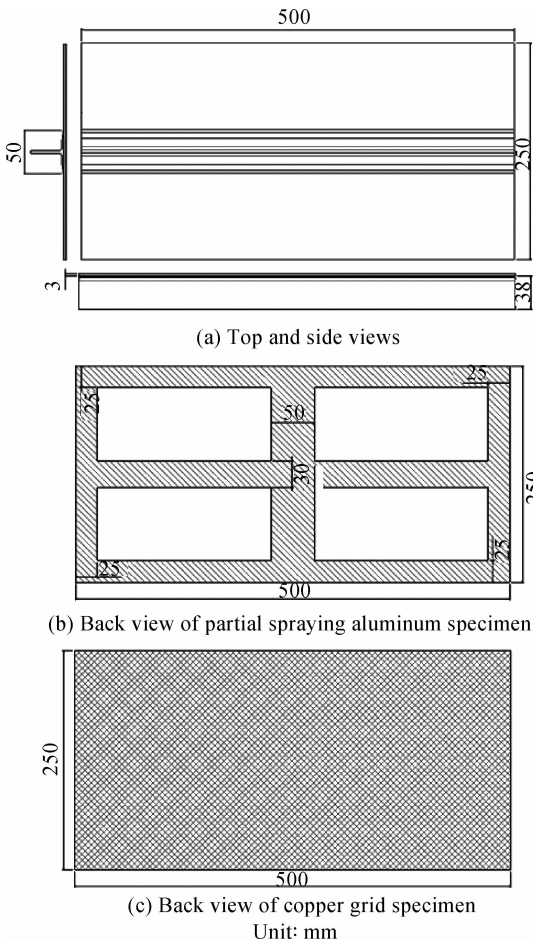


图 1 T700/BA9916 复合材料试验件尺寸及防护方式
Fig. 1 Sizes and protection modes of T700/BA9916 composite test specimens

表 1 T700/BA9916 复合材料试验件防护参数

Table 1 Parameters of protections for T700/BA9916 composite test specimens

Protection mode	Parameter	
Reference specimen	Skin panel thickness of composite stiffened plate/mm	
	3	
Full-scale spraying aluminum specimen	Thickness of aluminum layer/mm	
	0.1	0.2
Partial spraying aluminum specimen	Thickness of aluminum layer/mm	
	0.1	0.2
Copper grid specimen	Grid thickness/mm	Grid spacing/mm
	0.2	1

机结构雷电流直接效应试验的雷电流分量 A、B、C、D 4 种标准波形,如图 2 所示,其中 A、B 和 D 波形均可表示成双指数形式:

$$I = I_0 [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)] \tag{1}$$

式中: I 为雷电流; I_0 、 α 和 β 均为波形参数; t 为时间。雷电流试验中 4 种电流波形的总电荷量 Q 和作用总能量 E 均可通过积分获得^[20]:

$$Q = \int_0^t Idt \tag{2}$$

$$E = \int_0^t I^2 dt \tag{3}$$

根据 SAE 标准要求,并参考国内外雷击试验方法^[19-21, 23-24],选用 A+B+C+D 4 种电流波形连续作用于复合材料加筋壁板,其中 4 种雷电流波形参数如表 2 所示。

4 类试验件均在压力 1.013×10^5 Pa、温度 29 ℃、湿度 79%的环境下开展雷击试验,电极与试

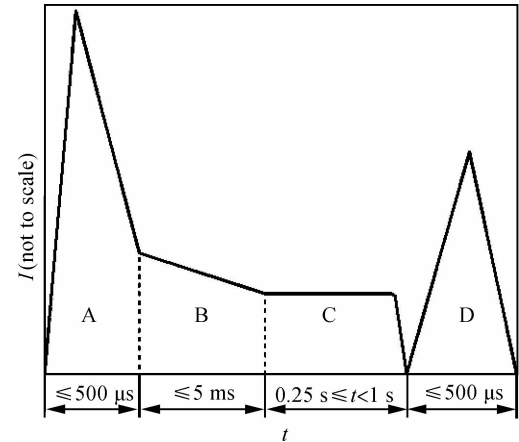


图 2 雷电流分量 A、B、C、D 4 种标准波形^[16]
Fig. 2 Four kinds of standard waveforms of lightning current component A, B, C and D^[16]

表 2 4 种雷电流波形参数

Table 2 Parameters of four kinds of lightning current waveforms

Current component	Peak current I_p/kA	Average amplitude I_a/kA	Time duration t/s	Action integral $E/(10^6 \text{A}^2 \cdot \text{s})$	Total charge transfer Q/C
A	200 ± 20		$(340 \pm 40) \times 10^{-6}$	1.80 ± 0.36	
B		2.0 ± 0.4	$(5.0 \pm 0.5) \times 10^{-3}$		10 ± 1
C		0.20 ± 0.01	1		200 ± 40
D	100 ± 10		$(190 \pm 50) \times 10^{-6}$	0.25 ± 0.05	

验件间距离为 50 mm,雷击试验装置示意图如图 3 所示。飞机上各种电子设备与机身结构接地连接且受复合材料蒙皮保护,为了模拟这些电子设备在复合材料层合板下面布设接地的金属导体。忽略自然雷电现象中爆炸及放电通道热膨胀冲击波对结构的影响,装置采用圆柱形金属棒和绝缘球组合的球形电极^[25]。绝缘球可以消弱放电通道冲击波对复合材料板的直接冲击效应。同时,绝缘球还能避免通道等离子体直接由电极飞溅到复合材料板,防止出现焊接电弧或切割电弧^[26]。此外,为了考察火焰喷铝和铺设铜网等不同防护形式对雷电附着位置和驻留特性的影响,未将球形电极直接通过金属线连接到复合材料板的指定位置。主要研究放电通道与复合材料板之间的相互作用以及对复合材料表面损伤的影响。

