



“十三五”国家重点图书出版规划项目
先进复合材料技术丛书

ADVANCED COMPOSITES
MANUFACTURING TECHNOLOGY

先进复合材料 制造技术

谢富原 编著

航空工业出版社



“十三五”国家重点图书出版规划项目
先进复合材料技术丛书

先进复合材料制造技术

谢富原 编著

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书系统介绍了先进复合材料制造技术的最新发展状况、相关专业知识和研究和工程方面的实践经验,重点阐述了基于预浸料的制造方法和基于树脂转移的制造方法,同时还介绍了拉挤成形、自动铺带、自动铺丝等自动化成形技术,整体化结构的制造技术及复合材料的质量控制。本书适合于从事复合材料产品研发和生产的工程技术人员,也适合于对此领域感兴趣的在校大学生及研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进复合材料制造技术 / 谢富原编著. -- 北京 :
航空工业出版社, 2017. 9
(先进复合材料技术丛书)
ISBN 978 - 7 - 5165 - 1317 - 0

I. ①先… II. ①谢… III. ①复合材料—制造 IV.
①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 222222 号

先进复合材料制造技术 Xianjin Fuhe Cailiao Zhizao Jishu

航空工业出版社出版发行
(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936597 010 - 84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2017 年 9 月第 1 版

2017 年 9 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 25.75

字数: 657 千字

印数: 1—2500

定价: 86.00 元

丛书前言

先进材料是科学技术发展和国民经济建设的重要支柱。先进复合材料作为一类轻质高效、节能环保的新型材料，在先进材料领域具有极其重要的地位。自20世纪60年代问世以来，先进复合材料始终是世界各国重点研究开发的关键材料之一，近年来更是备受青睐与重视，在世界各国的军民用领域，尤其是航空领域起到了至关重要的作用。先进复合材料的用量已经成为航空结构先进性的重要标志，大型飞机波音787、空客A350的先进复合材料用量达到50%以上，展示了其令人鼓舞的发展前景。此外，先进复合材料在基础设施、沿海油气田、风力发电、汽车和体育用品等民用工业领域的广泛应用，向人们昭示了其蓬勃发展的未来。

国内先进复合材料的发展应用已有30多年的历史，在此过程中获取了大量的性能数据，也积累了大量的设计使用经验。目前先进复合材料继续向高性能化、多功能化和尖端化发展，并向民用领域快速渗透和规模扩张，产业进入应用扩张带动成本持续降低的新阶段。为了适应这一发展需求，我们组织国内先进复合材料领域有实际经验的专家，吸取了国外的先进经验，汇总了国内外最新的研发成果，旨在为国内提供一套全面、系统并具有工程应用

价值的“先进复合材料技术丛书”。考虑到目前先进复合材料的规模和成熟程度，“先进复合材料技术丛书”的内容主要针对先进树脂基复合材料，涵盖先进树脂基复合材料技术基础、制造技术、性能表征、使用维护以及适航审定等最新成果。

对于21世纪的企业，其成功不仅仅是利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势，而利用拥有的知识带动和促进产业的跨越更是一种挑战和责任。把拥有的知识用书面文字的形式呈现出来，构建一个公共资料库和交流平台，让更多的人从中受益，为产业的跨越提供支撑——这就是中航复合材料有限责任公司、中国复合材料学会和航空工业出版社出版这套“先进复合材料技术丛书”的初衷。

相信这套丛书的出版，会使更多的复合材料科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力我国复合材料产业的自主创新，对复合材料产业的科技进步产生积极影响。

中国工程院院士
中国复合材料学会理事长 陈祥宝
“先进复合材料技术丛书”主编

前 言

20世纪60年代以来,以高性能纤维增强体为特征的先进复合材料经历了长足的发展,今天已成为最主要的航空结构材料之一。在当代的军用和民用飞机上,复合材料的应用范围几乎覆盖了所有的关键结构部位。在许多场合,复合材料的应用水平已成为表征飞机先进程度的一项重要指标。与此同时,随复合材料的潜在使用效益和成本效益为越来越多的行业所认识,其应用对象已逐渐由高端的航空航天飞行器延伸到其他领域。从汽车、船舶、火车等大型交通工具,到自行车、取暖装置等家用器具,处处能够看到复合材料的存在。

先进复合材料的发展现状是材料、力学、设计、制造等多个科学技术领域共同努力的结果。其中制造技术直接担负将产品设想变为现实的任务,重要性不言而喻。在当前发展趋势下,航空工业作为先进复合材料应用的先行者,将其通过多年实践考验的制造知识和工程经验系统地介绍给更多的技术工作者,无论对于业内相关工作的持续前行,还是对于复合材料在更广泛领域的高效应用,都是十分必要的。因此,在航空工业出版社的大力支持下,我们集合了多位长期工作在航空复合材料结构研发和生产第一线的材料和制造技术专家,共同完成了本书的编写。在书中阐述的大部分技术环节上,各位作者均有亲身的实践体会,这也是本书的特点所在。

