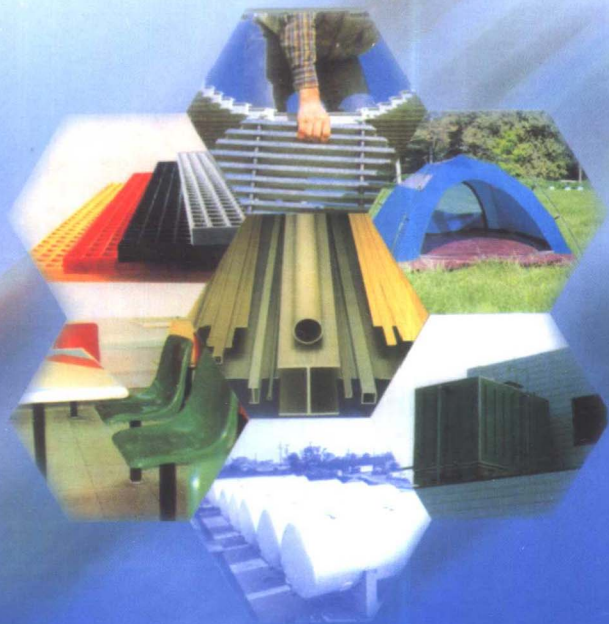


陈祥宝 包建文 娄葵阳 编著

树脂基复合材料 制造技术



化学工业出版社



树脂基复合材料制造技术

陈祥宝 包建文 姜葵阳 编著

化学工业出版社
·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

树脂基复合材料制造技术/陈祥宝等编著. —北京: 化学工业出版社, 1999.12
ISBN 7-5025-2635-8

I. 树… II. 陈… III. 合成树脂-纤维增强复合材料-成型-技术 IV. TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (99) 第 43655 号

树脂基复合材料制造技术

陈祥宝 包建文 姜葵阳 编著
责任编辑: 龚渊澄 虞旻
责任校对: 陶燕华
封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社出版发行
(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)
<http://www.cip.com.cn>

新华书店北京发行所经销
北京市密云云浩印制厂印刷
北京市密云同文印刷厂装订

开本 787×1092 毫米 1/32 印张 9 1/4 字数 194 千字
2000 年 1 月第 1 版 2000 年 1 月北京第 1 次印刷
印数: 1—4000
ISBN 7-5025-2635-8/TQ·1174
定 价: 20.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

纤维增强复合材料研究和应用涉及化学、物理、材料学、力学和工艺学等多学科高度交叉综合。根据使用的基体材料，纤维增强复合材料可分为纤维增强陶瓷基、金属基、碳基和树脂基复合材料。到目前为止，纤维增强树脂基复合材料在我国已经形成有数千家企业、数千种产品的极富活力的工业领域。纤维增强复合材料产品在我国石油、交通、建筑、电气、机械、航空航天等许多领域得到了广泛的应用。

纤维增强复合材料成型技术是复合材料研究和应用的关键。为适应复合材料产品发展的需要，经过多年的发展，复合材料成型技术已从简单的手糊成型、模压成型，发展到全自动的纤维缠绕成型、拉挤成型、纤维铺放/热压罐成型、RTM成型等。本书系统地介绍纤维增强树脂基复合材料成型技术，其中第一至第五章由陈祥宝编写，第六、第七章、第九章及第四章八节由包建文编写，第八章由娄葵阳编写。

限于作者水平，书中难免错误不妥之处，请读者批评指正。

作者

1999年6月

内 容 提 要

本书系统介绍纤维增强树脂基复合材料成型技术，主要包括手糊、喷射成型，模压成型，纤维缠绕成型，RTM成型，拉挤成型，热压罐成型以及热塑性复合材料成型技术及其应用。

本书对从事纤维增强树脂基复合材料研究、生产的科研和工程技术人员有很大的参考价值，也可作为高等院校复合材料专业的参考用书。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 前言	1
1.2 树脂基体	2
1.3 成型技术	3
1.4 树脂基复合材料的应用	5
参考文献	6
第二章 手糊成型技术	8
2.1 前言	8
2.2 原材料	9
2.2.1 玻璃纤维及其织物	10
2.2.2 树脂基体	11
2.2.3 辅助材料	12
2.3 手糊成型技术	15
2.3.1 原材料准备	15
2.3.2 模具的准备	17
2.3.3 胶衣层制备	20
2.3.4 糊制及固化	21
2.3.5 脱模、修整及装配	24
2.3.6 制件中产生缺陷的原因及其防止方法	25
2.4 喷射成型技术	30
2.4.1 喷射成型技术	30
2.4.2 喷射成型设备	31
2.4.3 喷射成型常见缺陷分析	34
2.5 手糊成型技术的应用	36

