



中国复合材料学会 组织编写

复合材料工程技术指导丛书

先进复合材料 成型工艺图解

潘利剑 主编 张彦飞 叶金蕊 副主编



化学工业出版社



中国复合材料学会 组织编写

复合材料工程技术指导丛书

先进复合材料 成型工艺图解

潘利剑 主编 张彦飞 叶金蕊 副主编



化学工业出版社

·北京·

本书采用大量试验过程中的图像资料,论述了复合材料构件制造中应用的热压罐成型技术、真空辅助成型技术、RTM成型技术、模压成型工艺以及自动铺放技术等成型工艺原理、工艺流程、操作方法,不同工艺使用到的不同设备、原材料、辅助材料,各种工艺容易产生的不同缺陷与防治方法等。

本书浅显易懂,既适合初学者作为速成教材,也适用于复合材料结构制造操作人员作为作业指导书使用。

图书在版编目(CIP)数据

先进复合材料成型工艺图解/潘利剑主编:中国复合材料学会组织编写. —北京:化学工业出版社,2015.10

(复合材料工程技术指导丛书)

ISBN 978-7-122-24983-8

I. ①先… II. ①潘…②中… III. ①复合材料-成型加工-图解 IV. ①TB33-64

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第196157号

责任编辑:赵卫娟 仇志刚
责任校对:宋 玮

文字编辑:冯国庆
装帧设计:张 辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:北京瑞禾彩色印刷有限公司
710mm×1000mm 1/16 印张9 $\frac{1}{2}$ 字数165千字 2016年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址:<http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:78.00元

版权所有 违者必究

京化广临字2015—20号

丛书编委会名单

主 编：朱建勋

副主编：陈绍杰 黄发荣 李 炜 武高辉 肖加余
张博明

编 委：（按拼音排序）

陈绍杰 龚 龔 郭早阳 黄发荣 蒋 云
李 炜 李 岩 李云涛 刘 玲 王荣国
吴申庆 武高辉 肖加余 徐吉峰 姚学锋
叶金蕊 张博明 朱建勋

序

材料工业是国民经济的基础产业，新材料是材料工业发展的先导。在《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》（国发〔2012〕28号）中将新材料列入七大战略性新兴产业。在高性能复合材料产业方面明确提出以树脂基复合材料和碳-碳复合材料为重点。在新材料产业创新能力建设方面，要求在重点领域建设一批新材料技术创新、产品开发、分析检测、推广应用和信息咨询的公共服务平台。

据统计，2014年中国的碳纤维需求量10600t，达到全球总需求量的19.8%，而目前国内理论年产能达到1000t的企业仅有4家；当前国内开设复合材料与工程专业的高等院校仅有25所，年毕业生不足800人。专业技术人才的培养远远不能满足行业的快速发展，现有的复合材料科学研究和科技成果难以得到大范围的普及推广。如何全面提升复合材料从业人员的专业技术水平，提升企业产能和产品品质，提升产业竞争力，成为我国复合材料产业实现跨越式发展亟待解决的关键问题。

在此背景下，中国复合材料学会组织编写的《复合材料工程技术指导丛书》坚持图文并茂的写作方式，力求使操作人员最直观、快速了解相关操作流程。随着中国复合材料学会学会工程技术继续教育系列培训活动的不断发展，丛书将涵盖复合材料力学性能测试标准、复合材料成型工艺、复合材料结构设计、复合材料成型模具加工、复合材料选材、复合材料分析检测等复合材料工程技术各个方面，建成适合全行业从业人员的系统性指导手册体系。

在国家“十三五”规划即将开始之际，衷心希望复合材料行业的从业人员能够借助中国复合材料学会这个交流合作平台，实现自身能力提升，寻得更多合作机会，全面提高产品品质，保障我国先进复合材料产业持续健康快速发展。



2015年5月



前 言

先进树脂基复合材料是以有机高分子材料为基体，以高性能连续纤维为增强材料，通过复合工艺制备而成，并具有明显优于原组分性能的一类新型材料。近年来其应用从最早的航空航天领域已经逐渐拓展到国民经济各个行业，发挥的作用也越来越重要。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。编者受中国复合材料学会的委托编写了本书，作为复合材料从业人员的培训资料。

