



国家出版基金资助项目



湖北省学术著作出版专项资金资助项目

湖北省学术著作
出版专项资金

数字制造科学与技术前沿研究丛书

碳纤维传动轴 设计制造与检测技术

Technology of Design, Manufacture and Test
for Carbon Fiber Composite Drive Shaft

张国良 丁国平 著



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press



国家出版基金资助项目

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLISHING FOUNDATION

湖北省学术著作出版专项资金资助项目



湖北省学术著作
出版专项资金
Hubei Academic Book
Publishing Special Fund

数字制造科学与技术前沿研究丛书

碳纤维传动轴设计制造 与检测技术

张国良 丁国平 著

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

内 容 提 要

碳纤维复合材料具有轻质、高强、热膨胀系数小、吸振性能好等优点,因此采用碳纤维复合材料制备的传动轴具有质量轻、强度高、尺寸稳定性好、传动效率和传动精度高等一系列独特优势。本书重点对碳纤维传动轴的结构设计、制造工艺和性能检测展开研究,主要包括:进行了碳纤维传动轴的力学性能分析,提出了碳纤维传动轴的结构设计方法,研究并探讨了碳纤维传动轴的制备方法和工艺,对碳纤维传动轴试件进行了静扭试验、疲劳试验以及动力学仿真与试验,利用光纤光栅传感器对碳纤维复合材料轴管进行了固化监测,展望了碳纤维复合材料传动轴及零部件的应用前景。

本书可供从事碳纤维复合材料零部件领域的研究人员阅读参考,也可作为材料、机械、力学等相关专业研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

碳纤维传动轴设计制造与检测技术/张国良,丁国平著. —武汉:武汉理工大学出版社,2019.1
(数字制造科学与技术前沿研究丛书)

ISBN 978-7-5629-5476-7

I. ①碳… II. ①张… ②丁… III. ①碳纤维增强复合材料-传动轴-机械制造工艺 ②碳纤维增强复合材料-传动轴-性能检测 IV. ①TH133.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 034507 号

项目负责人:田 高 王兆国

责 任 编 辑:王兆国

责 任 校 对:张莉娟

封 面 设 计:兴和设计

出 版 发 行:武汉理工大学出版社(武汉市洪山区珞狮路 122 号 邮编:430070)

<http://www.wutp.com.cn>

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:武汉中远印务有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:10

字 数:256 千字

版 次:2019 年 1 月第 1 版

印 次:2019 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1—1500 册

定 价:42.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

数字制造科学与技术前沿研究丛书

编审委员会

顾 问: 闻邦椿 徐滨士 熊有伦 赵淳生

高金吉 郭东明 雷源忠

主任委员: 周祖德 丁 汉

副主任委员: 黎 明 严新平 孔祥东 陈 新

王国彪 董仕节

执行副主任委员: 田 高

委 员(按姓氏笔画排列):

David He	Y. Norman Zhou	丁华锋	马 辉	王德石
毛宽民	冯 定	华 林	关治洪	刘 泉
刘 强	李仁发	李学军	肖汉斌	陈德军
张 霖	范大鹏	胡业发	郝建平	陶 飞
郭顺生	蒋国璋	韩清凯	谭跃刚	蔡敢为

秘 书: 王汉熙

总责任编辑: 王兆国

总 序

当前,中国制造 2025 和德国工业 4.0 以信息技术与制造技术深度融合为核心,以数字化、网络化、智能化为主线,将互联网+与先进制造业结合,兴起了全球新一轮的数字化制造的浪潮。发达国家(特别是美、德、英、日等制造技术领先的国家)面对近年来制造业竞争力的下降,大力倡导“再工业化、再制造化”的战略,明确提出智能机器人、人工智能、3D 打印、数字孪生是实现数字化制造的关键技术,并希望通过这几大数字化制造技术的突破,打造数字化设计与制造的高地,巩固和提升制造业的主导权。近年来,随着我国制造业信息化的推广和深入,数字车间、数字企业和数字化服务等数字技术已成为企业技术进步的重要标志,同时也是提高企业核心竞争力的重要手段。由此可见,在知识经济时代的今天,随着第三次工业革命的深入开展,数字化制造作为新的制造技术和制造模式,同时作为第三次工业革命的一个重要标志性内容,已成为推动 21 世纪制造业向前发展的强大动力,数字化制造的相关技术已逐步融入制造产品的全生命周期,成为制造业产品全生命周期中不可缺少的驱动因素。