本书面向的主要读者对象为从事复合材料产品研发和生产的工程技术人员,以及有兴趣深入了解复合材料制造技术的在校大学生和研究生。鉴于树脂基复合材料是当前应用最为广泛的复合材料分支,本书的写作主要围绕此类材料的制造问题进行。希望本书能为读者的工作和学习起到帮助和参考的作用。

本书共分7章,逐一讨论先进复合材料制造技术方面的一系列主要方法和关键问题。本书由谢富原主编,其中第1章由戴棣编写,第2章由梁宪珠、常海峰、程文礼、刘天舒、孙占红、胡江波、张铖、张博明、薛向晨、荀国立、王永贵、匡载平、姚锋、曲春艳、王德志编写,第3章由赵龙、刘强、黄峰、高艳秋、马金瑞、王海雷、张宪华编写,第4章由程文礼、王永贵编写,第5章由戴棣编写,第6章由郑广强、张洋、肖军、王显峰、姚锋编写,第7章由王永贵、王雪明、寇哲君、刘松平、李乐刚编写,最后由谢富原、赵龙、梁宪珠、戴棣、王海雷对全书进行了统稿和审定,对所有编写者付出的辛劳,特在此表示衷心的感谢。

谢富原
2017年4月

目 录

第1章 概论	(1)
1.1 复合材料制造技术及其特点	(1)
1.2 复合材料制造方法的主要类型	(2)
1.3 复合材料制造技术的发展概况	(5)
1.4 本书内容安排	(7)
第2章 基于预浸料的制造方法	(9)
2.1 概述	(9)
2.1.1 预浸料的定义	(9)
2.1.2 预浸料的制备方法	(9)
2.1.3 基于预浸料的成形方法	(9)
2.1.4 国内外预浸料发展现状和发展趋势	(10)
2.2 预浸料	(10)
2.2.1 纤维	(10)
2.2.2 树脂	(11)
2.2.3 预浸料制备	(14)
2.2.4 预浸料工艺性	(17)
2.2.5 预浸料的增韧	(20)
2.2.6 国内外预浸料及复合材料性能	(23)
2.2.7 胶黏剂	(33)
2.2.8 填充材料	(42)
2.3 预浸料铺叠	(44)
2.3.1 铺层	(44)
2.3.2 铺叠工艺	(46)
2.3.3 典型结构毛坯制备	(49)
2.4 固化成形	(53)
2.4.1 压力的施加方法	(54)
2.4.2 热固性树脂固化参数	(61)
2.4.3 热压罐成形工艺参数控制	(62)
2.4.4 工艺质量控制	(74)
2.5 成形方案	(80)
2.5.1 蒙皮成形方案	(80)
2.5.2 梁成形方案	(81)
2.5.3 翼面壁板成形方案	(84)
2.5.4 机身壁板和筒形件成形方案	(87)

2.5.5	整体盒段成形方案	(89)
2.5.6	夹芯结构成形方案	(92)
2.5.7	成形方案与结构外形精度的关系	(93)
2.6	成形模具的结构设计与制造	(97)
2.6.1	成形模具的材质	(97)
2.6.2	成形模具设计的基本原则	(99)
2.6.3	框架式模具的结构设计与制造	(100)
2.6.4	梁成形模具的结构设计与制造	(110)
2.6.5	大长细比长桁成形模具的结构设计与制造	(112)
2.7	基于预浸料制造方法的工艺适用性	(114)
2.7.1	材料工艺适用性	(114)
2.7.2	成形工艺适用性	(115)
2.8	应用情况	(122)
2.8.1	国外应用情况	(123)
2.8.2	国内应用情况	(124)
2.9	预浸料方法的优点和局限性	(125)
2.9.1	预浸料的优点	(125)
2.9.2	预浸料方法的优点	(125)
2.9.3	预浸料方法的局限性	(126)
第3章	复合材料液体成形技术	(127)
3.1	概述	(127)
3.2	纤维预制体	(127)
3.2.1	增强纤维织物	(127)
3.2.2	铺叠预制体	(137)
3.2.3	编织预制体	(139)
3.2.4	缝合预制体	(141)
3.2.5	Z-Pin 预制体	(146)
3.3	复合材料树脂传递模塑 (RTM) 成形技术	(149)
3.3.1	RTM 成形技术原理和特点	(149)
3.3.2	适用于 RTM 技术的基体材料	(150)
3.3.3	RTM 技术的模具与设备	(155)
3.3.4	RTM 技术的工艺过程控制	(168)
3.3.5	RTM 技术中常见缺陷及工艺过程控制	(170)
3.3.6	RTM 技术的发展	(171)
3.3.7	RTM 技术的国内外应用现状	(177)
3.4	复合材料真空辅助树脂渗透 (VARI) 技术	(183)
3.4.1	VARI 成形技术原理及工艺特点	(183)
3.4.2	适用于 VARI 技术的基体材料	(184)
3.4.3	VARI 技术的设备和模具	(189)
3.4.4	VARI 技术的工艺过程控制	(193)