先进树脂基复合材料成型技术主要包括：热压罐成型技术、液体成型技术（包括RTM成型技术、VARI成型技术等）、自动铺放技术、拉挤成型技术和缠绕成型技术等。本书主要介绍了先进树脂基复合材料构件制造中主要应用的热压罐成型技术、VARI成型技术、RTM成型技术、热压成型工艺以及自动铺放技术等。详细阐述了各种成型工艺原理、工艺流程、操作方法，不同工艺使用到的不同设备、原材料、辅助材料，各种工艺容易产生的不同缺陷与防治方法，各种工艺涉及的不同基础性的研究。

本书采用图文并茂的方式，对各种工艺所用的材料、流程、操作方法进行了详细的描述，采用了大量实际试验过程中的图像资料，阐述了各种成型工艺中使用的仪器设备、环境条件和操作步骤。本书浅显易懂，既适合初学者作为速成教材，也适用于复合材料结构制造操作人员作为作业指导书使用。本书各试验方法均具有一定的独立性，应用过程中可以根据实际情况进行有针对性地选择。

本书由潘利剑任主编、张彦飞任副主编，其中第1～5章由潘利剑编写，第6章由张彦飞编写。参与编写的其他人员有庄恒飞、王英男、胡秀凤、王召召、段振锦、刘宇婷。限于编者水平，书中难免有不妥之处，恳请专家、读者多加批评指正，以便我们进行修改、补充和不断完善。

特别致谢：感谢东华大学民用航空复合材料协同创新中心以及中国商飞上海飞机制造有限公司对本书编写过程的大力支持。

编者

2015年10月

目 录

第1章

复合材料成型原材料与辅助材料

1.1 复合材料成型原材料	1
1.1.1 预浸料	1
1.1.2 纤维织物	3
1.1.3 基体树脂	3
1.2 辅助材料	4
1.2.1 真空袋膜	4
1.2.2 密封胶带	5
1.2.3 脱模剂	5
1.2.4 隔离膜	6
1.2.5 透气毡	6
1.2.6 吸胶毡	7
1.2.7 压敏胶带	7

第2章

预成型体

2.1 自动铺放	8
2.1.1 自动铺带	8
2.1.2 自动铺丝	10
2.1.3 自动铺放的国内外发展	11

2.2	热隔膜	13
2.3	纤维预成型体	16
2.3.1	纤维预成型体的工艺性	16
2.3.2	纤维预成型技术	17
2.3.3	纤维纺织预成型体	19
	参考文献	23

第3章

热压罐成型

3.1	热压罐结构	24
3.2	热压罐工艺流程	27
3.3	热压罐工艺基础研究	39
3.3.1	整体共固化成型技术	39
3.3.2	固化变形	43
3.4	热压罐工艺的应用与发展	44
	参考文献	46

第4章

真空辅助成型

4.1	概述	47
4.1.1	真空辅助工艺特点	48
4.1.2	主要缺陷	49
4.1.3	技术要求	49
4.2	真空辅助工艺中几种特殊辅助材料	49
4.3	真空辅助成型工艺流程	51
4.4	真空辅助成型工艺基础研究	60
4.4.1	增强材料预成型体渗透率与测试方法	60
4.4.2	树脂工艺窗口	63
4.4.3	树脂流道设计	64
4.4.4	树脂流动模拟	67
4.5	真空辅助成型工艺的发展与应用	70
	参考文献	71

第5章

RTM成型

5.1	RTM成型基本原理	72
5.2	RTM成型模具	73
5.3	RTM树脂	73
5.4	RTM成型工艺流程	78
5.4.1	模具设计与制造	78
5.4.2	预成型体制备	79
5.4.3	合模与注胶	80
5.4.4	固化与脱模	81
5.5	RTM成型工艺发展与应用	81
	参考文献	84