数字制造科学与技术是以数字制造系统的基本理论和关键技术为主要研究内容,以信息科学和系统工程科学的方法论为主要研究方法,以制造系统的优化运行为主要研究目标的一门科学。它是一门新兴的交叉学科,是在数字科学与技术、网络信息技术及其他(如自动化技术、新材料科学、管理科学和系统科学等)跟制造科学与技术不断融合、发展和广泛交叉应用的基础上诞生的,也是制造企业、制造系统和制造过程不断实现数字化的必然结果。其研究内容涉及产品需求、产品设计与仿真、产品生产过程优化、产品生产装备的运行控制、产品质量管理、产品销售与维护、产品全生命周期的信息化与服务化等各个环节的数字化分析、设计与规划、运行与管理,以及产品全生命周期所依托的运行环境数字化实现。数字化制造的研究已经从一种技术性研究演变成为包含基础理论和系统技术的系统科学研究。

作为一门新兴学科,其科学问题与关键技术包括:制造产品的数字化描述与创新设计,加工对象的物体形位空间和旋量空间的数字表示,几何计算和几何推理、加工过程多物理场的交互作用规律及其数字表示,几何约束、物理约束和产品性能约束的相容性及混合约束问题求解,制造系统中的模糊信息、不确定信息、不完整信息以及经验与技能的形式化和数字化表示,异构制造环境下的信息融合、信息集成和信息共享,制造装备与过程的数字化智能控制、制造能力与制造全生命周期的服务优化等。本系列丛书试图从数字

制造的基本理论和关键技术、数字制造计算几何学、数字制造信息学、数字制造机械动力学、数字制造可靠性基础、数字制造智能控制理论、数字制造误差理论与数据处理、数字制造资源智能管控等多个视角构成数字制造科学的完整学科体系。在此基础上,根据数字化制造技术的特点,从不同的角度介绍数字化制造的广泛应用和学术成果,包括产品数字化协同设计、机械系统数字化建模与分析、机械装置数字监测与诊断、动力学建模与应用、基于数字样机的维修技术与方法、磁悬浮转子机电耦合动力学、汽车信息物理融合系统、动力学与振动的数值模拟、压电换能器设计原理、复杂多环耦合机构构型综合及应用、大数据时代的产品智能配置理论与方法等。

围绕上述内容,以丁汉院士为代表的一批制造领域的教授、专家为此系列丛书的初步形成提供了宝贵的经验和知识,付出了辛勤的劳动,在此谨表示最衷心的感谢!对于该丛书,经与闻邦椿、徐滨士、熊有伦、赵淳生、高金吉、郭东明和雷源忠等制造领域资深专家及编委会成员讨论,拟将其分为基础篇、技术篇和应用篇三个部分。上述专家和编委会成员对该系列丛书提出了许多宝贵意见,在此一并表示由衷的感谢!

