

Research on Conductivity Enhancement and Lightning Protection Technology of Carbon Fiber Composite Materials in Aircraft Skin

Chenyang Fan

Jiangsu Xinyang New Material Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 225100, China

Abstract

With the development of aviation industry, the performance requirements of aircraft materials are increasing day by day. Carbon fiber composites are widely used in aircraft structures because of their excellent mechanical properties and lightweight properties. However, the inherent weak electrical conductivity of the carbon fiber composites poses challenges to the safety of the aircraft in the lightning strike environment. Therefore, enhancing the electrical conductivity of carbon fiber composite material and improving its lightning protection performance has become the focus of current research. The paper deeply analyzes the structure and mechanical properties, conductivity mechanism, and the influence of interface effects on conductivity of carbon fiber composite materials. It explores various technical means to enhance conductivity and lightning protection techniques, in order to provide theoretical basis and technical support for the design and application of carbon fiber composite materials.

Keywords

carbon fiber composite materials; enhanced conductivity; lightning protection technology; aircraft skin; material modification

碳纤维复合材料在飞机蒙皮中的导电性增强与防雷击技术研究

范晨颖

江苏新扬新材料股份有限公司, 中国·江苏·扬州 225100

摘要

随着航空工业的发展,对飞机材料的性能要求日益提高。碳纤维复合材料因其优异的力学性能和轻质特性,被广泛应用于飞机结构中。然而,碳纤维复合材料的固有导电性较弱,给飞机在雷击环境中的安全性带来了挑战。因此,增强碳纤维复合材料的导电性并提高其防雷击性能成为当前研究的重点。论文深入分析了碳纤维复合材料的结构与力学性能、导电机理,以及界面效应对导电性的影响,探讨了多种增强导电性的技术手段和防雷击技术,以期碳纤维复合材料的设计与应用提供了理论依据和技术支持。

关键词

碳纤维复合材料; 导电性增强; 防雷击技术; 飞机蒙皮; 材料改性

1 引言

随着航空工业的发展,对飞机蒙皮材料的性能要求越来越高,不仅要具备轻量化、高强度的特点,还必须具备良好的导电性和防雷击能力。碳纤维复合材料由于优异的力学性能和轻质特性,已成为现代飞机蒙皮材料的主要选择。然而,碳纤维复合材料本身的导电性不足以满足防雷击的要求。因此,如何通过材料改性技术提高碳纤维复合材料的导电性,并在此基础上开发有效的防雷击技术,成为当前研究的重点。论文旨在通过分析碳纤维复合材料的基础性能及其

导电机理,探讨增强其导电性的技术手段。

2 碳纤维复合材料的基础性能分析

2.1 碳纤维复合材料的结构与力学性能

碳纤维复合材料由基元碳原子组成的长链状纤维与聚合物基体紧密结合而成,其中基元碳原子构成纤维的主体,边缘碳原子则位于纤维的末端或缺陷处,这些结构使材料具有强度高、模量高、密度低等优异的力学性能。碳纤维具有较高的轴向拉伸强度和弹性模量,而基体则起着传递载荷的作用,使复合材料在承受外部应力时表现出极佳的抗疲劳性和耐腐蚀性。

【作者简介】范晨颖(1995-),女,中国江苏南通人,助理工程师,从事材料科学研究。

2.2 碳纤维复合材料的应用概况

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)在飞机结构上的应用比例逐年提高,不仅使飞机重量大大降低,燃油效率得到提高,而且增强了飞机的耐久性和安全性,机械性能十分出色。例如,波音787“梦想”号客机上复合材料用料占比达到飞机总质量的一半以上,空客A230客机上复合材料用量占比达30%,新一代的战斗机复合材料的用量占比大于20%,未来期望在国产C929大飞机上实现复材使用量大于50%的目标。

2.3 碳纤维复合材料的导电性能

碳纤维复合材料的导电性能主要源于碳纤维本身优异的电导特性。碳纤维内部的石墨微晶结构提供了良好的电子传导路径,使得电流能够沿着纤维轴向高效传输。在复合材料中,碳纤维形成网络状结构,通过纤维间的接触形成导电网络,实现电子传递^[1]。但是,浸润于碳纤维丝之间的树脂基体的绝缘性导致碳纤维和树脂之间的界面难以形成连续的导电路径,阻碍了电流从一根纤维向另一根纤维有效地传递。同时,在实际中界面区域可能会因纤维表面的粗糙度、缺陷等因素形成阻隔层,进一步阻碍电子的自由流动。所以,不经过改性的复合材料通常情况下整体的导电性较差,难以有效疏导雷击电流。

