

# Design and Performance Optimization of Composite Layer Based on Lightning Protection Film

Yingfei Huo Liangdian Liu Qian Nan Lulu Zhang Dongpei He

Yangzhou Pinghang Aviation Power Technology Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 225200, China

## Abstract

To address the vulnerability of composite materials to lightning strikes in aerospace applications, this study investigates the structural design and performance optimization of lightning protection composite layers. By strategically selecting high-performance matrices and conductive materials, a multi-layer composite structure was developed, achieving coordinated enhancement of both shielding efficacy and mechanical properties. The results demonstrate that the optimized lightning protection composite layer not only significantly improves the material's lightning resistance but also enhances its overall strength and durability. This research provides robust technical support and theoretical foundations for safety protection of critical components in advanced equipment and the expansion of composite material applications.

## Keywords

lightning protection film; composite material; structural design; performance optimization; lightning resistance capability

# 基于防雷击膜的复合材料复合层设计与性能优化

火盈飞 刘良点 南茜 张璐璐 贺栋培

扬州平航航空动力技术有限公司, 中国·江苏扬州 225200

## 摘要

针对复合材料在航空航天领域易受雷击影响的问题, 本文开展了防雷击膜复合层的结构设计与性能优化研究。通过合理选用高性能基体与导电材料, 构建多层复合结构, 实现了材料屏蔽效能与力学性能的协调提升。研究表明, 优化的防雷击复合层不仅显著增强了材料的抗雷击能力, 还改善了其整体强度与耐久性。本研究为高端装备关键部位安全防护和复合材料应用拓展提供了有力技术支撑和理论依据。

## 关键词

防雷击膜; 复合材料; 结构设计; 性能优化; 抗雷击能力

## 1 引言

伴随航空航天技术的进步, 复合材料在航空器和航天器的结构部位中获得普遍使用, 然而其在高空飞行时易遭雷击等环境因素作用, 造成性能减退乃至失灵, 进而影响设备安全。当前的防雷击措施大多依托表面涂层或者嵌入导电材料, 然而难于兼备防护效果与力学性能, 常会造成强度减弱或者耐久性不够。变成迫切需要处理的技术难题。针对上述问题, 本文提出了一种依托防雷击膜的新型复合层设计方案, 借助多层结构改进, 恰当选择基体与导电材料, 达成复

合材料的防雷击性能和力学性能同时提高。通过试验得出的结果显示, 这项新设计大大加强了材料抵抗雷击的能力, 同时也让材料的强度和耐久性表现得到了优化提升。研究人员利用复合层结构的优化方法, 成功突破了传统防雷技术遇到的限制难题, 给航空航天领域中复合材料的可靠防护和高端应用提供了全新的解决思路 and 理论支持, 展现了非常重要的创新价值和广阔的未来应用空间。

## 2 防雷击膜复合材料的发展现状与需求

### 2.1 航空航天领域对防雷击性能的技术要求

航空航天行业快速进步导致性能更好安全标准更高, 雷击防护水平已经成为关键技术指标之一。飞机处在高空位置容易遇到雷电打击, 雷电打击会破坏飞机结构完整程度电子仪器安全水平产生很大损害。切实提升复合材料抵御雷击能力变成航空航天工程重要研究项目。雷击防护技术需求不单单针对雷电冲击进行直接阻挡, 还包含材料本身稳定程度耐久程度效果长期保持能力。航空航天行业需要抗雷击复合

**【基金项目】**扬州市科技计划产业前瞻与共性关键技术项目“飞机轻量化防雷击表面膜研制”(项目编号: YZ2023025)。

**【作者简介】**火盈飞(1989-), 男, 中国江苏人, 本科, 工程师, 从事复合材料研究。

材料必须具备优秀电磁屏蔽效果，不能因为增加防护层给飞机重量结构强度带来不利作用。材料务必可以在极端温度和气候条件下维持功能性，不妨碍飞行器的操作效率及安全性。这就关系到对复合材料结构和导电机理的详尽探究，还有对材料在实际应用中的可靠性验证，属于保证飞行器雷击防护性能合格的关键技术要求。优质的防雷击膜设计可以为飞行器给予更完善的防护，保证航空航天器材在恶劣环境中的持久可靠运作。

## 2.2 现有防雷击膜复合材料的技术瓶颈

现在防雷击膜复合材料性能和应用遇到一些技术困难。导电能力以及屏蔽效果还没有达到强大雷击环境里面完全保护要求，主要原因在于导电材料分布不均匀，材料之间连接效果差，最终造成屏蔽能力受到严重限制。力学性能方面，传统复合材料经常需要在结构强度和韧性之间艰难选择，因此限制材料复杂受力环境里面长期使用能力。防雷击膜复合材料制作过程特别复杂，不同材料匹配性很差，严重阻碍大规模生产可能性。制作过程参数出现稍微偏差，就会造成产品性能不稳定，影响实际使用效果。目前研究大部分只关注某一种性能提升，忽略屏蔽效果、力学性能、耐久性三者结合综合分析，迫切需要制定更加全面改进方案和性能测试方法，解决这些现有问题。