第6章

模压工艺

6.1	工艺原理	85
6.1.1	模压成型定义	85
6.1.2	模压成型工艺的特点	85
6.1.3	模压成型工艺	86
6.2	工艺选材	91
6.2.1	模压料的种类	91
6.2.2	典型模压料的制备工艺	95
6.3	工艺过程	115
6.3.1	模压工艺流程	115
6.3.2	模压工艺过程	115
6.4	案例分析及难点指导	122
6.4.1	控制器壳体模压成型(SMC)	122
6.4.2	出气罩壳体模压成型(酚醛模压料)	130
6.4.3	气门室体模压成型	139
	参考文献	144

第1章

复合材料成型原材料与辅助材料

1.1 复合材料成型原材料

1.1.1 预浸料

预浸料是用控制量的树脂（热固性或热塑性）浸渍纤维或织物后形成的中间材料。浸渍技术有溶剂浸渍、热熔体浸渍、粉末浸渍等。预浸料可以“B阶段”状态或部分固化后储存。单向预浸带（所有纤维平行）是最常见的预浸料形式，它们提供单向增强。机织布及其他平面织物预浸料提供二维增强，它们一般成卷销售。还有用纤维预成型体和编织物制成的预浸料，它们提供三维增强。如图1-1所示为碳纤维平纹织物预浸料。



图 1-1 碳纤维平纹织物预浸料

溶剂浸渍法是用溶剂稀释树脂，使稀释的树脂浸透所指定的纤维，然后蒸发掉浸渍纤维上的溶剂并使其干燥。它是将多束连续纤维在牵引力的作用下，从纱架引出，经过整纱、展平、展开、浸入浸胶槽与烘干工序，然后切边收卷制成。一定要注意保证不留溶剂，因为溶剂的残留物会使最终制成品固化时产生空隙。此浸渍材料铺上一层涂有脱模剂的纸，然后整个儿被卷成产品，进行贮存、冷冻，其贮存周期可持续几个月或几年。

溶剂浸渍法的主要缺点是溶剂对环境的影响，对敞槽浸胶工艺需提供安全、防爆的车间，以及既溶解有些坚韧的树脂体系而不损害其力学性能的问题（尽管化学配方的进展已改善了后面的问题）。这些障碍激励了另一种替代体系——热熔体浸渍。

热熔体浸渍法是将硅酮（聚硅氧烷）脱模纸涂覆上树脂膜（通常是两面）。将两层干纤维和一层双面膜组合在一起形成一个三层的预浸渍单元，然后通过加热的压紧辊筒把黏性的树脂压进纤维以将其浸透。然后层合的预浸料通过冷却辊筒并从那里卷上大辊筒供贮存及运输。

树脂膜重量、纤维密度、加热温度、加压压力、冷却速率和其他参数的控制，可以保证重复生产达到要求的质量。运行速度高达170m/min的精密涂胶机控制树脂膜的质量可在 $12 \sim 120\text{g/m}^2$ 之间进行设定。树脂供应商已调整化学成分以使其适应热浸渍的需要，减少了早先热熔工艺中溶剂不能彻底浸透纤维的麻烦，另外 β 射线测量的尖端在线监测使树脂的诸参数能迅速调整，从而保证质量。把纤维和树脂集合在精确测定的数量范围内使废料减至最少，并且用少量试验生产即能迅速被优化。

预浸料具有稳定一致的纤维/树脂复合效果，能使纤维完全浸透。使用预浸料，在模塑成型时就无需称量和混合树脂、催化剂等。预浸料中，热固性预浸料的铺覆性和黏性较好，容易操作，但它们必须在低于室温的温度下贮存，而且有适用期的限制。也就是说，它们脱离贮存条件后必须在一定的时间内使用，以免发生过早的固化反应。而热塑性预浸料没有这些局限，但它们若无特殊的配方，就会缺乏热固性预浸料那样的黏性或铺覆性，因而更难操作。

预浸料一度被认为成本很高而不宜大量生产，但现在预浸料正在迅速成为从航空航天到可再生能源材料生产的理想选择。实际上，预浸料市场在近年来经历了很大的发展。由于预浸料被广泛接受和面临一些新的市场机遇，目前预浸料行业在整体上颇具吸引力，其利润幅度高于平均水平。这一形势已吸引了投资商和用户的很大关注。世界上各大预浸料生产商也密切注视市场竞争动态，力图占有

