

复合材料在飞机结构中的应用与性能分析

刘 娜

浙江华瑞航空制造有限公司 浙江 杭州 310000

摘要: 复合材料因轻质、高强、耐腐蚀等特性,成为现代飞机结构设计与制造的核心材料,其应用关乎飞机性能、经济性与安全性。当下,航空航天行业对飞机轻量化等需求提升,复合材料应用比例扩大,但也面临性能匹配、工艺稳定等问题。本文系统介绍复合材料定义、分类、类型及工艺,分析其在飞机关键结构部位的应用现状与核心性能,总结优势与不足,旨在为其合理应用和性能优化提供支撑,推动航空复合材料技术升级,助力飞机高性能、轻量化发展。

关键词: 复合材料; 飞机结构; 应用; 性能分析

引言: 现代航空航天快速发展,对飞机结构材料要求更高,要轻量化降油耗,还要有优异力学、耐腐蚀和耐久性能保障飞行安全。传统金属材料技术成熟,但重量大、耐腐蚀差、疲劳寿命有限,难满足现代飞机需求。复合材料作为新型多功能材料,能通过搭配基体与增强体定制性能,弥补传统材料不足,已广泛应用于飞机各部位。本文开展相关研究,梳理特性与工艺,剖析应用场景与性能,为复合材料在航空领域推广提供依据,具重要理论与工程意义。

1 复合材料概述

1.1 复合材料的定义与分类

复合材料是指由两种或两种以上性质不同的材料,通过物理或化学的方法,在宏观尺度上按一定比例复合形成的新型材料,其综合性能优于组成它的单一材料。复合材料的核心特征是各组分材料保留自身特性,同时通过协同作用形成新的优异性能,实现“1+1>2”的效果。根据不同的分类标准,复合材料可分为多种类型:按基体材料分类,可分为聚合物基复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料,其中聚合物基复合材料因重量轻、加工便捷,在飞机结构中应用最广泛;按增强体形态分类,可分为纤维增强复合材料、颗粒增强复合材料、层状复合材料,纤维增强复合材料凭借高强度、高模量的优势,是飞机结构的核心复合材料类型;按用途分类,可分为结构复合材料与功能复合材料,飞机结构中主要采用结构复合材料,聚焦力学性能提升。

1.2 常见复合材料类型及其特性

飞机结构中常用的复合材料主要有四种,每种类型都具备独特特性,适配不同结构部位的需求。碳纤维增强聚合物基复合材料(CFRP)是应用最广泛的类型,具有比强度高、比模量高、重量轻、耐腐蚀性强等特性,密度仅为钢材的1/4,强度却可达钢材的3-5倍,是

飞机轻量化的核心材料。玻璃纤维增强聚合物基复合材料(GFRP)成本较低、加工工艺成熟,具有良好的耐腐蚀性与绝缘性,但强度与模量低于碳纤维复合材料,多用于飞机非承力结构。芳纶纤维增强聚合物基复合材料(AFRP)具有优异的抗冲击性能与疲劳性能,重量轻、韧性好,适用于承受冲击载荷的飞机结构部位。金属基复合材料以铝合金、钛合金为基体,结合纤维增强体,兼具金属的韧性与复合材料的高强度,适用于高温、高载荷的飞机结构,但其加工难度与成本相对较高^[1]。

1.3 复合材料的制造工艺

复合材料的制造工艺直接影响其性能与应用效果,飞机结构中常用的制造工艺主要有四种,各有优劣与适用场景。手糊成型工艺是最基础的工艺,操作简单、设备投入少,通过人工将树脂与增强体逐层铺贴成型,适用于小批量、复杂形状的飞机零部件,但生产效率低、产品性能稳定性差,多用于非承力结构。模压成型工艺通过模具将复合材料坯料加压、加热成型,生产效率高、产品尺寸精度高、性能均匀,适用于批量生产的飞机承力零部件,如机翼前缘、尾翼组件等。缠绕成型工艺主要用于制造圆柱形、筒形零部件,通过将纤维按一定角度缠绕在芯模上,结合树脂固化成型,具有纤维排列均匀、力学性能优异的特点,适用于飞机发动机舱、机身段等部件。树脂传递模塑成型(RTM)工艺通过将树脂注入预浸纤维的模具中,固化成型,具有成型效率高、产品表面质量好、环境污染小的优势,是现代飞机复合材料结构的主流制造工艺之一。

