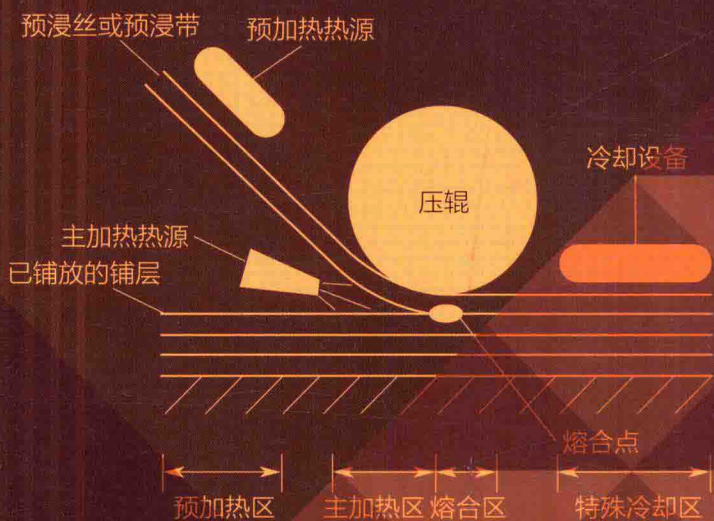




# 复合材料 成型及应用

方国治 藤一峰 等编著



学工业出版社



# 复合材料 成型及应用

方国治 藤一峰 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书分六个部分详细介绍了热塑性复合材料性能特点、原料的生产与工艺设计、成型的性能与结构设计、产品的成型工艺与方法、模具的制造工艺与技术和生产与加工及产品应用。

本书总结了国内外目前广泛应用的各种典型 FRTP 制品的设计、生产方法，全面系统地论述了 FRTP 的特点、应用、设计、制造等实用技术理论与实例。

全书内容翔实、通俗易懂、图文并茂，实用性强，专业应用实例众多，旨在提高实践工作能力。本书适合于工程技术人员、相关专业师生参考使用；可供玻璃钢生产技术人员及其他相关人员参考。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

FRTP 复合材料成型及应用/方国治等编著. —北京:  
化学工业出版社, 2017. 8  
ISBN 978-7-122-30083-6

I. ①F… II. ①方… III. ①复合材料-成型  
IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 158084 号

---

责任编辑: 夏叶清

文字编辑: 杨欣欣

责任校对: 边涛

装帧设计: 史利平

---

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: 三河市延风印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 10 $\frac{1}{2}$  字数 181 千字 2017 年 11 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: 58.00 元

版权所有 违者必究

# 前言

# PREFACE

热塑性复合材料是以玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维等增强各种热塑性树脂的复合材料的总称，国外称 FRTP(fiber reinforced thermoplastics)。由于热塑性树脂和增强材料种类不同，其生产工艺和制成的复合材料性能差别很大。从生产工艺角度分析，热塑性复合材料分为短纤维增强复合材料和长纤维增强复合材料两大类。

玻璃钢材料即是此类复合材料之一。玻璃钢复合材料的水平是衡量一个国家或地区科技、经济水平的标志之一。玻璃钢主要应用在国防、航空、航天以及工业建设中，已成为军工、民用领域中不可缺少的材料。如层压玻璃钢材料，不仅可以大量用于电绝缘材料，而且经过机械加工后可做成多种特殊形状的制品或部件。

FRTP 成型技术作为一种重要的成型加工方法，在机械工业、汽车工业、家电行业、航天航空工业、生物领域及日用品的生产中都有广泛应用。而且生产的玻璃钢制品具有精度高、复杂度高、外形美观、价格低廉、经久耐用的特点。市场对 FRTP 及制品加工发展的需求越来越大，各行各业都要求 FRTP 加工企业有更新颖、更多样、质量更优异的复合材料及制品出现。

为了适应 FRTP 及制品加工发展的需要，帮助有关读者了解 FRTP 生产的原料、模具、设备、工艺、质量等方面的关键知识，作者在大量搜集、综合整理国内外有关资料的基础上，结合国内生产的实际情况，编写了本书。

本书总结了国内外目前广泛应用的各种典型 FRTP 复合材料制品的设计、生产方法，全面系统地论述了 FRTP 复合材料的特点、应用、设计、制造等实用技术理论与实例。本书适合于工程技术人员、相关专业师生参考使用；可供玻璃钢生产技术人员及其他相关人员参考。