参考文献	37
第三章 压力模压技术	39
3.1 前言	39
3.2 压力模压工艺	39
3.3 固化周期	42
3.4 温度的影响	44
3.4.1 温度分布和固化时间	44
3.4.2 固化动力学	47
3.4.3 模压中的热传导	49
3.5 流动行为	50
3.5.1 实验观察	50
3.5.2 理论模型	51
3.6 纤维取向	55
3.6.1 取向测量	55
3.6.2 纤维取向对力学性能的影响	56
3.7 压力模压 SMC 复合材料中的缺陷	56
3.7.1 空隙	58
3.7.2 鼓泡	58
3.7.3 分层	59
3.7.4 收缩痕	59
3.7.5 流缝线	60
3.7.6 翘曲	60
3.8 成型技术参数	61
3.9 工艺控制	62
3.9.1 台面的平行度	62
3.9.2 加热控制	62
3.9.3 固化监控	62
3.9.4 工艺自动化	64
3.10 压力模压的应用	64
3.10.1 计算机外壳	64

3.10.2 汽车轮	65
3.10.3 航空发动机分流环	66
参考文献	66
第四章 RTM 成型技术	69
4.1 前言	69
4.2 RTM 成型技术	70
4.3 RTM 工艺的模拟	71
4.4 RTM 工艺的适用范围	75
4.5 RTM 用树脂基体和增强体	77
4.5.1 RTM 用树脂基体	77
4.5.2 RTM 用增强体	78
4.6 工装设备	82
4.6.1 RTM 模具	82
4.6.2 预制件设备	85
4.6.3 树脂压注设备	86
4.7 生产效率	88
4.8 树脂膜渗透 (RFI) 成型技术	90
4.9 RTM 技术的应用	93
参考文献	97
第五章 纤维缠绕成型	99
5.1 前言	99
5.2 纤维缠绕用材料	99
5.2.1 缠绕用纤维	100
5.2.2 缠绕用树脂体系	101
5.3 纤维缠绕技术	102
5.3.1 螺旋缠绕技术	102
5.3.2 平面缠绕技术	103
5.3.3 特种缠绕技术	104
5.4 纤维缠绕过程模拟	105
5.4.1 热化学模型	105

5.4.2	纤维移动模型	107
5.4.3	应力-应变模型	109
5.4.4	模型的求解和应用	109
5.5	缠绕设备	111
5.5.1	缠绕机	111
5.5.2	芯模	117
5.5.3	张力控制系统	119
5.5.4	浸胶和纤维供给系统	120
5.5.5	固化系统	121
5.6	纤维缠绕成型的应用	125
	参考文献	126
第六章	复合材料热压罐成型技术	128
6.1	前言	128
6.2	预浸料	130
6.2.1	预浸料的制造	130
6.2.2	预浸料性能	137
6.3	热压罐系统的结构与成型模具	139
6.3.1	热压罐系统的结构	139
6.3.2	成型模具	145
6.4	固化成型工艺流程	149
6.4.1	工艺辅助材料	149
6.4.2	成型工序	150
6.4.3	工艺过程中形成的制件缺陷	153
6.5	热压罐成型工艺模型	155
6.5.1	树脂流动模型	155
6.5.2	纤维变形模型	159
6.5.3	纤维压实模型	159
6.5.4	孔隙形成模型	163
6.5.5	传热模型	168
6.5.6	工艺模型应用	169

