

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.09.022

# 轻质纳米表面膜/CFRP的雷击防护性能

祝林, 王浩军, 盛永清, 田永杰, 赵虎

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

**摘要:** 碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)因其固有的低电导率,在遭遇雷击事件时难以将巨大的雷电流快速、安全地疏导与释放,对飞行安全构成严重威胁。传统的防雷击金属网虽能显著改善复合材料表面的导电性能,降低复合材料的雷击损伤,但其带来的额外重量不可忽视。为了开发一种轻质高性能的复合材料雷击防护方法,选用了一种轻质纳米防雷击表面膜(NLSPF),以飞机表面占比最高的2A雷击区为验证对象,结合飞机机翼复合材料部件的结构特征,采用国产T800级碳纤维环氧复合材料及其固化工艺,系统评估了该纳米表面膜在应用场景下的雷击防护性能,并与商用防雷击铜网表面膜(Cu-LSPF)进行对比。结果表明,在2A区雷击条件下,NLSPF防护的复合材料表面纳米膜发生局部烧蚀,未观察到内部CFRP出现分层、断裂等损伤;复合材料损伤面积约1 429 mm<sup>2</sup>,损伤深度约0.23 mm,相比未防护的CFRP损伤面积减少91.8%,损伤深度下降87.4%;雷击后CFRP的压缩剩余强度达到雷击前的95.4%,较未防护的复合材料提高76.0%。对NLSPF与商用Cu-LSPF的雷击防护性能进行对比,NLSPF对2A区雷电防护效果与Cu-LSPF接近,但面密度仅为Cu-LSPF的54.8%,单位面积减少质量约99 g/m<sup>2</sup>,在工程应用上可以替代Cu-LSPF并且显著降低雷电防护层的重量。

**关键词:** 复合材料;雷击防护;纳米表面膜;减重;压缩剩余强度

**中图分类号:** TQ323.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)09-0172-07

## Lightning strike protection performance of lightweight nano surface film/CFRP

ZHU Lin, WANG Haojun, SHENG Yongqing, TIAN Yongjie, ZHAO Hu

(AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

**Abstract :** Owing to their inherently low electrical conductivity, carbon fiber reinforced polymer composites are difficult to rapidly and safely divert and dissipate massive lightning currents during lightning strike events, posing significant threats to flight safety. Although the conventional lightning strike protection metal meshes can substantially enhance the surface conductivity of composites and reduce lightning-induced damage, the extra weight of them cannot be ignored. To develop a lightweight and high-performance lightning strike protection method for composites, a lightweight nano lightning strike protection surface film (NLSPF) was selected. Targeting lightning strike zone 2A (representing the highest proportion of aircraft surface), considering the structural characteristics of aircraft wing composite components, the lightning protection performance of NLSPF in the application scenario was systematically evaluated by using domestically T800-grade carbon fiber reinforced epoxy composites and its curing process, and compared with commercial copper mesh lightning strike protection film (Cu-LSPF). The results show that under zone 2A lightning strike conditions, NLSPF protected composites exhibit only surface nano film partially ablated, with no delamination and fracture damage observed in the internal carbon fiber reinforced composites. The damage area and depth of the composites are about 1 429 mm<sup>2</sup> and 0.23 mm respectively, representing an 91.8% reduction in damage area and an 87.4% reduction in damage depth compared to unprotected composites. The compressive residual strength of the composites after lightning strike is 95.4% of that before lightning strike, which is 76.0% higher than that of unprotected composites. By comparing the lightning protection efficacy of NLSPF to commercial Cu-LSPF, NLSPF demonstrates comparable lightning protection performance in zone 2A, with surface density only 54.8% of Cu-LSPF, achieving a weight reduction of approximately 99 g/m<sup>2</sup>. In engineering application, NLSPF can replace Cu-LSPF and significantly reduce the weight of lightning strike protection layer.

**Keywords :** composite ; lightning strike protection ; nano surface film ; weight reduction ; compressive residual strength

**基金项目:** 民用飞机专项科研项目(MJZ1-11N22)

**通信作者:** 祝林, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为树脂基复合材料

**收稿日期:** 2025-07-20

**引用格式:** 祝林, 王浩军, 盛永清, 等. 轻质纳米表面膜/CFRP的雷击防护性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(9): 172-178.

ZHU Lin, WANG Haojun, SHENG Yongqing, et al. Lightning strike protection performance of lightweight nano surface film/CFRP[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(9): 172-178.

