

# 民用飞机短舱复合材料结构雷电直接效应 试验验证方法及漆层厚度影响研究

王加成\* 林森 彭森

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

**摘要:** 随着飞机设计的发展,复合材料广泛应用于民用飞机短舱结构。由于碳纤维复合材料结构的导电性以及抗雷电损伤能力比铝合金结构差,复合材料短舱结构雷电防护能力已成为影响飞机飞行安全的一项关键问题。依据相关适航条款和相应的国际标准,阐述了民用飞机短舱复合材料雷电防护试验验证方法,并依据验证方法对漆层厚度的损伤影响进行了试验研究。短舱常规蒙皮构型的复合材料试验件,在不同漆层厚度下的雷电防护试验结果表明,漆层较薄时,漆层对短舱复合材料的雷电直接效应防护能力无明显的影响;当漆层厚度达到一定厚度时,较厚的漆层将显著降低短舱复合材料的雷电直接效应防护能力,最严重时将造成复合材料蒙皮的击穿,损伤蒙皮内部系统设备,从而危害飞行安全。试验结果与理论的机理分析具有良好的一致性,对民用飞机短舱复合材料结构的雷电防护设计提供了指导方向和参考意义。

**关键词:** 雷电防护;复合材料;漆层厚度;短舱

中图分类号: V257; V224+.2

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

对于人类的飞行活动来说,雷电是危及到飞行安全的。作为大气层中的自然现象,雷电可分布在海平面以上约 100 km 的空间内。统计数据表明,民用商业飞机在运营过程中经常在机头、翼尖、尾翼以及短舱部位遭受雷击。由于雷击造成的机身损伤会严重影响民用航空的飞行安全。

传统的民航客机广泛采用铆接结构的铝合金蒙皮,由于铝合金具有良好的导电性,其制造的机体结构很少在遭受雷击时产生较为严重的损伤。同时,铝合金蒙皮可以为内部的电子系统提供优良的电子屏蔽。而随着复合材料技术的发展,当前主流的短舱结构,包括风扇罩,反推外罩都越来越多地采用加入碳纤维增强的复合材料<sup>[1-2]</sup>。由于复合材料的导电性较差,通常在复材表面使用铺设的金属丝网、延

展金属箔、加入金属纤维丝等方式增强复材蒙皮的雷电防护性能<sup>[3]</sup>。

民用客机蒙皮表面广泛使用非导电漆层进行涂装,会在一定程度上降低复合材料蒙皮的雷电防护性能。由于难以定量通过分析计算的方式对复合材料蒙皮在受雷电打击时的损伤情况进行评估,因此需要建立一套复合材料的雷电防护试验方法,通过试验方法验证其真实的雷电防护能力,同时考虑漆层厚度的影响。周家东<sup>[4]</sup>等对复合材料延性雷电防护金属网进行了仿真与试验研究;李雪<sup>[5]</sup>等人通过试验对漆层厚度在 233  $\mu\text{m}$  以内的雷电损伤情况进行了研究;付尚琛<sup>[6]</sup>等测试了不同电导率涂层的复合材料雷电防护效果。为研究不同漆层厚度对复合材料损伤的影响,本文采用 1 A 雷电分区标准雷电电流,对 116  $\mu\text{m}$  ~ 255  $\mu\text{m}$  漆层厚度范围内的不同厚度复合材料蒙皮进行研究和分析。

\* 通信作者. E-mail: wangjiacheng@comac.cc

**引用格式:** 王加成,林森,彭森. 民用飞机短舱复合材料结构雷电直接效应试验验证方法及漆层厚度影响研究[J]. 民用飞机设计与研究,2021(4):73-78. WANG J C, LIN S, PENG S. The test and verification method of lightning direct effect on civil aircraft nacelle composite structure and the effect study of paint thickness[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2021(4):73-78(in Chinese).