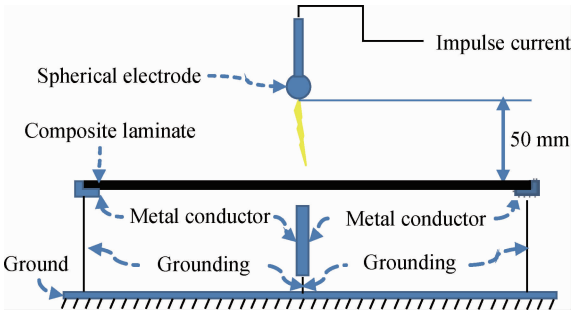


图 3 雷击试验装置示意图

Fig. 3 Schematic of setup for lightning strike tests

2 复合材料表面雷击损伤分析

2.1 雷击损伤过程

图 4 为不同防护形式 T700/BA9916 复合材料试验件雷击损伤照片。虽然各试验件的试验条件相同,但雷电流在试验件的雷击损伤区域的位置、形状和大小不尽相同。图 5 为雷电流附着传导示意图。

图 5(a)为放电通道中带电粒子的受力情况示意图。变化的雷电流在放电通道附近产生周向感应

磁场^[2]。单位长度放电通道中高速运动的带电粒子在感应磁场 B 的作用下产生向心收缩的洛伦兹力 F 。

根据文献[2, 27]中放电通道的基本假设和 Lago 等^[28]有关雷电与飞机间相互作用的计算结果,将球形电极与复合材料板间的放电通道模拟为图 5(a)的变化过程。球形电极与复合材料板间的间隙被击穿时,将放电通道假设为直的圆柱型通道。当放电通道形成后便成为完全电离的等离子体通道。

在放电通道与复合材料板附着初期,复合材料板表面感应和积聚的电荷与通道电荷急剧中和,瞬间产生巨大焦耳热量 Q_j ,造成复合材料表面的基体汽化燃烧、纤维升华及断裂,复合材料表面容易出现烧蚀坑,形成初始附着区(IAA)。

对于具有正交各向异性电学特性的复合材料板,纤维方向的电导率远大于横向和厚度方向的电导率。在复合材料板雷电附着的初始阶段,由于通道的对称性,在复合材料附着表面附近容易感生出对称分布的感应电荷。但感应电荷更容易沿阻抗远低于横向和厚度方向的纤维方向传导,与雷电通道电荷发生剧烈的电荷中和,释放出大量的焦耳热。焦耳热的急剧累积使得通道初始附着区的复合材料在纤维方向出现了基体的熔融、汽化和烧蚀,纤维发生升华、烧蚀和断裂。沿纤维方向远离初始附着区,电流密度降低,焦耳热效应随之降低,复合材料的雷电流损伤模式逐渐变为基体分解、熔融和炭化,复合材料分层、纤-基分离。如此,便沿复合材料表层纤维方向形成附着传导区(ACA)(见图 5(c))。

表层纤维方向上的导电性好,电流密度较高,但不容易累积电荷。相反,横向上因电导率低则容易积累出与通道附着区电荷相反的感应电荷。不断累积的感应电荷致使与附着表面附近通道电荷间的库仑力 F_q 不断增加。同时,与复合材料附着的表面附

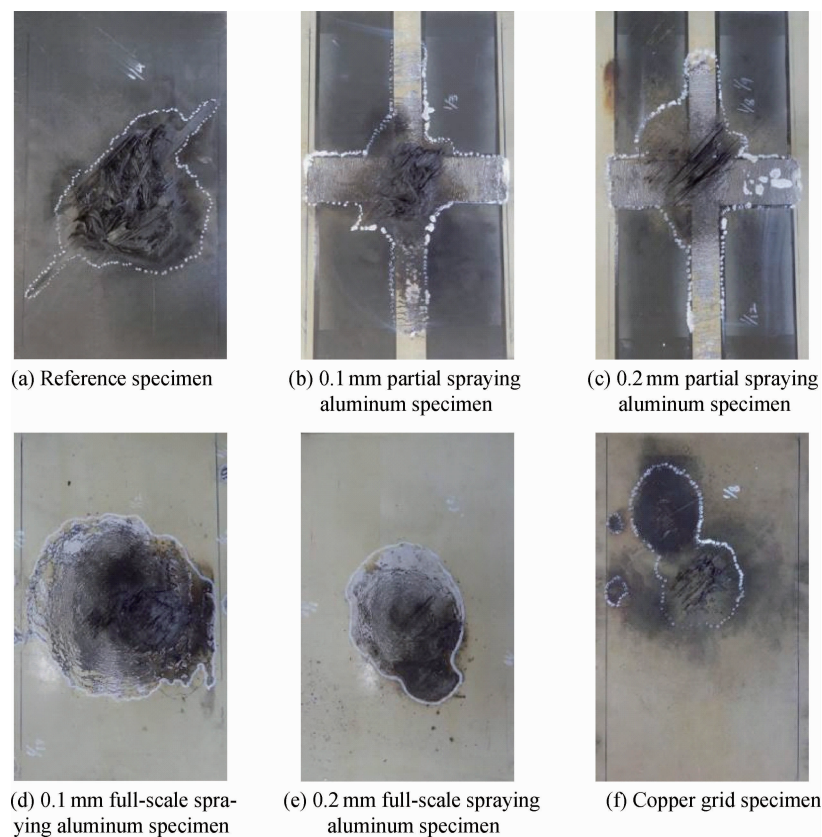


图 4 不同防护形式 T700/BA9916 复合材料试验件雷击损伤照片

Fig. 4 Photographs of lightning strike damages for T700/BA9916 composite specimens with different protection forms

