



中航工业首席专家
技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写

邢丽英 编著

先进树脂基复合材料 自动化制造技术

AUTOMATED MANUFACTURING
TECHNOLOGY OF ADVANCED
POLYMER COMPOSITE MATERIALS

航空工业出版社

中航工业首席专家技术丛书

“十二五”国家重点

先进树脂基复合材料 自动化制造技术

邢丽英 编著

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

先进树脂基复合材料制造技术在很大程度上决定了复合材料构件的质量、成本和性能。随着复合材料用量的快速增长、复合材料构件尺寸的增大和对复合材料构件质量及制造效率要求的不断提高,先进树脂基复合材料自动化制造技术得到快速发展和广泛应用。

本书系统介绍了目前先进树脂基复合材料自动化制造技术,主要包括:树脂基复合材料制造过程数字化技术基础、树脂基复合材料热压罐成形数字化技术、树脂基复合材料自动铺放技术、树脂基复合材料拉挤成形技术、树脂基复合材料 RTM 成形技术、树脂基复合材料纤维缠绕成形技术。各个部分介绍了相关成形技术原理,适宜制造的产品类型,主要使用的材料体系、设备与制造工艺流程,以及典型应用实例等。

本书对与复合材料领域相关的设计、研究、工程技术人员具有较好的参考价值。

图书在版编目 (C I P) 数据

先进树脂基复合材料自动化制造技术 / 邢丽英编著

. --北京:航空工业出版社,2014.6

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0397 - 3

I. ①先… II. ①邢… III. ①树脂基复合材料—自动化—制造—技术 IV. ①TP1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 138981 号

先进树脂基复合材料自动化制造技术

Xianjin Shuzhiji Fuhe Cailiao Zidonghua 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 - 84934379 010 - 84936343

北京世汉凌云印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2014 年 6 月第 1 版

2014 年 6 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 16.5

字数: 421 千字

印数: 1—3000

定价: 108.00 元

总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从2009年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人才中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人才技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展做出更大的贡献。

21世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，可以让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。



中国航空工业集团公司董事长

前 言

先进树脂基复合材料是一类在性能、设计、制造方面有别于传统材料的新型材料，其具有复合效应、性能的可设计性、多功能兼容性和材料与构件制造的同步性等特点。

先进树脂基复合材料具有高比强度和比模量、抗疲劳、耐腐蚀、可设计性强、便于大面积整体成型等特性，这些优异性使其在飞机上的应用可实现其他材料所不能实现的减重效益，已经成为继铝合金、钛合金和钢之后的最重要航空结构材料之一。因此，先进树脂基复合材料的用量已经成为航空结构先进性的重要标志。先进大型飞机波音 787、A350 和 A400M 等的复合材料用量达到 40% ~ 50%，第四代战斗机 F-22、F-35 等的复合材料用量达到 20% ~ 40%，先进直升机复合材料用量更是高达约 90%。

先进树脂基复合材料制造技术在很大程度上决定了复合材料构件的质量、成本和性能。随着先进树脂基复合材料在航空领域的大量应用，复合材料构件的尺寸越来越大，外形越来越复杂，整体化程度和质量要求越来越高，传统的以手工铺覆为主的热压罐成形工艺已经难以满足要求。为了满足复合材料构件制造的要求和提高复合材料构件的制造精度、制造一致性及制造效率，先进树脂基复合材料制造技术和数字化技术开始实现高度融合，自动化制造技术得到了快速发展和广泛应用。

本书系统介绍了目前先进树脂基复合材料自动化制造技术，主要包括：树脂基复合材料制造过程固化模拟优化的复合材料数字化制造技术基础；预浸料热压罐成形工艺技术和数字化、自动化技术高度融合后的树脂基复合材料热压罐数字化成形技术；融合缠绕和铺放技术于一体的树脂基复合材料自动铺放技术；采用预浸料连续化制造各种等截面复合材料型材的预浸料拉挤技术；适宜制造近净尺寸复合材料构件的树脂传递模塑（RTM）成形技术，以及最早开发、最成熟的树脂基复合材料构件自动化制造技术——纤维缠绕成形技术。