本书在编写过程中，承蒙国家建材局上海玻璃钢研究所、中国玻璃钢工业协会、国家纤维质量监督检验中心、南京玻璃纤维研究设计院、全国建材科技期刊《玻璃纤维》等单位的专家与前辈和同仁热情支持和帮助，并提供有关资料，对本书内容提出宝贵意见。童忠东、欧玉春、张淑谦等参加了本书的编写与审核，范立红、吴宝兴、张建玲、陈羽、张邦亭、王书乐、王瑜、王月春、俞俊、高巍、高新、周雯、童凌峰、来金梅、杨经伟、高洋、孙铁海、蒋峰等同志为本书的资料收集和编写付出了大量精力，在此一并致谢！由于时间仓促，书中纰漏之处在所难免，敬请各位读者批评指正。

编著者

2017年8月



# 目录

# CONTENTS

## 第一章 概论

1

第一节 热塑性复合材料简介 .....	1
一、概述 .....	1
二、热塑性复合材料特殊性能与成型工艺 .....	2
三、热塑性复合材料制备工艺概述 .....	5
四、纤维增强摩擦复合材料 .....	8
第二节 热塑性复合材料应用 .....	13
一、概述 .....	13
二、玻璃纤维材料应用 .....	14
三、碳纤维材料应用 .....	19
四、芳纶纤维材料应用 .....	20
五、高性能的超高分子量聚乙烯纤维应用 .....	21
六、热塑性复合材料应用研究方向转换 .....	22
第三节 国外新型复合材料创新与制造能力动态 .....	22
一、美国建立专门的研究所 .....	22
二、美国开发新型复合材料构件自动化检测系统 .....	22
三、Chem Polymer 推出一种新型玻纤增强聚酰胺 6 复合 材料 .....	23
四、AGY 新型 PCB 用玻璃纤维 .....	24
五、Fiber SIM 5.5 增强复合材料制造能力 .....	24
六、RTM 用树脂及其注射设备 .....	25
七、超轻碳纤维复合材料制备一体式设计自行车 .....	26
八、制造聚氨酯复合材料的纤维复合喷射技术 .....	26

第四节	国内复合材料产业化的关键技术现状	27
	一、国内复合材料产业化的技术现状	27
	二、新型聚氨酯玻璃纤维复合材料	29
	三、城市建设推动玻璃纤维增强塑料电缆导管市场加快发展	29
	四、新加压浸胶系统优化复合材料拉挤制品后续铺层工艺	30
	五、稀土改性玻璃纤维环氧树脂复合材料的制备方法	30
	六、碳纤维增强复合材料	31
	七、热塑性复合材料纤维铺放技术	31
第五节	制备低成本碳纤维复合材料结构件的新技术	37
	一、快速液体成型技术	37
	二、制备碳纤维的新技术	38
	三、低碳轻量化复合聚合物填充材料技术开发	38
第六节	复合材料生产过程中关键技术与工艺参数的确定方法及评价	41
	一、关键技术与工艺参数的确定	41
	二、复合材料生产过程的计算机模拟	41
	三、基于专家系统的计算机辅助复合材料成型	42
	四、FRTP 同种及 FRTP 与铝合金异种材料搅拌摩擦焊的 评价	43
	五、碳纤维增强热塑性树脂复合材料的研究前沿	43
第七节	Prodrive 公司制备碳纤维复合材料新工艺与表面的质量控制	44
	一、复合材料部件表面现状	44
	二、工艺及制备过程	45
	三、质量标准	45

## 第二章

## FRTP 原料生产及工艺设计

46

第一节	概述	46
	一、FRTP 设计的原则	46
	二、聚氨酯复合材料	46
	三、玻纤增强尼龙 46	47
	四、低温成型工装预浸料制成的部件	47
	五、复合材料制品中润湿分散剂的性能与使用	47
	六、新型 Hyperform <sup>®</sup> HPR 增强剂	48
第二节	玻纤增强材料——玻纤滤料的特性、应用	49
	一、连续玻璃纤维过滤布的特性及其应用	49

	二、玻璃纤维膨体纱滤料的特性及其应用	50
	三、玻璃纤维针刺毡滤料与设计	51
	四、滤袋工艺设计过程中的一些经验教训	51
	五、玻纤覆膜	52
第三节	高品质塑料片材共挤技术	57
	一、传统挤出工艺的问题	57
	二、解决方案——共挤技术	58
	三、环保上的优势	58
	四、双螺杆挤出技术应用	59
第四节	F RTP 复合材料中纤维屑的回收再利用	60
	一、碳纤维的回收再利用	60
	二、纤维屑的回收再利用	61