在航空结构设计领域,减轻结构质量是提升飞行器综合性能(航程、有效载荷与燃油效率)的核心目标之一。碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)凭借其优秀的比强度与比刚度特性,已经成为现代航空结构减重增效的关键材料,在飞机主承力构件(如机翼、机身段与尾翼等)上得到大规模应用<sup>[1-2]</sup>。以波音787与空客A350为代表,先进民用飞机的复合材料结构质量占比已经超过50%<sup>[3]</sup>。然而,与铝合金等传统金属材料相比,CFRP固有的导电性能较差,在遭遇雷击事件时,难以像金属蒙皮那样在表面形成低阻抗通路将巨大的雷电流进行快速、安全地疏导释放<sup>[4-6]</sup>。据报道,飞机平均每年遭受一次雷击,雷击的瞬时电流可高达200 kA,若无法得到有效的疏导,会使飞机材料瞬间热解或燃烧,造成飞机结构破碎和分层,进而导致飞机结构失效,甚至威胁飞行安全<sup>[7-9]</sup>。

为了解决CFRP低电导率在雷击事件中引发的安全隐患,当前航空工业上广泛使用的一项关键防护技术是在复合材料结构表面铺贴金属防雷击网。然而,此类金属网(通常是铜、铝)虽然能够显著改善复合材料表面的导电性能,降低复合材料的雷击损伤,但是其自身密度较高,带来的额外重量不可忽视,与飞机轻量化的目标相悖<sup>[10-12]</sup>。因此,开发新型高性能、轻量化的复合材料雷击防护策略,成为国内外航空领域研究的重点方向。

为了应对复合材料雷击防护的挑战,国内外学者相继开发了多种新型雷电防护方法,技术路径上主要包括以下几种:1)树脂基体导电改性<sup>[13-16]</sup>;2)复合材料层间导电改性<sup>[17-18]</sup>;3)复合材料表面导电层构建<sup>[19-26]</sup>。郭妙才等<sup>[15]</sup>研究了石墨烯、碳纳米管杂化改性环氧树脂基体的CFRP的雷电防护性能,在2A区雷电流条件下,2 mm CFRP的损伤深度为0.2 mm,雷击后的平均弯曲强度保持率为87.4%。Zhu等<sup>[17]</sup>将银包覆的四针状氧化锌晶须粒子铺在碳纤维预浸料层间,在复合材料层间构建了三维导电网络,插入155 g/m<sup>2</sup>导电层的复合材料在100 kA(D波形)雷击下,相比未防护的复合材料,雷击损伤面积与深度分别降低了94.85%与58.82%。Bai等<sup>[19]</sup>将超顺排碳纳米管膜/石英纤维布铺覆在CFRP表面共固化成型,雷电试验结果表明,230 g/m<sup>2</sup>的复合防护层可以承受100 kA(D波形)的雷击。Das等<sup>[22]</sup>研究了不同厚度的聚苯胺导电涂层对复合材料的雷电防护性能,结果表明,345  $\mu\text{m}$  (380 g/m<sup>2</sup>)的涂层可以在

40 kA的雷击下有效保护CFRP,损伤深度约0.2 mm,剩余弯曲强度约为雷击前的83%。

尽管相关研究已取得显著进展,但是现有技术仍面临以下关键挑战:1)树脂基体导电改性需要对改性后的复合材料体系进行重新全面鉴定认证,成本高昂;2)改性材料的雷电防护效能与传统防雷击铜网还存在差距,减重效益不高;3)多数研究仍处于实验室规模制备阶段,在工程适用性方面仍面临较大障碍。

纳米防雷击表面膜是一类以低密度金属氧化物或纤维毡为载体,与金属化粒子、石墨烯、碳纳米管等多种导电纳米填料复合而成的雷电防护膜,可与树脂基复合材料共固化成型,工程实施难度较低,应用潜力较大。笔者选用了一种轻质纳米防雷击表面膜,该纳米表面膜以镀镍碳纤维毡为载体,与碳纳米管导电填料复合而成。为了系统评估该纳米表面膜在应用场景下的使用性能,结合飞机机翼复合材料部件的结构特征,采用国产T800级碳纤维环氧预浸料及其固化工艺,制备了纳米表面膜复材试验件,对其在2A雷击区下的内部损伤进行了定量表征,对雷击后的剩余压缩强度进行了测试,并与传统商用铜网表面膜进行了对比分析,为复合材料轻量化雷电防护设计提供了参考。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

高韧性高温固化环氧/碳纤维单向带预浸料:AC531/CCF800H,树脂牌号AC531,碳纤维牌号CCF800H,树脂质量分数为35%,中航复合材料有限责任公司;