## 2.3 高端装备防护的应用挑战

高端装备对防雷击性能的需求越来越提升，特别是于航空航天领域，其对材料的耐久性、可靠性和轻量化特性带来了更严格要求。当前复合材料在达到力学性能的通常很难同时具备电磁屏蔽效能，这于雷击多发的环境中变成明显挑战。怎样于未提高装备重量的前提下，改善抗雷击性能同样为重大难题。此类因素制约了高端装备在严苛环境中的安全防护能力，迫切需要借助创新材料与结构设计以攻克。

## 3 防雷击膜复合层材料体系与结构构建

### 3.1 基体与导电材料的选择与配比

防雷击膜复合层材料体系当中，基体和导电材料选择以及比例搭配直接决定材料性能能不能明显提高。基体材料必须拥有优秀力学性能和热稳定性，这样才能适应航空航天应用非常严格环境。通常选用环氧树脂、聚酰亚胺或者其他高分子材料来作为基体，确保复合材料保持良好韧性和持久耐用性。导电材料主要包含金属纤维、碳纳米管、石墨烯这些种类，高导电性能成为最重要要求。导电相选择直接影响复合层屏蔽效果，必须根据具体应用目标需求来进行合理选择。材料比例搭配过程当中，需要把导电性能提高和力学性能保持两者平衡，通过多次实验找到最佳比例，确保复合材料高强度性能和耐冲击性能都得到明显提高。基础材料以及导电材料经过改善之后共同使用，可以提高复合材料整体性能，给航空航天防雷击提供可靠支持。

### 3.2 多层复合结构的集成原理

多层复合结构融合原理重点研究制造拥有很好屏蔽效

果和很强力学性能防雷击膜复合层。结构设计过程里面，高性能基体材料跟导电组分巧妙结合，制造出功能梯度分布结构层。导电层复合层表面合理布置，有效减弱电流密度集中，从而完成快速导流和减少损伤目的。每层厚度跟材质比例变成融合设计核心内容，这些因素一起决定复合材料雷击事件里面反应路径和损伤控制能力。复合层不同材料之间需要提高界面结合性能，确保结构整体力学稳定性。材料界面和内部结构协调设计，能够提高复合层抵抗雷击干扰时候整体耐受能力和热稳定性。这种融合原理提供防护性能技术支持，同时推动复合材料航空航天领域广泛应用。

## 3.3 屏蔽效能与力学性能的协同机制

设计防雷击膜复合层时，平衡屏蔽效果和机械性能属于主要目标。屏蔽效果代表材料面对雷击过程中电磁干扰的抵抗能力。选用高导电材料，比如金属填料，能够明显提高材料电磁屏蔽能力。保持整体结构机械性能，基体材料需要拥有高强度和韧性，承受雷击造成机械冲击和热应力。多层复合结构设计同时考虑各层材料电磁屏蔽特点和力学支撑功能，通过层间优化提升整体性能。这种平衡方式保证材料复杂环境里面拥有抗雷击并且可靠防护性能。

## 4 防雷击膜复合层性能提升策略

### 4.1 雷击防护能力的优化路径

提升防雷击膜复合层抵抗雷击能力，需要依靠材料性能改善以及结构设计两个方面。合理选择导电能力优秀并且稳定性强的导电材料，成为提高雷击防护效果最关键部分。导电能力强材料能够显著加快电荷快速转移和扩散能力，降低雷击能量集中程度，减轻雷击造成材料损伤程度。复合层里面基体材料选择直接影响吸收雷击能力以及承受损伤能力。基体需要拥有优秀电绝缘能力、耐高温能力以及力学稳定性，确保结构面对雷击产生高温时候保持完整。采用多层复合结构设计方式，实现材料厚度、电导率、机械性能最佳组合。借助改进层间导电路径，达成电流的高效分导和消散，减小雷击作用对于某个单层的损伤几率。在此基础之上，加入纳米级界面增强填料，提升层间结合强度，更进一步增强整体性能。依据雷击多物理场耦合分析，构建面向复合层设计的模型优化方法，能够给性能的提升给予理论支撑。

### 4.2 强度与耐久性的提升方法

提高复合材料强度和耐久性属于增强防雷击能力最重要部分。挑选基体材料必须注重力学性能和稳定性，高分子材料跟金属基体结合可以有效增加复合层结构强度和抵抗疲劳性能。加入纳米增强材料比如碳纳米管或者石墨烯，既可以提高材料强度，又可以改善抗磨损能力。复合层结构设计必须考虑层间粘接强度，采用适当界面处理技术增加不同层材料之间结合力，从而提高整体耐久性。导电材料分布优化必须保证雷击能量快速散开从而减少结构损伤。改善热机械性能对于材料在恶劣环境长期保持稳定非常重要。导电网络稳定程度和材料热膨胀系数必须特别关注，从而保证材料