3.4.5	VARI 技术中常见的缺陷类型及控制	(200)
3.4.6	VARI 技术的发展	(205)
3.4.7	VARI 技术的国内外应用现状	(209)
3.5	复合材料树脂膜熔渗 (RFI) 成形技术	(217)
3.5.1	RFI 工艺原理和特点	(217)
3.5.2	适用于 RFI 工艺的基体树脂材料	(219)
3.5.3	RFI 工艺的设备与模具	(222)
3.5.4	RFI 工艺过程控制	(223)
3.5.5	RFI 工艺的发展	(226)
3.5.6	RFI 技术的国内外研究及应用现状	(227)
第4章	先进拉挤成形技术	(233)
4.1	概述	(233)
4.2	先进拉挤成形的材料	(235)
4.2.1	材料工艺及要求	(235)
4.2.2	材料参数及性能	(236)
4.2.3	脱模材料	(239)
4.3	先进拉挤成形工艺过程与工艺参数控制	(240)
4.3.1	先进拉挤成形工艺过程	(240)
4.3.2	先进拉挤成形工艺关键参数及控制	(241)
4.3.3	先进拉挤成形工艺仿真技术	(243)
4.4	先进拉挤成形设备	(246)
4.4.1	供带装置	(246)
4.4.2	预成形装置	(247)
4.4.3	热压装置	(247)
4.4.4	夹持牵引装置	(250)
4.4.5	切割装置	(251)
4.4.6	控制系统	(251)
4.5	先进拉挤成形技术的应用情况	(252)
4.6	先进拉挤技术的优点和局限性及其展望	(253)
第5章	结构的整体化制造技术	(254)
5.1	概述	(254)
5.2	整体化结构的特殊接头	(255)
5.2.1	特殊接头的定义及其在外部载荷作用下的应力特点	(255)
5.2.2	整体化结构接头承载能力的预测和优化	(258)
5.2.3	整体化结构接头承载能力的改善途径	(262)
5.3	整体化结构的制造技术难点及对策	(264)
5.3.1	模具技术	(264)
5.3.2	整体化结构的共固化和胶结共固化界面	(271)
5.3.3	固化变形	(273)
5.3.4	复杂形状结构的铺叠	(279)

5.4 整体化结构应用需注意的一些问题	(285)
第6章 制造技术的自动化和数字化	(287)
6.1 概述	(287)
6.2 自动铺带技术	(288)
6.2.1 自动铺带技术含义	(288)
6.2.2 自动铺带技术发展历程	(289)
6.2.3 自动铺带技术分类	(289)
6.2.4 自动铺带机	(289)
6.2.5 自动铺带材料	(297)
6.2.6 自动铺带编程系统	(298)
6.2.7 自动铺带工艺的实施	(306)
6.2.8 国内外自动铺带技术的应用	(307)
6.2.9 小结	(313)
6.3 自动铺丝工艺技术	(313)
6.3.1 自动铺丝工艺技术概述	(313)
6.3.2 自动铺丝工艺材料体系	(316)
6.3.3 自动铺丝工艺成形设备	(319)
6.3.4 自动铺丝工艺 CAD/CAM 软件技术	(320)
6.3.5 自动铺丝工艺成形专用模具	(326)
6.3.6 自动铺丝工艺参数控制	(328)
6.3.7 自动铺丝技术的应用	(330)
6.3.8 自动铺丝技术未来发展趋势	(334)
6.4 自动铺放工艺过程中的监控技术	(335)
6.4.1 铺放质量监控技术	(335)
6.4.2 铺放工艺参数监控技术	(336)
6.5 铺放工艺过程中的计算机模拟	(339)
6.5.1 铺放工艺过程仿真	(339)
6.5.2 铺丝工艺仿真分析	(342)
6.6 小结	(344)
第7章 复合材料产品的质量控制	(345)
7.1 概述	(345)
7.2 质量控制	(345)
7.2.1 复合材料质量控制的困难	(345)
7.2.2 材料内部缺陷的种类和控制方法	(346)
7.2.3 结构固化变形的原因	(355)
7.2.4 检测方法的现状和发展需求	(383)
参考文献	(393)
后记	(398)

第1章 概 论

1.1 复合材料制造技术及其特点

复合材料（简称复材）由两种或两种以上的组分材料（如纤维、树脂）按一定方式复合而成。与组分材料相比，复合后形成的新材料会具备某些特殊的性能优势，从而使有相应需求的应用对象显著受益。