数字制造科学与技术是一个内涵十分丰富、内容非常广泛的领域,而且还在不断地深化和发展之中,因此本丛书对数字制造科学的阐述只是一个初步的探索。可以预见,随着数字制造理论和方法的不断充实和发展,尤其是随着数字制造科学与技术在制造企业的广泛推广和应用,本系列丛书的内容将会得到不断的充实和完善。

《数字制造科学与技术前沿研究丛书》编审委员会

前 言

传动轴是机械装备中用于传递扭矩的关键部件,在许多领域得到了广泛应用。机械装备的快速发展对传动轴提出了越来越高的要求。传统的金属材料制备的传动轴由于其自身的局限性,阻碍了传动轴性能的提升。采用复合材料取代金属材料制备高性能传动轴已成为提升传动轴性能的可行方案。碳纤维复合材料具有轻质、高强、热膨胀系数小、吸振性能好等优点,采用碳纤维复合材料制备的传动轴具有质量轻、强度高、尺寸稳定性好、传动效率和传动精度高等一系列独特优势。

本书重点对碳纤维复合材料传动轴的结构设计、制造工艺和性能展开研究。全书共分为7章,第1章为碳纤维及其复合材料概述,第2章为碳纤维复合材料传动轴,第3章为碳纤维复合材料传动轴的力学性能分析,第4章为碳纤维复合材料传动轴的结构设计方法,第5章为碳纤维复合材料传动轴的制备及性能测试,第6章为碳纤维复合材料传动轴的动力学仿真与试验,第7章为碳纤维复合材料传动轴的固化监测。

本书主要围绕CFRP传动轴设计制造与检测的相关理论和技术展开论述,主要内容如下:进行了碳纤维传动轴的力学性能分析,提出了碳纤维传动轴的结构设计方法,研究并探讨了碳纤维传动轴的制备方法和工艺,对碳纤维传动轴试件进行了静扭试验、疲劳试验以及动力学仿真与试验,利用光纤光栅传感器对碳纤维复合材料轴管进行了固化监测,展望了碳纤维复合材料传动轴的应用前景。

本研究是在武汉理工大学周祖德教授悉心指导下完成的,研究工作得到了武汉理工大学先进材料制造装备与技术研究院的教师和研究生的大力支持和帮助,并获得了国家自然科学基金项目、“湖北省重大科技创新计划”项目等资助,在此作者表示深深的谢意。

希望本书的出版能够对从事复合材料零部件领域的科研和工程技术人员有所帮助。鉴于作者水平有限,书中难免有错误和疏漏之处,恳请读者指正和赐教。

目 录

1 碳纤维及其复合材料概述	(1)
1.1 碳纤维的结构、特性以及分类	(1)
1.2 碳纤维增强复合材料概述	(3)
1.2.1 碳纤维增强陶瓷基复合材料	(3)
1.2.2 碳/碳复合材料	(3)
1.2.3 碳纤维增强金属基复合材料	(4)
1.2.4 碳纤维增强树脂基复合材料	(5)
1.3 碳纤维及其复合材料的应用	(6)
1.3.1 航空航天	(7)
1.3.2 交通	(8)
1.3.3 体育用品	(9)
1.3.4 工业、建筑及新能源领域的应用	(11)
2 碳纤维复合材料传动轴	(12)
2.1 碳纤维复合材料传动轴概述	(12)
2.1.1 传统金属传动轴的局限性	(12)
2.1.2 碳纤维复合材料传动轴的特点	(13)
2.2 碳纤维复合材料传动轴的研究现状	(16)
2.2.1 国外 CFRP 传动轴的研究现状	(16)
2.2.2 国内 CFRP 传动轴研究现状	(21)
2.2.3 国内外研究的综合分析	(23)
3 碳纤维复合材料传动轴的力学性能分析	(24)
3.1 复合材料圆柱叠层壳的力学分析	(25)
3.1.1 圆柱叠层壳的力学基础	(25)
3.1.2 圆柱叠层壳经典理论的基本方程和边界条件	(30)
3.1.3 圆柱叠层壳力学问题的求解	(31)
3.2 复合材料圆柱叠层壳的强度分析	(35)