# 1 雷电直接效应试验验证方法

## 1.1 适航要求

依据中国民用航空规章 CCAR-25-R4, 第 25.581 条款要求<sup>[7]</sup>:

a) 飞机必须具有防止闪电引起的灾难性后果的保护措施;

b) 对于金属组件, 下列措施之一可表明符合本条(a)的要求:

- 1) 该组件合适地搭接到飞机机体上;
- 2) 该组件设计成不致因闪击而危及飞机。

c) 对于非金属组件, 下列措施之一可表明符合本条(a)的要求:

- 1) 该组件的设计使闪击的后果减至最小;
- 2) 具有可接受的分流措施, 将产生的电流分流而不致危及飞机。

为满足 25.581 条款要求, 需对短舱复合材料结构选取典型试验件进行 MOC4 试验室试验。并根据基于损伤结果进行的剩余强度计算, 证明短舱复合材料结构的雷电防护能力和遭受雷击后安全返航的能力。

## 1.2 试验验证方法

### 1.2.1 试验方法

依据 SAE ARP 5416<sup>[8]</sup>, 直接效应试验包括:

1) 高电压放电附着试验, 用于确定受试对象出现的雷电附着位置;

2) 大电流物理破坏试验, 用于确定雷电通道附着于或接近于受试对象时可能对受试对象产生的损坏。

民用飞机短舱典型的雷电附着区域通过 SAE ARP 5414<sup>[9]</sup> 确定, 通常仅需要进行一个大电流的电弧引入试验来验证结构在热效应和声效应中的正常工作能力。

针对短舱结构直接效应的电弧引入试验, 为模拟真实的雷击情况, 要求依次将不同的电流分量在单次打击中注入试验件, 给出试验件的综合响应。图 1 为电流依次进入的示意波形。

参考 SAE ARP5414, 根据雷电附着时间和电流传导方式对飞机表面区域进行分类, 可分为 1A、1B、1C、2A、2B 区域。对于典型的翼吊飞机, 短舱前部表面属于 1A 区域, 中部表面属于 1C 区域, 反推的后部表面属于 2A 区域, 后核心罩及尾锥后缘末端属于 1B 区域; 对于典型的尾吊飞机, 短舱表面大部分均属于 2A 区域, 仅后缘及尾锥属于 2B 区域。参考 SAE

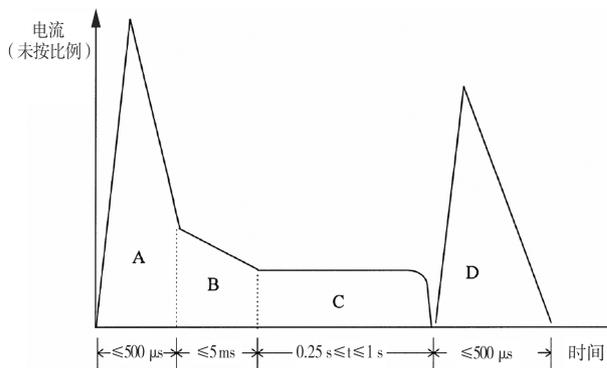


图 1 电流引入波形

ARP5412<sup>[10]</sup>, 仅对于间接效应试验需要使用 H 波形, 因此各区域对应的试验电流波形如表 1 所示, 各类电流波形的具体参数在 SAE ARP5412 中有详细的说明。

表 1 各分区对应的电流试验波形<sup>[10]</sup>

雷电分区	1A	1B	1C	2A	2B
电流波形	A, B, C*	A, B, C, D	A <sub>h</sub> , B, C*	D, B, C*	D, B, C

### 1.2.2 试验装置与设备

试验应参照并遵循 SAE ARP5416 规定的雷电直接效应试验方法进行, 电流波形采用 1.2.1 节中阐述的电流分量 A(A<sub>h</sub>)、B、C(C\*) 和 D, 电流分量以特定的组合方式连续依次注入试验件, 试验原理如图 2、图 3 所示。