### 第三章 复合材料成型的工艺与设计

63

第一节	复合材料结构中的纤维路径及连续纤维的均布性	63
	一、复合材料结构中的纤维路径	63
	二、纤维铺放的实际情况	65
	三、条状铺层的铺叠方法	65
第二节	复合材料设计制造一体化技术	66
	一、数字化的设计流程	67
	二、复合材料构件数字化设计原则	68
	三、复合材料设计制造一体化的优势	68
	四、复合材料设计制造一体化的评价	69
第三节	复合材料曲面铺层的数字化展开技术设计及发展	69
	一、复合材料数字化展开技术	70
	二、复合材料曲面数字化展开方法存在的问题	73
	三、复合材料曲面数字化展开技术的发展方向	74

### 第四章 复合材料产品的成型工艺与方法

75

第一节	复合材料制品成型工艺特点	75
第二节	聚合物基复合材料几种成型工艺与方法	75
	一、离心成型工艺	76
	二、浇注成型工艺	77



	三、弹性体贮树脂成型技术 .....	77
	四、增强反应注射成型技术 .....	77
第三节	树脂基复合材料湿法缠绕成型工艺与方法 .....	78
	一、湿法缠绕用增强材料 .....	78
	二、湿法缠绕用树脂基体的应用 .....	79
	三、湿法缠绕成型工艺的应用 .....	81
	四、湿法缠绕成型研究与评价 .....	81
第四节	热塑性树脂基复合材料拉挤成型工艺 .....	82
	一、生产工艺 .....	82
	二、生产设备 .....	84
第五节	复合材料的预浸料模压成型工艺与方法 .....	86
	一、基本过程 .....	86
	二、压制前的准备 .....	86
	三、压制工艺 .....	88
	四、典型配方模压成型工艺 .....	89
	五、典型预浸料和性能 .....	90
第六节	复合材料热隔膜成型技术 .....	90
	一、复合材料热隔膜成型概念 .....	91
	二、热隔膜成型分类 .....	91
	三、复合材料热隔膜成型关键技术 .....	93
	四、复合材料热隔膜成型技术应用 .....	94

## 第五章 复合材料模具的制造工艺与技术

97

第一节	复合材料模具概述 .....	97
	一、模具按照材质分类 .....	97
	二、复合材料模具 .....	98
第二节	典型注塑模具设计过程 .....	99
第三节	复合材料注射成型模具的几种新结构 .....	100
	一、模具“疾速”加热冷却系统 .....	100
	二、叠模和 T 模 .....	101
	三、整体式热流道系统 .....	102
第四节	轻型 RTM 工艺简介 .....	102
	一、轻型 RTM 工艺 .....	102
	二、LRTM 和 RTM 比较 .....	103

	三、LRTM 工艺中要注意的问题 .....	106
	四、LRTM 的应用领域 .....	108
第五节	复合材料结构设计数字化建模技术 .....	108
	一、复合材料传统研制方法 .....	108
	二、复合材料数字化设计、分析与制造 .....	109
	三、复合材料数字化建模 .....	109
	四、复合材料数字化建模规范 .....	113
第六节	复合材料可制备性设计及其模型的实现 .....	114
	一、复合材料可制备性设计 .....	114
	二、复合材料可制备性设计模型及其实现 .....	115
第七节	热塑性增强塑料的成型工艺及原料设备要求 .....	116
	一、原材料的准备 .....	116
	二、对设备的要求 .....	117
	三、工艺条件的确定 .....	118
第八节	复合材料成型制造新技术和新型模具材料 .....	119
	一、摒弃模型 .....	119
	二、大型航空航天模具 .....	120
	三、BMI 基材料 .....	120
第九节	先进复合材料构件成型模具和工装技术 .....	121
	一、模具和工装的设计技术 .....	122
	二、模具和工装结构形式 .....	122
	三、模具和工装材料 .....	125
	四、模具和工装制造方法 .....	127

