

塑料工业手册

HANDBOOK OF PLASTIC INDUSTRY

热固性塑料加工 工艺与设备

陈祥宝 主编

化学工业出版社

塑料工业手册

热固性塑料加工工艺与设备

陈祥宝 主编

化学工业出版社

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

塑料工业手册. 热固性塑料加工工艺与设备/陈祥宝
主编. —北京: 化学工业出版社, 2001. 1

ISBN 7-5025-2927-6

I. 塑… II. 陈… III. ①塑料工业-手册 ②热固性
塑料-生产工艺-技术手册 ③热固性塑料-化工设备-技术
手册 IV. TQ32-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 37700 号

塑料工业手册

热固性塑料加工工艺与设备

陈祥宝 主编

责任编辑: 龚浏澄 虞 旻

责任校对: 马燕珠

封面设计: 郑小红

*

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

北京市云浩印制厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 27 $\frac{3}{4}$ 字数 685 千字

2001 年 1 月第 1 版 2001 年 1 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—4000

ISBN 7-5025-2927-6/TQ·1271

定 价: 60.00 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

《塑料工业手册》编委会

主任委员	徐 僊	四川大学教授，中国科学院院士
副主任委员	袁晴棠	中国石油化工集团公司教授级高级工程师，中国工程院院士
	李俊贤	黎明化工研究院教授级高级工程师，中国工程院院士
	杨元一	中国石油化工集团公司北京化工研究院院长，教授级高级工程师
顾 问	顾觉生	国家《履行禁止化学武器公约》工作领导小组办公室副主任
	陶 涛	原化学工业部副部长
	胡亚东	中国科学院化学所研究员
	陈文瑛	原轻工业部塑料局教授级高级工程师

编委会成员（按姓氏笔画）

- 王贵恒 四川大学高分子材料科学与工程系教授
申开智 四川大学塑料工程系教授
申长雨 郑州工业大学教授
朱复华 北京化工大学教授
吴持生 中国五矿公司复合材料集团公司高级工程师
吴培熙 河北工业大学化工学院教授
吴舜英 华南理工大学工业装置与控制工程系教授
宋焕成 北京航空航天大学教授
张传贤 兰州化学工业公司合成橡胶厂教授级高级工程师
李滨耀 中国科学院长春应用化学研究所研究员
杜强国 复旦大学高分子科学系教授
邱文豹 锦西化工研究院教授级高级工程师
陈大俊 中国纺织大学高分子材料学院教授
陈信忠 上海交通大学应用化学系教授
陈祥宝 北京航空材料研究院研究员
林兆安 山西省能源产业集团公司研究员
姚康德 天津大学应用化学系教授
施祖培 岳阳石油化工总厂研究院教授级高级工程师
洪定一 中国石油化工集团公司技术开发中心教授级高级工程师
贺飞峰 上海合成树脂研究所教授级高级工程师
徐传骧 西安交通大学教授
徐新民 北京市化学工业研究院院长
益小苏 浙江大学高分子材料科学与工程系教授，北京航空材料研究院研究员
黄 锐 四川大学塑料工程系教授
傅 旭 晨光化工研究院院长教授级高级工程师
焦扬生 华东理工大学高分子材料系教授
潘祖仁 浙江大学高分子材料科学与工程系教授
瞿金平 华南理工大学工业装置与控制工程系教授

本分册编写人员

第一章	陈祥宝
第二章	梁国正
第三章	陈祥宝
第四章	梁国正
第五章	邢丽英
第六章	赵磊
第七章	李宏运
第八章	包建文
第九章	包建文 沈超
第十章	陈祥宝

序

材料是现代科学技术和社会发展的支柱，高分子材料在尖端技术、国防建设和国民经济各个领域已成为不可缺少的重要材料。合成树脂和塑料世界年产量目前已高达1.4亿吨以上，占三大合成材料产量80%以上。我国国民经济和高科技已进入高速发展时期，对高性能、廉价的高分子材料的需求日益增加。据报道，近年来我国五大合成树脂（PE，PP，PVC，PS，ABS）年需求量为1300万吨左右，塑料制品总产量居世界第二位（1600万吨以上），农地膜产量居世界首位，地膜和棚膜覆盖面积分别突破1亿亩和1000万亩，均居世界首位。我国是世界人口大国，需求量大，与先进国家对比，国产树脂在产品品种、质量、技术水平、生产成本等方面还有较大差距，每年还需要从国外进口大量高档次树脂，大量废弃塑料制品的回收处理和再生利用等问题亦有待解决，希望发展能与环境协调、高效益的高分子材料制备技术。