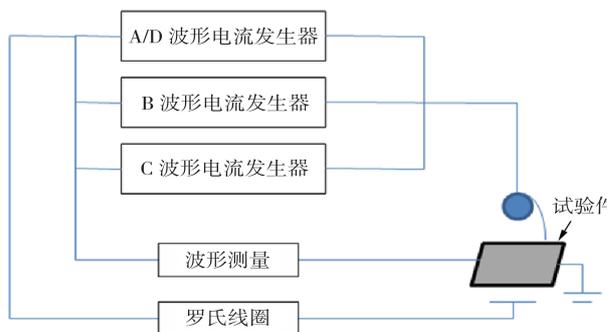


图 2 试验装置架构

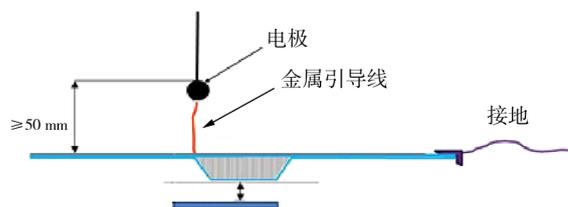


图 3 试验件布置

电流发生器与电极相连,波形测量仪一端与试验件搭接,另一端与电流发生器形成回路。电极与试验件间距不小于 50 mm,试验件下方布置有穿透电流检测装置,检测装置与试验件间距应不大于短舱内部设备与短舱蒙皮最小间距。试验件采用接地连接,电极处的金属引导线直径不超过 0.1 mm。

## 2 漆层厚度对试验结果的影响研究

### 2.1 漆层厚度影响机理分析

短舱复合材料蒙皮表面通常使用防腐蚀环氧底漆、底色漆结合清漆作为表面涂层,用于表面防护及飞机涂装作用。因此,在短舱遭受雷电直接效应打击时,雷电通道通过电弧引入点与短舱导电结构形成的电流通路,将穿透短舱结构表面漆层。

当电流因雷击进入短舱结构蒙皮时,通常可以分解成多条电流弧根,同时在蒙皮表面形成多个附着注入点。如此,每个单独的电流弧根产生的能量将降低为总能量的  $1/n^2$ ,如式 1 所示。其中, $n$  为电流分散的数量, $I$  为总电流。因此,在存在若干条分散电流的情况下,总的耗散能量与单点电流注入相比就会显著减少。这表明弧根分散现象可有效降低短舱蒙皮的损伤程度<sup>[3]</sup>。

$$\int I_n^2 dt = \frac{\int I^2 dt}{n^2} \quad (1)$$

短舱复合材料表面通常铺设有一层铜网铺层,其上覆盖的油漆涂层通常具有绝缘特性,将减少雷电引入点处的弧根分散效应,趋向于使雷电通道保持附着在蒙皮表面的一点上,因此漆层往往使电弧的附着集中于一小块区域,从而增加了该区域的热效应,导致复合材料结构的损伤程度加深。最严重时将造成复合材料蒙皮的击穿,损伤蒙皮内部系统设备,从而危害飞行安全。

此外,雷电能量的传递速度  $V$  与漆层介电常数  $\varepsilon$  的关系如式(2)所示<sup>[11]</sup>,其中  $c$  代表光速。

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (2)$$

在特定的表面漆层厚度范围内,通常漆层越厚,产生的介电常数会越大,从而降低雷电能量的传递速度,导致雷电引入点处产生的热量更加集中,致使相应复合材料结构的雷电打击损伤更加严重,从而降低雷电直接效应防护的能力。

### 2.2 试验研究

本次试验研究选用现代民用客机短舱普遍使用的碳纤维环氧树脂复合材料平板试验件,由  $(0, 90)^\circ$  与  $\pm 45^\circ$  的预浸料交替铺设共同固化制成,该试验件铺层设计与实际短舱蒙皮结构基本铺层设计一致。采用两组铺层数分别为 6 层和 7 层的试验件,均在其表面铺设金属铜网,同时喷涂不同的漆层厚度,厚度分别为 116  $\mu\text{m}$ 、145  $\mu\text{m}$ 、235  $\mu\text{m}$  和 256  $\mu\text{m}$ 。为减少边际效应,试验采用的试验件尺寸均为 500 mm  $\times$  500 mm,采用 1A 雷电分区的电流分量 A、B、C\* 依次注入试验件。不同漆层厚度的复合材料试验件在雷电电流注入后的试验结果如图 4 ~ 图 11 所示。