尽可能多的市场份额。而如何有效地满足用户要求则是决定能否长期成功的关键。

1.1.2 纤维织物

编织是一种基本的纺织工艺，是能够使两条以上纱线在斜向或纵向互相交织形成整体结构的预成型体。这种工艺通常能够制造出复杂形状的预成型体，但其尺寸受设备和纱线尺寸的限制。在航空工业，目前该技术主要集中在编织的设备、生产和几何分析上，最终的目的是实现完全自动化生产，并将设备和工艺与CAD/CAM进行集成。该工艺技术一般分为两类：一类是二维编织工艺；另一类是三维编织工艺。

按织造方式的不同，主要可以分为以下几类。

- ① 机织碳纤维布，主要有平纹布、斜纹布、缎纹布、单向布等。
- ② 针织碳纤维布，主要有经编布、纬编布、圆机布（套管）、横机布（罗纹布）等。
- ③ 编织碳纤维布，主要有套管、盘根、编织带、二维布、三维布、立体编织布等。

碳纤维平纹织物和缎纹织物如图 1-2 所示。

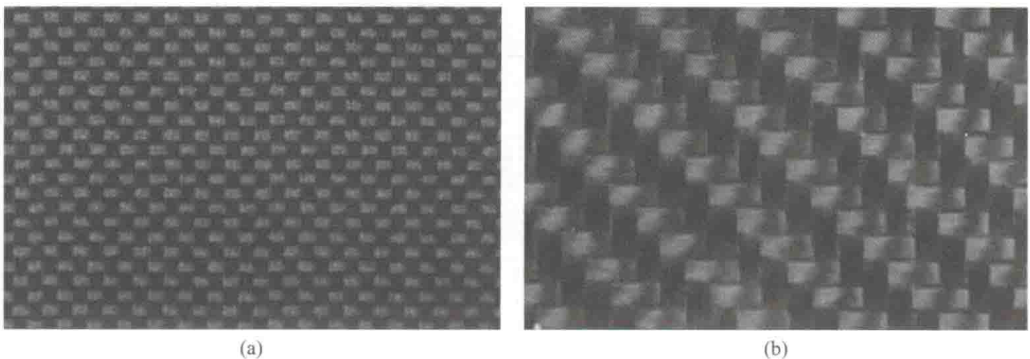


图 1-2 碳纤维平纹织物 (a) 和缎纹织物 (b)

1.1.3 基体树脂

基体主要是起连接、支撑和保护纺织增强件（纤维、线或织物）的作用，使增强件保持在设计的方向和位置上，具有刚性和稳定性，还能使载荷均匀分布，并传递到纤维上去。

基体树脂可分为热固性树脂和热塑性树脂两大类。热固性树脂是指加热后产生化学变化，逐渐硬化成型，再受热也不软化，也不能溶解的一种树脂。热固性

树脂在固化后，由于分子间交联，形成网状结构，因此刚性大、硬度高、耐高温、不易燃、制品尺寸稳定性好，但性脆。热固性树脂基体的可选择范围较大，且应用广，耗量大。常用的热固性树脂有聚酯、环氧、改性双马来酰亚胺、酚醛、脲醛等。

典型的热塑性树脂基体有聚醚醚酮（PEEK）、聚苯硫醚（PPS）、聚醚酰亚胺（PEI）等。采用热塑性树脂为基体的复合材料具有许多优于热固性复合材料的综合性能，热塑性复合材料最突出优点是具有较高的韧性、优秀的损伤容限性能以及良好的抗冲击性能，有利于克服热固性树脂基复合材料层间韧性不足和冲击分层的缺点，可应用于使用环境较为苛刻、承载能力要求较高、容易受到强烈冲击的场合。另外，一些高性能热塑性复合材料（例如纤维增强PEI）的长期使用温度可达250℃以上，其耐热性能明显优于热固性复合材料；其还具有优良的抗蠕变能力，可以在较高温度条件下长期使用。同时，热塑性复合材料的耐水性也高于热固性复合材料，可在潮湿环境下使用。热塑性复合材料的预浸料存放环境与时间无限制，废料还可以回收再利用，故通常被称为“绿色材料”。热塑性复合材料在加工过程中不发生化学反应，成型周期短，结构件可以直接熔融焊接，无需铆接，并且维修方便，故具有较大降低结构件制造成本和使用成本的潜力。