复合材料制造技术泛指不同类型复合材料产品制造所依赖的工艺和装备技术系统。复合材料制造技术一方面要保证组分材料按预先设计的排列方式实现复合，另一方面则要保证产品的外形和质量按设计要求得以稳定和可重复的实现。

对于不同类型的复合材料，所涉及制造技术的内容各不相同。本书的讨论范围仅限于树脂基复合材料。因此，本书中所出现的“复合材料”这一术语，如无特殊定语说明，均特指树脂基复合材料。

复合材料制造技术具备以下特点。

(1) 材料和产品形状的生成同步完成

如上所述，复合材料制造技术同时涉及组分材料的复合和产品最终外形的实现。两者在同一制造步骤中完成。而大部分金属产品与此不同，其制造过程在已经是成品的材料对象上展开。这种方式的一个突出优点是：材料如有不能允许的缺陷，可通过必要的检测规程来阻止其进入产品制造阶段，从而有利于最终产品的质量稳定性控制。复合材料产品的制造无法采用这种方式，其成形过程既须考虑产品形状能否按要求实现，又须兼顾材料能否按要求生成，工艺上所面临的问题相对较多。

(2) 产品制造质量的影响因素错综复杂

复合材料产品的制造过程同时是材料的生成过程。复合材料的生成既涉及组分材料的相互结合，又涉及组分材料自身物理特性或化学结构的变化。工艺的成败不仅取决于产品成形过程中温度、压力场控制的合理与否，同时还有可能受到组分材料存储热历程的影响。此外，由于复合材料的各向异性特征，成形后产品会因各向收缩的不一致，以及残余应力的特殊分布方式而产生变形。如何合理、统筹地应对上述影响因素，以获得高度重现性的制造结果，无疑是复合材料制造技术最主要的关注点之一。

(3) 对产品制造缺陷进行修复的可行空间窄小

对于复合材料，特别是目前大量应用的热固性树脂基复合材料，其产品固化过程中一旦发生缺陷（包括材料质量缺陷或产品尺寸或形状缺陷），要通过修复来改变产品，使其与无缺陷产品完全一致，可行性受限极大。限制因素有三。其一，复合材料内部的纤维如在修复过程中被切断，再行续接目前尚无可能。其二，在尺寸超出容差范围的情况下，即便可以通过机械加工将产品的尺寸修至要求范围，但加工后材料组分的复合状态（如纤维的连续性，纤维/树脂的相对比例等），一般会与要求相差甚远。其三，热固性树脂

一旦固化，降低其黏度以重现流动性的可能即不复存在。因此，此类树脂基复合材料内部如有缺陷，修复工作无法通过熔融树脂来调整材料的内部状态，而只能采用挖除缺陷部位，胶结或机械连接补片的方式进行。修复结果与无缺陷产品相比，差异一目了然。

(4) 存在特殊的制造过程数字化和自动化问题

从产品数字化定义的角度看，复合材料产品与一般金属产品的一个显著不同之处在于：其数字模型要提供的信息不仅仅包含产品的形状、尺寸、材料，而且要包含产品内部纤维的排列方式。由于大部分复合材料产品采用“层合”的结构形式，因此在产品制造中，如何流畅实现铺层展开、切割、铺叠等复合材料制造特有工序中产品数据的准确传递和转换，也是制造过程数字化面临的特殊问题。同时，铺层的切割、定位、铺叠操作也成为复合材料产品制造过程自动化所关心的，不同于一般金属加工的特殊问题。

(5) 提供了实现高度整体化产品的可能性

一个产品往往由多个零件组合而成。在功能要求给定的前提下，零件数量越少，可认为其整体化程度越高。相对于金属材料，复合材料产品因其制造工艺特点，可以以较低的成本代价来实现整体化程度较高的结构方案。这类结构方案的一个突出特点是，用于零件组合的紧固件数量和相应的装配工作量可大幅度降低。而对于复合材料结构而言，无论是所用金属紧固件数量的减少，还是结构上连接孔洞数量的减少，均有利于结构的减重。这一优势对于结构设计人员，尤其是飞机结构设计人员，无疑极具吸引力。本书在相关章节中将对整体化结构的一些技术问题进行更深入的讨论。

本书的书名为《先进复合材料制造技术》，在进入讨论之前，有必要对“先进复合材料制造技术”的范围做一界定。顾名思义，“先进复合材料制造技术”应有两方面的含义。一是“先进复合材料”，二是“先进制造技术”。“先进复合材料”是被广泛应用的术语，其基本含义为：小直径、高强度、高模量的连续纤维束按特定方式布入均质基体而形成的具有各向异性特征的新材料。就本书而言，均质基体特指树脂，纤维材料则定位于碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维三者。在“先进制造技术”上，本书编写的主要考虑是：能以相对较低的成本，来高质量、高效率、高稳定性地实现各种高端复合材料产品的技术系统。鉴于航空工业涉及的复合材料产品，无论在材料的先进性和制造技术的复杂性方面，均可作为高端产品的典型代表，因此本书将航空复合材料产品直接涉及的制造技术，作为书中内容的主线。