3 飞机蒙皮对导电性和防雷击性能的要求

3.1 飞机蒙皮的结构设计与功能要求

飞机蒙皮是机身外部的覆盖层,由蒙皮、加强肋、翼梁、前墙、后墙、翼肋、桁条和接头等部件组成,蒙皮主要负责保护飞机内部结构不受外界环境的影响,并提供空气动力学外形以减少飞行阻力。加强肋和翼肋分布在蒙皮内部,用以支撑蒙皮,保证其在飞行过程中能够抵抗气动载荷引起的变形。翼梁是机翼的主要承力构件,连接前墙和后墙,承受弯曲载荷和剪切力。桁条则沿机翼长度方向布置,用于增强机翼的纵向刚度。接头则用于连接蒙皮与其他结构件,确保整体结构的完整性和稳定性。除了结构强度要求外,飞机蒙皮还需具备良好的导电性能,以确保能够有效分散雷击产生的电流,防止因雷击引发的电气系统故障或火灾等危险情况。

3.2 主要飞机制造商的蒙皮材料选择

为减轻飞机重量,提高燃油效率,增强结构耐久性,飞机蒙皮越来越多采用碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)。但是,相对于传统金属机身而言,使用复合材料制造的飞机更容易在雷电环境中遭受严重的雷击破坏。遭遇雷击时,焦耳加热会使得蒙皮雷击附着区周围的温度突然升高,导致树脂基体熔化、升华或蒸发,产生热气体。由于热膨胀和收缩,这些热气体被截留在层压板中会产生瞬态机械载荷,导致碳纤维复合材料层压板分层、穿刺和纤维断裂,最终造成飞机结构强度和刚度下降而失效。另外,飞机遭受雷击损伤后,留在材料上的电荷会直接冲向导体,在接触的过程中产生火

花,在飞机内部的金属液压管道、燃油系统管道及电缆诱导出高闪电电流和电压,可能会引起火灾,影响飞行安全,造成灾难性后果。除此之外,初始的雷电损失可能引起的结构破坏,导致气动载荷变化、结构的振动响应或引起动力系统失常等二次损伤甚至事故。因此,采取防雷防护措施,提升飞机复合材料构件导电性,保证飞行安全,一直是各国攻克的重要难题。

3.3 防雷击技术的基本原理

防雷击技术的基本原理在于保护飞机表皮等关键结构不受损害,通过构建有效的导电网络,确保雷电流能够快速均匀地分散。该网络通常由覆盖在飞机表皮表面的导电材料构成,或者在复合材料内部嵌入。当雷击发生时,通过飞机上的接闪器(如翼尖、尾锥等突出部位)导入雷电流,然后沿着预先设计好的导电路径迅速传导到机体其他部位,最后通过机翼边缘导入大地,也可以通过其他接地装置将雷电流输送到地面。导电网络必须具有足够的导电性和良好的电流分布特性,以确保电流不集中于某一点而均匀分散,以防止雷电流在传导过程中造成局部过热或产生电弧^[2]。为了增强材料的导电性能,提高雷击防护效果,还需要在关键部位加装防雷击涂层或添加导电填充物。

3.4 导电性对防雷击性能的影响

当雷电发生时,为避免局部地区产生过高的热能,而造成结构损坏或引发火灾,需要使雷电流迅速而均匀地分散开来。良好的导电性能可以保证雷电在蒙皮表面或内部流通的导电网络迅速传导到地面,减少电流停留在蒙皮上的时间,防止局部过热引起电流集中。决定电流能否均匀分布,避免电弧或火花的形成,从而保护飞机电子设备和乘员安全的导电网络的设计和材料的选择也至关重要。若蒙皮材料导电性不足,在传导过程中雷电流会遇到较大的阻力,从而在一些可能破坏蒙皮结构或破坏机载系统的薄弱环节造成能量的集中释放。因此,飞机蒙皮的抗雷击性能可以得到显著提升,确保遇到雷击时能够有效分散电流,确保飞行安全,通过增强蒙皮材料的导电性,优化其导电网络的设计。

4 碳纤维复合材料导电性增强技术

早期的雷击防护方法是在复合材料表面火焰喷铝,如波音787、歼-11B系列、歼-15系列、歼-16系列,增重明显不具备持续防护能力。后期逐渐采用导电金属网复合表面膜替代喷铝工艺,如中国无侦-9飞机、攻击-11无人机和某型歼击机,大大降低了飞机的重量,节省了制造周期。为了在相同雷击防护效果的前提下进一步减重,国内外大量投入开发本体防雷击复合材料导电技术,其主要改性方法为将各种不同结构形态的导电结构引入到复合材料结构中,引入后带来的增重较少,方法主要有直接掺杂到树脂基体中、喷涂到纤维表面和以薄层的形式插层于复合材料层间。

4.1 碳纤维表面改性技术

碳纤维表面改性技术是通过物理或化学的方式,在碳纤维表面形成一层均匀、致密的导电层。将一层导电氧化物或导电聚合物如聚苯胺、聚苯醚等通过溶胶-凝胶技术沉积在碳纤维表面,或采用物理气相沉积技术(PVD)将铝、铜、银等导电金属沉积在碳纤维表面,形成一层均一导电层^[9]。通常情况下,为了保证导电层能牢固地附着在碳纤维表面,须利用等离子技术进行活化处理,引入羟基、羧基等极性官能团,增加碳纤维表面活性位点。