高韧性高温固化环氧/碳纤维织物预浸料:AC531/CF8611,树脂牌号AC531,纤维织物牌号CF8611(由CCF800H碳纤维编织而成),树脂质量分数为40%,中航复合材料有限责任公司;

高温固化环氧复合材料用防雷击铜网表面膜(Cu-LSPF):J-375LSP-CU73,黑龙江省科学院石油化学研究院;

纳米防雷击表面膜(NLSPF):MG2002E-II,北京美格美沃科技有限公司。

### 1.2 主要仪器及设备

数字超声探头校正测量系统:MZ-04,北京欧宇航宇检测技术有限公司;

超声探伤仪:OmniScan iX,日本OLYMPUS公司;

万能力学试验机;LD26,深圳兰博三思公司。

### 1.3 复合材料试验件的制备

复合材料试验件使用 T800 级碳纤维环氧预浸料(牌号为 AC531/CCF800H, AC531/CF8611),采用热压罐成型工艺。试验件尺寸为 300 mm×300 mm,预浸料铺层根据复合材料部件的结构特点进行设计,见表 1,试验件厚度为 3.24 mm。在碳纤维预浸料贴模面首层手工铺贴防雷击铜网表面膜 Cu-LSPF 或者纳米防雷击表面膜 NLSPF (性能参数见表 2),分别命名为 CFRP-Cu-LSPF, CFRP-NLSPF;无防护的复合材料命名为 CFRP。复合材料完成铺贴后,按照预浸料常规固化工艺进行热压罐共固化成型,固化压力 0.65 MPa,全程抽真空,真空度不低于 0.08 MPa,固化温度为 185 °C/3 h,每种复合材料试验件制备 3 件。固化后的复合材料试验件用金刚石铣刀进行加工。

表 1 CFRP 的铺层设计

Tab. 1 Laminate design of CFRP

| Ply No. | Material      | Angle/(°) |
|---------|---------------|-----------|
| Ply.1   | AC531/CF8611  | 45        |
| Ply.2   | AC531/CCF800H | 0         |
| Ply.3   | AC531/CCF800H | 0         |
| Ply.4   | AC531/CCF800H | 45        |
| Ply.5   | AC531/CCF800H | 90        |
| Ply.6   | AC531/CCF800H | -45       |
| Ply.7   | AC531/CCF800H | 0         |
| Ply.8   | AC531/CCF800H | 45        |
| Ply.9   | AC531/CCF800H | 90        |
| Ply.10  | AC531/CCF800H | -45       |
| Ply.11  | AC531/CCF800H | 0         |
| Ply.12  | AC531/CCF800H | 0         |
| Ply.13  | AC531/CCF800H | -45       |
| Ply.14  | AC531/CCF800H | 90        |
| Ply.15  | AC531/CCF800H | 45        |
| Ply.16  | AC531/CCF800H | 0         |
| Ply.17  | AC531/CCF800H | -45       |
| Ply.18  | AC531/CCF800H | 90        |
| Ply.19  | AC531/CCF800H | 45        |
| Ply.20  | AC531/CCF800H | 0         |
| Ply.21  | AC531/CCF800H | 0         |
| Ply.22  | AC531/CF8611  | 45        |

表 2 Cu-LSPF 与 NLSPF 的性能参数

Tab. 2 Property parameters of Cu-LSPF and NLSPF

| Property                               | Cu-LSPF                | NLSPF |
|----------------------------------------|------------------------|-------|
| Areal density/(g·m <sup>-2</sup> )     | 219                    | 120   |
| Thickness/mm                           | 0.15 <sup>①</sup>      | 0.16  |
| Square resistance/(Ω·m <sup>-2</sup> ) | LWD:0.003<br>SWD:0.012 | 0.03  |

Notes: LWD is long intercept direction; SWD is short intercept direction; <sup>①</sup>: The thickness of Cu mesh in Cu-LSPF is 0.05 mm.

### 1.4 测试与表征

#### 1.4.1 复合材料的雷击试验

复合材料雷击试验按照 SAE ARP5416A《飞行器雷电试验方法》中规定的雷电流直接效应试验方法,由合肥航太电物理技术有限公司进行试验。试验件采用四边接地方式,并用 U 形夹固定在金属工装上,试验装置如图 1 所示。试验雷电流按 2A 区域规定进行,施加电流波形顺序为 D, B, C\*, 雷击试验后对试验件的损伤情况进行目视观察。