2 复合材料在飞机结构中的应用

2.1 机翼结构中的应用

机翼是飞机的核心承力结构,承担升力、阻力等载荷,对材料的力学性能与减重效果要求极高,是复合材料应用最集中的部位之一。现代飞机机翼结构中,复合

材料应用比例已达到50%以上,主要用于机翼蒙皮、翼梁、翼肋等关键部件。机翼蒙皮采用碳纤维增强聚合物基复合材料,具有重量轻、强度高、气动外形好的特点,可有效降低机翼重量,提升飞机升阻比;翼梁作为机翼的主要承力部件,采用高强度碳纤维复合材料,能够承受较大的弯曲载荷与剪切载荷,替代传统金属翼梁,可实现减重20%~30%。此外,机翼前缘、后缘等部位采用玻璃纤维复合材料,兼具轻量化与耐冲击性能,有效提升机翼的气动性能与使用寿命,同时降低维护成本,成为现代飞机机翼设计的主流选择。

2.2 机身结构中的应用

机身是飞机的主体结构,承担人员、货物装载与连接其他部件的功能,对材料的强度、刚度、耐腐蚀性要求较高,复合材料在机身结构中的应用比例不断提升。现代民用飞机与军用飞机的机身蒙皮、机身框架、地板梁等部件,广泛采用碳纤维增强聚合物基复合材料,替代传统铝合金材料,可实现机身减重15%~25%,降低燃油消耗。机身蒙皮采用复合材料,不仅轻量化效果显著,还具有良好的耐腐蚀性,可减少机身腐蚀维护工作量,延长机身使用寿命。机身框架与地板梁采用复合材料,能够提升机身的整体刚度与抗疲劳性能,同时简化结构设计,减少零部件数量,降低制造成本^[2]。例如,波音787客机机身复合材料应用比例达到50%以上,大幅提升了飞机的经济性与安全性。

2.3 尾翼结构中的应用

尾翼包括水平尾翼与垂直尾翼,主要作用是控制飞机的飞行姿态,确保飞行稳定性,其结构尺寸相对较小,但对材料的轻量化与力学性能要求严格,是复合材料的重要应用部位。水平尾翼的蒙皮、舵面等部件,采用碳纤维增强复合材料,具有重量轻、刚度高的特点,可有效降低尾翼重量,提升飞机的操控灵活性;垂直尾翼的承力部件采用高强度复合材料,能够承受较大的侧向载荷,确保飞机在飞行过程中的稳定性。此外,尾翼的前缘、后缘等部位采用玻璃纤维复合材料,具有良好的耐冲击性能与气动性能,可有效抵御气流冲击与外界环境侵蚀。复合材料在尾翼结构中的应用,不仅实现了轻量化,还提升了尾翼的结构强度与使用寿命,降低了维护成本。

2.4 其他结构部位的应用

除机翼、机身、尾翼等核心结构外,复合材料还广泛应用于飞机的其他结构部位,涵盖起落架舱门、发动机舱、内饰件等,进一步提升飞机的轻量化水平与综合性能。起落架舱门采用碳纤维复合材料,重量轻、强度

高,可有效降低飞机整体重量,同时具备良好的气动外形,减少飞行阻力;发动机舱采用耐高温复合材料,能够抵御发动机工作时的高温环境,同时降低发动机舱的重量,提升飞机的动力效率。飞机内饰件如座椅、天花板、地板等,采用玻璃纤维增强复合材料,具有重量轻、隔音、隔热、阻燃等特性,不仅提升了乘客的舒适性,还进一步实现了飞机轻量化。此外,复合材料还用于飞机的雷达罩、天线罩等部件,兼具轻量化与电磁透过性,满足航空电子设备的工作需求。

3 复合材料在飞机结构中的性能分析

3.1 力学性能分析

复合材料的力学性能具有显著的各向异性特点,这是与传统金属材料最本质的区别。复合材料的强度和刚度主要取决于纤维的取向和铺层设计。沿纤维方向,复合材料具有极高的强度和模量,碳纤维复合材料拉伸强度可达1500~2500MPa,模量可达140~210GPa;垂直纤维方向,强度和模量由基体和界面决定,通常仅为纤维方向的1/20~1/30。这一特性为结构设计提供了极大的灵活性,设计师可根据受力需求优化铺层方向和顺序,使材料在主要受力方向具有足够强度,在次要受力方向则节约材料。复合材料的比强度(强度/密度)和比刚度(模量/密度)远超传统金属材料,碳纤维复合材料比强度约为铝合金的5倍,比刚度约为铝合金的3~4倍。抗疲劳性能是复合材料的突出优势,金属材料的疲劳裂纹一旦萌生会持续扩展直至断裂,而复合材料的多相结构能有效阻止裂纹扩展,疲劳极限可达静强度的60%~70%,远高于金属的30%~40%。复合材料的阻尼性能优于金属,具有良好的减振降噪效果。复合材料也存在一些力学弱点,如层间剪切强度较低,容易产生分层损伤;抗冲击性能相对不足,低能量冲击可能产生肉眼难以发现的内部损伤^[3]。