## **第六章** FRTP 生产与加工及产品应用 129

第一节	概述 .....	129
	一、FRTP 加工 .....	129
	二、复合材料泡沫芯材的加工及使用 .....	131
第二节	玻璃纤维毡增强热塑性复合片材生产与加工 .....	132
	一、玻璃纤维毡增强聚丙烯片材的制造工艺 .....	133
	二、GMT 材料性能 .....	134
	三、GMT 材料应用前景 .....	135
第三节	自增强复合材料发展及应用 .....	136
	一、概述 .....	136

	二、制备方法 .....	137
	三、聚合物体系 .....	139
	四、纤维增强聚合物复合材料的应用 .....	140
第四节	长纤维增强热塑性材料的加工与应用 .....	140
	一、概述 .....	140
	二、LFT 的加工工艺 .....	140
	三、LFT 的优势 .....	141
	四、LFT 的主要应用 .....	142
	五、LFT 的回收 .....	142
	六、LFT 的评价 .....	142
第五节	碳纤维复合材料钻削加工对比试验 .....	142
	一、概述 .....	142
	二、试验方案 .....	143
	三、试验结果与分析 .....	144
	四、试验结论 .....	146
第六节	复合材料热压罐共固化的低成本工程 .....	147
	一、概述 .....	147
	二、技术难点 .....	147
	三、技术方案 .....	147
	四、先进复合材料共固化技术降低工程化制造成本评价 .....	151
第七节	凯芙拉纤维复合材料孔加工技术 .....	151
	一、概述 .....	151
	二、凯芙拉纤维复合材料加工工艺性分析 .....	151
	三、凯芙拉纤维复合材料通孔加工技术 .....	152
	四、凯芙拉纤维复合材料的台阶孔加工技术 .....	153
	五、孔口铤窝加工 .....	154
	六、结论 .....	154

# 第一章

## 概 论

### 第一节 热塑性复合材料简介

#### 一、概述

近年来，纤维增强型热塑性塑料（以下简称 FRTP，又称热塑性复合材料）以其优异的耐冲击性能而迅速成为现代塑料工业的一部分。

FRTP 成形周期短，又能降低生产成本，被认为是今后开发的重要课题之一。

与金属材料相比，热塑性复合材料重量轻了 30%~50%，可以帮助汽车制造商节省油耗，从而节省汽车使用成本。热塑性材料的加工工艺简便，能够节省大量生产时间，并且可以再循环利用，因此大规模生产变得可行。

在最近几十年里，芳纶等高性能纤维复合材料的生产工艺已经给新型材料的制造奠定了一定的基础。目标是在汽车和底盘的半结构件和初级结构件上应用这种材料。

热塑性长纤维增强复合板由织物和非织物相互掺杂再结合树脂形成最后成型材料，重量轻、强度高。

UD-tape 高性能韧性环氧树脂充分利用了单向浸渍纤维的异向性，又通过注塑包覆成型工艺将半成品部件塑造成更复杂的结构部件。

根据 Lucintel 公司最新报告，预计未来 5 年汽车行业将是热塑性复合材料的最大市场，全球热塑性复合材料市场的年复合增长率有望达到 4.9%，估计

到 2017 年可达 82 亿美元。在极需减轻重量、节省燃料和提高其他性能优势等方面，热塑性复合材料的应用越来越广。

美国和西欧的汽车行业由于接受了新的热塑性复合材料，预计未来 5 年间将会呈现出稳步增长。然而，全球汽车业的增长将由亚洲市场和东欧市场来带动。Lucintel 公司的研究显示，这一增长背后的关键推动因素是采用 SFT（短纤维增强热塑性塑料）和 LFT（长纤维增强热塑性塑料）的电气、电子和汽车用产品的出货量上升。此外，提高 SFT 性能的产品开发将使 SFT 得以进一步渗透到诸如汽车油箱和导电零部件等应用当中。研究表明，虽然增长受到能源成本上升的制约及来自低成本材料的竞争，但在中国、俄罗斯、巴西和印度等新兴经济体，由于这些地区汽车生产欣欣向荣，新的热塑性复合材料材料日益渗透到汽车零部件中，热塑性复合材料正面临着巨大的发展机遇。

## 二、热塑性复合材料特殊性能与成型工艺

### 1. 热塑性复合材料的特殊性能

一般热塑性复合材料的特殊性能如下：

(1) 密度小、强度高 热塑性复合材料的密度为  $1.1\sim 1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ，仅为钢材的  $1/7\sim 1/5$ ，比热固性玻璃钢轻  $1/4\sim 1/3$ 。它能够以较小的单位质量获得更高的机械强度。一般来讲，不论是通用塑料还是工程塑料，用玻璃纤维（简称玻纤）增强后，都会获得较高的增强效果，提高强度应用档次。