3.2.1	单层复合材料的宏观强度准则	(35)
3.2.2	叠层复合材料的强度分析	(36)
3.3	本章小结	(39)
4	碳纤维复合材料传动轴的结构设计方法	(40)
4.1	碳纤维复合材料传动轴的设计要求	(41)
4.2	碳纤维复合材料传动轴的结构形式	(41)
4.2.1	碳纤维复合材料传动轴的材料选择	(41)
4.2.2	碳纤维复合材料传动轴的结构形式	(41)
4.3	碳纤维复合材料传动轴的连接形式	(43)
4.4	碳纤维复合材料传动轴的结构设计	(44)
4.4.1	金属端设计	(45)
4.4.2	碳纤维复合材料轴管的设计	(46)
4.4.3	碳纤维复合材料轴管的强度校核	(54)
4.5	碳纤维复合材料传动轴的胶接设计	(62)
4.5.1	碳纤维复合材料传动轴的胶接形式	(62)
4.5.2	碳纤维复合材料传动轴的胶层设计	(63)
4.6	碳纤维复合材料传动轴的设计方法及应用案例	(66)
4.6.1	碳纤维复合材料传动轴的设计方法	(66)
4.6.2	设计 CFRP 传动轴连接结构的步骤	(66)
4.6.3	碳纤维复合材料传动轴的设计案例	(67)
5	碳纤维复合材料传动轴的制备及性能测试	(77)
5.1	碳纤维复合材料传动轴的制备	(77)
5.1.1	碳纤维复合材料轴管的制备	(77)
5.1.2	碳纤维复合材料轴管与金属法兰的胶接工艺	(86)
5.2	碳纤维复合材料传动轴的静扭试验	(87)
5.2.1	静扭试验标准及设备	(88)
5.2.2	静扭试验过程	(89)
5.2.3	静扭试验结果	(90)
5.3	碳纤维复合材料传动轴的扭转疲劳试验	(90)
5.3.1	疲劳试验标准及设备	(90)
5.3.2	疲劳试验过程	(93)

5.3.3 疲劳试验结果	(93)
6 碳纤维复合材料传动轴的动力学仿真与试验	(94)
6.1 碳纤维复合材料传动轴的有限元模态分析	(95)
6.1.1 碳纤维复合材料轴管的有限元模态分析	(95)
6.1.2 考虑金属端的碳纤维复合材料传动轴的有限元模态分析 ...	(100)
6.1.3 两种模型的有限元模态分析结果对比	(103)
6.2 碳纤维复合材料传动轴的模态试验	(104)
6.2.1 碳纤维复合材料传动轴的模态试验原理	(104)
6.2.2 碳纤维复合材料传动轴的模态试验	(105)
6.2.3 碳纤维复合材料传动轴的模态试验与仿真结果对比	(109)
7 碳纤维复合材料传动轴的固化监测	(110)
7.1 基于光纤光栅传感的碳纤维复合材料传动轴固化监测原理	(112)
7.1.1 碳纤维复合材料传动轴的固化残余应力	(112)
7.1.2 光纤光栅的传感原理	(114)
7.1.3 光纤光栅的封装与温度灵敏度标定	(116)
7.2 埋入光纤光栅的碳纤维复合材料传动轴的制备	(123)
7.2.1 光纤光栅的布置	(123)
7.2.2 埋入光纤光栅的碳纤维复合材料传动轴试件的制备	(126)
7.3 基于光纤光栅传感的碳纤维复合材料传动轴固化监测	(133)
7.3.1 温度参考光栅的监测曲线	(134)
7.3.2 温度补偿后的固化残余应变	(137)
7.4 本章小结	(139)
参考文献	(140)

1

碳纤维及其复合材料概述

碳纤维(Carbon fiber)是纤维状的碳素材料,是指由有机纤维原丝在 1000°C 以上的高温下碳化形成,且含碳量在 90% 以上的高性能纤维材料。碳纤维具有一般碳素材料的特性,如耐高温、耐摩擦、耐腐蚀及导电导热等,但与一般碳素材料不同的是,其触感柔软,有显著的各向异性,可加工成各种织物,沿纤维轴方向表现出很高的强度。碳纤维作为一种高性能纤维,具有高比强度、高比模量、抗辐射、耐疲劳、抗蠕变和热膨胀系数小等一系列优异性能,既可用作结构材料承载负荷,又可作为功能材料发挥作用。因此,碳纤维及其复合材料近几年发展得十分迅速。

