

Optimization of Conductive Performance and Structural Design of Lightning Protection Composite Film

Liangdian Liu Qian Nan Dongpei He Yingfei Huo Lulu Zhang

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

Abstract

With the increasing demand for lightweight and performance improvement of aircraft materials, lightning protection safety has become an important issue in structural design. This article focuses on the application of composite films in aircraft lightning protection, starting from the optimization of material conductivity, and comprehensively analyzing the influence of structural parameters on the conductivity path and film performance. By designing the thickness, interface structure, and material arrangement of the film layer reasonably, the composite film has significantly improved its current dispersion and shielding ability while ensuring mechanical strength. The optimization results show that structural design plays a key role in improving the overall lightning protection function of composite films, providing theoretical basis and technical support for the innovation and application of aviation and aircraft safety protection materials.

Keywords

lightning protection composite film; Optimization of conductivity performance; Aviation aircraft; Current dispersion capability

防雷击复合膜的导电性能优化结构设计

刘良点 南茜 贺栋培 火盈飞 张璐璐

扬州平航航空动力技术有限公司, 中国·江苏扬州 225200

摘要

随着航空飞行器材料的轻量化与性能提升需求不断增加, 防雷击安全性成为结构设计的重要课题。本文聚焦于复合膜在飞行器防雷击中的应用, 从材料导电性能优化入手, 综合分析了结构参数对导电路径及膜层性能的影响。通过合理设计膜层的厚度、界面结构及材料排列方式, 实现了复合膜在保证机械强度的同时, 显著提升其电流分散和屏蔽能力。优化结果显示, 结构设计对于提升复合膜整体防雷击功能具有关键作用, 为航空飞行器安全防护材料的创新与应用提供了理论依据与技术支持。

关键词

防雷击复合膜; 导电性能优化; 航空飞行器; 电流分散能力

1 引言

航空飞行器于高空飞行进程中常常遭遇繁杂的电磁环境, 特别是雷击事件对于飞行器结构安全形成了巨大威胁。复合膜凭借其出色的力学性能和优良的设计可塑性, 逐步变成防雷击技术的关键研究对象。本文全面解析不同结构参数对于复合膜导电路径和整体性能的交互影响, 意在给出一种既要保证机械强度, 同时可以明显提高防雷击能力的一类优化结构设计方案, 给航空飞行器防护材料的创新供给理论基

础和工程指导。

2 防雷击复合膜在航空飞行器中的应用现状

2.1 复合膜材料的基本特性与发展趋势

复合膜材料已经变成飞机防雷击这个领域里面非常关键的功能材料, 因为它拥有独特性能所以得到大家广泛关注。最核心优势就是导电性能很强、力学性能非常好并且环境适应性能也很优秀。通过认真选择合适材料并且合理设计结构, 复合膜能够在遭受雷击时候快速把电流分散出去, 从而明显减少高压电弧对飞机机身造成的局部破坏。重量很轻这个优点完全满足飞机需要减轻整体重量的要求, 这样就能让飞机整体飞行性能变得更好。目前研究工作正朝着功能更多样、制作更精密方向发展, 主要包括把多层结构设计得更好、把不同种类材料结合起来使用、把纳米技术加进去, 这些做法都大幅度增加了材料在导电性能、电磁屏蔽性能以及机械强度这些方面的提升空间。

【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】刘良点(1989-), 男, 中国安徽人, 硕士, 工程师, 从事复合材料研究。

2.2 现有防雷击复合膜的功能局限

目前使用的防雷击复合膜存在明显的功能缺点，具体体现在导电能力跟机械强度很难同时做到很好，而且电流分散能力比较弱。有些复合膜材料导电路径设计的不够合理，所以雷电流通过的时候分布很不均匀，容易出现局部地方温度升得特别高或者发生烧坏熔化的情况。膜层厚度厚薄不一致，或者跟基材表面粘合得不够牢固，就会导致界面出现脱落分开或者整体结构受到破坏。复合膜面对复杂电磁环境的时候，屏蔽效果和使用寿命都还不够理想。这些缺点严重影响了复合膜在高性能飞行器结构上面的大量应用，必须尽快通过调整材料成分和重新设计结构的方式来改进，才能真正满足实际使用的各种要求。

3 复合膜导电性能影响因素

3.1 材料成分对导电性能的作用

影响复合膜导电能力的最关键因素属于材料组成成分，不同种类材料本身具备的电导率高、分子排列方式还有接触面具体情况会直接决定导电通道能不能顺利形成以及电流通过时候效率到底有多高。制作复合膜整个过程里面，把高导电能力材料比如金属纳米颗粒、碳纳米管、石墨烯这些东西加进去，就能很显著地把整层膜导电能力提升上去。这些高导电能力材料依靠搭建出效率很高导电网络，给电流创造出电阻特别小通道，这样就大大增强复合膜遇到雷击时候把电流分散开的能力。复合材料里面基体材料跟导电填料之间相容程度好坏直接决定接触面情况优秀还是糟糕，相容程度特别好就能帮助确保导电网络分布得非常均匀，让整层膜导电能力变得更加稳定可靠。选择材料成分的时候必须同时考虑它的机械强度和适应各种环境的能力，要避免导电成分加得太多比例过大，这样做会使整个结构的强度变得比较差。通过改变和调整所用材料的种类以及它们之间的具体比例关系，就可以让整体性能得到比较大的提高。