6.6 热压罐成型技术的应用	170
参考文献	175
第七章 复合材料拉挤成型技术	178
7.1 前言	178
7.2 拉挤原材料	179
7.2.1 增强材料	179
7.2.2 树脂基体	182
7.2.3 催化及固化剂	185
7.2.4 脱模剂	186
7.2.5 填料	187
7.2.6 色料	188
7.2.7 其他添加剂	189
7.3 拉挤设备与工艺	189
7.3.1 排纱	190
7.3.2 浸渍	191
7.3.3 预成型与固化	192
7.3.4 牵引	195
7.3.5 切割	196
7.4 拉挤工艺监控	196
7.5 拉挤复合材料的性能	202
7.5.1 拉挤复合材料的力学性能	202
7.5.2 拉挤复合材料的物理性能	207
7.5.3 耐腐蚀性能	208
7.5.4 燃烧性能	209
7.6 拉挤复合材料的应用	210
7.6.1 电气设备	210
7.6.2 耐腐蚀应用	210
7.6.3 体育及娱乐消费品	213
7.6.4 建筑	213
7.6.5 交通运输	214
7.6.6 在农业方面的应用	215

7.6.7 在航空航天等军事领域中的应用	215
7.7 RIM-拉挤工艺	216
参考文献	217
第八章 连续纤维增强热塑性树脂基复合材料成型工艺	220
8.1 前言	220
8.2 热塑性树脂的变形与流动	222
8.2.1 热塑性树脂的热变形及粘流温度	222
8.2.2 热塑性树脂的粘性流动	227
8.3 连续纤维增强热塑性复合材料的变形与流动	231
8.4 结晶过程及其对树脂和复合材料性能的影响	234
8.4.1 结晶过程	234
8.4.2 影响结晶速度的因素	236
8.4.3 结晶对树脂和复合材料性能的影响	238
8.5 成型工艺参数及成型方法	245
8.5.1 工艺参数	245
8.5.2 成型方法	246
8.6 连续纤维增强高性能热塑性复合材料典型制件	254
8.6.1 热塑性复合材料前机身	254
8.6.2 Westland 30-300 飞机尾翼	255
8.6.3 V-22 Osprey 飞机起落架舱门	256
8.6.4 FOKKER 50 主起落架舱门	256
参考文献	257
第九章 先进复合材料电子束固化成型技术	259
9.1 前言	259
9.2 树脂基复合材料电子束固化成型技术特点	259
9.3 电子束固化复合材料树脂基体	261
9.4 电子束固化技术成型工艺与设备	264
9.5 电子束固化成型技术存在的一些问题	270
9.6 电子束固化复合材料的性能	272
9.7 电子束固化复合材料的应用	279
参考文献	280

第一章 绪 论

1.1 前言

树脂基复合材料是指由树脂和纤维增强材料构成的一类复合材料，具有比强度和比刚度高、可设计性强、抗疲劳性能好、耐腐蚀性能好以及便于大面积整体成型和具有特殊的电磁性能等独特优点。和传统的钢、铝合金结构材料相比(表 1-1)，树脂基复合材料的密度约为钢的 1/5，铝合金的 1/2，其比强度、比模量高于钢和铝合金。这样在强度和刚度要求相同的情况下，用树脂基复合材料可以减轻结构质量^[1,2]。

表 1-1 不同材料的比强度、比模量

材 料	纤维体积 含量/%	密度 /(g/cm ³)	比模量 /(MN/kg)	比强度 /(MN/kg)
芳纶/环氧	60	1.4	29	0.46
碳/环氧	58	1.54	54	0.25
低碳钢	—	7.8	27	<0.11
铝合金	—	2.7	27	0.15

树脂基复合材料的力学、物理性能除了由纤维、树脂的种类及含量决定外，还与纤维的排列方向、铺层次序和层数密切相关。可根据使用条件的不同，选取相应的材料及铺层设计来满足既定要求，做到安全可靠、经济合理。

树脂基复合材料对于即使结构形状复杂的大型制件也能实现一次成型，从而使部件中零件数目明显减少，避免了接头过多，显著降低了应力集中；减少了制造工序和加工量，大量节

省原材料。树脂基复合材料以其独特的优点，在建筑、舰船、陆地运输、电气、航空航天工业和体育用品等领域得到了大量应用，成为发展最迅速、应用最广泛的一类复合材料。

1.2 树脂基体^[3-5]

大量热固性和热塑性塑料都可作为复合材料树脂基体使用。常用的热固性树脂有：不饱和聚酯、乙烯基酯、环氧、酚醛、双马来酰亚胺（BMI）以及聚酰亚胺树脂等。不同树脂体系具有不同的使用温度（表 1-2）。常用的热塑性树脂有：聚丙烯（PP）、聚碳酸酯（PC）、尼龙（Nylon）、聚醚醚酮（PEEK）、聚醚砜（PES）等。表 1-3 为几种热塑性树脂的性能。