1.2 复合材料制造方法的主要类型

复合材料产品随其组分材质和形式的差异，产品的制造方法也会显著不同。就增强纤维而言，其形式对制造过程产生的决定性影响作用表现在两个方面：

- (1) 所采用的增强纤维为连续纤维还是短切纤维；
- (2) 当增强纤维为连续纤维时，纤维采用何种排列方式。

增强纤维在复合材料内部既可采用长纤维束的形式有序取向排布，也可采用短切纤维束的形式随机取向排布。前者对应的复合材料称为连续纤维增强复合材料，后者对应的复合材料则称为短切纤维增强复合材料。由于本书对“先进复合材料”的讨论限于“连续纤维束”范围，书中对后者不再做具体的介绍。而对于前者，其制造过程完全超越一般

塑料工艺的范畴而具备独有的工艺特征，是本书讨论的主要对象。

采用连续纤维增强的复合材料按纤维在其内部的排列方式又可分为两类：一为厚度向无纤维增强的材料结构（纯粹的层合结构），二为厚度向有纤维增强的材料结构（如编织结构、缝合结构、Z-Pin 纤维钉增强结构等）。对于先进复合材料而言，实现前者的主要途径是将树脂浸渍于纤维之上，形成布、带、束状预浸料，再将预浸料逐层铺叠，制成具有产品形状的预浸料叠层毛坯，在必要的温度压力条件下固化得到复合材料产品。而后的实现一般不采用预浸料途径，而是先通过纺织和缝合方法将纤维制成具有产品形状的预制体，再以特定方法将树脂转移至纤维预制体内部，在必要的温度压力条件下固化得到复合材料产品。如按制造过程上的这一显著差异对制造方法分类，可得到两种主要的制造方法类型：

- (1) 基于预浸料的制造方法；
- (2) 基于树脂转移的制造方法。

应当指出的是，基于树脂转移的制造方法虽是目前实现厚度向增强复合材料结构的主要途径，但此方法也会被用于制造无厚度向增强的普通层合结构。在制造方法的选择上，纤维的排列方式虽是极重要的考虑对象，但非唯一影响因素。产品性能和制造成本同样会起到一定的影响作用。

基于预浸料的制造方法在高性能复合材料产品的生产中得到非常广泛的应用。在预浸料的形状和后续工艺上，此类方法涵盖极广。按照实施途径的不同，从中延伸出一系列分支方法，如用预浸丝束缠出旋转体制件的缠绕方法、将预浸丝束铺出复杂形状体制件的丝束铺放技术、将预浸带铺出小曲率体制件的带铺放技术、将裁切好的预浸布先制成平板叠层块后贴模成形的热隔膜技术等。高性能的大尺寸复合材料结构件由于其外形特点及基体材料的工艺特点，一般需将铺叠后的预浸料叠层块封装于真空袋中，在可提供高温和高压环境的热压罐中完成固化。目前用于航空承力结构的复合材料产品大部分基于预浸料方法制造，之所以如此，主要源于以下几方面原因：

(1) 采用预浸料方法时，由于预浸料中的纤维通过所浸树脂的黏性而黏附于预浸料载体之上，后续的铺叠操作中，纤维不易发生滑移和弯曲。与采用干纤维制作预制体的树脂转移方法相比，预浸料方法所制产品内部纤维方向的准确性和一致性可以得到更好的控制。由于纤维取向对结构力学性能的重要影响作用，这一优点理所当然地为高性能结构设计人员所青睐。

(2) 采用树脂转移方法时，树脂与纤维的复合通过向纤维预制体注入树脂而实现。为保证产品质量，纤维预制体需保持一定程度的渗透率。而这实际上意味着：采用此法制造一些有较高纤维含量要求的结构产品时，会面临较大的工艺困难。相比而言，采用预浸料方法制造此类结构产品，难度显著降低。

(3) 采用预浸料方法时，产品的固化成形过程不涉及树脂转移问题，模具的复杂性以及对模具强度刚度要求较低。尤其对于大型结构制造，这是非常重要的优点。

另一方面，预浸料方法也存在以下局限性：

(1) 对于三维编织或缝合等厚度向增强复合材料结构，预浸料方法不适用其制造。即便是以铺层为基础的缝合结构，如缝合工序中的缝纫对象为预浸料叠层块，缝纫操作对纤维的损伤会显著高于干纤维织物叠层块，材料的性能会发生较大幅度的下降。因此，一