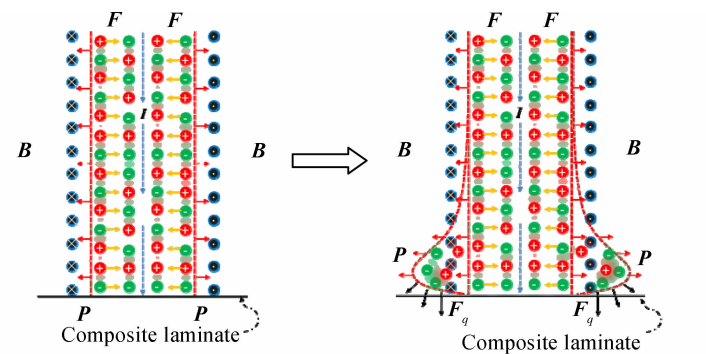
近放电通道由于正负电荷的剧烈中和而释放出大量焦耳热,致使通道等离子体热膨胀压力急剧升高,当通道膨胀压力 P 大于向心收缩的洛伦兹力 F 时,圆柱形放电通道便沿径向膨胀(见图 5(a)右图)。在库仑力和热膨胀压力的共同作用下,通道附着根部出现膨胀弯曲的通道前锋,这样便打破了附着区附近放电通道的轴对称性。

在通道沿复合材料表面横向扩展初期,放电通道在库仑力和热膨胀压力的共同作用下,靠近复合材料表面的放电通道根部贴近复合材料表面附着区,持续沿复合材料板横向扩展。放电通道根部前锋电荷与板间距较小,容易发生正负电荷中和,释放出大量焦耳热,从而在复合材料表面形成纤维烧蚀、断裂,基体分解、熔融、炭化等,形成附着扩展区(AEA)(见图 5(c))。

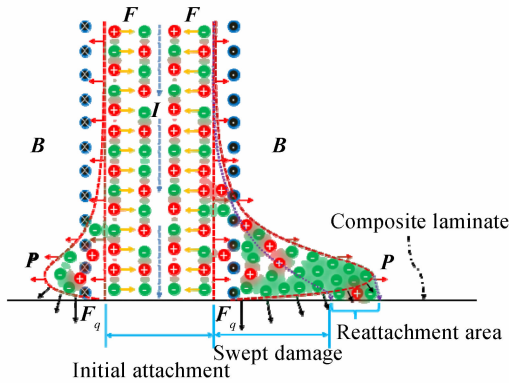
随着雷电能量持续由放电通道注入复合材料,在初始附着区的焦耳热持续产生,放电通道沿表层横向也在持续膨胀扩展,逐渐呈现“葫芦”型。但雷电流波形幅值在降低,通道电荷密度在减小,致使复合材料表面的感应电荷密度亦在减小,从

而导致“葫芦”型通道的前锋与复合材料表面间的库仑力 F_q 降低。这样便使得弯曲通道表面与复合材料表面间隙增大,电荷中和效应减弱。但库仑力和热膨胀压力使得通道电荷不断向“葫芦”型通道前锋汇聚。相应的,在前锋扫掠位置的复合材料表面感应电荷也在持续累积。当横向扩展的“葫芦”型通道前锋电荷与复合材料横向表面积累的相反电荷间的电场强度达到或超过间隙的击穿电场临界值 $E_c = 1 \sim 3 \text{ kV/mm}^{[26]}$ 时,发生间隙击穿^[14],放电通道在复合材料表面发生二次附着,形成二次附着区(RAA)(见图 5(b)和图 5(c))^[11, 13-15]。在二次附着区,雷电流以同样的方式在复合材料表面形成如初始附着区类似的损伤。但由于 2 次附着雷电能量的差异,致使两区域的损伤程度有所不同。

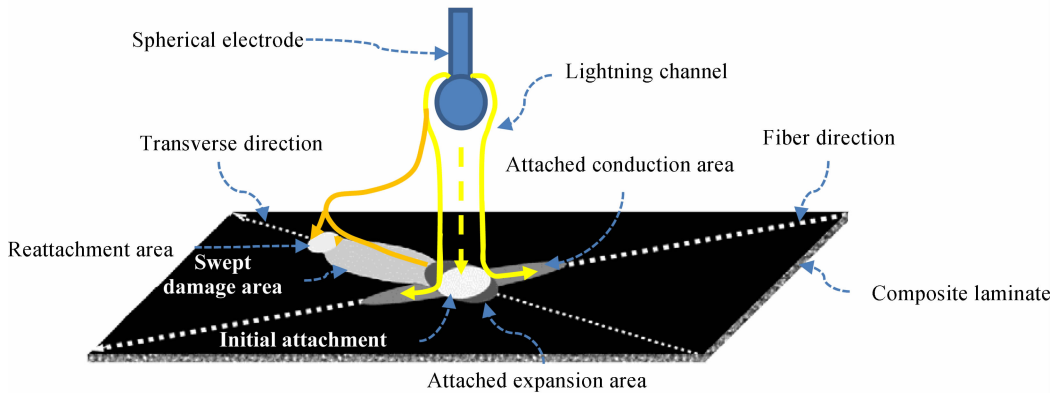
在二次附着区与初始附着区之间,放电通道与复合材料间发生强热对流和热辐射作用,致使沿复合材料表面横向出现纤维汽化、烧蚀和基体分解、炭化等损伤,形成扫掠损伤区(SDA)(见图 5(b)和图 5(c))。