本书共分为 7 章，第 1 章、第 2 章、第 3 章和第 7 章由邢丽英编写，第 4 章由李敏、钟翔屿编写，第 5 章由李斌太编写，第 6 章由安学锋编写，许新光参与了第 2 章的编写，刘晓丽参与了第 7 章的编写。由邢丽英提出全书的编写大纲并对全书进行了统稿、修改、

校稿和终审。

尽管我们衷心希望奉献给读者一本树脂基复合材料自动化制造技术方面的高质量作品，但由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和错误，恳请广大读者批评指正。

邢丽英
2014年4月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 先进树脂基复合材料自动化制造技术	(2)
1.2.1 复合材料数字化制造技术基础	(2)
1.2.2 树脂基复合材料热压罐成形数字化技术	(4)
1.2.3 树脂基复合材料自动铺放技术	(5)
1.2.4 树脂基复合材料拉挤成形技术	(7)
1.2.5 树脂基复合材料 RTM 成形技术	(9)
1.2.6 树脂基复合材料纤维缠绕成形技术	(11)
1.3 先进树脂基复合材料在航空领域的应用	(12)
1.4 先进树脂基复合材料制造技术的发展	(15)
第 2 章 树脂基复合材料制造过程数字化技术基础	(16)
2.1 引言	(16)
2.2 复合材料工艺稳定性和适宜性	(17)
2.2.1 复合材料工艺稳定性研究	(17)
2.2.2 复合材料制造工艺适宜性研究	(21)
2.2.3 复合材料体系的选择与优化	(23)
2.3 复合材料固化反应动力学模型	(25)
2.3.1 固化反应动力学试验技术	(25)
2.3.2 固化反应动力学模型	(28)
2.3.3 固化反应动力学模型的验证	(31)
2.4 复合材料固化过程温度分布模型	(33)
2.4.1 固化过程温度分布模型的建立	(33)
2.4.2 温度分布模型影响因素研究	(35)
2.4.3 固化过程温度分布模型的验证	(38)
2.5 复合材料固化和温度分布模拟应用	(39)
2.5.1 复合材料固化过程模拟技术的应用	(39)
2.5.2 复合材料温度分布模拟技术的应用	(43)
2.6 热压成形复合材料制造过程优化	(45)
2.6.1 复合材料固化过程优化技术	(45)
2.6.2 复合材料固化过程优化技术的应用	(52)

第3章 树脂基复合材料热压罐成形数字化技术	(58)
3.1 引言	(58)
3.2 热压罐成形技术	(59)
3.2.1 热压罐系统的组成	(59)
3.2.2 热压罐工艺技术	(60)
3.3 预浸料制造技术	(69)
3.3.1 预浸料制造工艺	(69)
3.3.2 预浸料性能要求	(72)
3.4 复合材料制造过程的数字化技术	(73)
3.4.1 热压罐成形中的数字化技术	(73)
3.4.2 预浸料自动剪裁技术	(74)
3.4.3 预浸料激光辅助定位铺贴技术	(78)
3.4.4 预浸料自动剪裁和激光辅助定位铺贴软件	(83)
3.4.5 数字化技术在热压罐成形中的应用	(86)
第4章 树脂基复合材料自动铺放技术	(88)
4.1 引言	(88)
4.2 自动铺放材料体系	(89)
4.2.1 自动铺放对材料的要求	(89)
4.2.2 自动铺放预浸带(丝束)制造技术	(91)
4.2.3 自动铺放材料体系	(92)
4.3 复合材料自动铺带成形技术	(94)
4.3.1 自动铺带设备	(94)
4.3.2 自动铺带工艺技术	(104)
4.3.3 自动铺带铺放成形模具	(106)
4.4 复合材料纤维自动铺放成形技术	(108)
4.4.1 复合材料纤维自动铺放设备	(109)
4.4.2 纤维自动铺放工艺技术	(113)
4.4.3 纤维自动铺放成形模具	(116)
4.5 复合材料自动铺放技术的应用	(118)
4.5.1 复合材料自动铺带技术的应用	(119)
4.5.2 复合材料纤维自动铺放技术的应用	(121)
第5章 树脂基复合材料拉挤成形技术	(124)
5.1 引言	(124)
5.2 拉挤成形用树脂基体、添加剂和增强材料	(125)
5.2.1 拉挤成形用树脂基体	(125)
5.2.2 拉挤成形用树脂添加剂	(127)