在复杂条件保持稳定运行。

### 4.3 复合层服役性能的可靠性保障

选用材料结构使用过程这些环节全面考虑非常重要。挑选稳定性高基体材料加上耐久性好导电材料,确保复合层实际使用过程里面能够长时间保持优秀性能。设计合理层状结构能够减少环境应力带来损害,提高抵抗雷击能力。工程使用时候需要进行严格性能检测加上可靠性检查,确保材料复杂气候环境里面保持稳定状态保持安全状态。结合理论计算加上实验检验,构建可靠评估方法,用于指导材料实际应用以及推广使用。

## 5 防雷击膜复合层在飞机轻量化防护中的工程应用

### 5.1 关键部位轻量化防雷击表面膜应用需求

飞机用减轻重量的防雷击表层薄膜,关键部位使用要求重点体现在两个地方,一是把结构重量降下来,二是把防雷保护能力提上去。航空航天领域里面,设备零件重量大小直接关系到飞机飞得省不省油、效率高不高,所以必须选用特别轻的材料。但是重量很轻的材料一旦被雷击打中,大多数情况下防雷保护效果很差,几乎挡不住雷电。为了让飞机零件既轻又能很好地防雷,就要使用一种新型的防雷击薄膜复合材料。这种新型复合材料可以明显减小零件整体重量,同时拥有非常好的导电性能和结构稳定性,雷电打过来的时候能快速把雷电流安全导走,从而大幅降低飞机机身受到的损伤和破坏。关键部位通常受到飞行环境复杂作用影响,需要表面膜具备出色耐久性能和适应能力,保持长期稳定工作状态。技术要求驱动复合材料设计朝着更精密方向发展并且实现多种功能结合,确保不增加飞机整体重量情况下提高安全水平。通过这次应用需求分析,进一步清楚认识到轻量化防雷击膜在高端装备里面实现高效保护的重要性。

### 5.2 技术推广与应用前景

防雷击膜复合层航空航天领域工程应用具备广阔前景和重要价值。技术推广可以很好满足飞机减轻重量同时保持高安全防护两方面要求。利用经过科学设计的防雷击复合结构,能够保持整机重量基本不变情况下,大幅提升关键部位抵御雷击能力,这种做法非常符合当今航空器追求高性能低油耗发展目标,意义十分重大。应用前景主要体现在高端装备多个领域持续拓展。防雷击膜复合层拥有优秀屏蔽效果和突出力学特性,为技术用于商用飞机、无人机以及军用航空器表面防护提供可靠支持。技术逐步成熟并且实现部件化生

产,也为未来实现大规模工业生产创造必要条件。技术大概率发挥关键作用,进一步推动航空航天领域安全标准提升,并且扩大复合材料在先进装备防护方面应用深度和覆盖范围。

### 5.3 推动复合材料防护技术发展的理论价值与实践意义

阻止雷电击穿多层结构研究和应用给复合材料防护技术发展带来关键理论依据以及实用经验借鉴。采用新式材料搭配结合层层堆叠方式制造,显著提高材料阻挡性能和力学强度,达到航空航天领域减少重量和高安全标准两方面要求同时实现。这个成果不但推动复合材料在苛刻环境应用范围扩大,而且促进高端装备关键安全部位结构改进,对增加设备服役寿命和提高可靠性水平带来很大好处。这项研究给防护技术不断发展建立牢固科学根基。

## 6 结语

这项工作面对飞机航天复合材料需要防雷击保护的要求,认真完成防雷击膜复合层结构设计以及性能提高任务。利用优秀基体加上导电材料共同组合,实现复合层材料屏蔽效果和力学性能显著提高,给雷击情况重要设备提供可靠保护。测试数据清楚显示,经过提高复合层材料不但大幅加强抵抗雷击能力,而且提高整体力学强度和耐久能力,实现结构功能跟防护能力很好结合。工作存在一定不足,实际使用情况复合材料长期保持稳定情况以及多尺度损伤发展过程需要继续深入探索,雷击能量多种复杂变化引起微观反应机理仍然缺乏完整研究。性能优化过程中参数选择和材料界面设计仍需更深入精准化研究。未来能从多尺度模拟与实验验证、材料界面工程及复合层智能化适应等方向开展详尽工作,促进防雷击膜复合材料在更广泛、高端应用领域达成超越,并且为其持久可靠使用供给科学依据和技术保障。

### 参考文献

- [1] 奉晔.浅谈船舶防雷击[J].天津航海,2021,(02):40-42.
- [2] 肖尧,李斌,刘晓山,张献逢,董俊,魏小龙.碳纤维复合材料电导率改性及抗雷击性能[J].航空材料学报,2021,41(01):74-82.
- [3] 肖万宝,李洪峰,曲春艳,王德志,张杨,杨海冬,王永强.高韧性防雷击复合材料表面膜研究[J].航空科学技术,2023,34(01):105-110.
- [4] 王金莲,马闪红,廖可,高慧聪,毛萍萍.进口防雷击复合胶膜环境适应性研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2021,(02):0322-0323.
- [5] 张荣鑫,田世成,纪涛.VLCC复合材料风帆防雷击与静电标准探讨[J].中国船检,2023,(03):65-70.