(a) Force analysis of lightning channel in strong electromagnetic environment



(b) Reattachment process of lightning channel



(c) Interaction between lightning channel and composite laminate

图 5 雷电流附着传导示意图

Fig. 5 Schematic of lightning attachment and conduction

由于 4 种试验件的表面防护方式不同和表面粗糙度不同,以及复合材料具有正交各向异性,这打破了放电通道附着区的对称性,致使通道附着区根部非对称扩展,最终使得放电通道在 4 种复合材料试验件表面的附着、传导和扫掠的形式也各不相同。

2.2 不同防护形式雷击损伤分析

2.2.1 复合材料基准件

对于正交各向异性的复合材料基准件,纤维方向

初始附着在试验件的雷电流将主要沿着表层复合材料的纤维方向传导。在放电通道初始附着区根部,由于洛伦兹收缩力的作用致使通道焦耳热 Q_j 急剧增加,温度 T 急剧升高,瞬间可以高达 30 000 K,致使初始附着区基体瞬间熔融、汽化、喷射和燃烧,纤维瞬间升华、烧蚀并出现断裂起毛现象,形成 IAA,复合材料基准板雷击损伤模式如图 6 所示。

热膨胀压力 P 急剧上升,致使通道附着区迅速膨胀并呈“葫芦”型弯曲,在库仑力 F_q 和热膨胀压力 P 的共同作用下贴近复合材料表面,容易发生电荷

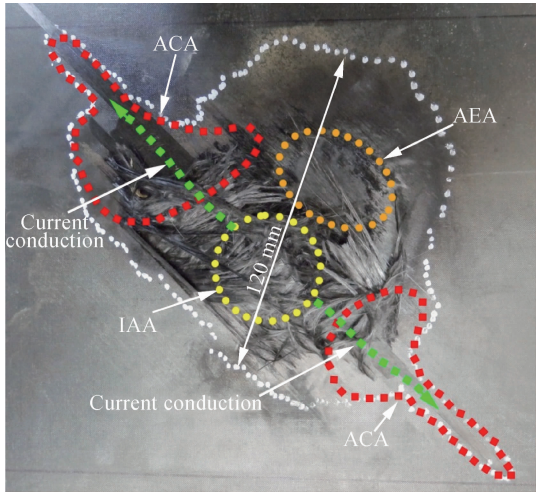


图6 复合材料基准板雷击损伤模式

Fig.6 Lightning strike damage modes of reference composite specimen

中和效应生成焦耳热，形成 AEA。在复合材料表面，电阻与复合材料纤维方向长度成正比，远离附着区的电势逐渐减小，沿纤维方向的电流密度逐渐降低，使得雷电流在纤维方向的焦耳热逐渐降低，继而沿表面纤维方向复合材料损伤逐渐变为分层及表层剥落，形成ACA。由于基准件表面未作任何防护，

致使大量的雷电能量在附着区附近以焦耳热的形式消耗掉，剩余能量不足以出现扫掠和二次附着现象。雷电流在复合材料基准件中部造成表面直径约为 120 mm 明显损伤的区域。

2.2.2 局部喷铝试验件

对于局部喷铝防护试验件，由图 4(b)和图 4(c)可以发现，雷电流直接附着在铝层防护带的十字中心部位，0.2 mm 的初始附着位置稍微偏离中心部位。从图 4 中可以看出局部喷铝试验件雷电流的波及范围最广，但雷电流对复合材料的表面损伤程度较基准件的轻，尤其是 0.2 mm 局部喷铝试验件，表明局部喷铝形式和厚度影响雷电流在试验件表面的覆盖范围。

图 7 为局部喷铝 T700/BA9916 复合材料试验件雷击损伤模式。由于铝层电导率远高于复合材料的电导率，因此雷电流将主要在十字形喷铝带传导形成 4 个铝层传导区，如图 7 中 4 个矩形线框所示。雷电流对十字型铝层防护带造成的损伤呈现出对称性，4 个方向上的损伤程度也基本对称，0.2 mm 稍有偏差，表明雷电流在铝层平面内传导均匀性较好，如图 7 中深色实线箭头所示。