5.2.3	拉挤成形用增强材料	(129)
5.3	传统拉挤成形技术和设备	(130)
5.3.1	拉挤成形工艺过程	(130)
5.3.2	拉挤成形工艺参数控制	(131)
5.3.3	拉挤成形工艺设备	(135)
5.3.4	拉挤制品模具的设计与制造	(138)
5.3.5	拉挤成形过程质量管理	(140)
5.4	高性能预浸料拉挤成形技术和设备	(142)
5.4.1	高性能预浸料拉挤成形工艺	(142)
5.4.2	预浸料拉挤成形复合材料	(146)
5.4.3	高性能预浸料拉挤设备	(148)
5.4.4	高性能预浸料拉挤成形用模具	(151)
5.5	拉挤成形复合材料的应用和发展	(152)
5.5.1	传统拉挤成形复合材料的应用	(152)
5.5.2	高性能预浸料拉挤成形复合材料的应用	(154)
5.5.3	拉挤成形复合材料技术发展	(156)
第6章	树脂基复合材料 RTM 成形技术	(161)
6.1	RTM 成形技术	(161)
6.1.1	RTM 成形技术概述	(161)
6.1.2	RTM 成形工艺过程	(163)
6.1.3	非闭模 RTM 成形工艺	(164)
6.2	RTM 复合材料树脂基体	(165)
6.2.1	RTM 树脂基体概述	(165)
6.2.2	环氧树脂基体	(166)
6.2.3	双马来酰亚胺树脂基体	(173)
6.3	RTM 复合材料增强体及其预制技术	(177)
6.3.1	定形剂预定形	(178)
6.3.2	纺织预制体	(181)
6.4	RTM 成形过程树脂流动模拟技术	(187)
6.4.1	概述	(187)
6.4.2	材料特性研究	(190)
6.4.3	研究实例	(192)
6.5	RTM 复合材料的增韧技术研究	(198)
6.5.1	RTM 复合材料的韧性	(198)
6.5.2	RTM 复合材料的离位增韧技术	(199)
6.6	RTM 复合材料的应用	(202)

第7章 树脂基复合材料纤维缠绕成形技术	(206)
7.1 引言	(206)
7.2 纤维缠绕成形技术原理	(206)
7.2.1 纤维缠绕线型及其分类	(206)
7.2.2 螺旋缠绕线型分析	(208)
7.2.3 纤维缠绕线型的设计	(212)
7.2.4 纤维缠绕类型的选择	(213)
7.3 纤维缠绕用材料	(214)
7.3.1 纤维缠绕用增强材料	(215)
7.3.2 纤维缠绕用树脂体系	(215)
7.4 纤维缠绕成形工艺技术	(218)
7.4.1 纤维缠绕工艺技术	(218)
7.4.2 纤维缠绕工艺参数	(219)
7.4.3 固化工艺技术	(222)
7.4.4 纤维缠绕过程模拟	(225)
7.5 纤维缠绕设备	(228)
7.5.1 纤维缠绕机	(228)
7.5.2 纤维缠绕芯模	(231)
7.5.3 纤维缠绕张力控制系统	(232)
7.5.4 浸胶和纤维供给系统	(233)
7.5.5 纤维缠绕固化设备	(234)
7.6 缠绕成形复合材料的应用和发展	(236)
7.6.1 玻璃钢储罐	(236)
7.6.2 化工管道	(238)
7.6.3 压力容器	(238)
7.6.4 其他应用	(239)
7.6.5 缠绕成形复合材料技术发展	(240)
参考文献	(243)

第1章 绪 论

1.1 引言

先进树脂基复合材料是以有机高分子材料为基体、高性能连续纤维为增强材料，通过复合工艺制备而成，明显优于原组分性能的一类新型材料。目前广泛应用的先进树脂基复合材料主要包括高性能连续纤维增强环氧、双马和聚酰亚胺树脂基复合材料。先进树脂基复合材料具有高比强度和比模量、抗疲劳、耐腐蚀、可设计性强、便于大面积整体成形以及具有特殊电磁性能等特点，已经成为继铝合金、钛合金和钢之后的最重要航空结构材料之一。先进树脂基复合材料在飞机上的应用，可以实现 15% ~ 30% 的减重效益，这是使用其他材料所不能实现的。因此，先进树脂基复合材料的用量已经成为航空结构先进性的重要标志。图 1-1 为先进树脂基复合材料和铝合金、钛合金等轻质金属材料的比强度和比模量。

