

# 树脂基复合材料在轻量化机械结构中的应用

吴云峰 杨芳 陈咪

陕西德信零部件集团有限公司 陕西 西安 710200

**摘要:** 在当今工业快速发展的时代,轻量化机械结构成为众多领域追求的关键目标。本文围绕树脂基复合材料在轻量化机械结构中的应用展开探讨。首先介绍了树脂基复合材料的定义、组成及高比强度和比模量、耐腐蚀性、可设计性等性能特点,随后阐述其在航空航天、汽车工业、机械制造领域的应用实例,还分析了手糊、喷射等多种成型工艺。最后指出该材料面临的挑战,并展望其高性能化、低成本化、多功能化和绿色可持续发展趋势,旨在展现其在轻量化机械结构应用中的重要性及发展前景,为相关领域应用提供参考。

**关键词:** 树脂基;复合材料;轻量化;机械结构;应用

**引言:** 在现代机械工程领域,轻量化设计愈发关键,它关乎能源效率提升、环境污染减少以及产品性能优化。树脂基复合材料凭借独特优势,在这一趋势中崭露头角。它能在确保机械结构性能的同时减轻重量,对于航空航天、汽车、机械制造等诸多行业意义重大。鉴于其应用日益广泛且发展前景可观,深入探讨其在轻量化机械结构中的应用情况、工艺特点及发展走向,具有重要的现实意义。

## 1 树脂基复合材料概述

### 1.1 定义与组成

树脂基复合材料是以有机树脂为基体,如环氧树脂、聚酯树脂、酚醛树脂等,与纤维(碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维等)或颗粒(碳化硅、氧化铝等)增强通过特定复合工艺组合而成的多相材料。基体树脂承担粘结、保护及载荷传递功能,增强相则赋予材料高强度与高模量等优异特性。两者相互协同,使得树脂基复合材料能够兼具多种优良性能,在众多领域展现出独特优势,是现代材料科学中极为重要的一类材料,为轻量化机械结构设计提供了理想的材料基础。

### 1.2 性能特点

#### 1.2.1 高比强度和比模量

树脂基复合材料的密度通常在 $1.5\text{--}2.0\text{g/cm}^3$ 之间,仅为钢材的 $1/4\text{--}1/5$ ,铝合金的 $2/3$ 左右。而其拉伸强度和弹性模量却可与高强度合金钢相媲美,具有极高的比强度和比模量。这使得在承受相同载荷时,树脂基复合材料构件的质量远低于金属构件,为机械结构的轻量化提供了有力保障。例如,碳纤维增强环氧树脂复合材料的比强度可达 $1500\text{MPa}/(\text{g/cm}^3)$ 以上,比模量可达 $100\text{GPa}/(\text{g/cm}^3)$ 以上,远超普通金属材料。

#### 1.2.2 良好的耐腐蚀性

树脂基体对许多化学介质具有良好的耐受性,能够有效抵抗酸、碱、盐等介质的侵蚀。与金属材料容易生锈腐蚀不同,树脂基复合材料在恶劣的化学环境中仍能保持其结构完整性和性能稳定性,大大延长了机械结构的使用寿命,降低了维护成本。特别是在化工、海洋等腐蚀性环境较为突出的领域,其优势更为明显。

#### 1.2.3 可设计性强

通过改变树脂基体的种类、增强相的类型、含量、分布以及铺层方式等,可以根据具体的工程需求设计出具有不同性能特点的树脂基复合材料。例如,可以设计出各向异性的材料,使材料在不同方向上呈现出不同的力学性能,以满足复杂结构件在不同受力情况下的要求。这种可设计性为机械结构的优化设计提供了极大的灵活性,能够实现材料性能与结构功能的完美匹配。

#### 1.2.4 其他特点

树脂基复合材料还具有良好的疲劳性能、减震性能和低的热膨胀系数等特点。其疲劳寿命通常比金属材料长,在交变载荷作用下能够保持较长时间的可靠性,由于树脂基体和增强相之间的界面具有一定的阻尼作用,能够有效吸收和耗散振动能量,降低机械结构的振动和噪声<sup>[1]</sup>。

## 2 树脂基复合材料在轻量化机械结构中的应用领域

### 2.1 航空航天领域

航空航天领域对飞行器的性能要求极高,轻量化是提高飞行器性能、降低运营成本的关键因素之一。树脂基复合材料在航空航天领域的应用历史悠久且应用范围广泛。在飞机结构中,大量采用碳纤维增强树脂基复合材料制造机翼、机身、尾翼等部件。例如,波音787客机的机身结构中复合材料的使用比例高达50%以上,碳纤维复合材料机翼不仅减轻了飞机的自重,还提高了机翼的

强度和刚度,降低了燃油消耗,复合材料的良好疲劳性能和耐腐蚀性有助于提高飞机的安全性和使用寿命,减少维修次数和成本。在卫星和航天器结构中,树脂基复合材料也因其轻质、高强度和可设计性等特点而得到广泛应用,用于制造卫星的承力结构、太阳能电池板支架等部件,能够有效减轻航天器的重量,提高有效载荷,降低发射成本。