1.1 碳纤维的结构、特性以及分类

碳纤维的结构取决于原丝结构和碳化工艺,但无论采用哪种材料,碳纤维中碳原子平面总是沿纤维轴平行取向。通过 X 射线衍射、电子衍射和电子显微镜研究发现,真实的碳纤维结构并不是理想的石墨点阵结构,而是乱层石墨结构,如图 1-1 所示。构成此结构的基元是正六边形碳原子的层晶格,由层晶格组成层平面。在层平面内的碳原子以强共价键相连,其键长为 0.1421 nm ;在层平面之间则由弱的范德华力相连,层间距为 $0.336\sim 0.344\text{ nm}$;层与层之间的碳原子没有规则的固定位置,因而层片边缘参差不齐。处于石墨层片边缘的碳原子与层面内部结构完整的基础碳原子不同。层面内部的基础碳原子所受的引力是对称的,键能高、反应活性低;处于表面边缘处的碳原子受力不对称,具有不成对电子,活性比较高。

碳纤维以聚丙烯腈(PAN)、沥青、粘胶纤维等为原材料,先后经过预氧化、碳化、石墨化等过程制成,其基本性能如表 1-1 所示^[7]。

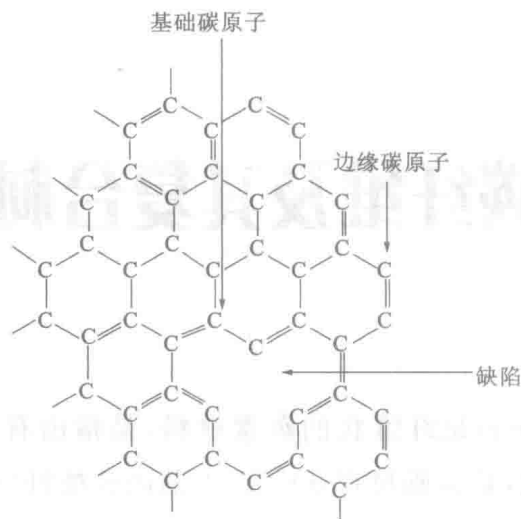


图 1-1 碳纤维结构示意图

表 1-1 碳纤维的基本性能

性能参数	碳纤维			
	普通	高强度	高模量	极高模量
直径(μm)	6	6	6	6
熔点($^{\circ}\text{C}$)	3650	3650	3650	3650
相对密度 γ	1.75	1.75	1.75	1.75
拉伸强度 σ_b ($\times 10$ MPa)	250~300	350~700	240~350	75~250
模量 E ($\times 10^5$ MPa)	2.3	2.25~2.28	3.5~5.8	4.6~4.7
热膨胀系数 α ($\times 10^6 / ^{\circ}\text{C}$)	-0.41	-0.38	-0.6	-1.4
伸长率 δ (%)	1.5~1.6	2.0~2.1	1.5~2.4	0.5~0.7
比强度 (σ_b/γ) ($\times 10$ MPa)	143~171	200~400	137~200	43~143
比模量 (E/γ) ($\times 10^5$ MPa)	1.31	1.29~1.3	2.0~2.34	2.63~3.83

碳纤维主要具备以下特性:

- (1) 密度小、质量轻,碳纤维的密度相当于钢密度的 $1/4$ 、铝合金密度的 $1/2$ 。
- (2) 热膨胀系数小,热稳定性好。
- (3) 摩擦系数小,并具有润滑性。
- (4) 导电性好, 25°C 时高模量碳纤维的比电阻为 $775\ \Omega \cdot \text{cm}$,高强度碳纤维则为 $1500\ \Omega \cdot \text{cm}$ 。
- (5) 耐高温和低温性好,在 3000°C 非氧化气氛下不熔化、不软化,在液氮温度