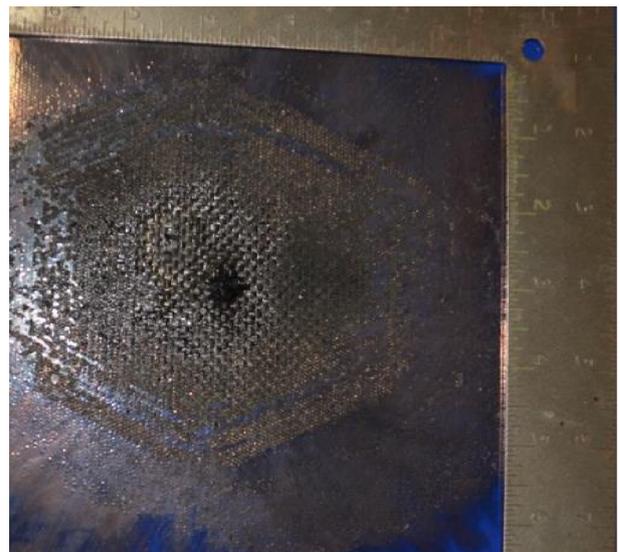


图 4 6 层、116  $\mu\text{m}$  漆层厚度试验损伤情况

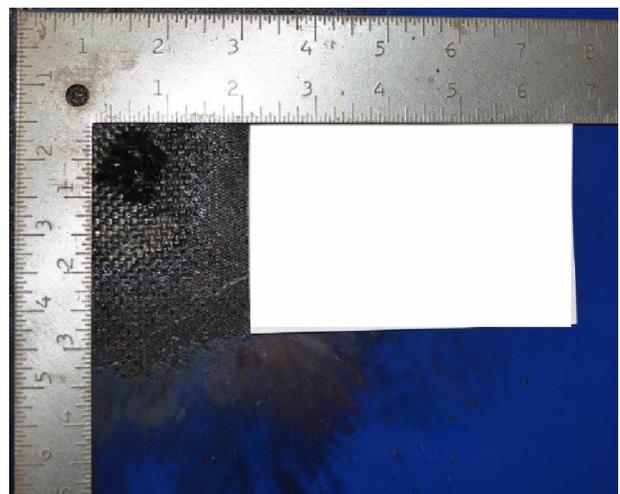


图 5 7 层、116  $\mu\text{m}$  漆层厚度试验损伤情况

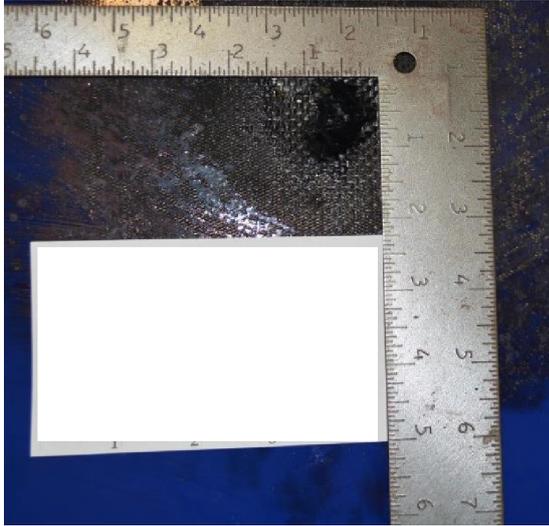


图 6 6 层、145  $\mu\text{m}$  漆层厚度试验损伤情况



图 7 7 层、145  $\mu\text{m}$  漆层厚度试验损伤情况



图 8 6 层、235  $\mu\text{m}$  漆层厚度试验损伤情况

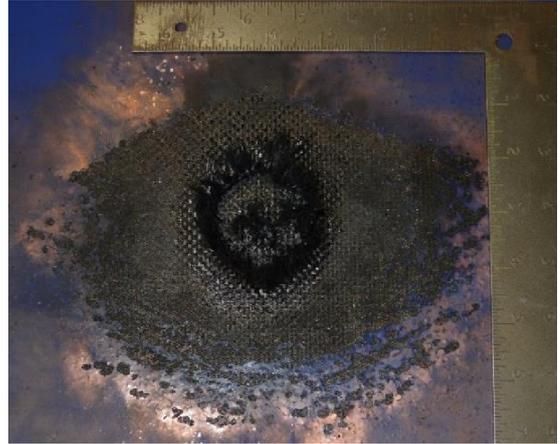


图 9 7 层、235  $\mu\text{m}$  漆层厚度试验损伤情况



图 10 6 层、256  $\mu\text{m}$  漆层厚度试验损伤情况



图 11 7 层、256  $\mu\text{m}$  漆层厚度试验损伤情况

试验结果表明,漆层厚度达到 235  $\mu\text{m}$  时,6 层铺层试验件出现了试验件击穿情况;在漆层厚度达到 256  $\mu\text{m}$  时,7 层铺层试验件同样出现了试验件击穿情况。