科学技术进步日新月异，合成树脂及塑料的性能不断得到提高。有关实现通用高分子材料的工程化和工程高分子材料的高性能化方面的新技术、新措施的报道不断出现。纳米材料在高新技术领域有极为广阔的应用前景，被称为“21世纪最有前途的材料”。金属、无机非金属和聚合物的纳米微粒、纳米丝、纳米薄膜、纳米块体以及由不同组元和联结型构成的纳米复合材料将构成丰富多彩的纳米材料世界。塑料制品的质量取决于原料的选择和加工条件，塑料的成型加工是控制制品结构和性能的中心环节，其任务是：了解原料的加工特性，确定最适宜的加工条件，制备最佳性能的产品。它是一门学科交叉，科学与工程紧密结合的学科，内容涉及化学、物理、力学、机械、数理逻辑、计算机等多学科，对它早已不再停留在“来料加工”的概念。这些皆是我们在近期需要赶超的。

本手册执笔人皆是在科研、生产、信息或高教战线有多年工作经验的知名专家学者。本手册对塑料的制备、加工工艺、成型机械、制品与模具设计、质量控制和使用的基本知识、世界合成树脂的发展概况等作了比较详尽的介绍和综合评述；对合成树脂的聚合机理、结构与性能作了充分论述，并重点阐述了塑料的改性、成型加工工艺。目的在于使从事合成树脂及塑料科技工作者、高校师生和使用部门对这一学科和行业领域的现状、水平、存在问题以及发展趋势有所了解，在运用这一领域成就的同时，共同努力，力求在基础性研究的某些领域有所创新，达到国际先进水平，开发新产品，使我国合成树脂和塑料，跃上一个新台阶。

徐倬

1999年1月20日，成都

前 言

热固性塑料研究和应用涉及化学、物理学、材料学、力学、工艺学等多学科，既高度交叉，又相互综合。选用不同的热固性塑料，采用不同的成型工艺技术和设备制备的热固性塑料产品，可以满足不同工业领域的需要。到目前为止，热固性塑料产业在中国已有数千家企业、数万种产品，并极富有活力。热固性塑料产品在中国航空、航天、建筑、石油、化工、能源、交通、机电、信息、医疗、船舶、兵器等工业领域有着十分广泛的应用。

热固性塑料成型技术是热固性塑料应用的关键。为适应热固性塑料产品发展的需要，经过多年的发展，热固性塑料成型技术已经从简单的浇铸和灌封、手糊和喷射、层合、模压成型发展到自动化的纤维缠绕、RTM、拉挤、热压罐成型等。本书全面系统地介绍热固性塑料成型工艺和设备，其中第一章概要地介绍了热固性塑料及其成型工艺技术，第二章至第九章分别介绍了浇铸和灌封、手糊和喷射、层合、模压、纤维缠绕、RTM、拉挤、热压罐成型工艺和设备，第十章主要讨论纤维增强热固性塑料结构损伤、修理。

本书的编写注重实用性和先进性的统一，技术内容的介绍立足于读者的实际需要，同时又注意反映当前热固性塑料成型工艺技术的最新发展，是一本兼具有理论性、实用性和系统性的图书。