(-196℃)下依旧很柔软,不脆化;耐酸性好,对酸呈惰性,能耐浓盐酸、磷酸、硫酸等的侵蚀。除此之外,碳纤维还具有耐油、抗辐射、抗放射、吸收有毒气体和使中子减速等特性。

(6)碳纤维的抗拉强度很高,是钢材的4~5倍,比强度为钢材的10倍,高模量碳纤维抗拉强度比钢材大68倍以上,其弹性模量比钢材大1.8~2.6倍。

1.2 碳纤维增强复合材料概述

尽管碳纤维可单独使用发挥某些功能,然而它属于脆性材料,只有将它与基体材料牢固地结合在一起时,才能利用其优异的力学性能,使之更好地承载负荷。因此,可将碳纤维作为增强材料,通过选用不同的基体材料和复合方式制成复合材料来达到复合效果。碳纤维可用于增强树脂、碳、金属及各种无机陶瓷材料,而目前使用得最多、最广泛的是树脂基复合材料。

1.2.1 碳纤维增强陶瓷基复合材料

陶瓷具有优异的耐蚀性、耐磨性、耐高温性和化学稳定性,广泛应用于工业和民用产品,它的缺点是对裂纹、气孔和夹杂物等细微的缺陷很敏感。碳纤维增强陶瓷可有效地改善材料韧性,改变陶瓷的脆性断裂形态,同时阻止裂纹在陶瓷基体中的迅速传播、扩展。

目前,国内外比较成熟的碳纤维增强陶瓷材料是碳纤维增强碳化硅材料,因其具有优良的高温力学性能,在高温下服役不需要额外的隔热措施,因而在航空发动机、可重复使用航天飞行器等领域得到广泛应用。其主要制备方法有:泥浆浸渗和混合工艺,化学合成工艺(溶胶-凝胶及聚合物先驱体工艺),熔融浸渗工艺,原位化学反应(CVD、CVI反应烧结等)等。

碳纤维增强陶瓷基复合材料在奥迪汽车轮毂上有所应用,如图1-2所示。

1.2.2 碳/碳复合材料

碳/碳复合材料是由碳纤维或各种碳织物增强碳,或石墨化的脂碳(沥青)以

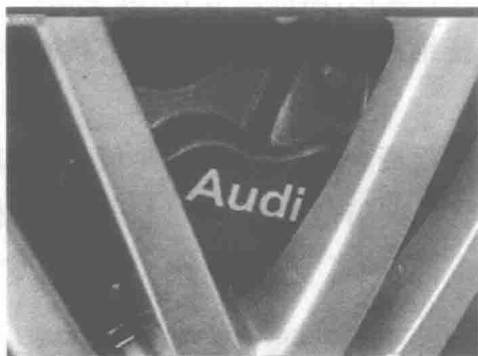


图 1-2 奥迪汽车轮毂中碳纤维增强陶瓷基复合材料

及化学气相沉积(CVD)碳所形成的复合材料,是具有特殊性能的新型工程材料。碳/碳复合材料由三种不同组分构成,即树脂碳、碳纤维和热解碳。由于它几乎完全是由元素碳组成,故能承受极高的温度和极大的加热速率。通过碳纤维适当的取向增强,可得到力学性能优良的材料,在高温时这种性能保持不变,甚至某些性能指标有所提高。碳/碳复合材料抗热冲击和抗热导能力极强,且具有一定的化学惰性。碳/碳复合材料的发展主要受航空航天工业发展的影响。它具有高的烧灼热、低的烧蚀率,抗热冲击和在超高温环境下具有高强度等一系列优点,被认为是一种高性能的烧蚀材料。碳/碳复合材料可以作为导弹的鼻锥,烧蚀率低且烧蚀均匀,从而能提高导弹的突防能力和命中率。碳/碳复合材料还具有优异的耐摩擦性能和高的热导率,使其在飞机刹车片和轴承等方面得到了应用;它也可以作为飞机的刹车盘。碳与生物体之间的相容性极好,再加上碳/碳复合材料的优异力学性能,使之适宜制成生物构件插入活的生物机体内作为整形材料,如人造骨骼、心脏瓣膜等。