表 1-2 不同树脂体系的最高使用温度

树脂基体	最高使用温度/℃	应用领域
120℃固化环氧	80	民机、亚音速飞机
180℃固化环氧	130	民机、亚音速、超音速飞机
BMI	200	超音速飞机、火箭、发动机
聚酰亚胺	>230	发动机

表 1-3 几种热塑性树脂的性能

材料	弹性模量 /GPa	断裂强度 /MPa	断裂伸长 /%	密度 / (g/cm ³)	T _g /℃	T _{加工} /℃
PP	1.4	34	200	0.9	-20	200~280
Nylon 66	2.8	76	100	1.2	57	270~290
PC	2.4	66	110	1.1	157	260
PEEK	3.4	100	150	1.3	143	370~390

不饱和聚酯 价格便宜，固化温度低。室温性能好，可广泛用于制备大型构件（如游艇），适合于规模化生产。

乙烯基酯 性能和价格介于不饱和聚酯和环氧树脂之间。

环氧树脂品种多，能和不同固化剂组成不同的树脂/固化体系，室温或高温固化，改性容易，是在复合材料中使用最为广泛的一种树脂。目前使用的环氧树脂有 5 种基本类型：

- ① 双酚 A 型环氧树脂；
- ② 酚醛环氧树脂；
- ③ 脂环族环氧树脂（耐高温、高韧性）；
- ④ 卤化环氧树脂（阻燃）；
- ⑤ 柔性环氧树脂（高抗冲击）。

环氧树脂固化剂有以下几大类：脂肪胺、芳香胺、酸酐、聚酰胺以及潜伏性固化剂，如三氟化硼的络合物和双氰胺。脂肪胺能在室温下和环氧树脂发生固化反应，其他固化剂一般需加热或在促进剂存在时才能和环氧树脂发生固化反应。

酚醛树脂 使用温度高，阻燃性能好，但力学性能较低。

聚酰亚胺树脂 优异的耐高温性能，可用于制备发动机部件，但工艺性较差。

BMI 树脂 具有较好的工艺性，良好的耐高温性能和耐湿热性能，使用温度介于环氧和聚酰亚胺之间。

1.3 成型技术^[6-8]

树脂基复合材料成型技术主要包括：手糊成型技术、模压成型技术、RTM 成型技术、纤维缠绕成型技术、拉挤成型技术、热压罐成型技术等。

① 手糊成型技术 很少受到制品形状及大小的制约；模具费用也较低。因此对于那些品种多、生产量小的大型制品，手糊成型技术是最适合的。

② 模压成型技术 适合于生产量大，尺寸要求精确的制品。模压成型的模具由阴、阳模两部分组成，增强材料一般为短切纤维毡、连续纤维毡和织物。

③ RTM成型技术 RTM (树脂传递模型, 简称 RTM) 成型技术是一种适宜多品种、中批量、高质量复合材料制品生产的成型技术, RTM 技术有许多优点: 能够制造高质量、高精度、低孔隙率高纤维含量的复杂复合材料构件, 无需胶衣树脂也可获得光滑的双表面, 产品从设计到投产时间短, 生产效率高; RTM 模具和产品可采用 CAD 进行设计, 模具制造容易, 材料选择面广; RTM 成型的构件与管件易于实现局部增强以及制造局部加厚的构件, 带芯材的复合材料能一次成型; RTM 成型过程中挥发分少, 有利于劳动保护和环境保护。

④ 纤维缠绕成型技术 纤维缠绕成型是在专门的缠绕机上, 将浸渍树脂的纤维均匀地、有规律地缠绕在一个转动的芯模上, 最后固化、除去芯模获得制件。纤维缠绕成型方法既适用于制备简单的旋转体, 如筒、罐、管、球、锥等, 也可以用来制备飞机机身、机翼及汽车车身等非旋转体部件。在纤维缠绕成型中常使用的增强材料包括玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维, 缠绕用树脂基体有聚酯、乙烯酯、环氧和 BMI 树脂等。纤维缠绕的主要优点是节省原材料、低的制造成本以及制件的高度重复性, 最大的缺点是制件固化后需除去芯模以及不适宜于带凹曲表面制件的制造。