(2) 性能可设计性的自由度大 热塑性复合材料的物理性能、化学性能、力学性能，都是通过合理选择原材料种类、配比、加工方法、纤维含量和铺层方式进行设计。由于热塑性复合材料的基体材料种类比热固性复合材料多很多，因此，其选材设计的自由度也就大得多。

(3) 热性能 一般塑料的使用温度为  $50\sim 100^\circ\text{C}$ ，用玻璃纤维增强后，可提高到  $100^\circ\text{C}$  以上。尼龙 6 的热变形温度为  $65^\circ\text{C}$ ，用 30% 玻纤增强后，热变形温度可提高到  $190^\circ\text{C}$ 。聚醚醚酮树脂的耐热性达  $220^\circ\text{C}$ ，用 30% 玻纤增强后，使用温度可提高到  $310^\circ\text{C}$ ，这样高的耐热性，热固性复合材料是达不到的。热塑性复合材料的线膨胀系数比未增强的塑料低  $1/4\sim 1/2$ ，能够降低制品成型过程中的收缩率，提高制品尺寸精度。其传热系数为  $0.3\sim 0.36\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，与热固性复合材料相似。

(4) 耐化学腐蚀性 复合材料的耐化学腐蚀性，主要由基体材料的性能决定。热塑性树脂的种类很多，每种树脂都有自己的防腐特点，因此，可以根据复合材料的使用环境和介质条件，对基体树脂进行优选，一般都能满足使用要



求。热塑性复合材料的耐水性优于热固性复合材料。

(5) 电性能 一般热塑性复合材料都具有良好的介电性能,如不反射无线电电波、透过微波性能良好等。由于热塑性复合材料的吸水率比热固性复合材料小,故其电性能优于后者。在热塑性复合材料中加入导电材料后,可改善其导电性能,防止产生静电。

(6) 废料能回收利用 热塑性复合材料可重复加工成型,废品和边角余料能回收利用,可减少对环境的污染。

由于热塑性复合材料有很多优于热固性复合材料的特殊性能,应用领域十分广泛。从国外的应用情况分析,热塑性复合材料主要用于车辆制造工业、机电工业、化工防腐及建筑工程等方面。

## 2. 热塑性复合材料分类

热塑性复合材料是以玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维等增强的各种热塑性树脂的总称,国外称 FRTP (fiber reinforced thermoplastics)。由于热塑性树脂和增强材料种类不同,其生产工艺和制成的复合材料性能差别很大。

从生产工艺角度,塑性复合材料分为两大类:

(1) 短纤维增强复合材料 生产工艺包括:注射成型工艺、挤出成型工艺、离心成型工艺。

(2) 连续纤维增强及长纤维增强复合材料 生产工艺包括:预浸料模压成型、片状模塑料冲压成型、片状模塑料真空成型、预浸纱缠绕成型、拉挤成型。

## 3. 热塑性复合材料成型工艺与方法

(1) 注射成型工艺 注射成型是热塑性复合材料的主要生产方法,历史悠久,应用最广。其优点是:成型周期短,能耗最小,产品精度高,一次可成型开关复杂及带有嵌件的制品,一模能生产几个制品,生产效率高。缺点是不能生产长纤维增强复合材料制品和对模具质量要求较高。根据目前的技术发展水平,注射成型的最大产品为5kg,最小到1g。这种方法主要用来生产各种机械零件、建筑制品、家电壳体、电器材料、车辆配件等。

(2) 挤出成型工艺 挤出成型是热塑性复合材料制品生产中应用较广的工艺之一。其主要特点是生产过程连续,生产效率高,设备简单,技术容易掌握等。挤出成型工艺主要用于生产管、棒、板及异型断面型等产品。增强塑料管玻纤增强门窗异型断面型材,在我国有很大市场。

(3) 缠绕成型工艺 热塑性复合材料的缠绕成型工艺原理和缠绕机械设备

与热固性玻璃钢的一样，不同的是热塑性复合材料缠绕制品的增强材料不是玻纤粗纱，而是经过浸胶（热塑性树脂）的预浸纱。因此，需要在缠绕机上增加预浸纱预热装置和加热加压辊。缠绕成型时，先将预浸纱加热到软化点，再与芯模的接触点加热，并用加压辊加压，使其熔接成一个整体。