1.2.3 碳纤维增强金属基复合材料

碳纤维增强金属基复合材料是以碳纤维为增强纤维、金属为基体的复合材料,金属基体多采用铝、镁、镍、钛及它们的合金等,其中,碳纤维增强铝、镁复合材料的制备技术比较成熟。碳纤维增强金属基复合材料与金属材料相比,具有高的比强度和比模量;与陶瓷相比,具有高的韧性和耐冲击性能。制造碳纤维增强金属基复合材料的主要技术难点是碳纤维的表面涂层,以防止在复合过程中损伤碳纤维,避免复合材料的整体性能下降。目前,在制备碳纤维增强金属基复合材料

时碳纤维的表面改性主要采用气相沉积法、液钠法等方法,但因其过程复杂、成本高,限制了碳纤维增强金属基复合材料的推广应用。

碳纤维增强金属基复合材料的主要制备工艺方法有:固相法、液相法和原位复合法。固相法主要有粉末冶金、固态热压法、热等静压法;液相法主要有真空压力浸渍法、挤压铸造法;原位复合法主要包括共晶合金定向凝固、直接金属氧化物法、反应生成法。

碳纤维增强金属基复合材料的成品如图 1-3 所示。



图 1-3 碳纤维增强金属基复合材料

1.2.4 碳纤维增强树脂基复合材料

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)是目前最先进的复合材料之一。它以轻质、高强、耐高温、抗腐蚀、热力学性能优良等特点广泛用作结构材料及耐高温、抗烧蚀材料,是其他纤维增强复合材料所无法比拟的。

碳纤维增强树脂基复合材料所用的基体树脂主要分为两大类,一类是热固性树脂,另一类是热塑性树脂。热固性树脂由反应性低分子量预集体或带有活性基团的高分子量聚合物组成:成型过程中,在固化剂或热作用下进行交联、缩聚,形成不熔不溶的交联体型结构。在复合材料中常采用的有环氧树脂、双马来酰亚胺树脂、聚酰亚胺树脂以及酚醛树脂等。热塑性树脂由线型高分子量聚合物组成,在一定条件下溶解熔融,只发生物理变化。常用的热塑性树脂有聚乙烯、尼龙、聚四氟乙烯以及聚醚醚酮等。

在碳纤维增强树脂基复合材料中,碳纤维起到增强作用,而树脂基体则使复合材料成型为承载外力的整体,并通过界面传递载荷于碳纤维,因此它对碳纤维复合材料的技术性能、成型工艺以及产品价格等都有直接的影响。碳纤维的复合方式也

会对复合材料的性能产生影响。碳纤维增强树脂基复合材料如图 1-4 所示。

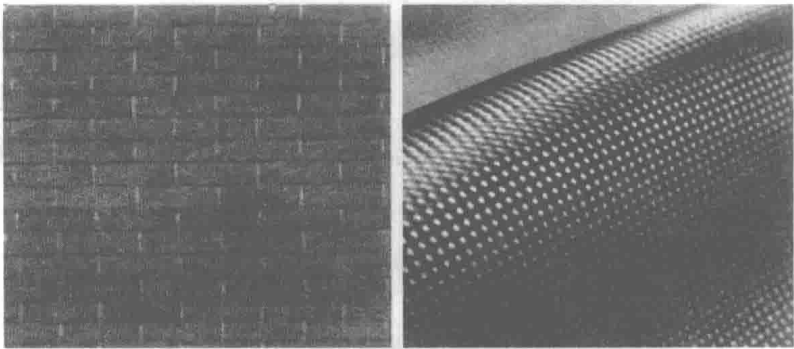


图 1-4 碳纤维增强树脂基复合材料预浸布及板件

本书使用的碳纤维复合材料的基体为环氧树脂,其主要优点是黏结力强,与碳纤维表面浸润性好,且固化收缩小,并具有较高的耐热性,固化成型也较方便。环氧树脂的拉伸强度为 60~95 MPa,模量为 $(3\sim4)\times10^3$ MPa,抗压强度为 90~110 MPa,抗弯强度为 100 MPa^[8]。