3.2 减重效果分析

减重是复合材料在飞机结构中应用的首要目标,也是其最显著的优势。复合材料减重效果来源于三个方面:材料密度低、强度刚度高、结构可设计性强。碳纤维复合材料密度约为1.6g/cm³,远低于铝合金的2.8g/cm³和钛合金的4.5g/cm³。在同等受力要求下,复合材料构件可比铝合金构件减重20%~30%。波音787全机复合材料用量达50%,相比传统铝合金结构减重约20%,燃油效率提高20%以上。空客A350复合材料用量达53%,同样取得显著的减重效果。军机对减重要求更为苛刻,F-35战斗机复合材料用量超过35%,有效提高了机动性能和作战半径。复合材料减重不仅体现在材料替换上,更体现在结构形式的变革上。复合材料可采用整体成型技术,将多个零

件合并为一个整体构件,减少连接件和紧固件数量,既减轻重量又提高结构效率。例如,波音787机身筒段采用复合材料整体成型,取消了约1500块铝合金蒙皮和4万~5万个紧固件,减重效果极为显著。复合材料还允许采用更优化的结构形式,如变厚度设计、加筋壁板、蜂窝夹层等,在满足受力要求的同时最大限度降低重量。对于相同结构形式,优化铺层设计可进一步挖掘减重潜力,根据受力分布变化铺层厚度和方向,避免材料浪费。

3.3 耐腐蚀性和耐久性分析

复合材料的耐腐蚀性和耐久性是其替代金属材料的重要优势,金属材料如铝合金在潮湿环境下容易发生电化学腐蚀,需要定期进行防护处理和维护。碳纤维复合材料本身具有优异的耐腐蚀性,对酸、碱、盐等介质具有良好的耐受性,不会像金属那样发生氧化腐蚀。复合材料的抗疲劳性能优异,在循环载荷作用下寿命远高于金属结构。金属材料的疲劳裂纹一旦萌生会持续扩展,而复合材料的疲劳损伤以基体开裂、界面脱粘、分层等形式分散发展,不会突然失效,具有良好的损伤容限。复合材料对湿热环境敏感,吸湿后基体会发生塑化,玻璃化转变温度降低,高温力学性能下降。现代航空复合材料采用耐湿热性能好的树脂体系,如增韧环氧树脂、双马树脂、聚酰亚胺等,并通过防护涂层减少吸湿。复合材料耐紫外线性能较差,长期暴露在阳光下会发生老化降解,需要通过涂层系统进行防护。复合材料的长期耐久性受环境因素综合影响,需在设计时考虑环境折减系数。经过适航验证的复合材料结构,在设计使用寿命内具有可靠的耐久性能,维护工作量远小于金属结构。波音787的复合材料机身取消了常规的腐蚀防护和疲劳检查项目,维护成本显著降低。

3.4 其他性能分析

复合材料在飞机结构中优势众多,可设计性尤为独特。设计师能依据结构受力与功能需求,优化选纤维、基体,确定铺层方向与顺序,实现性能“定制化”,还能在

同一构件不同部位变化铺层,最大化结构效率。介电性能上,玻璃纤维和芳纶纤维复合材料透波性好,用于雷达罩等需电磁波穿透的结构;碳纤维复合材料导电,可用于防雷击,但会屏蔽电磁信号,需采取措施。碳纤维复合材料热膨胀系数极低,温度变化时尺寸稳定,适合高精度结构,不过导热性差,局部过热热量难扩散。航空复合材料采用阻燃树脂体系,满足适航要求,燃烧时烟密度和毒性气体释放量可控^[4]。碳纤维复合材料有雷达波吸收能力,经改性可制成结构吸波材料,在军机上应用价值大。复合材料损伤后,可用补片、注射等方法修复,修复后强度能恢复八成以上,但需专业技术和条件。其回收利用是研究热点,热塑性复合材料回收相对容易,热固性复合材料回收技术还不成熟。

结束语

复合材料在飞机结构中的应用是航空材料技术发展的重要里程碑。本文系统介绍其定义、分类、特性与制造工艺,详细分析其在机翼、机身等结构部位的应用,并从力学、减重、耐腐蚀和耐久性等方面剖析综合性能。研究表明,其大规模应用提升了飞机结构效率、减轻重量、改善性能。随着技术进步,应用比例将扩大,未来应聚焦损伤容限设计等方向,推动技术升级。

参考文献

- [1]高文明,刘琛,聂海平,等.复合材料飞机副油箱结构铺层设计及性能分析[J].复合材料科学与工程,2025(2):70-81.
- [2]李星,楼昉,董嘉琪,等.复合材料结构电池在民用飞机中的应用[J].北京航空航天大学学报,2025,51(12):4093-4105.
- [3]刘福佳,李东辉,李群芳,等.某型水上飞机复合材料浮筒结构设计与试验验证[J].西北工业大学学报,2025,43(4):723-731.
- [4]吴跃韬,周来水,赵聪,等.飞机复合材料结构装配预连接临时紧固件布局优化方法[J].航空制造技术,2025,68(20):92-99,108.