(4) 拉挤成型工艺 热塑性复合材料的拉挤成型工艺与热固性玻璃钢的基本相似。只要把进入模具前的浸胶方法加以改造，生产热固性玻璃钢的设备便可使用。生产热塑性复合材料拉挤产品的增强材料有两种：一种是经过浸胶的预浸纱或预浸带，另一种是未浸胶的纤维或纤维带。

(5) 焊接层合法工艺 此法系利用热塑性复合材料的可焊性生产复合材料板材。其方法如下：先在工作台上压铺一层预浸料（一般宽500mm），铺第二层浸料时，开动压辊的焊接器，使预浸料进入压辊下，焊接器使上下两层预浸料在几秒钟内同时受热熔化，当机器向前移动时，预浸料在压辊的压力（0.3MPa）作用下黏合成一体。如此重复，可生产任意厚度的板材。

(6) 热塑性片状模塑料制品冲压成型工艺 热塑性片状模塑料制品冲压成型与热固性SMC压制成型不同，它要先将坯料预热，然后再放模具加压成型。

(7) 热塑性复合材料的连接技术 热塑性复合材料的连接方法很多，列举如下：

① 铆接 用于热塑性复合材料铆接用的铆钉，一般都是用连续纤维增强热塑性塑料制造，最好是用拉挤棒材制造。施工时，铆钉预热到可以加压塑变的温度，铆钉与孔径应能严密配合，不能大，也不能小。也可以用金属螺栓。铆接的优点是耐冲击性好，无电化学腐蚀，价格便宜。

② 焊接 热塑性复合材料的焊接处理，是将被连接材料的焊接表面加热到熔化状态，然后搭接加压，使之接成一体。复合材料焊接原理与塑料焊接相似，但必须注意焊接处的纤维增强效果不能降低很多。

③ 管件对接焊 热塑性复合材料管的对接焊方法有直接对接焊和补强对接焊两种。这种连接方法的优点是工艺简单，可在现场施工，不需对管子进行机械加工，连接强度高，不易断裂。缺点是成本高，工艺要求严格，要保证尺寸紧密配合。

④ 缠绕焊接 用预浸带沿焊缝手工或机械缠绕，同时用火焰喷枪对接触点加热熔融，使之与被连接件粘牢。选择预浸带时，要注意纤维的方向和含量。此法较实用，被连接材料能保留较好的性能，但易出现加热不均的现象。

⑤ 薄板超声波焊接 此法是用超声波对被连接处进行加热焊接，一般能够获得较高的连接强度。

### 三、热塑性复合材料制备工艺概述

热塑性复合材料 (FRTP) 具有很多独特的优点, 如韧性高、耐冲击性能好、预浸料稳定、无贮存时间限制、制造周期短、耐化学性能好、吸湿率低、可重复加工等。自 1951 年 R. Bradit 首次采用玻璃纤维增强聚苯乙烯制造复合材料以来, 对热塑性复合材料的基体树脂、增强材料及成型方法的研究不断深入, 其产量与应用领域不断扩大, 已经在汽车、电子、电器、医药、建材等行业得到了广泛的应用。近几年来, 热塑性树脂基复合材料的发展速度已大大超过热固性树脂基复合材料。由于热塑性树脂熔融温度高、化学性质稳定, 其复合材料成型加工与热固性复合材料有很多不同之处。预浸、成型等每一个阶段对设备和工艺都有特殊的要求。如制备热塑性预浸料, 采用热固性预浸料常用的熔融法、溶液法难度较大, 因而出现了悬浮法、粉末法等特殊的预混工艺。通常热塑性复合材料制备过程如图 1-1 所示。