## 2.2 汽车工业领域

随着全球对汽车节能和环保要求的不断提高,汽车轻量化已成为汽车工业发展的必然趋势。树脂基复合材料在汽车工业中的应用日益增多,为汽车的轻量化设计提供了重要的解决方案。在汽车车身结构方面,一些高端汽车品牌开始采用碳纤维复合材料制造车身框架和外覆盖件,如宝马i系列电动汽车。与传统钢制车身相比,碳纤维复合材料车身可减重30%-50%,显著降低了整车重量,提高了汽车的加速性能、续航里程和操控稳定性。此外,树脂基复合材料还广泛应用于汽车内饰件,如仪表盘、座椅、车门内饰板等,不仅可以减轻重量,还能实现复杂的造型设计,提高汽车内饰的美观性和舒适性。在汽车发动机和底盘部件中,也有部分零件采用树脂基复合材料制造,如发动机进气歧管、油底壳、悬挂系统部件等,在保证部件性能的前提下,实现了轻量化目标,有助于降低汽车的油耗和排放。

## 2.3 机械制造领域

在通用机械制造领域,树脂基复合材料被广泛应用于制造各种轻量化的机械零部件。例如,在纺织机械中,采用碳纤维增强树脂基复合材料制造的罗拉、锭子等部件,具有重量轻、转动惯量小、高速稳定性好等优点,能够提高纺织机械的生产效率和产品质量。在印刷机械中,复合材料制成的印版滚筒、墨斗辊等零部件,可在保证印刷精度的同时减轻设备重量,便于设备的安装、调试和维护。在模具制造领域,树脂基复合材料模具具有重量轻、制造周期短、成本低等优势,可用于一些中小批量生产的注塑模具、冲压模具等,能够有效缩短模具制造时间,降低模具制造成本,提高生产效率。在工业机器人领域,轻量化的机械结构对于提高机器人的运动速度、精度和负载能力至关重要<sup>[1]</sup>。

## 3 树脂基复合材料的成型工艺

### 3.1 手糊成型工艺

手糊成型是最早发展起来的一种树脂基复合材料成型工艺,也是最为简单和常用的方法之一。其工艺过程是先在模具表面涂覆一层脱模剂,然后将增强材料(如玻璃纤维布)铺放在模具上,用刷子或喷枪将调配好的

树脂基体均匀地涂刷在增强材料上,通过手工操作使树脂充分浸渍增强材料,并排除气泡,如此反复铺层直至达到设计厚度,最后在常温或加热条件下固化成型。手糊成型工艺的优点是设备简单、投资少、操作灵活,能够制造形状复杂、尺寸较大的制品,适用于小批量生产或产品试制阶段。

### 3.2 喷射成型工艺

喷射成型工艺是将混有引发剂和促进剂的树脂基体与短切纤维通过喷射设备同时喷射到模具表面,在模具上沉积并固化成型的工艺方法。该工艺的优点是生产效率比手糊成型有所提高,能够快速制造大型复杂形状的制品,且纤维分布相对均匀,产品强度较高。然而,喷射成型过程中树脂和纤维的混合比例不易精确控制,导致产品质量稳定性稍差,该工艺对设备和操作环境要求较高,存在一定的环境污染问题。

### 3.3 纤维缠绕成型工艺

纤维缠绕成型是将连续的纤维(如碳纤维、玻璃纤维)浸渍树脂后,按照预定的缠绕规律缠绕在旋转的芯模上,然后在加热或常温下固化成型的工艺。该工艺可以精确控制纤维的缠绕角度、层数和张力,从而实现对制品力学性能的优化设计。纤维缠绕成型工艺生产效率较高,产品质量稳定,能够制造高强度、高刚度的轴对称回转体构件,如压力容器、管道、火箭发动机壳体等。但该工艺设备复杂、投资较大,且对制品形状有一定限制,一般适用于制造圆柱形、球形等规则形状的产品。

### 3.4 拉挤成型工艺

首先,将连续纤维增强材料(如玻璃纤维、碳纤维等)浸渍在树脂基体中,通常树脂中已添加好固化剂等助剂。浸渍后的纤维和树脂通过预成型模具,初步确定形状与尺寸,使纤维排列更为规整。接着进入加热的拉挤模具,模具依据所需制品的截面形状设计,在模具内,树脂受热发生固化反应,形成具有一定强度和硬度的复合材料制品。拉挤成型的优势显著,其生产过程高度自动化,能实现连续生产,生产效率极高,适合大规模制造具有恒定截面形状的制品,如各种型材、棒材、管材等。并且制品纤维含量高、质量稳定、力学性能好,在建筑、电力、交通等领域广泛应用,如用于制造建筑用的复合材料门窗框架、电力工程中的绝缘杆塔以及交通设施中的桥梁栏杆等。