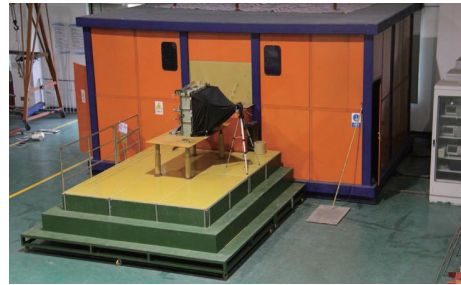


图 1 人工模拟雷击试验装置

Fig. 1 Artificial simulation lightning strike test device

#### 1.4.2 复合材料雷击后的超声无损检测

按照 GJB 1038.1A-2004《纤维增强复合材料无损检验方法第一部分超声波检验》对雷击后的复合材料试验件分别进行喷水式超声透射 C 扫与接触式脉冲反射法 A 扫超声检测,根据 C 扫试验结果确定雷击后试验件的损伤面积,根据 A 扫结果,以注入点所在面为基准确定雷击后试验件的损伤深度。

#### 1.4.3 复合材料雷击后的力学性能测试

对雷击后的复合材料试验件进行加工,按照 ASTM D7137-2017 进行压缩剩余强度测试。试样从试验件雷击中心部位裁取,试样尺寸为 150 mm×100 mm,每件试验件裁取 1 个压缩试样,每种试验件 3 件裁取 3 个压缩试样。试验装置如图 2 所示。



图 2 压缩剩余强度测试装置

Fig. 2 Test device of compressive residual strength

## 2 结果与讨论

### 2.1 雷击后复合材料试验件的形貌

对不同防护方式的复合材料试验件施加2A区雷击电流,对雷击后试验件的损伤情况进行目视观察与对比,不同防护方式的复合材料试验件雷击后的表面形貌如图3a-图3c所示。对试验件雷电注入面的损伤大小进行测量,对破坏形式进行观察,不同防护方式的复合材料试验件雷击后的目视损伤情况见表3。

结果表明,未防护的CFRP试验件在注入点发生基材的烧蚀损伤,表层损伤范围约 $113.7\text{ cm}^2$ ,树脂基体在雷击的瞬时高温下发生汽化,大量碳纤维拔出,复合材料出现严重的分层、断裂损伤;CFRP-Cu-LSPF试验件,表面的铜网发生局部烧蚀,烧蚀面积约 $130.7\text{ cm}^2$ ,铜网在瞬时高温下熔化,表面有小孔,碳纤维轻微起毛,但板材结构良好,未出现目视可见的分层、断裂损伤;CFRP-NLSPF试验件,表面的纳米防护膜发生局部烧蚀损伤,烧蚀面积约 $154.7\text{ cm}^2$ ,纳米防护膜在雷击瞬时高温下局部烧蚀,未观察到CFRP出现分层、断裂等损伤。对不同防护方式的试验件目视损伤情况进行对比,2A区域的雷电试验电流对无防护的复合材料造成了严重的损伤,Cu-LSPF与NLSPF均具有良好的雷电防护效果。

### 2.2 雷击后复合材料试验件的内部损伤

雷击后的复合材料试验件的表面形貌无法反映复合材料内部的损伤情况,为了进一步表征不同防护方式的复合材料试验件雷击后的内部损伤,采用超声透射法C扫与超声反射法A扫对试验件进行了测试,不同CFRP试验件雷击后的超声C扫描图像如图4所示。对超声C扫图像进行定量分析,计算得到试验件雷击后的整体损伤面积,利用超声反射法A扫检测得到试验件雷击后的损伤深度,图5