1.2 辅助材料

1.2.1 真空袋膜

如图1-3所示为真空袋薄膜，它的用途是形成真空体系，提供良好的覆盖性，并在固化温度下不透气。真空袋薄膜一般经吹塑或铸塑制成，厚度为0.05～0.075mm，要求其伸长率为300%～400%。典型的真空袋薄膜有美国Richmond生产的HS6262、HS8171和HS800等。



图 1-3 真空袋膜

1.2.2 密封胶带

如图1-4所示，密封胶带是一种有黏性的挤出橡胶带，适用于各种成型模具，能牢固地粘接真空袋薄膜和模具，保证热压罐成型过程中真空袋的气密性要求。固化成型完毕后，在成型模具上不残留密封材料残渣，且能容易剥取下来。



图 1-4 密封胶带

1.2.3 脱模剂

脱模剂（图1-5）是一种为使制品与模具分离而附于模具成型面的物质。其功能为使制品顺利地 from 模具上取下来，同时保证制品表面质量和模具完好。脱模剂主要有如下种类。



图 1-5 脱模剂

(1) 薄膜型脱模剂 主要有聚酯薄膜、聚乙烯醇薄膜、玻璃纸等，其中聚酯薄膜用量较大。

(2) 混合溶液型脱模剂 其中聚乙烯醇溶液应用最多。聚乙烯醇溶液是采用低聚合度聚乙烯、水和乙醇按一定比例配制的一种黏性、透明液体。干燥时间约30min。

(3) 蜡型脱模剂 这种脱模剂使用方便，省工省时省料，脱模效果好，价格也不高，因此应用也广泛。

1.2.4 隔离膜

隔离膜(图1-6)的用途是防止辅助材料与复合材料制件粘连，抑制流胶及衬托脱模剂等。隔离膜分为有孔和无孔两种，有孔薄膜适用于成型工艺过程中吸出多余树脂基体材料或排出气体，一般用于成型材料和吸胶毡或透气毡之间。



图 1-6 隔离膜

1.2.5 透气毡

透气毡(图1-7)是为了连续排出真空袋内的空气或固化成型过程中生成气体而生产的一种通气材料。通常与隔离膜并用，不直接与复合材料制件接触。



图 1-7 透气毡

1.2.6 吸胶毡

吸胶毡的主要用途是在复合材料制品成型工艺过程中，吸出树脂基体材料。使用时根据复合材料制件纤维体积含量要求，确定固化成型工艺参数，来选择吸胶材料的种类和层数，以保证复合材料制件质量的稳定性。

1.2.7 压敏胶带

压敏胶带（图 1-8）的主要用途是将隔离膜、透气毡、吸胶毡等复合材料成型辅助材料固定于成型模具上。要求压敏胶带具有很强的粘接力，固化后在成型工装模具表面不留有粘接剂的残渣。



图 1-8 压敏胶带

第2章

预成型体

2.1 自动铺放

自动铺放技术包括自动铺带技术和自动铺丝技术，这两项技术的共同优点是采用预浸料，并能实现自动化和数字化制造，高效高速。自动铺放技术特别适用于大型复合材料结构件制造，在各类飞行器，尤其是大型飞机的结构制造中所占比重越来越大。

2.1.1 自动铺带

自动铺带机由美国 Vought 公司在 20 世纪 60 年代开发，用于铺放 F-16 战斗机的复合材料机翼部件。随着大型运输机、轰炸机和商用飞机复合材料用量的增加，专业设备制造商（如 Cincinnati Machine 公司、Ingersoll 公司）在国防需求和经济利益的驱动下开始制造自动铺带设备，此后自动铺带技术日趋完善，应用范围越来越广泛。

自动铺带技术采用有隔离衬纸的单向预浸带，剪裁、定位、铺叠、辊压均采用数控技术自动完成，由自动铺带机实现。利用多轴龙门式机械臂可完成铺带位置自动控制，核心部件——铺带头（图 2-1）中装有预浸带输送和预浸带切割系统，根据待铺放工件边界轮廓自动完成预浸带特定形状的切割，预浸带加热后在