⑤ 拉挤成型技术 用于连续生产纤维复合材料型材。主要过程是依靠牵引将原材料通过一定型面的加热模, 完成复合、成型和固化。拉挤成型工艺简单、效率高。拉挤法制备制件时, 增强纤维沿轴向平行排列, 能有效地利用其强度。采用纤维毡增强材料可制备各向同性制件, 采用编织带可提高制件的横向强度。拉挤成型的关键是固化的控制。固化反应放热峰出现太早制件易开裂、翘曲; 出现太迟, 制件固化不完全, 易分层。取决于型材形状和加热方式, 拉挤速度在 1.5~60m/h

之间。

⑥ 热压罐成型技术 热压罐成型技术是生产高质量复合材料制件的主要方法。其基本过程是先将预浸料按尺寸裁剪、铺贴，然后将预浸料叠层和其他工艺辅助材料组合在一起，置于热压罐中在一定压力和温度下固化形成制件。热压罐成型技术的最大优点是仅用一个模具就得到形状复杂、尺寸较大、质量较好的制件。

1.4 树脂基复合材料的应用^[9~12]

树脂基复合材料在建筑、船舶、运输、电气、体育器材和航空航天领域得到了广泛的应用，其中运输、建筑和船舶工业的应用最多，约占树脂基复合材料用量的60%以上。航空航天领域虽然复合材料用量较少，但这一领域对复合材料高性能的要求，使复合材料的设计、材料、制造和试验技术首先得到了发展。

树脂基复合材料的应用在汽车工业中增长极快。从50年代采用模压技术首次成功制备 Citroen-DS 19 车顶盖后，到60年代，Prosche Carrera GTS, DJET, M530 等车身都采用复合材料，复合材料汽车发动机风扇叶片也在 Citroen Ami 6 和 Renault Dauphine 上得到应用。随着 SMC、BMC 和 RTM 技术的发展，复合材料在汽车工业的应用发展到扰流片、保险杠、反射器、分配器盖、风扇座、车门、散热器护栅和轻型卡车弹簧片等。

在船舶工业，短切玻璃纤维增强聚酯复合材料是最常用的材料。粗纱织物和短切粗纱毡由于具有较高的性能得到越来越多的应用。一些二维和三维玻璃纤维缝编织物、芳纶织物、蜂窝芯材和乙烯基酯树脂也在高性能赛艇上得到应用。为了获得较高的生产效率，一些船舶生产厂已经开始发展快速生产技

术,如RTM技术。在船舶工业使用RTM技术的难点在于可以承受注射压力的超大型模具的制造。

在航空航天领域应用各种复合材料成型技术,如拉挤和缠绕技术,但使用最广泛的是真空袋/热压罐成型技术。有时为了制造复杂的复合材料层合板也使用自动铺放成型技术。在军用飞机上复合材料已经大量使用,其目的是减轻结构质量。但在民用飞机上,如Boeing 757和Boeing 767,复合材料的用量仅4%左右。复合材料在民用飞机上应用的目的是降低燃油消耗。如何降低成本,提高效费比是复合材料扩大在民用飞机应用的一个关键。目前发展的复合材料真空/压力袋/加热模压技术表明工艺技术的重要变化。和复合材料低成本技术相关,能在高温使用的热塑性树脂,如聚醚醚酮、聚砜、聚醚砜和聚苯砜等,得到了重视。利用这些热塑性树脂可以实现复合材料的快速成型,降低制造成本。此外,热塑性复合材料还具有断裂韧性高、贮存期无限长和可以多次成型和回收使用等优点。

参 考 文 献

- 1 Timothy G Gutowski. *Advanced Composites Manufacturing*. New York: Wiley, 1997
- 2 Daniel I M and Ishai O *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University Press, 1994
- 3 Tito T. Serafini. *High Temperature Polymer Matrix Composites*, Noyes DATA Corporation, New Jersey, 1987
- 4 Lin S C and Eli M Pearce. *High Performance Thermosets*. New York: Hanser Publishers, 1994
- 5 陈祥宝等: 高性能树脂基体. 北京: 化学工业出版社, 1999
- 6 A Brent Strong. *High Performance and Engineering Thermoplastic Composites*. Basel: Technomic, 1993
- 7 Mallick P K and Newman S. *Composite Materials Technology*. New York: Hanser