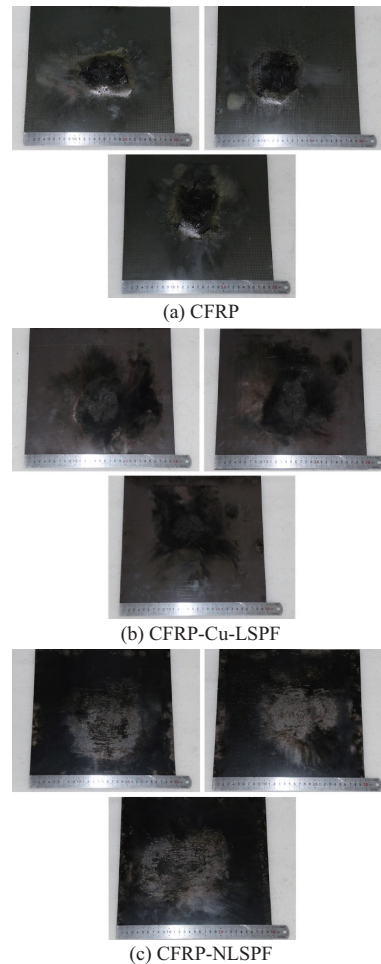


图3 不同CFRP试验件雷击后的表面形貌

Fig. 3 Surface morphology of different CFRP samples after lightning strike

为不同CFRP试验件雷击后的内部损伤定量数据。

结果表明,未防护的CFRP试验件雷击后的内部损伤非常严重,中心区域处无法检测到超声信号,整体损伤面积约 $17\,504\text{ mm}^2$ ,是目视损伤面积的1.5倍,损伤深度达到 $1.83\text{ mm}$ ,占复合材料整体厚度的56.5%;CFRP-Cu-LSPF试验件,雷电注入点附近出现了一定的损伤,整体损伤面积约 $309\text{ mm}^2$ ,损

表3 不同CFRP试验件雷击后的目视损伤情况

Tab. 3 Visual damage condition of different CFRP samples after lightning strike

| Sample       |   | Visual damage condition                                  | Damage area                       |
|--------------|---|----------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| CFRP         | 1 | CFRP substrate ablation damage at lightning entry point  | $11\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ |
|              | 2 |                                                          | $10\text{ cm}\times 11\text{ cm}$ |
|              | 3 |                                                          | $11\text{ cm}\times 11\text{ cm}$ |
| CFRP-Cu-LSPF | 1 | Cu mesh ablation damage at lightning entry point         | $12\text{ cm}\times 12\text{ cm}$ |
|              | 2 |                                                          | $12\text{ cm}\times 14\text{ cm}$ |
|              | 3 |                                                          | $8\text{ cm}\times 10\text{ cm}$  |
| CFRP-NLSPF   | 1 | Protection film ablation damage at lightning entry point | $12\text{ cm}\times 13\text{ cm}$ |
|              | 2 |                                                          | $10\text{ cm}\times 14\text{ cm}$ |
|              | 3 |                                                          | $12\text{ cm}\times 14\text{ cm}$ |

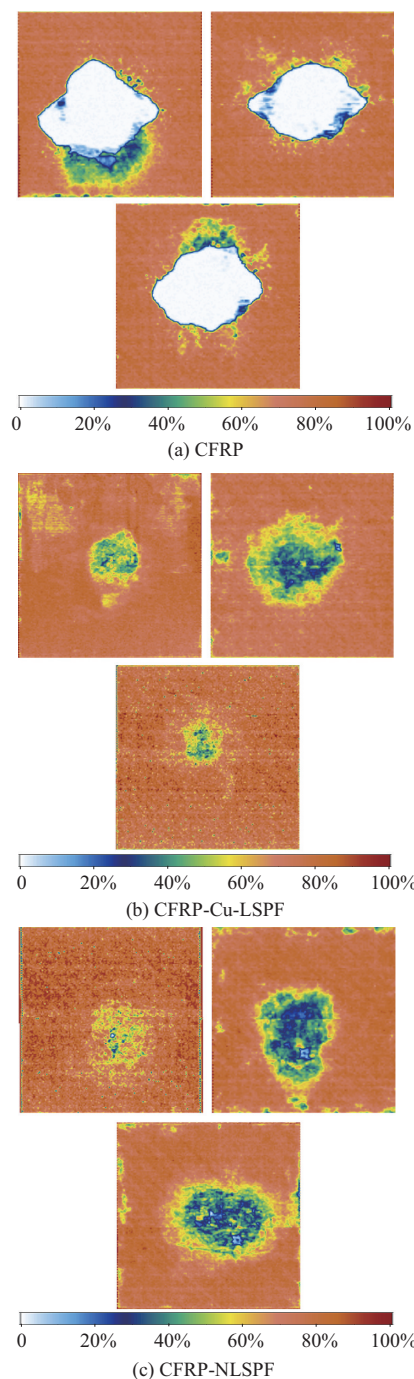


图4 不同CFRP试验件雷击后的超声扫描图像

Fig. 4 Ultrasound scan image of different CFRP samples after lightning strike

伤深度约0.07 mm,相比未防护的CRFP损伤面积减少98.2%,损伤深度下降96.2%,具有优异的雷电防护效果;CFRP-NLSPF试验件,在雷电注入点附近出现了一定的损伤,整体损伤面积约1 429 mm<sup>2</sup>,损伤深度约0.23 mm,相比未防护的CRFP损伤面积减少91.8%,损伤深度下降87.4%,表明NLSPF具有较强的雷电防护效果。将试验件超声内部损伤结果与