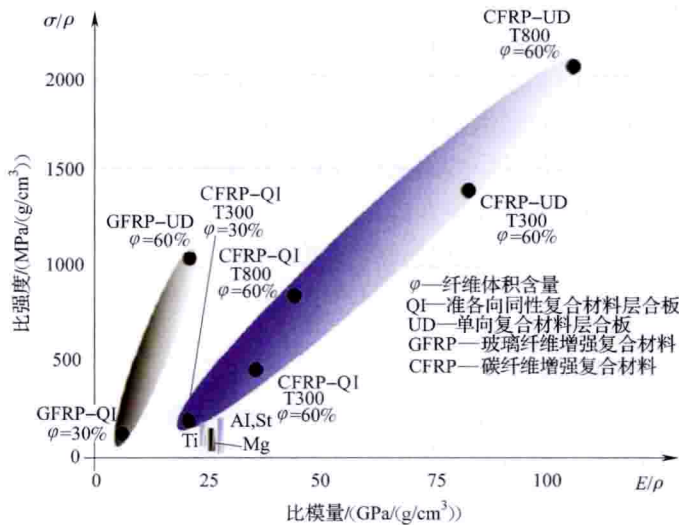


图 1-1 先进树脂基复合材料和轻质金属材料的比强度和比模量

先进树脂基复合材料在性能、设计、制造方面有别于传统材料的基本特点，主要体现在复合效应、性能可设计性、多功能兼容性和材料与构件制造的同步性等方面。

复合效应：复合材料中增强体和基体各保持其基本特性，通过界面相互作用实现叠加和互补，使复合材料产生优于各组分材料的新的、独特的性能。

性能可设计性：复合材料性能可设计性主要表现为可通过改变材料组分、结构、工艺等调控复合材料性能，赋予复合材料性能设计以极大的自由度，以及可以按照工程结构的使用要求，选择适当的组分材料和调整增强纤维的取向，使设计的结构重量轻、安全可靠

且经济合理。

多功能兼容性：当对复合材料构件有多种功能要求时，可增减某种组分，从而在满足主要功能要求的同时又能兼顾其他功能要求。

材料与构件制造的同步性：与一般传统材料产品不同，复合材料产品不是经机械加工制造而成，而是构件成形与材料制造同时完成。

1.2 先进树脂基复合材料自动化制造技术

先进树脂基复合材料制造技术在很大程度上决定了复合材料构件的质量、成本和性能。先进树脂基复合材料成形技术主要包括热压罐成形技术、RTM 成形技术、自动铺放技术、拉挤成形技术和缠绕成形技术等。依据复合材料的不同类型、构件的不同形状以及对构件质量和性能的不同要求，先进树脂基复合材料可采用不同的成形工艺。

1.2.1 复合材料数字化制造技术基础

树脂基复合材料的特性之一是材料和构件成形的同步性。树脂基复合材料无论采用何种成形工艺，都存在固化过程和固化控制。固化周期影响复合材料构件的制造周期；固化的均匀性影响复合材料构件的性能和质量。如何控制制造过程中复合材料树脂基体的固化反应是实现复合材料构件高质量制造的关键。

不同复合材料具有不同的反应机理，固化反应过程复杂。但对固化度和反应热的关系进行分析，可以发现常用的双马树脂基和环氧树脂基复合材料的固化反应符合自催化反应规律。因此可以用基于自催化反应的固化动力学方程来描述常用环氧树脂基和双马树脂基复合材料的固化过程。固化度的计算方法为

$$\alpha = (H_0 - H_R) / H_0 \quad (1-1)$$

式中： α ——固化度，%；

H_0 ——总反应热，J/g；

H_R ——残余反应热，J/g。

通过采用实际固化工艺过程并测定不同固化阶段的残余反应热求取固化度，验证了双马树脂基和环氧树脂基复合材料的固化动力学方程的正确性，实现了对常用航空复合材料体系固化过程的模拟。