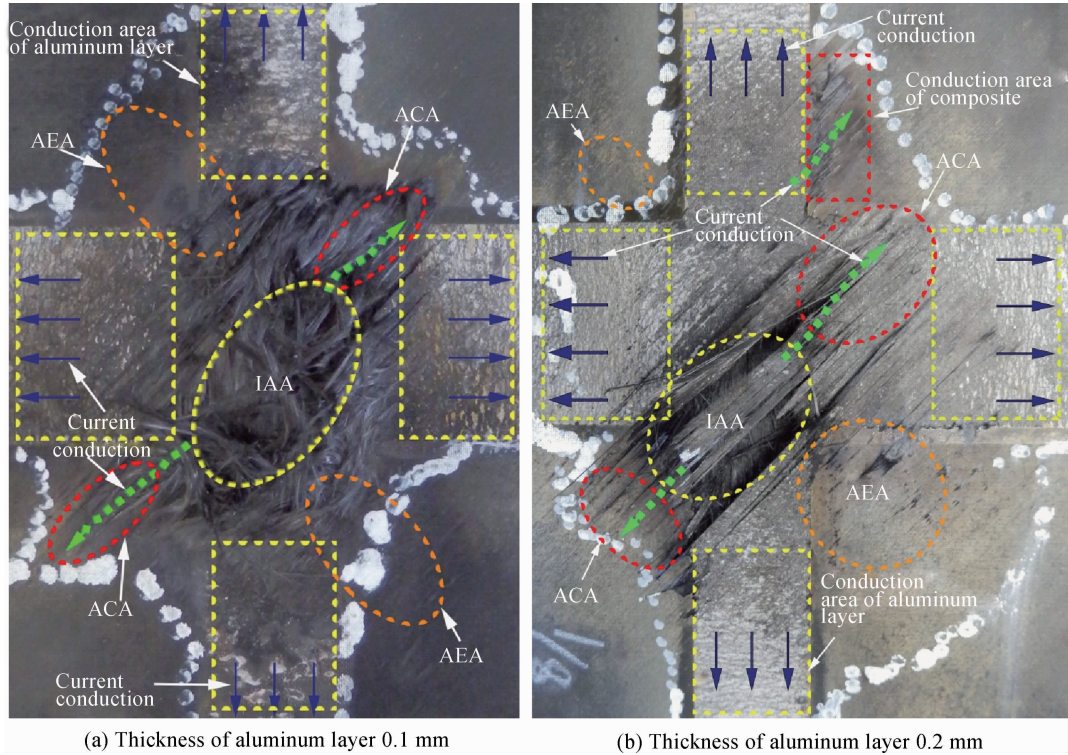


图7 局部喷铝 T700/BA9916 复合材料试验件雷击损伤模式

Fig.7 Lightning strike damage modes of T700/BA9916 composite specimen with partial spraying aluminum

当铝层因焦耳热效应而熔融、汽化消失后,雷电流便直接附着在复合材料表面产生焦耳热,使得基体熔融、汽化、烧蚀,纤维升华、断裂。0.2 mm 铝层传导的雷电流大于 0.1 mm 铝层传导的雷电流,致使 0.2 mm 铝层初始附着区沉积的电量较少且产生的焦耳热小于 0.1 mm 铝层产生的焦耳热。从而在十字中心的 IAA,0.2 mm 局部喷铝试验件的初始附着区损伤程度比 0.1 mm 局部喷铝试验件的初始附着区损伤程度轻,如图 7 所示。在初始附着区,局部喷铝试验件的铝层在高温放电通道和电流传导焦耳热的作用下完全消失。0.1 mm 防护件初始附着区呈现出纤维升华、断裂和起毛现象,并伴有隐约的烧蚀坑;而 0.2 mm 防护件初始附着区则表现出纤维升华、断裂和分层现象,伴有明显的烧蚀坑。这表明铝层厚度影响初始附着区烧蚀坑大小。

在铝层消失后的十字中心初始附着区,雷电流将沿复合材料纤维方向传导,产生的焦耳热在复合材料表面形成 ACA。同时,直接附着在复合材料表面的放电通道,在表面横向累积电荷库仑力 F_q 和热膨胀压力 P 的共同作用下,将沿复合材料表面横向扩展,形成 AEA。但由于铝层厚度不同,附着传导区和扩展区的损伤程度存在差异。

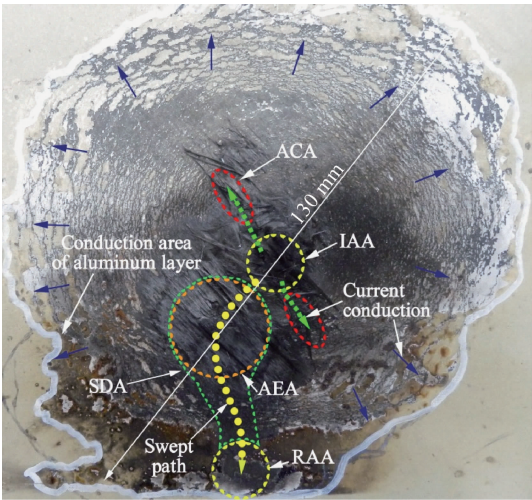
图 7 中标出的复合材料附着传导区的范围较基准件的范围小,附着扩展区损伤程度较基准件的损伤程度轻,表明雷电流通道的大部分能量以电流传导的形式被喷铝层消散。放电通道剩余能量不足以使得放电通道在复合材料板表面形成扫掠和二次附着。

在铝层传导区,随着电流密度的降低,喷铝层的损伤程度逐渐降低,在铝层熔融汽化严重区域,雷电流沿板厚度方向导入复合材料,所产生的焦耳热引起复合材料分层和基体炭化。在图 7(b)中,上方的铝层传导区附近还存在小面积的复合材料传导区,这是由于该区域喷铝层熔融汽化程度高导致雷电流直接在复合材料表层纤维方向上传导。

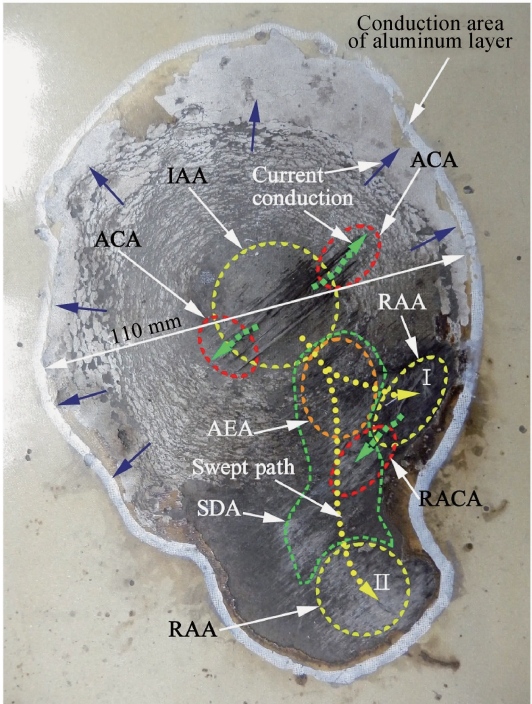
2.2.3 全喷铝试验件

图 8 为全喷铝 T700/BA9916 复合材料试验件雷击损伤模式。对于全喷铝试验件,与局部喷铝类似,当铝层在雷电流焦耳热效应作用下熔融、汽化消失后,雷电流便直接附着在复合材料表面产生焦耳热,并在复合材料表面造成基体熔融、汽化、烧蚀和纤维升华、断裂,形成 IAA,如图 8 所示。