般情况下只对未浸渍树脂的干纤维织物叠层块进行缝合，然后采用树脂转移方法完成产品的制造。

(2) 与树脂转移方法相比，预浸料方法需要专门增添一道预浸料制造工序，对于产品的成本控制，有可能成为不利因素。

由于预浸料方法的上述局限，在航空复合材料工业领域，在其仍持有突出重要地位的同时，近年来树脂转移方法也愈来愈多地被用于不同类型复合材料产品的制造。树脂转移方法的一个根本特点是省却预浸料制造工序，而是在产品成形的过程中完成树脂对纤维的浸渍。对于许多产品，这一特点可能成为降低制造成本的一个潜在有利条件。用于航空结构等高端产品的树脂转移方法包括三个主要分支：树脂传递模塑（RTM）法，树脂膜熔渗（RFI）法和真空辅助树脂渗透（VARI）法。

树脂传递模塑法是应用最为广泛的树脂转移方法。其工艺为：将纤维预制体置于一封闭的模具型腔之中，然后将液态树脂注入模具型腔，使之渗入预制体中的纤维间空隙，并在必要温度环境下完成复合材料的固化。此法的特点在于：

(1) 成形压力由注射压力保证。无需特殊的热压罐设施。对于有意制造小尺寸复合材料零件但不具备热压罐设施的生产商，这个特点是非常有吸引力的。

(2) 省却了预浸料制造工序，对于成本控制是一个潜在的有利因素。

(3) 由于成形过程在密闭的模腔内进行，制件的所有表面的形状和尺寸均为模具所控制，相关精度（尤其是厚度向尺寸精度）可满足较高的要求。

(4) 树脂原料在工艺全程中处于密闭容器之内。与预浸料方法相比，在环境保护方面有突出的优越之处。

(5) 由于零件在封闭的模腔内成形，而且模具腔壁须承受由液体树脂注射压力导致的载荷，对于同等尺寸的零件，此法所用模具的复杂程度、强度刚度要求，以及相应的设计制造费用会远高于预浸料方法。由于模具的技术可行性限制和高成本特点，此法一般不适用于大型零件产品或小批量产品。

(6) 要求树脂在注入过程中具有很低的黏度，从而可充分渗入纤维预制体的内部空隙之中，并对纤维充分浸润。同时，由于成形在封闭模腔中进行，为避免材料内部生成过多孔隙，不宜采用挥发性溶剂来降低树脂黏度。由于这两点，对所用树脂的工艺性有特殊的要求。

树脂膜熔渗法出现于 20 世纪末。该法将基体树脂制成固态的膜或块，置于纤维预制体与成形模具之间，并对纤维预制体进行真空袋封装。复合材料成形过程中，树脂因温度上升而熔融，在热压罐压力作用下渗入纤维预制体内处于真空状态的空隙并浸渍纤维。最后在纤维预制体内完成固化。此法的主要特点如下：

(1) 树脂膜熔渗工艺中，对制件的成形压力通过真空袋封装和外部气压实现，因此该法对模具的强度刚度要求以及模具的制造成本一般会低于树脂传递模塑法。

(2) 对于通过缝合进行厚度向增强的大型复合材料结构，一方面由于缝合工艺的非预浸料局限性而不能采用预浸料方法，另一方面又由于其大尺寸特点而不宜采用树脂传递模塑方法。这种情况下，树脂膜熔渗工艺是制造此类结构的最好选择。

(3) 此法虽无须制造预浸料，但一般仍须采用热压罐来提供成形压力。对树脂的黏度要求虽宽于树脂传递模塑方法，但仍苛于预浸料方法。

真空辅助树脂渗透法在原理上类似于树脂传递模塑法。不同之处在于：后者通过注射压力将液态树脂强行注入纤维预制体内部的空隙之中，而前者则采用真空袋操作来使纤维预制体的内部空隙呈真空状态，液态树脂可在大气压力（简称气压）驱动下渗入其中，完成树脂和纤维的混合。其后，真空袋内的制件在必要的温度条件下固化，完成制件的成形。此法的主要特点在于：

(1) 可使大型复合材料产品的制造摆脱对热压罐设施的依赖。在一定条件下具备降低制造成本的潜力。

(2) 由于液态树脂的转移仅在大气压力条件下进行，对树脂的流动性（足够低的黏度及低黏度的保持时间）有很高的要求。

(3) 因成形压力方面的局限，制件力学性能在某些场合可能会低于其他方法得到的产品。

复合材料制造方法的选择是复合材料产品开发人员需认真面对的重要技术问题。产品的使用性能往往为复合材料的构成方式所决定，而材料的构成方式以及产品的形状和尺寸必然左右制造方法的取舍。另一方面，当决定使用某种制造方法来制造结构产品时，应清楚这一方法对于结构几何形式、材料构成方式以及产品性能指标的局限性。在实际产品的开发过程中，应针对具体的性能和成本要求，基于不同制造方法的固有特点，通过反复斟酌来形成合理的设计和制造方案，以获取最优的性能/成本综合效益。