复合材料固化过程受温度场的影响，一方面，温度场分布影响固化反应速率和固化均匀性；另一方面，固化反应热又影响温度场。温度场分布可采用热传导方程描述，即

$$\frac{\partial(\rho_c C_c T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho_r V_r \dot{H} \quad (1-2)$$

式中： ρ_c ——复合材料密度，kg/m³；

C_c ——复合材料热容，J/K；

K_x, K_y, K_z ——复合材料 x, y, z 方向的导热系数，W/(m·K)；

T ——温度，K；

t ——时间，s；

ρ_r ——树脂密度, kg/m^3 ;

V_r ——树脂体积分数, %;

\dot{H} ——固化反应放热速率, J/s 。

复合材料固化过程产生的热量和反应程度有关, 通过固化动力学方程可获得任何状态的固化反应热, 因此热传导方程中内部热源的函数关系要由固化动力学方程确定。

复合材料固化过程中增强材料没有明显的相变, 增强材料的比热变化不明显。而基体树脂要发生从液态→凝胶态→固态的变化, 复合材料树脂基体的比热将发生明显的变化。试验研究表明, 复合材料固化过程中树脂基体的比热变化符合树脂基体在凝胶点前后分段线性变化的基本规律。

通过将固化反应热和树脂比热的变化引入热传导方程, 建立了环氧树脂基和双马树脂基复合材料的固化过程温度分布模型; 采用有限元逐次迭代的方法, 实现了温度分布的数值计算。图 1-2 和图 1-3 为复合材料固化度及其固化过程温度场变化的计算结果和实测结果的对比。

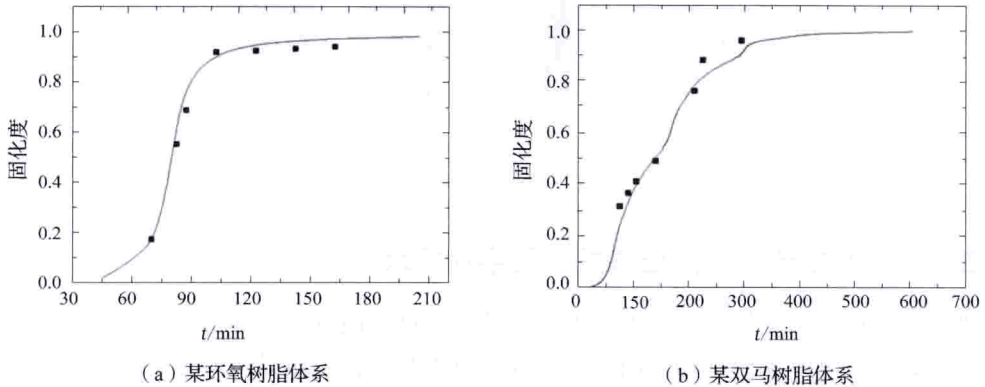


图 1-2 复合材料固化度计算结果和实测结果对比

(点图为实测结果; 线图为计算结果)