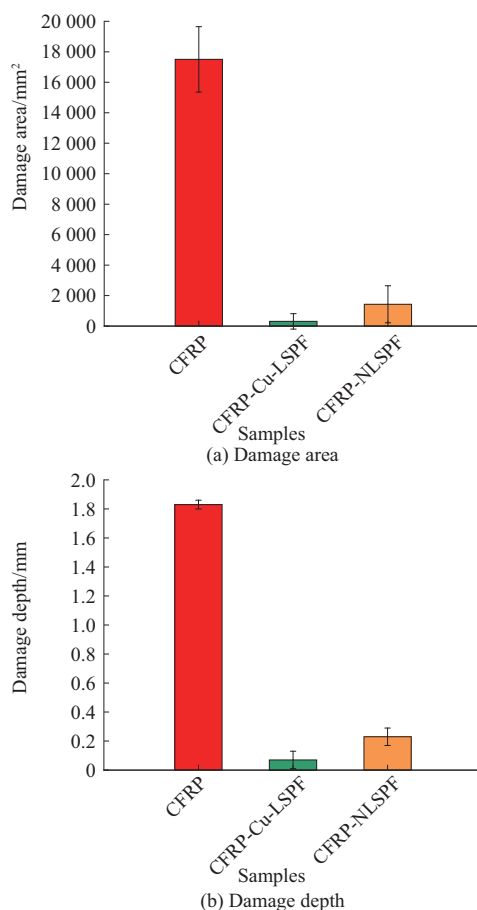


图5 不同CFRP试验件雷击后的内部损伤结果

Fig. 5 Internal damage results of different CFRP samples after lightning strike

目视损伤结果进行对比分析可以发现,未防护的复合材料在2A区雷电作用下,超声损伤面积大大超出目视观察结果,且深度方向的损伤超过50%;而CFRP-Cu-LSPF与CFRP-NLSPF试验件,雷击损伤主要发生在表面膜附近,超声损伤面积小于目视损伤面积,复合材料深度方向的损伤较低。

### 2.3 雷击后复合材料试验件的力学性能

以上结果表明,雷击会对复合材料的表面与内部结构造成严重的损伤,从而对复合材料的力学性能造成损害,可能导致复合材料构件失效,影响飞行安全。为了定量评估雷击对不同复合材料试验件力学性能的影响,对不同防护方式的复合材料试验件进行了压缩剩余强度试验。从雷击损伤中心部位切割试样(150 mm×100 mm)进行压缩剩余强度测试(ASTM D7137-2017),试验结果如图6所示。

由图6可看出,未防护的CFRP试验件,雷击后压缩强度降低为142.1 MPa,与雷击前复合材料压缩强度进行对比,压缩强度保持率为54.2%;CFRP-

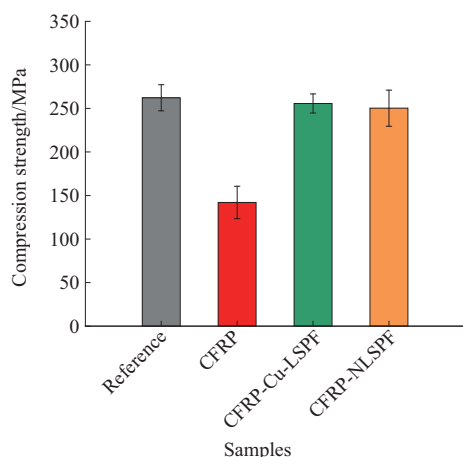


图6 不同复合材料试验件雷击后的压缩剩余强度

Fig. 6 Compressive residual strength of different composite samples after lightning strike

Cu-LSPF 试验件,雷击后压缩强度为 255.7 MPa,压缩强度保持率约为 97.5%,相比未防护的 CFRP 提高 79.9%;CFRP-NLSPF 试验件,雷击后压缩强度为 250.3 MPa,压缩强度保持率约为 95.4%,相比未防护的 CFRP 提高 76.1%。以上试验结果与试验件的内部损伤结果一致,CFRP-Cu-LSPF 与 CFRP-NLSPF 试验件在 2A 区雷击后,压缩强度保持率在 90% 以上,满足工程应用需求,表明 Cu-LSPF 与 NLSPF 均具有优秀的雷电防护效果,NLSPF 在工程应用上可以替代 Cu-LSPF。此外,从减重的角度考虑,NLSPF 的面密度为 120 g/m<sup>2</sup>,Cu-LSPF 的面密度为 219 g/m<sup>2</sup>,NLSPF 的面密度仅为 Cu-LSPF 的 54.8%,单位面积减少质量约为 99 g/m<sup>2</sup>,在航空领域具有较大的应用价值。