由于编者水平有限，编写时间较短，因此本书的缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

第一章 概论	1	2.1.1.1 静态浇铸对热固性树脂的要求	47
1.1 概论	1	2.1.1.2 静态浇铸的分类	47
1.2 常用热固性塑料	1	2.1.1.3 静态浇铸模具	48
1.2.1 热固性塑料的结构	1	2.1.2 嵌铸	48
1.2.2 结构和性能的关系	4	2.1.2.1 选择嵌铸用树脂的原则	49
1.2.2.1 耐热性能	4	2.1.2.2 嵌铸用模具	49
1.2.2.2 力学性能	5	2.1.2.3 嵌铸工艺过程	49
1.2.3 常用热固性塑料	6	2.1.3 离心浇铸	50
1.2.3.1 热固性不饱和聚酯	6	2.1.3.1 离心浇铸的特点	50
1.2.3.2 环氧树脂	12	2.1.3.2 立式离心浇铸	51
1.2.3.3 酚醛树脂	14	2.1.3.3 水平式离心浇铸	52
1.2.3.4 双马来酰亚胺树脂	16	2.2 环氧树脂浇铸	53
1.2.3.5 热固性聚酰亚胺树脂	20	2.2.1 固化剂	53
1.2.3.6 氰酸酯树脂	22	2.2.2 其他添加剂	53
1.2.3.7 其他热固性树脂	25	2.2.3 浇铸料制造工艺	55
1.3 纤维增强热固性塑料	27	2.2.4 模具和脱模剂	57
1.3.1 增强材料	27	2.2.5 浇铸和固化工艺	57
1.3.2 纤维增强热固性塑料特性	30	2.2.6 环氧树脂浇铸工艺在电子绝缘中 的应用	59
1.3.2.1 各向异性	30	2.2.6.1 大型浇铸胶	60
1.3.2.2 界面性能	31	2.2.6.2 耐户外气候性浇铸胶	61
1.4 热固性塑料成型工艺概述	33	2.2.6.3 耐 SF ₆ 分解气体浇铸胶	61
1.4.1 热固性塑料灌封、浇铸成型工艺	33	2.2.6.4 耐热性浇铸胶	61
1.4.2 热固性塑料覆铜箔层压板成型 工艺	34	2.2.6.5 阻燃型浇铸树脂	64
1.4.3 手糊成型技术	34	2.2.6.6 环氧树脂浇铸应用实例	64
1.4.4 模压成型工艺	35	2.3 不饱和聚酯树脂的浇铸	67
1.4.5 树脂传递模塑成型工艺	37	2.3.1 人造大理石与人造玛瑙	68
1.4.6 纤维缠绕成型工艺技术	39	2.3.1.1 主要性能要求	68
1.4.7 拉挤成型工艺技术	40	2.3.1.2 主要原材料	68
1.4.8 热压罐成型工艺	41	2.3.1.3 制品设计原则	71
1.4.8.1 预浸料制备工艺	41	2.3.1.4 制造工艺	71
1.4.8.2 热压罐成型工艺	41	2.3.1.5 裂纹与缺陷的防止	74
1.4.9 纤维增强热固性塑料损伤修理	43	2.3.2 聚酯纽扣的生产	75
1.5 热固性塑料的应用	45	2.3.2.1 原材料	75
参考文献	45	2.3.2.2 生产工艺	75
第二章 热固性塑料浇铸成型	47	2.4 聚酰胺浇铸	76
2.1 浇铸成型的种类	47	2.4.1 反应机理	77
2.1.1 静态浇铸	47	2.4.2 原材料规格及用量	77