试验后,采用无损检测 C 扫的方式,对复合材料的损伤面积大小进行了测量,测量结果如图 12、图 13 所示。

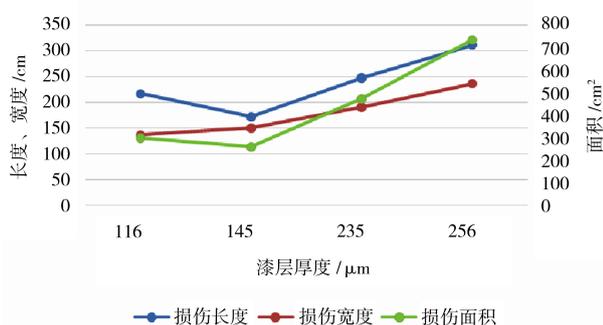


图 12 6 层试验件不同漆层厚度损伤情况

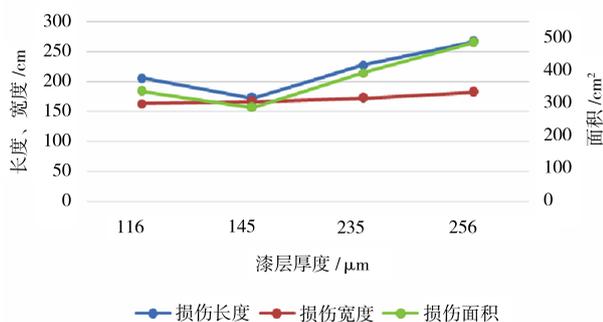


图 13 7 层试验件不同漆层厚度损伤情况

### 3 试验结果分析

通过对比各组不同厚度漆层试验件的试验结果,可以发现:

1) 各组试验件的漆层在雷电弧引入点附近均被击穿并产生焦黑痕迹,复合材料板均带有不同程度的损伤;

2) 116  $\mu\text{m}$  与 145  $\mu\text{m}$  厚度的试验件损伤面积大小无明显差别,甚至于 145  $\mu\text{m}$  厚度的损伤大小略小于 116  $\mu\text{m}$  厚度。这表明在较小的漆层厚度范围内,雷电引起的复合材料蒙皮损伤无明显差异,这主要是由于漆层较薄,电流通道容易击穿并在引入点处产生弧根分散,不会造成大能量的聚集,该现象与文献[12]中结果一致;

3) 6 层铺层试验件在漆层厚度达到 235  $\mu\text{m}$  时

出现了试验件被击穿情况;7 层铺层试验件在漆层厚度达到 256  $\mu\text{m}$  时,出现了试验件击穿情况。该结果证明了复合材料蒙皮越厚,雷电防护能力越强;

4) 试验结果显示,漆层厚度达到 235  $\mu\text{m}$  以上时,损伤面积大小存在较明显的增加现象。说明漆层厚度达到一定厚度后,严重影响了雷电引入点处的弧根分散,造成了雷电能量的大量聚集,该现象与本文中机理分析中的表述一致。

### 4 结论

本文阐述了民用飞机短舱复合材料结构的雷电直接效应试验方法,同时通过对漆层厚度影响的理论研究以及试验研究,得出以下结论:

1) 对于雷电最严酷区域 1A 雷电分区,在较薄的漆层厚度影响下,漆层对短舱复合材料的雷电直接效应防护能力无明显的影响;

2) 当漆层厚度达到一定厚度时,较厚的漆层将显著降低短舱复合材料的雷电直接效应防护能力,最严重的情况将击穿复合材料蒙皮,危害短舱内系统的安全运行;