3.2 膜层厚度与界面结构优化

膜层厚度大小和界面结构情况属于影响复合膜导电性能改善设计最关键的两个因素。关于膜层厚度这个部分，设计厚度合适就能同时满足电流容易通过的要求和材料需要足够结实的要求，膜层做得太厚就会让整体电阻变大，电流通过起来更困难，膜层做得太薄又会让挡住电磁干扰的能力变差。把界面结构改进做好，对于让电流流动的通道更加连续通畅并且更加稳定可靠这件事非常重要。界面接触地方的物理贴合质量好坏以及化学键合方式种类不同，会明显影响到电流能不能顺利通过以及能不能均匀分散。通过把界面之间的微小结构进行调控，比如让纳米级别的表面变得更加平整光滑、让界面之间结合力量变得更强，就可以明显减小电子在界面处被乱反射的现象，从而减小这种反射对整个导电能力的负面影响。两种材料接触的地方结合得不够牢固，这种情况会让电流通过时遇到很大阻碍，电流就会挤到一起形

成堵点，所以必须使用能够在不同材料接触面实现高效连接的技术来让接触面变得更好更通畅。控制膜的厚度并且同时把接触面的结构也管理好，这两件事一起做好对整个复合膜的性能变得更好起到了非常大的作用，同时也给怎样设计才能让导电能力变得更好提供了清楚的理论依据和指导。

3.3 材料排列方式对电流分散能力的调控

材料排列方式对复合膜电流分散能力有很大影响。导电材料在膜层里面怎么排列，直接决定载流子走哪条路以及走得快不快。通过让材料排列得很有规律，可以形成连续性更好的导电通道，这样电阻就会变小，电流分散效果也会变得更好。不同比例的导电材料分布结构，会影响到载流子运动是否均匀，如果分布不均匀，就容易在某些地方电场集中得很厉害，从而使防雷能力变差。把导电材料的排列方式改得更更有规律，比如采用交错层状结构或者均匀分散结构，就能非常有效地提升复合膜传导电流的能力，并且全面加强抵抗雷击的本领。

4 导电性能优化的结构创新

4.1 多层复合结构的构建思路

设计多层复合结构对于提高防雷击复合膜导电性能具有非常重要作用。通过科学合理构建各层之间关系，能够有效改善电流流动路径，提高复合膜分散电流能力以及屏蔽电磁干扰能力。在结构设计过程中，采用多层层层叠加方法，能够把不同材料各自优秀特性结合到一起，比如高导电层提供优秀导电能力、增强层提供更好机械强度、绝缘层提供电气隔离功能，这些功能一起发挥作用，最终实现机械强度和电气性能两者平衡统一。不同种类材料在多层结构里面合理安排位置，通过改善界面导电特性，能够显著降低整体电阻数值，提高整个材料导电效率。精确控制每层厚度对于形成合理电流流动路径非常重要，利用不同层之间界面产生特殊效应，也能够有效减弱雷击带来能量快速传递过程。多层复合结构有利于减弱单一材料对于整体性能的限制，进而明显提高复合膜的可靠性和使用寿命。优选构造的复合结构设计给航空飞行器赋予了更加高性能的防护能力，而且给新型防雷材料的研发建立了关键基础。

4.2 异质界面设计促进电流传导

不同材料之间形成的界面设计大大提高了复合膜的导电能力，这种设计最重要的一点就是通过调整界面的各种特点来让电流流动的路线变得更好。人们通过加入导电性能不同的材料成分，制造出导电能力、绝缘能力和机械强度各不相同的界面区域，这样就能非常有效地降低界面处的电阻大小，同时加快电荷移动的速度。研究人员对界面在微小尺度下的结构进行仔细设计，通过改变主体材料和添加填充物之间的排列方式以及分布的具体形态，最终让电流能够在整个膜上分布得更加均匀。不同材料形成的界面能够显著减少因为局部电流密度太大而产生的过多热量聚集和电弧放电现

象,这样就使膜层的结构更加稳定并且使用时间变得更长。采用多层界面互相交叉重叠的方式,将导电性能特别好的通道和高强度区域结合到一起,既实现了非常优秀的电磁波屏蔽效果,同时也让整体的机械强度保持稳定可靠。这种全新的设计方法为复合膜用来防止雷击损伤提供了非常好的改进途径。