2.4.3	浇铸工艺	78	4.2.1.2	增强材料	114
2.4.4	影响因素	78	4.2.1.3	填料	115
2.4.5	MC 尼龙浇铸产品容易出现的 问题及解决方法	79	4.2.1.4	增稠剂	116
	参考文献	79	4.2.1.5	着色剂	119
	4.2.1.6		低收缩添加剂	119	
第三章	手糊成型技术	81	4.2.2	模塑粉的制备	120
3.1	概论	81	4.2.2.1	干法生产	120
3.2	原材料	82	4.2.2.2	湿法生产	123
3.2.1	玻璃纤维及其织物	82	4.2.3	团状模塑料(DMC)和散状模塑料 (BMC)的制备	123
3.2.2	树脂基体	83	4.2.3.1	常用配方	123
3.2.3	辅助材料	84	4.2.3.2	制备过程	124
3.3	手糊成型技术	88	4.2.3.3	混料工艺过程中的影响因素	124
3.3.1	原材料准备	88	4.2.4	片状模塑料(SMC)的制备	126
3.3.1.1	玻璃纤维织物的准备	89	4.2.4.1	SMC 配方	126
3.3.1.2	树脂胶液的配制	89	4.2.4.2	生产工艺	126
3.3.2	模具的准备	91	4.2.4.3	SMC 典型参数	130
3.3.3	手糊工具的准备	95	4.2.5	吸附预成型坯的制备	131
3.3.4	胶衣层的制备	95	4.2.5.1	材料及配方	131
3.3.5	糊制	96	4.2.5.2	预成型用设备	132
3.3.6	固化及后处理	99	4.2.5.3	预成型对设备的要求	134
3.3.7	脱模、修整及装配	100	4.2.6	短纤维模压料的制备	135
3.3.8	制件中产生缺陷的原因及其防止 方法	100	4.2.6.1	短纤维模压料的典型配方	135
3.4	喷射成型技术	103	4.2.6.2	短纤维模压料的制备	136
3.4.1	喷射成型技术	103	4.2.6.3	短纤维模压料制备过程中主要控 制的几个因素	140
3.4.2	喷射成型设备	104	4.2.7	其他模塑料的制备	141
3.4.3	喷射成型常见缺陷分析	105	4.2.7.1	ZMC 模塑料注射技术	141
3.5	手糊成型技术的应用	106	4.2.7.2	高强度片状模塑料 HMC、XMC	142
3.5.1	玻璃钢小艇的制作	106	4.2.7.3	厚模塑料 TMC	143
3.5.2	玻璃钢浴缸的制造	107	4.2.8	模压料的存放及性能测试	145
参考资料		109	4.2.8.1	模压料的存放	145
第四章	模压成型工艺与设备	110	4.2.8.2	模压料的性能测试	146
4.1	概论	110	4.2.8.3	模压料的流动性	149
4.1.1	模压工艺简介	110	4.3	模压成型工艺	150
4.1.2	模压成型工艺分类	110	4.3.1	概述	150
4.1.2.1	模塑粉模压法	111	4.3.2	压制前的准备	151
4.1.2.2	吸附预成型坯模压法	111	4.3.2.1	装料量的计算	151
4.1.2.3	团状模塑料和散状模塑料模压法	111	4.3.2.2	脱模剂的涂刷	151
4.1.2.4	片状模塑料模压成型法	112	4.3.2.3	预压	151
4.1.2.5	其他模压法	113	4.3.2.4	预热和干燥	154
4.1.3	模压成型工艺的特点及应用	114	4.3.2.5	表压值的计算	157
4.2	模压料的制备	114	4.3.3	模压成型工艺	157
4.2.1	模压料用原材料	114	4.3.3.1	嵌件安装	157
4.2.1.1	树脂	114			