纳米表面膜优异的雷电防护性能是通过在复合材料表面构建高导电表面层来实现的。对于无防护的 CFRP 试验件,表面没有导电层,100 kA 的雷击电流直接作用于复合材料,在短时间内产生巨大的热量与热应力,造成树脂升华并产生冲击波,在复合材料深度方向上造成严重破坏;对于 CFRP-NLSPF 试验件,由于该纳米表面膜的表面方阻低至 0.03 Ω/□,在雷击时大部分电流被表面层疏导释放,极少部分作用于复合材料,从而保护了 CFRP 结构层。

### 3 结论

(1)制备了纳米表面膜防护的复合材料试验件,在 2A 区雷击下,复合材料损伤面积约 1 429 mm<sup>2</sup>,损伤深度约 0.23 mm,相比未防护的 CFRP 损伤面积减少 91.8%,损伤深度下降 87.4%,有效降低了复合材

料的雷击损伤。

(2)纳米表面膜防护的复合材料试验件,在 2A 区雷击下,压缩强度保持率约为 95.4%,相比未防护的 CFRP 提高 76.1%,大幅提升了复合材料雷击后的剩余强度。

(3)纳米防雷击膜对 2A 区雷电防护效果与商用铜网防雷击膜接近,但面密度仅为铜网防雷击膜的 54.8%,单位面积减重约 99 g/m<sup>2</sup>,在工程应用上可以替代铜网防雷击膜,并且可以显著降低雷电防护层的重量。

### 参考文献

- [1] 单忠德,宋文哲,范聪泽,等.面向 2035 年复合材料构件精确制造发展战略研究[J].中国工程科学,2023,25(1):113-120.  
SHAN Zhongde, SONG Wenzhe, FAN Congze, et al. Development strategy for precision manufacturing of composite components facing 2035[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1):113-120.
- [2] 邢丽英,李亚锋,陈祥宝.先进复合材料在航空装备发展中的地位与作用[J].复合材料学报,2022,39(9):4 179-4 186.  
XING Liying, LI Yafeng, CHEN Xiangbao. Status and role of the advanced composite materials in the development of aviation equipment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4 179 - 4 186.
- [3] 徐林,刘传军,赵崇书.复合材料在民用飞机应用与发展趋势[J].复合材料科学与工程,2024(9):98-104.  
XU Lin, LIU Chuanjun, ZHAO Chongshu. Application and development trends of composite materials in civil aircraft[J]. Composites Science and Engineering, 2024(9):98-104.
- [4] 刘福佳,李群芳,潘钦,等.某型金属铜网对复合材料结构雷电防护效果的仿真与试验验证[J].材料导报,2025,39(S1):650-654.  
LIU Fujia, LI Qunfang, PAN Qin, et al. Simulation and experimental verification of lightning protection effect of a certain type of metal copper mesh on composite structure[J]. Materials Reports, 2025, 39(S1):650-654.
- [5] 李树,孙晋茹,郭永强,等.CFRP 复合材料雷电冲击力测量方法[J].复合材料学报,2025,42. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20241219.001.  
LI Shu, SUN Jinru, GUO Yongqiang, et al. Method of measuring the mechanical impact loads of lightning on CFRP composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20241219.001.
- [6] 黄鑫,文永洪,李严,等.复合材料层压板雷电防护设计试验与验证[J].复合材料科学与工程,2022(5):98-102.  
HUANG Xin, WEN Yonghong, LI Yan, et al. Lightning strike design test and verification of composite laminates[J]. Composites Science and Engineering, 2022(5):98-102.
- [7] 徐雯婷,巢昺轩,李智勇,等.国产防雷击铜网在直升机上的应用研究[J].科技创新与应用,2025,15(12):60-63,67.  
XU Wenting, CHAO Bingxuan, LI Zhiyong, et al. Study on the