4.2 碳纳米管防雷击表面膜技术

碳纳米管(CNTs)作为纳米材料,重量轻,比表面积大,具有高模量和高强度,具有良好的电学性能和传热性能,其电导率通常可达到铜的一万倍。将各种碳纳米管的宏观体如碳纳米管纸(又称巴基纸)、碳纳米管薄膜(CNF)与树脂复合制成碳纳米管防雷击表面膜,与碳纤维复合材料共固化后,可使整体结构在维持良好的强度、弹性、抗疲劳性的同时极大地改善导电性能。某型战机的翼尖整流罩的防雷击复合材料蒙皮,是对纳诺科莫(Nanocomp)公司的巴基纸进行取向并与双马树脂复合,制备出的碳纳米管含量达60wt%的复合材料。其基本力学性能与常用IM7碳纤维增强复合材料基本相当,同时在取向方向上电导率高达5500S/cm,重量与铺贴铜网相比每平方米减重120g,且不易剥落,也不会发生电偶腐蚀。最新研究还将银纳米颗粒用于改进碳纳米管宏观体,不仅可以提高宏观体的导电性(约为未经处理的碳纳米管的10倍,约为一般聚合物基复合材

料的5000倍),还能为保护延伸电流传导提供熔化的银骨架,大大提高了雷击防护能力。测试表明模拟雷击试验后银纳米颗粒改性碳纳米纸/碳纤维复合材料仍能保持91%左右的极限抗压强度和92%左右的抗弯强度。

4.3 碳纳米填料改性树脂基体技术

从成本考虑,对树脂基体添加CNTs、石墨烯、碳纳米纤维等导电填料进行改性,以提高复合材料的导电性和抗雷击性能是当前较优选的解决方案。关键工艺是使用高能混合设备如高剪切混合机、超声波分散器,将导电填料粒子均匀分散在树脂中,并尽快进行树脂基体与碳纤维的复合加工以避免填料沉降或聚集,确保最终材料的导电性能达到预期标准。美国WRIGHT PATTERSON空军基地的材料与制造研究部与代顿大学研究所(UDRI)联合研制出了电导率 $10^{-6}\sim 10^2\text{S/cm}$ 之间可调的聚合物基复合材料,并已应用于F-35飞机电磁屏蔽/电磁兼容结构上,起到了减重、改善维护性、提高机动性和耐久性以及保持设备与电子系统可操作性的效果^[4]。

4.4 导电性增强技术实际效果评估

相较于传统铝合金,未经处理的碳纤维复合材料(CFRP)导电率较低,导致雷电流分散不均,表面温度升高明显,并伴有明显损伤,如表1所示。然而,通过表面改性和碳纳米材料复合技术,CFRP的导电率分别提升至 $2.0\times 10^5\text{S/m}$ 和 $5.0\times 10^5\text{S/m}$,显著改善了雷电流的均匀分散,降低了表面温度变化,并几乎消除了材料损伤,从而显著提升了防雷击性能。

表1 导电性与防雷击性能的实际效果

指标/材料	传统铝合金	CFRP(未经处理)	CFRP(表面改性)	CFRP(碳纳米材料复合)
导电率(S/m)	3.5×10^7	1.0×10^5	2.0×10^5	5.0×10^5
防雷击测试	通过	未通过	通过	通过
雷电流分散	均匀	局部集中	均匀	均匀
表面温度变化	+20°C	+120°C	+30°C	+25°C
材料损伤程度	无损伤	明显损伤	轻微损伤	无损伤

5 结语

碳纤维复合材料在飞机蒙皮中的应用比例逐年提升,发展结构-防雷击功能一体化的复合材料是未来的重要发展方向之一。碳纤维表面改性、碳纳米材料防雷击表面膜以及树脂基体添加导电填料的技术可以显著改善复合材料结构的导电性能,在防雷击测试中能够有效分散雷电流,降低表面温度变化,并减少材料损伤。未来,随着技术的不断进步,碳纤维复合材料将进一步优化导电性能,为飞机的安全和性能带来更大的提升。

参考文献

- [1] 肖春芳,邵林发.飞机碳纤维复合材料蒙皮激光除漆技术的研究进展[J].光学技术,2024,50(2):150-159.
- [2] 郑学博.飞机结构中碳纤维复合材料的应用研究[J].中国设备工程,2023(7):92-94.
- [3] 卢鑫.镀铜碳纤维复合材料的制备及其雷击防护性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2024.
- [4] 欧阳宏志,姚学玲,孙晋茹,等.碳纤维复合材料雷电电磁环境的仿真研究[J].计算机仿真,2020,37(4):81-86.