附着在复合材料表面的雷电流将沿纤维方向传导,所产生的焦耳热使得复合材料基体熔融、汽化、



(a) Thickness of aluminum layer 0.1 mm



(b) Thickness of aluminum layer 0.2 mm

图 8 全喷铝 T700/BA9916 复合材料试验件雷击损伤模式
Fig. 8 Lightning strike damage modes of T700/BA9916 composite specimen with full-scale spraying aluminum

烧蚀以及复合材料分层,形成 ACA。0.1 mm 全喷铝试验件初始附着区出现纤维升华、断裂和起毛现象,而 0.2 mm 初始附着区仅发生基体炭化和材料分层。

由于该组试验件采用全喷铝防护,而喷铝层在各个方向上的导电性能相同,因此雷电流在铝层将沿各向均匀传导,使得试验件表面损伤呈圆形扩展,形成铝层传导区。但由于喷涂工艺的限制,使得铝

层并非严格等厚度喷涂,从而导致表面感应电荷分布不均匀,雷电流周向密度不相等。在电流密度较高区域,铝层迅速熔融、汽化消失。0.1 mm 全喷铝试验件铝层电流密度较高致使表面铝层损伤范围远大于 0.2 mm 全喷铝试验件的损伤范围(见图 4(d)和图 4(e))。复合材料损伤面积所占比例较小,但铝层损伤范围较大,表明雷电流主要以铝层传导为主。对于 0.1 mm 全喷铝试验件,位于壁板中心的直径约 130 mm 的近似圆形区域的铝层发生熔融汽化,而 0.2 mm 全喷铝试验件中部铝层熔融汽化区域直径约为 110 mm。

当初始附着区铝层熔融、汽化消失以后,该区域复合材料表面横向迅速感应和累积电荷。在热膨胀压力 P 和放电通道与复合材料表面间库仑力 F_q 共同作用下,放电通道根部沿表面横向呈现“葫芦”型膨胀。在初始阶段,膨胀前锋电荷与复合材料表面电荷发生剧烈的电荷中和而释放焦耳热,使得复合材料表面基体熔融炭化、复合材料分层,形成 AEA。对于 0.1 mm 全喷铝试验件,在附着扩展区发生基体炭化、纤维断裂和材料分层;而对于 0.2 mm 全喷铝试验件,附着扩展区仅发生铝层熔融汽化,复合材料只出现轻微的基体炭化。

随着雷电流在铝层和复合材料中的传导,雷电流幅值减小致使膨胀前锋电荷与复合材料表面横向感应电荷间库仑力 F_q 也在减小,从而使得通道前锋与复合材料板间距增大,致使通道与板间电荷中和效应降低。但雷电流在复合材料板的传导中仍持续产生焦耳热,使得放电通道持续膨胀。当通道膨胀前锋电荷与板表面感应电荷间电场强度值达到或超过间隙击穿电压时,间隙击穿,通道在复合材料板表面发生二次附着,形成 RAA,如图 8 中远离初始附着区的(椭)圆形区域所示。在初始附着区与二次附着区之间,通道与板间以强热对流和热辐射形式造成铝层熔融、汽化、消失和复合材料表面的基体炭化,形成 SDA,如图 8 中不规则曲线区域所示。0.2 mm 全喷铝试验件同时存在 RAA、SDA 和二次附着传导区(Reattachment Conduction Area, RACA),这主要与该区域铝层喷涂均匀程度和厚度有关。

2.2.4 铜网防护试验件

对于铜网防护试验件,铜网镶嵌在复合材料表面,使得其表面比基准件和喷铝试验件的表面粗糙。类比尖端放电形成机理,粗糙表面的许多微凸起尖

端容易积聚电荷。表面越粗糙越容易使得电荷在表面累积,且容易使得表面电荷分布不均匀。

图 9 为铜网防护 T700/BA9916 复合材料试验件雷击损伤模式。雷电流初始附着在复合材料板中心区域,形成 IAA。附着在试验件表面的雷电流可以同时铜网和复合材料中传导,但铜网的电导率远高于复合材料的电导率,因此雷电流主要在铜网中传导。当铜网在传导电流焦耳热的作用下熔融断裂后,雷电流完全与初始附着区复合材料接触,并主要在复合材料中传导,产生大量的焦耳热,造成复合材料基体熔融、汽化、烧蚀和纤维升华、断裂,如图 9 中右下方圆形区域所示。