- application of domestic lightning protection copper mesh in helicopter[J]. *Technology Innovation and Application*, 2025, 15(12): 60–63, 67.
- [8] LANGOT J, GOURCEROL E, SERBESCU A, et al. Performance of painted and non-painted non-woven nickel-coated carbon fibers for lightning strike protection of composite aircraft[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 175. DOI: 10.1016/j.compositesa.2023.107772.
- [9] WANG B, ZHU Y S, MING Y K, et al. Understanding lightning strike induced damage mechanism of carbon fiber reinforced polymer composites: An experimental study[J]. *Materials & Design*, 2020, 192. DOI:10.1016/j.matdes.2020.108724.
- [10] KUMAR V, YOKOZEKI T, KARCH C, et al. Factors affecting direct lightning strike damage to fiber reinforced composites: A review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 183. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107688.
- [11] DAS S, YOKOZEKI T. A brief review of modified conductive carbon/glass fibre reinforced composites for structural applications: Lightning strike protection, electromagnetic shielding, and strain sensing[J]. *Composites Part C: Open Access*, 2021, 5. DOI: 10.1016/j.jcomc.2021.100162.
- [12] 李渔, 司晓亮, 黄业园, 等. 碳纤维复合材料雷击损伤及防护试验与仿真研究[J/OL]. *复合材料科学与工程*, 2024: 1–8. (2024-06-26). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=BLGF20240624003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.  
LI Yu, SI Xiaoliang, HUANG Yeyuan, et al. Experimental and simulation study on lightning damage and protection of carbon fiber composites[J/OL]. *China Industrial Economics*, 2024: 1–8. (2024-06-26). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=BLGF20240624003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [13] LIN W H, WANG Y Q, YOUSEFPOUR K, et al. Evaluating the lightning strike damage tolerance for CFRP composite laminates containing conductive nanofillers[J]. *Applied Composite Materials*, 2022, 29(4):1 537–1 554.
- [14] ZHOU Y, RAGHU S N V, KUMAR V, et al. Simulated lightning strike investigation of CFRP comprising a novel polyaniline/phenol based electrically conductive resin matrix[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 214. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.108971.
- [15] 郭妙才, 黑艳伟, 李斌太, 等. 石墨烯/碳纳米管共改性碳纤维复合材料的结构、力学、导电和雷击性能[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(9):4 354–4 365.  
GUO Miaocai, HEI Yanwei, LI Bintai, et al. Structure, mechanical property, electrical conductivity and lightning strike damage behavior of graphene/carbon nanotube co-modified CFRPs[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(9):4 354–4 365.
- [16] 肖尧, 张献逢, 董俊, 等. 碳纤维复合材料基体改性/铜网组合雷击防护性能的研究[J]. *宇航材料工艺*, 2023, 53(3):68–74.  
XIAO Yao, ZHANG Xianfeng, DONG Jun, et al. Lightning protection performance of carbon fiber composite matrix modification/copper mesh combination[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2023, 53(3):68–74.
- [17] ZHU H X, FU K K, HUANG T L, et al. Highly conductive CFRP composite with Ag-coated T-ZnO interlayers for excellent lightning strike protection, EMI shielding and interlayer toughness[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 279. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111448.
- [18] LI K N, CHENG X Q, ZHANG X L, et al. Study on compressive performances of carbon nanotube film-protected composite laminates after lightning strike[J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(8): 6 970–6 984.
- [19] BAI Y X, ZHU M Q, WANG S J, et al. Superaligned carbon nanotube film/quartz fiber composites towards advanced lightweight lightning strike protection[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 173. DOI: 10.1016/j.compositesa.2023.107617.
- [20] SERBESCU A, BRASSARD D, LANGOT J, et al. Silver-based conductive coatings as lightning strike protection for composite aircraft[J]. *Results in Materials*, 2023, 19. DOI: 10.1016/j.rinma.2023.100427.
- [21] DYDEK K, BOCZKOWSKA A, KOZERA R, et al. Effect of SWCNT-tuball paper on the lightning strike protection of CFRPs and their selected mechanical properties[J]. *Materials*, 2021, 14 (11). DOI:10.3390/ma14113140.
- [22] DAS S, KUMAR V, LEE J, et al. Thickness threshold study of polyaniline-based lightning strike protection coating for carbon/glass fiber reinforced polymer composites[J]. *Composite Structures*, 2022, 280. DOI:10.1016/j.compstruct.2021.114954.
- [23] ZHU H X, FU K K, YANG B, et al. Nickel-coated nylon sandwich film for combination of lightning strike protection and electromagnetic interference shielding of CFRP composite[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 207. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.108675.
- [24] XIA Q S, MEI H, ZHANG Z C, et al. Fabrication of the silver modified carbon nanotube film/carbon fiber reinforced polymer composite for the lightning strike protection application[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 180. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107563.
- [25] DUONGTHIPTHEWA A, LU M Y, DU K, et al. Experimental and numerical simulation of lightning damage development on composites with/without a carbon-based protection layer[J]. *Composite Structures*, 2021, 260. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113452.
- [26] 席佳琦, 戴亚光, 夏雷, 等. 轻质高导电金属化碳纳米管薄膜的制备及其雷击防护性能[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(1):196–206.  
XI Jiaqi, DAI Yaguang, XIA Lei, et al. Preparation and lightning strike protection properties of lightweight high conductive metalized carbonnanotube film[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(1):196–206.