1.3 复合材料制造技术的发展概况

先进复合材料制造技术的发展与其在航空结构上的应用历程紧密相关。在很大程度上，这一技术以往的发展走向由航空工业产品的性能需求和成本权衡所决定。鉴于这一点，本节的阐述主要围绕航空复合材料结构的制造技术展开。

先进复合材料的出现始于20世纪60年代。当时此类材料显现的一个“先进”特征是采用了模量显著大于玻璃纤维的材料作为增强体，从而大幅度提升了材料刚度。最初采用的增强材料为硼纤维，但硼纤维仅在少量飞机结构上得到应用，随后即让位于碳纤维。而在一些对电性能或抗冲击性能有特殊要求的场合，芳纶纤维也成为一种新的选择。

20世纪60—90年代，先进复合材料航空结构制造主要采用预浸料方法。如前所述，这种方法之所以长期占有突出位置，是因为所制产品在力学性能上的优势。需要指出的是，在几十年的发展历程中，这种方法所赖以支撑的技术基础不断得到完善，其中包括：预浸料制造技术、辅助材料技术、模具技术以及质量控制技术。顾名思义，预浸料是该方法的根本所在，其制造设备和制造工艺的发展结果使当代的复合材料产品制造人员能够得到质量稳定，同时能够满足不同用途需求的原材料支持。而所谓辅助材料，主要是指供模具制造、固化封装、制件脱模等制造步骤使用的特殊用材。辅助材料的系统性、耐温性、可靠性、工艺性、经济性会在很大程度上影响复合材料产品的性能和成本，从而影响其应用前景。模具技术对于复合材料产品的制造极为关键，产品的形状精度和内部质量主要由模具所决定。而复合材料在结构整体化方面的潜在优势也只有通过模具技术的不断完善才能得到充分的实现。质量控制问题对于复合材料产品至关重要，之所以如此是因为此类产品的固化成形完全在操作人员的直接观察范围之外进行，同时聚合物材料性能的分散特点

又进一步加剧了问题的复杂性。复合材料产品的质量控制无疑与原材料的质量控制密切相关，但就制造技术而言，关注的重点主要在于产品缺陷的成因和预防方法、固化过程中材料状态信息的提取，以及固化后产品的检测评判。几十年来，随原材料稳定性的不断提升，各种传感器和检测手段的不断改进，工程制造经验的不断积累，基于预浸料方法的复合材料产品质量控制达到了比较高的水平，这也是此法为航空工程界所欢迎的重要原因之一。

通过设计和制造的革新来降低结构成本、重量^①和缩短研制周期，始终是先进复合材料领域工程技术人员持续的工作目标。而复合材料结构的整体化是一个主要的探寻方向。整体化结构可大幅度减少零件数量和机械紧固件数量，复合材料结构的减重效果可随整体化程度的提高而显著上升。由于整体化结构制造所面临的技术问题相对复杂，因此结构的整体化水平在一定程度上反映了复合材料结构的制造技术水平。结构整体化研发工作的一个早期的重要例证是美国 AV-8B 垂直起落攻击机的复合材料前机身。该项工作将金属前机身结构的 237 个零件缩减为复合材料结构的 88 个零件，同时将紧固件数量从 6440 个缩减到 2450 个。整个前机身减重 25.3%，大幅度降低了结构的装配工作量。以后许多年来，结构整体化的技术基础研究和工程实践积累了大量的知识和经验，成为先进复合材料制造技术的一个令人关注的分支领域。

先进复合材料在航空结构上的应用虽从军用飞机开始，但从 20 世纪 70 年代起，将其用于商用飞机上的研发工作也随之跟进。从国外 70—80 年代的一些工作实践资料看，将复合材料用于机翼、机身主承力结构的努力并未如期实现其预期效果。所遇及的主要障碍为复合材料结构过低的抗冲击损伤能力和过高的制造成本。而这两方面的问题成为当时复合材料技术发展的主要驱动力。