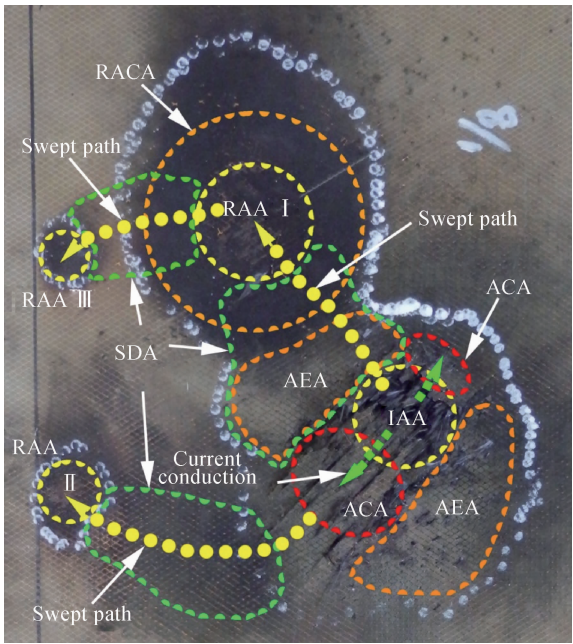


图 9 铜网防护 T700/BA9916 复合材料试验件雷击损伤模式
Fig. 9 Lightning strike damage modes of T700/BA9916 composite specimen with copper grid

铜网损伤后,雷电流在初始附着区主要沿导电性能好的纤维方向传导,产生的焦耳热沿雷电流传导方向形成 ACA,如图 9 中椭圆形区域所示,该区域出现复合材料分层损伤。同时,初始附着区的放电通道在 F_q 和 P 的共同作用下沿复合材料表面横向呈“葫芦”型膨胀,形成 AEA。由于铜网导电性能优异,放电通道在该区域仅造成铜网熔融和基体炭化且呈斑点状分布。

随着雷电流在铜网和复合材料中持续传导,电流峰值降低,通道膨胀前锋与板间距离增大,能量传导以热对流和热辐射为主。前锋与板间电场达到或超过击穿电压时,放电通道在复合材料板表面形成

RAA,如图9中I号小圆形区域所示。由于铜网导电性好且二次附着的雷电流峰值较低,该区域出现铜网熔融和基体炭化损伤。在I号区和初始附着区之间形成SDA,该区域的损伤主要以表面基体炭化为主。

与二次附着圆形区域同心的外部圆形所围区域为RACA,该区域仍以表面基体炭化损伤为主,但炭化程度较轻。这主要与雷电流幅值低和该区域铜网导电性能各向均匀性良好有关。雷电流在I号二次附着区左侧以同样的物理过程形成III号二次附着区,该区域仍以表面基体炭化为主。

与I、III二次附着区形成机理不同,II号区域是由于跳闪而形成二次附着。雷电流在I号附着传导区传导过程中,因复合材料电阻较大而在传导区积累了大量电荷,远离传导区的表面粗糙使得铜网容易感应和累积出相反电荷。当两者之间的电场强度达到或超过击穿电压时,雷电流便在贴近板表面上方“跳跃”,形成雷电流跳闪通道并附着在II号区域。II号二次附着区出现轻微基体炭化。在初始附着传导区和II号区域之间形成表面基体轻微炭化的SDA。

3 结 论

通过A+B+C+D 4种标准雷电流波形联合作用,对未防护、局部喷铝防护、全喷铝防护以及铜网防护的4类复合材料板开展了雷击试验,并对4类雷击试验件的雷击损伤特性进行了分析,得出如下结论:

(1) 复合材料板表面损伤是强电磁场条件下放电通道热电物理特性与复合材料表面热电特性及电荷分布的共同作用结果。可以将复合材料表面损伤区域分解成初始附着区、附着传导区、附着扩展区、二次附着区和扫掠损伤区。

(2) 在相同试验条件下,复合材料各试验件因防护方式不同导致复合材料板表面的损伤区域不同。基准件和局部喷铝防护件未出现二次附着区和扫掠损伤区,全喷铝和铜网防护件出现了二次附着区和扫掠损伤区。铜网防护件的二次附着区最为明显,但二次附着区损伤程度较全喷铝试验件损伤程度轻。

(3) 在初始附着区、附着传导区和附着扩展区,基准件损伤最严重,出现了纤维升华、断裂、起毛、基体炭化、材料分层和剥落等现象。而喷铝防护件在这3个区域的损伤程度与喷铝形式及厚度有关,损

伤程度较基准件的损伤程度轻。铜网防护件在这3个区域仅出现了纤维断裂和材料分层现象。

(4) 对于喷铝防护件,因铝层导电性能远高于复合材料的导电性能,同时铝层熔融、汽化温度较低,喷铝层以电流传导和铝层熔融汽化形式消耗掉雷电流通道的大部分能量,较好保护了复合材料板。而铜网的导电性能较铝的导电性能优异,但铜网熔融、汽化温度比铝的高,因此铜网主要以电流传导对复合材料板进行有效保护。

(5) 铝层厚度、喷涂形式及其喷涂均匀程度影响复合材料试验件的损伤程度和损伤分区特性。铜网试验件表面较粗糙容易造成复合材料板表面电荷累积且分布不均匀,从而在其表面形成多个二次附着区。

参考文献:

- [1] Qie X S, Jiang R B, Wang C X, et al. Simultaneously measured current, luminosity, and electric field pulses in a rocket-triggered lightning flash[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(D10): D10102.
- [2] Borovsky J E. An electrodynamic description of lightning return strokes and dart leaders: Guided wave propagation along conducting cylindrical channels[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(D2): 2697-2726.
- [3] Izadi M, Kadir M Z A, Gomes C, et al. Analytical expressions for electromagnetic fields associated with the inclined lightning channels in the time domain[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2012, 40(4): 414-438.
- [4] Izadi M, Kadir M Z A, Hajikhani M. Evaluation of electromagnetic fields due to inclined lightning channel in presence of ground reflection[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2013, 135: 677-694.
- [5] Li D M, Wang C, Liu X H. General time-domain formula for horizontal electric field excited by lightning[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, 53(2): 395-400.
- [6] Cvetić J, Osmokrović P. Dynamics of lightning discharge during return stroke[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, 37(1): 4-14.
- [7] Tausanović M, Marković S, Marjanović S, et al. Dynamics of a lightning channel corona sheath using a generalized traveling-current-source return stroke model—Theory and calculations[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, 52(3): 646-656.
- [8] Wang J, Yuan P, Zhang H M, et al. The study on the characteristics and particle densities of lightning discharge plasma