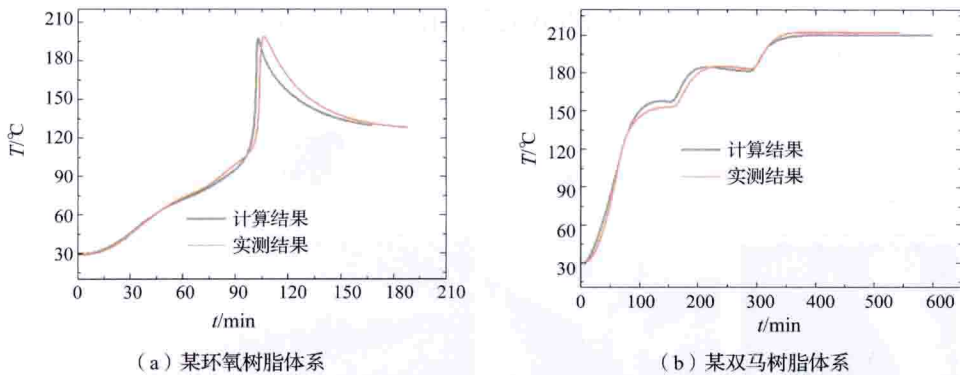


图 1-3 复合材料固化过程温度场变化计算结果和实测结果对比

在复合材料固化过程模拟技术的基础上, 依据目前不同复合材料成形的基本要求, 确定了固化过程优化的规范。以固化的时间最短, 固化均匀、完全为优化目标, 建立了复合

材料固化工艺优化判据，发展了复合材料固化工艺优化技术。采用固化模拟和优化技术对 5428 双马树脂基复合材料固化工艺参数进行优化，在复合材料性能不变的前提下，实现固化周期由 11.5h 减少到 6h。图 1-4 是不同固化工艺下的 5428 双马树脂基复合材料弯曲性能对比。先进树脂基复合材料固化过程模拟与固化工艺优化技术的应用，可提高对复合材料制造过程固化工艺的研究水平，将树脂基复合材料固化工艺从试验研究阶段推进到试验研究和数值模拟相结合的新阶段。

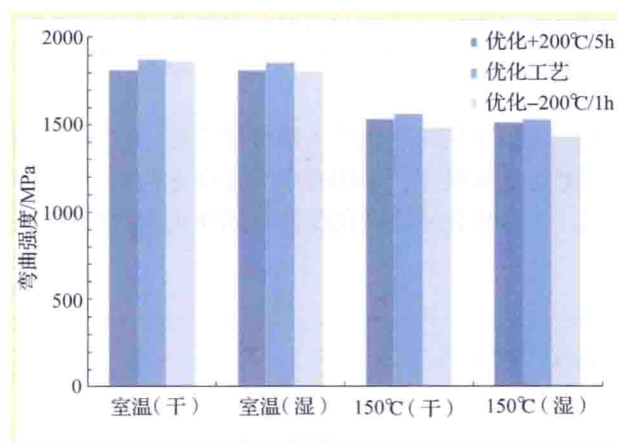


图 1-4 不同固化工艺下 5428 双马树脂基复合材料弯曲性能对比

1.2.2 树脂基复合材料热压罐成形数字化技术

热压罐成形技术是目前国内外先进树脂基复合材料最成熟的成形技术之一，复合材料机翼、尾翼等大量承力构件都采用热压罐成形技术制造，热压罐成形技术的工艺过程如图 1-5 所示。热压罐成形技术有许多其他成形工艺无法完全替代的优点：①易于制备高纤维体积含量的复合材料；②固化温度场和压力场的温度和压力分布均匀，复合材料构件的质量和性能稳定性优异；③成形模具简单；④适于制备较大面积、较复杂结构的高质量复合材料构件。但热压罐成形工艺同时存在能源消耗较大、设备投资成本较高以及制件尺寸受热压罐尺寸限制等问题。



图 1-5 热压罐成形技术的工艺过程

从20世纪60年代开始,热压罐成形技术得到了很大的发展,主要体现为整体成形技术发展和融入了大量自动化、数字化技术。

复合材料整体成形技术是采用热压罐共固化共胶接技术,直接实现带梁、肋和墙的复杂结构的一次性制造。整体成形技术的主要优点有:①减少零件数目,提高减重效率,降低制造成本;②减少连接件数目,降低装配成本;③减少分段和对接,构件表面无间隙、无台阶,有利于降低雷达散射截面积(RCS),提高隐身性能。图1-6所示为整体成形复合材料机身壁板。

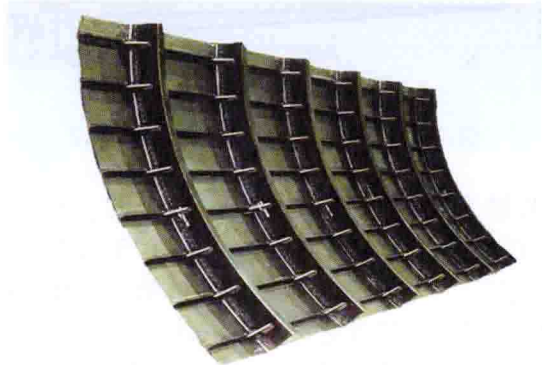


图1-6 整体成形复合材料机身壁板

热压罐成形技术从最初铺贴、裁剪主要依靠手工发展到和预浸料激光定位铺贴、自动裁剪等自动化、数字化技术相结合,明显提高了预浸料铺贴、裁剪的精度,进而提高了复合材料的制造效率和构件质量。热压罐成形技术的进一步发展将是和自动铺放技术相结合,以满足大型复合材料构件的高效优质制造的要求。图1-7和图1-8所示分别是预浸料铺贴激光定位和预浸料自动裁剪设备。