抗冲击损伤能力受到极大的关注。航空工业界的研发人员认为，克服这方面的弱点有两条道路可循：一是改善基体材料的韧性，二是在结构的厚度向加入增强纤维。前者是重要的材料问题，后者则在很大程度上涉及制造技术。而如前所述，厚度向增强的目标为预浸料方法的能力所不及。虽有研究人员曾尝试对预浸料叠层进行缝合来实施厚度向增强的设想，但纤维浸渍树脂后，缝纫工艺无论在实施难度和还是在对纤维的损伤上，均展现出极不理想的负面效果。因此，厚度向增强纤维的植入须在纤维浸渍树脂之前进行，而新结构形式的制造随之面临两个基本问题是：①如何采用未浸渍树脂的干纤维制造厚度向增强的纤维预制体。②如何将树脂引入纤维预制体并使树脂对纤维实现良好的浸润。从 20 世纪 80 年代起，这两个基本问题引起了一系列的制造技术革新，包括三维编织，缝合，纤维钉（Z-Pin）植入，以及与之配套的各种树脂转移成形方法，如 RTM，RFI，VARI 等。这些技术后来在先进复合材料航空结构上得到了不同程度的应用，从一个侧面提升了复合材料结构的抗冲击损伤能力。

成本问题对于复合材料在商用飞机上的应用前景至关重要。成本问题首先涉及使用成本，这方面的关注焦点是复合材料结构的减重效果能否在其使用寿命期间带来使用成本上的好处，如油料的节省和飞机运输能力的提升等。而这一点实际上和上面所述的抗冲击损伤能力问题密切相关。显然，这方面的能力如不能有所提升，复合材料结构即便投入实际

① 本书所提“重量”均为“质量”（mass）概念，单位为 t、kg 等。

使用,为安全起见,其减重效率也必然相当有限。成本问题其次涉及到制造成本,20世纪90年代到21世纪初的10多年中,“用得起的(Affordable)复合材料”曾在世界范围内成为左右发展方向的一条流行口号。相关领域的技术人员认为,降低制造成本的途径有两个,一是制造技术的自动化,二是包括纤维织物和树脂转移方法在内的技术制造革新。前者希望通过节省人工和完善质量的途径解决问题,后者则希望从减少制造工序和避免高能耗生产设施的角度出发,为低成本目标的实现提供更多可选的工艺途径。这一技术趋势迄今为止的发展成果是形成了多样化的复合材料制造技术体系,不同的制造商可根据不同的用户需求来设计最优的产品方案和最合理的制造工艺途径,从而将产品的全寿命成本控制在可被用户接受的范围之内。

前面提及,制造技术的自动化是降低制造成本的有效途径之一。复合材料因其与金属材料截然不同的工艺特点,制造技术自动化所面临的问题也具很大的特殊性。如裁剪、铺叠等工序,均为普通金属材料制造所无须涉及。复合材料制造技术的自动化实际上可追溯至20世纪40年代,采用缠绕设备来取代人工铺叠即为一种延续多年的自动化制造实践。当然,由于缠绕工艺的局限性,其主要用于形状满足一定规则要求的旋转体结构,在先进复合材料应用最多的航空工业领域,缠绕工艺的用途相对有限。随着计算机技术的突飞猛进,近二十年来,复合材料制造技术的自动化得到很快的发展。在以计算机技术为基础的发展背景下,自动化面临的主要问题可分为三个方面。一是制造对象的数字化表征。复合材料产品的制造不仅要准确实现产品的几何构型,而且要实现产品内部复杂的纤维排列和取向要求。如何将特定工艺方法相对应的材料构成信息完整地融入产品的数字模型,并形成相应的工程化标准,多年来始终是自动化发展进程的基本关注点之一。二是基于数字信息的特殊加工设备。这些设备及其配套软件分别针对复合材料产品制造过程中的不同工艺步骤,实现不同程度的自动化操作。诸如预浸料铺层的自动切割设备、预浸料铺层的铺叠定位设备、预浸带的自动铺放设备、预浸丝束的自动铺放设备、拉挤成型设备等自动化工具,目前均在先进复合材料产品的工程化制造过程中得到实际的应用。在产品的质量和成本控制,以及生产效率提升上发挥了重要的作用。三是与自动化相适应的产品设计理念。当用自动化操作替代传统的手工操作来实施一个工艺步骤后,对产品的工艺性要求可能会有一定程度的变动。设计理念如何与之相辅相成,对于自动化制造技术的实际应用是一个无法回避的问题。上述三方面问题持续不断地涌现和解决过程对复合材料自动化制造技术形成了实际的推动作用。

1.4 本书内容安排

本书旨在为读者系统地介绍先进复合材料制造技术的最新发展状况、相关的专业知识以及研究和工程方面的实践经验。主要的读者对象为从事复合材料产品研发和生产的技术人员,以及对此领域感兴趣的在校大学生和研究生。在写作上力求能够使读者对先进复合材料制造技术有全面的了解,并对读者的相关工作和学习起到参考和帮助作用。

在具体内容的安排上,依循1.2节中的制造技术分类思路,首先在第2章和第3章着重讨论两类基本方法,即基于预浸料的制造方法和基于树脂转移的制造方法。这两部分为本书最为重要的中心内容。同时,鉴于自动化制造技术在复合材料的实际应用中所发挥的