- [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(9): 2003-2008 (in Chinese).
- 王杰,袁萍,张华明,等. 闪电放电通道等离子体成分及相关特性的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(9): 2003-2008.
- [9] Cvetić J, Heidler F, Marković S, et al. Dynamics of a lightning corona sheath—A constant field approach using the generalized traveling current source return stroke model[J]. Atmospheric Research, 2012, 117: 122-131.
- [10] Masłowski G, Rakov V A. Review of recent developments in lightning channel corona sheath research[J]. Atmospheric Research, 2013, 129-130: 117-122.
- [11] Larsson A. The interaction between a lightning flash and an aircraft in flight[J]. Comptes Rendus Physique, 2002, 3(10): 1423-1444.
- [12] Uman M A, Rakov V A. The interaction of lightning with airborne vehicles[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2003, 39(1): 61-81.
- [13] Larsson A, Lalande P, Clergerie A B, et al. The lightning swept stroke along an aircraft in flight. Part I: thermodynamic and electric properties of lightning arc channels[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 33(15): 1866-1875.
- [14] Larsson A, Lalande P, Clergerie A B. The lightning swept stroke along an aircraft in flight. Part II: numerical simulations of the complete process[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 33(15): 1876-1883.
- [15] Larsson A, Delannoy A, Lalande P. Voltage drop along a lightning channel during strikes to aircraft[J]. Atmospheric Research, 2005, 76(1-4): 377-385.
- [16] SAE International Aerospace Standards Europe Office. SAE-ARP5412A Aircraft lightning environment and related test waveforms[S]. London, UK: SAE International, 2005.
- [17] SAE International Aerospace Standards Europe Office. SAE-ARP5414A Aircraft lightning zoning[S]. London, UK: SAE International, 2005.
- [18] Klemperer C J, Maharaj D. Composite electromagnetic interference shielding materials for aerospace applications[J]. Composite Structures, 2009, 91(4): 467-472.
- [19] 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(6-7): 954-967.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Ding N, Zhao B, Liu Z Q, et al. Simulation of ablation damage of composite laminates subjected to lightning strike[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2): 301-308 (in Chinese).
- 丁宁,赵彬,刘志强,等. 复合材料层合板雷击烧蚀损伤模拟[J]. 航空学报, 2013, 34(2): 301-308.
- [23] Duan Z M, Cao K F, Cheng Z G, et al. Lightning protection tests and waveforms for aircraft[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(4): 61-63 (in Chinese).
- 段泽民,曹凯风,程振革,等. 飞机雷电防护试验与波形[J]. 高电压技术, 2000, 26(4): 61-63.
- [24] Wen H, Hou X Y, Wang H. Research on lightning attachment points test on airplane model[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7): 90-92 (in Chinese).
- 温浩,候新宇,王宏. 飞机模型雷击附着点试验研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 90-92.
- [25] SAE International Aerospace Standards Europe Office. SAE-ARP5416 Aircraft lightning test methods[S]. London, UK: SAE International, 2005.
- [26] 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 of Aerospace Lab, 2012(5): 1-15.
- [27] Wang X X, Fan D, Huang J K, et al. Numerical simulation of coupled arc in double electrode tungsten inert gas welding[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(22): 228101 (in Chinese).
- 王新鑫,樊丁,黄健康,等. 双钨极耦合电弧数值模拟[J]. 物理学报, 2013, 62(22): 228101.
- [28] Lago F, Gonzalez J J, Freton P, et al. A numerical modelling of an electric arc and its interaction with the anode; part III. Application to the interaction of a lightning strike and an aircraft in flight[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(10): 2294-2310.

Damage zoning characteristics of composite laminates with different protections subjected to lightning strike

LIU Zhiqiang, YUE Zhufeng^{*}, WANG Fusheng, JI Yaoyao

(Advanced Materials Testing Center, School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: Lightning strike tests of composite laminates with different protections were conducted based on the combining strikes of four standard waveforms A+B+C+D. The interaction procedure between the lightning channel and composite laminate surface was analyzed, and the surface damage area of composite was divided into initial attachment area, attached conduction area, attached expansion area, reattachment area and swept damage area with respect to the physical characteristics of lightning channel. And the damage characteristics were analyzed for four types of laminates: unprotected reference specimen, partial and full-scale spraying aluminum specimens, and copper grid specimen. The results show that the surface damage of composite is induced by the interactions of thermo-electrical physical properties of lightning channel, surface thermo-electrical properties of composites, and charge distribution in strong electromagnetic field. The characteristics of symmetry and zoning of damage area on surface of composites are affected by spraying shape, thickness and homogeneity of aluminum layer. The rough surface of composite laminates induced by copper grid protection leads to the complexity of surface damage zoning. The accumulation characteristic and homogeneity of distribution for the induced charge on surface of composite laminates are the direct reasons for distributions of reattachment area and swept damage area. The primary damage forms of composites subjected to the lightning strike include fiber sublimation, rupture and fuzzing, the matrix charring melting and ablation, the delamination and detaching of materials, and the melting, vaporization and breakdown of protective materials. The analysis results can be applied to the qualitative design for lightning protection of composites.

Keywords: lightning strike test; composite protection; physical characteristics of lightning channel; lightning strike damage zoning; multi-field coupling