图1-7 预浸料铺贴激光定位设备



图1-8 预浸料自动裁剪设备

1.2.3 树脂基复合材料自动铺放技术

自动铺放技术包括预浸料自动铺带技术(ATL)和纤维自动铺放技术,前者适合铺放形状相对简单的复合材料构件,后者则可以铺放形状复杂的复合材料整体结构。图1-9所示为不同铺放技术的铺放效率比较。预浸料自动铺带技术具有铺放效率高、纤维取向偏差小、铺层间隙控制精度高以及材料利用率高等优点,已广泛用于复合材料机翼壁板、尾翼壁板等大型复合材料构件的制造。

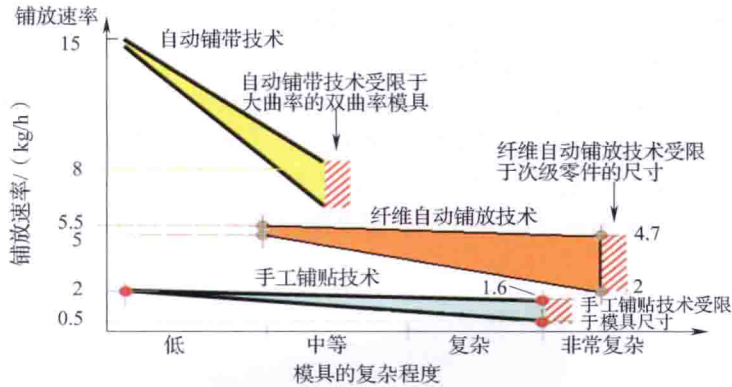


图 1-9 不同铺放技术的铺放效率比较

自动铺放技术的关键是自动铺放设备。波音公司、辛辛那提机械（Cincinnati Machine）公司与氰特（Cytec）工业公司于 20 世纪 70 年代中期联合研制自动铺带机。1983 年第一台商用铺带机进入生产领域，现已发展到第三代自动铺带机，铺带时可自动加热，逐层压实，并带有激光控制铺带定位系统。南京航空航天大学在 2006 年研制了自动铺带和纤维自动铺放原理样机，之后又发展了工程样机。中国航空工业集团公司北京航空制造工程研究所通过国际合作研制了复合材料自动铺带设备。中国航空工业集团公司北京航空材料研究院在预浸料铺带适宜性方面开展了研究工作，建立了预浸料黏性和可铺性的关系，并以战斗机和大型无人机的机翼为应用对象开展复合材料预浸料自动铺带技术研究，应用预浸料自动铺带技术制造了大型飞机和某型战斗机的复合材料构件。图 1-10 所示为复合材料预浸料自动铺带设备。

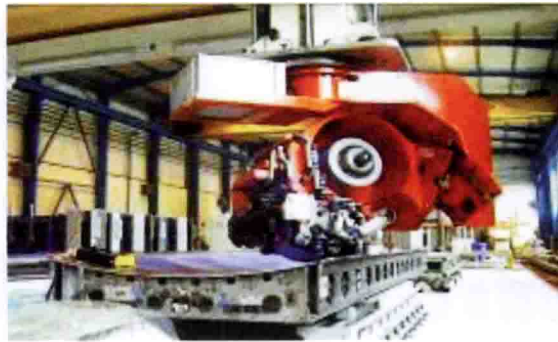


图 1-10 复合材料预浸料自动铺带设备

纤维自动铺放技术是在预浸料自动铺带与纤维缠绕技术基础上发展起来的。纤维自动铺放技术特别适于制造形状复杂的零件，具有制造效率高、材料利用率高、零件质量好、生产成本低、可整体成形复杂形状的复合材料构件等特点。纤维自动铺放技术于 20 世纪 90 年代末应用于机身、进气道、后压力框以及发动机短舱等复合材料构件的制造。图 1-11 和 1-12 所示分别为采用纤维自动铺放技术制备的复合材料进气道和前机身。