表 1-2 列出了碳纤维环氧树脂基复合材料与金属材料的基本力学性能参数^[7]。

表 1-2 碳纤维环氧树脂基复合材料与金属材料的基本力学性能参数

性能参数	碳纤维复合材料		金属材料		
	碳纤维/ 环氧树脂	中模高强 碳纤维/环氧树脂	钢 (结构用)	铝合金	钛合金
密度(g/cm ³)	1.6	1.6	7.8	2.8	4.5
纵向拉伸强度(MPa)	1760	2950	1200	420	1000
纵向拉伸模量(GPa)	130	154	206	72	117
比强度[MPa·(g/cm ³) ⁻¹]	1100	1844	153	151	222
比模量[GPa·(g/cm ³) ⁻¹]	81.25	96.25	26.4	25.7	26

1.3 碳纤维及其复合材料的应用

碳纤维复合材料凭借其优良的性能,已经在航空航天、汽车、结构加固工程、新能源开发、休闲用品等领域得到广泛的应用。

1.3.1 航空航天

碳纤维复合材料最初主要应用于航空航天业,因为发射航天器的成本与质量成正比关系,所以,如何在保证航天器性能的同时减轻其质量成为最重要的问题。碳纤维复合材料因具有高比强度、高比模量、使用温度范围大等优点而在航天工业得到深入的应用,从航天器的外壳、内设、结构到航空发动机,几乎都是采用碳纤维复合材料制作而成的。近年来,随着碳纤维复合材料制造成本的下降,军用航空飞机和民用航空飞机也开始大规模使用该材料以大幅度减轻机体机构质量、改善气动弹性、提高飞机的综合性能。

据统计,目前碳纤维复合材料在小型商务飞机和直升机上的使用量已占 70%~80%,在军用飞机上占 30%~40%,在大型客机上占 15%~50%(表 1-3)。以美国波音公司的 B777 型号飞机为例,碳纤维复合材料在该型号飞机上的使用比例达到 9%。如图 1-5 所示,这些先进复合材料主要应用在飞机尾翼、襟翼、副翼、天线罩、整流罩、短舱和地板梁等构件,具体包括:垂直安定面翼盒、平尾翼盒、方向舵、升降舵、前后缘壁板、地板梁、外侧副翼、外侧襟翼、襟翼、襟副翼、整流包皮、内外侧扰流板、后缘壁板、发动机短舱、发动机支架整流罩、前起落架舱门、固定前缘、雷达天线罩等。

在航天工业中用作导弹隔热及结构材料,如火箭喷管、鼻锥、大面积隔热层;卫星构架、天线、太阳能翼片底板、卫星-火箭结合部件;航天飞机机头,机翼前缘和舱门等制件;哈勃太空望远镜的测量构架,太阳能电池板和无线电天线等。

表 1-3 碳纤维复合材料在各类飞机上的应用情况

战斗机	美国: F-16, F-14, F-18, YF-22, F-22, JSF, UCAV 欧洲: Gripen JAS-39, Mirage 2000, Rafael, Eurofighter Typhoon, Lavi, DASA Makoc 俄罗斯: MiG-29, Su series
运输机	美国: KC-1358, C-17, B-777, B-767, MD-11 欧洲: A-320, A-340, A-380, Tu-204, ATR42, Falcon 900, A300-600 ST
普通客机	Piaggio, Starship, Premier 1
螺旋桨飞机	V-22, Eurocopter Tiger, Comanche RAH-66, Bell/Agusta BA-609, EH101, Super Lynx 300, S-92