### 3.5 热压罐成型工艺

先将纤维预制体铺放在模具上,然后将其放入热压罐中。在热压罐内,通过精确控制温度、压力和时间等工艺参数来实现复合材料的固化成型。加热系统使罐内

温度升高,促使树脂基体熔化流动并浸润纤维,压力系统施加均匀压力,保证纤维与树脂紧密结合,排除内部气泡等缺陷,在一定的保温保压时间后,树脂固化,形成高性能复合材料制品。此工艺的优点突出,能够制造大型、复杂形状且高性能要求的部件,制品内部质量均匀、孔隙率低、力学性能优异,常用于航空航天领域制造飞机机翼、机身等关键部件,在高端体育器材如高级碳纤维自行车架制造中也有应用。

#### 4 树脂基复合材料在轻量化机械结构中的发展趋势

##### 4.1 高性能化

未来,树脂基复合材料的高性能化将聚焦于多方面突破。在树脂基体研发上,新型热塑性树脂的开发有望进一步提升材料的韧性与可加工性,纳米改性树脂则可借助纳米粒子独特性能显著增强材料综合性能。增强材料方面,石墨烯增强纤维与碳纳米管增强纤维的应用前景广阔,它们能极大提高材料的强度与模量。通过精准优化复合工艺,如采用更先进的纤维铺放技术与树脂浸渍工艺,可实现增强相与基体间更理想的界面结合,从而充分发挥各组分优势。这将促使树脂基复合材料在航空航天领域的极端环境部件、高端装备制造的核心结构件等领域发挥更为关键的作用,有力地支撑前沿科技领域对材料性能的严苛要求,推动相关产业向更高精尖方向发展。

##### 4.2 低成本化

在原材料环节,扩大生产规模可依据规模效应降低碳纤维等关键原材料的单位成本,优化供应链管理能有效减少采购、运输等中间环节费用。成型工艺创新至关重要,开发如简易高效的模压成型改进工艺,减少设备投资与能源消耗。提高自动化智能化生产水平,不仅能提升生产效率,还可降低人工成本并提高产品质量稳定性。此外,积极探索复合材料回收再利用技术并将回收料合理应用于产品制造,也是降低成本的有效途径。随着成本逐步降低,树脂基复合材料将在汽车、建筑等大规模产业中得到更广泛普及,加速传统产业的轻量化与现代化进程。

##### 4.3 多功能化

树脂基复合材料的多功能化趋势将开启全新应用模式。自诊断自修复智能复合材料的研发是重要方向,通过在材料内部植入微传感器与修复剂,能实时监测损伤

并自动修复,大幅提高结构安全性与可靠性,在桥梁、大型机械等长期服役结构中有极大应用潜力。电磁屏蔽隐身功能复合材料的研制,可满足电子对抗、军事装备等特殊领域需求,保障信息安全与作战效能。隔热隔音阻燃等多功能复合材料的开发,将在建筑、航空航天内饰等领域广泛应用,提升居住与工作环境舒适性与安全性。多功能化设计使材料能在单一结构中集成多种功能,减少部件数量与装配复杂性,提升整体性能与附加值,为各行业创新发展提供有力材料支撑。

##### 4.4 绿色可持续发展

树脂基体方面,研发环保型材料,减少或消除生产使用过程中的有害物排放,如开发水性树脂、生物基树脂等。回收利用技术与产业化应用将成为重点领域,物理回收法可通过粉碎、分离等手段实现材料部分再利用,化学回收法能将树脂基体降解为单体或低聚物重新合成新材料。建立完善回收处理体系,实现从废弃物收集、运输到处理的全链条管理,提高资源循环利用率,降低对自然资源依赖<sup>[4]</sup>。

#### 结束语

综上所述,树脂基复合材料于轻量化机械结构领域的地位举足轻重。它以独特的性能优势在航空航天、汽车工业、机械制造等多领域大放异彩,有力推动了各行业的技术进步与创新发展。尽管当前仍面临成本、回收等诸多挑战,但随着高性能化、低成本化、多功能化及绿色可持续发展趋势的持续演进,凭借技术的深度挖掘与工艺的优化革新,其必将突破阻碍,在未来的轻量化征程中担当更为关键的角色,为机械结构的优化升级与全球工业的绿色可持续发展注入源源不断的强劲动力。

#### 参考文献

- [1]王文龙,刘强,张鹏,等.纤维增强环氧树脂基复合材料界面性能研究进展.中国塑料,2024,40(4):1819-1840.
- [2]李明,张华,王磊.高性能树脂基复合材料在新能源汽车中的应用.复合材料学报,2024,41(3):345-352.
- [3]赵军,李伟,陈刚.碳纤维增强树脂基复合材料在航空航天领域的应用研究.航空制造技术,2024,67(2):89-95.
- [4]孙丽,周洋,王志强.树脂基复合材料在风电叶片中的应用及优化设计.可再生能源,2024,42(6):678-685.