4.3 机械强度与电磁屏蔽能力的综合提升途径

以便于提高导电性能的同时兼顾机械强度和电磁屏蔽能力的要求,研究集中于复合膜的多功能结构设计。借助改良复合膜的层间粘结力,强化材料界面处的力学性能,进而增进其抵御外界冲击能力。异质材料的合理组合能在达成优异机械性能的同时,构建连贯并且高效果的电流分散路径,强化电磁屏蔽效果。阶梯式膜层设计可以有力缓和内部应力集中,更进一步提升结构全局的力学稳定性和电磁性能。引入具备导电性以及高强度的纳米材料能在微观层面上巩固导电网络的连接性,既能提高电流传导性能,同时优化材料的屏蔽效能,因而达成多重性能的协同完善。

5 关键技术突破与工程应用前景

5.1 优化结构对飞行器防护效果的保障

调整结构设计对提高飞行器抵御雷击的能力具有关键作用。把复合膜材料的结构加以改进,就可以大幅增强电流扩散能力和电磁屏蔽能力,进而显著加强整体抵御雷击的保护性能。经过改进的多层复合结构,会仔细调整每一层的厚度大小和不同材料的叠放顺序,既能让电流高效顺畅地传出去,又能明显改善电磁屏蔽的效果。不同材料交界面的特别设计,在电流传导的时候起到连接通道的功能,让电荷在不同材料之间移动得更加流畅,这样非常有利于雷电流迅速分散到更大范围。工程师把这些结构设计方法全部结合起来,再应用到实际的工程项目中,就能够在尽量保持重量很轻的情况下,获得十分优秀的防雷保护效果。这不只提高了飞行器在雷击环境之中的安全性,而且促进了新型防雷材料于航空领域的应用。借助结构优化,材料在雷击保护里的表现获得更进一步改善,对克服传统复合膜材料于应用里的局限性带来了实用且高效的思路。在未来的航空航天防雷技术发展,这一领域将会拥有优秀的应用前景以及宽广的发展空间。

5.2 工程实现中的主要难点及其解决路径

航空飞行器防雷击复合膜工程实现过程中,技术难点集中结构优化、材料兼容性、工艺控制这些方面。复合膜导电性能提升必须精确控制膜层厚度以及界面特性,但是实际制造里面,高精度加工工艺难以满足设计要求,造成性能波

动很大。复合膜材料热膨胀系数不同很容易产生界面不匹配情况,直接降低整体结构可靠程度并且缩短使用年限。保持机械强度条件下面,膜层电流分散能力提升会受到材料排列方式、工艺方法限制。面对这些技术难点,需要使用高精度制膜设备,搭配先进涂布技术、层压技术,来精确控制膜层结构。依靠挑选合适材料并且添加界面缓冲层来处理界面不匹配情况。另外建立依靠数值模拟方法工艺参数优化模型,提高材料排列均匀程度,提高导电路径形成速度和质量。各个不同学科的专家们开展合作,就可以让这种复合膜材料在实际的工程项目里面发挥出更好的使用效果。

5.3 未来航空航天防雷材料的发展方向

未来航空航天防雷材料将要重视智能化和多功能整合演进,借助纳米技术和仿生设计达成材料在导电性、轻质性及耐用性方面的全方位提高。研究将要聚焦于自愈合材料的应用、高性能界面优化还有绿色环保复合膜的研制,来适应极端环境之中的高效果保护,给飞行器带来更强稳定的可靠保证与更为环保持久的技术支撑。

6 结语

为了满足飞机等航空飞行器防止雷击的安全要求,研究人员深入开展了复合材料薄膜导电性能的改进结构设计工作。通过仔细分析薄膜厚度、层与层之间的界面结构以及材料排列方式这些关键因素,成功实现了导电路径的多层次调节,这样做显著提高了复合薄膜分散电流和屏蔽电磁的能力,而且很好地兼顾了材料机械强度的需求。实验和分析结果清楚表明,结构设计和材料选择联合优化才是增强复合薄膜防雷击能力的最主要方法,这种方法为飞机安全防护材料的实际设计和工程使用提供了全新理论依据和技术参考。值得注意的是,目前这项研究还存在一些不足之处,比如在复杂实际环境下薄膜长期性能的变化规律还没有完全弄清楚,多尺度计算机模拟结果跟真实使用条件之间还存在一些差距。未来,有必要进一步结合多场耦合仿真、耐久实验与新材料开发,细化复合膜在极端气候和复杂电磁环境下的防护性能研究,为飞行器安全防雷提供更为完善的解决方案。

参考文献

- [1] 杨帆.微型扑旋翼飞行器结构设计[J].中国科技信息,2021,(06):38-41.
- [2] 王璐,王樱霖,张永力,韩继先,侯锦秋,姜睿智.新型复合导电垫片的结构设计及性能研究[J].新技术新工艺,2022,(06):59-62.
- [3] 奉晔.浅谈船舶防雷击[J].天津航海,2021,(02):40-42.
- [4] 湛鑫杨海诚.基于数字化技术的单人飞行器结构设计及优化研究[J].南方农机,2021,52(05):34-37.