3) 本文研究的是一种复合材料结构蒙皮,导电能力以及强度与复合材料本身的物理特性有关,不同的复合材料均需要进行试验测试,以获取设计参数。在复合材料蒙皮结构出现雷击损伤后,应进行剩余强度分析和导电性能测试,当不满足强度以及导电性要求时,应进行修补,避免损伤扩展甚至危及飞行安全的情况出现。

在今后的研究中,可以考虑针对不同材料的涂层对复合材料蒙皮的雷电防护能力的影响进行试验研究。

#### 参考文献:

- [1] MALL S, OUPER B L, FIELDING J C. Compression strength degradation of nanocomposites after lightning strike[J]. Journal of Composite Materials, 2009, 43 (24):2987-3001.
- [2] 邱宏波. 复合材料在世界通用飞机的应用发展趋势[J]. 装备制造技术, 2013(7):160-162.
- [3] 合肥航太电物理技术有限公司. 航空器雷电防护技术[M]. 北京:航空工业出版社, 2013.
- [4] 周家东,熊秀,谢健,等. 复合材料延性雷电防护金属网仿真与试验研究[J]. 飞机设计, 2017,37(3):68-74.

- [ 5 ] 李雪,姚永杰,张英杰,等. 漆层厚度对短舱 CFRP 及防护铜网的雷击损伤影响研究[J]. 内燃机与配件, 2019(11):86-88.
- [ 6 ] 付尚琛,石立华,周颖慧,等. 碳纤维复合材料不同电导率涂层的雷击防护效果测试[J]. 中国舰船研究, 2018,13(增1):61-65.
- [ 7 ] 中国民用航空局. 中国民用航空规章第 25 部 运输类飞机适航标准:CCAR-25-R4[S]. 中国:中国民用航空局, 2011.
- [ 8 ] SAE International. Aircraft lightning test methods: SAE ARP5416[S]. [S. l.]: Society of Automotive Engineers International, 2005.
- [ 9 ] SAE International. Aircraft lightning zoning: SAE ARP5414A[S]. [S. l.]: Society of Automotive Engineers International, 2005.
- [10] SAE International. Aircraft lightning environment and related test waveforms: SAE ARP5412A[S]. [S. l.]: Society of Automotive Engineers International, 2005.
- [11] FISHER F A, PLUMER J A, PERALA R A. Aircraft lightning protection handbook: DOT/FAA/CT-89/22 [R]. U. S. ;FAA, 1989.
- [12] FABRICE T, FABIAN F. Lightning Direct Effects Degradation of Composite Material Depending on Paint Thickness [C]. [S. l.]: Iclose, 2017.

#### 作者简介

王加成 男,硕士,工程师。主要研究方向:短舱结构设计。E-mail: wangjiacheng@comac. cc

林森 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:吊挂结构设计。E-mail: linsen@comac. cc

彭森 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:短舱吊挂结构设计。E-mail: pengsen@comac. cc

## The test and verification method of lightning direct effect on civil aircraft nacelle composite structure and the effect study of paint thickness

WANG Jiacheng\* LIN Sen PENG Sen

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** With the development of civil aviation, composite materials are widely used in civil aircraft nacelle design. Due to the electrical conductivity and lightning damage resistance of carbon fiber composites are not as good as aluminium structure, the lightning protection capability of the nacelle composite structure has become a key problem affecting the flight safety of aircraft. In this paper, according to the airworthiness regulations and the corresponding international standards, the testing verification method of composite material lightning protection for civil aircraft nacelle was described, and the damage effect of paint thickness was studied. The lightning test results of composite test specimens which represent the conventional configuration of the nacelle skin with different paint thickness show that when the paint thickness is relative thin, the paint layer has no obvious effect on the lightning protection ability; when the paint reaches a certain thickness, the thicker paint layer will significantly reduce the lightning protection ability, and in the most serious condition, it will cause the penetration of the composite skin and damage the inner system, which will cause flight safety hazard. The experimental results are well consistent with the theoretical analysis, which provides guidance and reference for the lightning protection design of composite structure of civil aircraft nacelle.

**Keywords:** lightning protection; composite material; paint thickness; nacelle

\* Corresponding author. E-mail: wangjiacheng@comac. cc