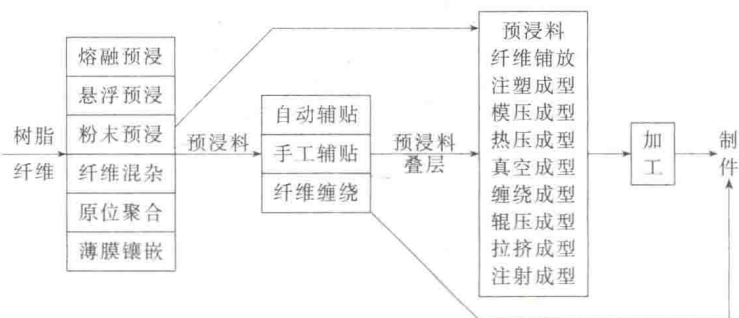


图 1-1 热塑性复合材料制备过程

#### 1. 预浸料的制备

热塑性树脂的熔体黏度很高, 一般大于  $100 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , 难以使增强纤维获得良好浸渍。因此制备 FRTP 的关键技术是解决热塑性树脂对增强纤维的浸渍。各国对此进行了大量的研究, 主要开发了熔融预浸、悬浮预浸、粉末预浸、纤维混杂、原位聚合以及薄膜镶嵌等多种制备技术。

(1) 熔融预浸法 是先将树脂加热熔融, 纤维接触熔融树脂得到浸渍。这是一种最常用的方法, 无溶剂污染, 特别适用于结晶性树脂制备预浸带。早在 1972 年, 美国 PPG 公司就采用这一技术生产连续玻璃纤维毡增强聚丙烯复合材料。具体是将两层玻璃纤维原丝针刺毡夹在三层聚丙烯层之间, 其中间层是挤出机挤出的熔融树脂。上下两层树脂既可用挤出机挤出, 也可直接用树脂薄膜。将这种夹层结构置于高于树脂基体熔化的温度下热压成型。



(2) 悬浮预浸法 是根据树脂情况选定合适的悬浮剂配成悬浮液, 纤维通过悬浮液使树脂粒子均匀地分布在纤维上, 然后加热烘干使悬浮剂蒸发, 同时使树脂熔融浸渍纤维得到预浸带。悬浮浸渍法生产的片材中玻璃纤维分布均匀, 成型加工时预浸料流动性好。它适合制作复杂几何形状和薄壁结构制品。但与熔融制备方法一样, 此法存在技术难度高和设备投资大的缺点。

(3) 粉末预浸法 是纤维预先经过扩散器被空气吹松散后进入流化床中, 带静电的树脂粉末很快沉积于接地的纤维上, 沉积量由流化床电压和纤维通过的速率控制, 再经烘炉加热熔化。这种工艺能快速连续生产热塑性预浸带, 纤维损伤少, 聚合物无降解, 具有成本低的潜在优势。适合于这种技术的树脂粉末直径以  $5\sim 10\mu\text{m}$  为宜。此法的不足之处是浸润仅在成型加工过程中才能完成, 且浸润所需的时间、温度、压力均依赖于粉末直径的大小及其分布状况。

(4) 纤维混杂法 是将热塑性树脂纺成纤维或薄膜带, 然后根据含胶量的多少将一定比例的纤维与树脂纤维束紧密地合并成混合纱, 再通过一个高温密封浸渍区使树脂和纤维熔成连续的基体。该法的优点是树脂含量易于控制, 纤维能得到充分浸润, 可以直接缠绕成型得到制件, 是一种很有前途的方法。但由于制取直径极细的热塑性树脂纤维 ( $< 10\mu\text{m}$ ) 非常困难, 同时编织过程中易造成纤维损伤, 限制了这一技术的应用。

(5) 原位聚合法 是利用单体或预聚体初始分子量小、黏度低及流动性好的特点, 纤维与之一边浸润、一边反应, 从而达到理想的浸渍效果。采用该法要求单体聚合速度快, 反应易于控制。存在的主要问题是工艺条件比较苛刻、反应不易控制, 尚不具有实用价值。

(6) 薄膜镶嵌法 是先将热塑性树脂热熔制成衬有脱模纸的薄膜, 铺层时撕去脱模纸与增强纤维之间的间隔薄膜, 然后加热加压将树脂压入纤维区。该法加工比较简单, 但要加工低孔隙率的复合材料很困难, 且仅能用于模压制品的加工。

## 2. 制备方法

采用上述工艺制备的 FRTP 只是半成品——预混料, 通过进一步成型加工才可制得最终产品。热塑性树脂基复合材料的成型方法主要是从热固性树脂基复合材料及金属成型技术借鉴而来。按照所用的设备可以分为注射成型 (IM)、热压成型、真空模压成型工艺、纤维缠绕成型、辊压成型、拉挤成型及树脂注射成型等。

(1) 注射成型 是生产短纤维增强塑料的主要方法。短纤维增强塑料至少有 50% (质量分数) 是通过注塑机成型的。生产工艺包括加料及熔融, 并在