4.3.3.2	装模和装料	158	4.5.6.1	电加热	203
4.3.3.3	模压工艺	158	4.5.6.2	蒸汽或过热水加热	205
4.3.3.4	制品的后处理	161	4.5.6.3	煤气或天然气加热	206
4.3.3.5	修饰及辅助加工	161	4.6	模压成型设备	206
4.3.4	常用模压料的成型工艺	162	4.6.1	液压机的的工作原理与分类	206
4.3.4.1	短纤维模压料成型工艺	162	4.6.1.1	液压机的的工作原理	206
4.3.4.2	DMC(BMC)成型工艺	163	4.6.1.2	液压机的性能要求	207
4.3.4.3	SMC的模压成型工艺	164	4.6.1.3	液压机的结构和分类	207
4.3.4.4	预成型坯的模压成型工艺	166	4.6.2	液压机的性能参数	207
4.3.4.5	聚酯料团制品的表面装饰成型	168	4.6.2.1	压力参数	207
4.3.5	模压工艺中易出现问题及解决方法	170	4.6.2.2	速度参数	208
4.4	模压制品设计	173	4.6.2.3	升压时间	209
4.4.1	脱模斜度	173	4.6.3	液压机的结构	210
4.4.2	壁厚	174	4.6.3.1	机身结构	210
4.4.3	圆角	176	4.6.3.2	活动横梁及其与活塞杆联接方式	211
4.4.4	加强筋与凸台	177	4.6.4	液压机的传动系统	212
4.4.4.1	加强筋	177	4.6.5	液压机的使用与维护	214
4.4.4.2	凸台	178	参考文献	216	
4.4.5	嵌件	179	第五章 纤维缠绕成型	217	
4.4.6	孔与侧凹	180	5.1	概论	217
4.4.7	螺纹设计	181	5.2	纤维缠绕用材料	218
4.5	模压成型模具	181	5.2.1	缠绕用纤维	218
4.5.1	概述	181	5.2.2	缠绕用树脂体系	219
4.5.1.1	压模结构	182	5.3	纤维缠绕技术	220
4.5.1.2	压模的分类	182	5.3.1	螺旋缠绕技术	220
4.5.2	影响模压成型模具的因素	184	5.3.2	平面缠绕技术	221
4.5.2.1	模压料工艺特性与压模结构的关系	184	5.3.3	特种缠绕技术	222
4.5.2.2	制品结构与压模的关系	184	5.4	纤维缠绕工艺参数及缠绕过程模拟	222
4.5.3	模压成型模具与压机的关系	187	5.4.1	主要工艺参数的计算	222
4.5.3.1	成型压力的计算	187	5.4.2	纤维缠绕过程模拟	224
4.5.3.2	脱模力及压机顶出杆行程的计算	187	5.4.2.1	热化学模型	224
4.5.3.3	压机工作台行程与压模闭合高度的关系	188	5.4.2.2	纤维移动模型	225
4.5.3.4	压机顶杆与压模脱模机构的关联	188	5.4.2.3	应力-应变模型	226
4.5.4	压模成型零件设计	189	5.4.2.4	模型的应用	226
4.5.4.1	型腔总体设计	189	5.5	缠绕设备	227
4.5.4.2	压模成型型腔配合形式	191	5.5.1	缠绕机	227
4.5.4.3	成型零件设计	192	5.5.1.1	螺旋缠绕机	228
4.5.4.4	加料室设计	197	5.5.1.2	平面缠绕机	229
4.5.5	结构零件	198	5.5.1.3	多轴缠绕机	229
4.5.5.1	导向零件	198	5.5.1.4	环向缠绕机	230
4.5.5.2	脱模机构	199	5.5.1.5	360°缠绕系统	230
4.5.5.3	抽芯机构	202	5.5.2	芯模	230
4.5.6	加热装置与计算	203	5.5.2.1	金属芯模	231
			5.5.2.2	膨胀芯模	231

5.5.2.3	一次性使用芯模	231			
5.5.3	张力控制系统	232	6.4.4	薄层压板的连续化生产	251
5.5.4	浸胶和纤维供给系统	233	6.5	层压板的品种及性能	252
5.5.5	固化系统	233	6.5.1	层压板的品种	252
5.5.5.1	烘箱	233	6.5.2	层压板的性能	253
5.5.5.2	热油加热	234	6.6	层压制品的机械加工	254
5.5.5.3	加热灯	234	6.6.1	层压板的锯削加工	254
5.5.5.4	蒸汽加热	234	6.6.2	层压板的剪切加工	255
5.5.5.5	热压罐	234	6.6.3	层压板的冲剪加工	255
5.5.5.6	其他固化方法	234	6.6.4	层压板的钻削加工	256
5.6	纤维缠绕成型的应用	235	6.6.5	层压板的车削加工	256
5.6.1	在国防军工方面	235	6.6.6	层压板的铣削加工	257
5.6.2	民品工业方面	235	6.6.7	层压板的刨削加工	257
参考资料	235	6.6.8	层压板的磨削加工	258
第六章	层压板成型工艺与设备	237	6.7	层压板的应用	258
6.1	概论	237	6.8	覆铜箔层压板制造工艺	258
6.2	原材料	237	6.8.1	覆铜箔层压板加工工艺	259
6.2.1	基体树脂	237	6.8.1.1	铜箔的处理	259
6.2.2	增强材料	238	6.8.1.2	铜箔上胶工艺	260
6.2.3	溶剂	239	6.8.1.3	覆铜箔层压板的压制工艺与设备	260
6.2.4	辅助材料	239	6.8.1.4	覆铜箔层压板类型及技术要求	262
6.3	预浸料的制备	239	6.8.2	多层印刷电路板	265
6.3.1	原材料的预处理	239	6.8.2.1	多层印刷电路板特点	265
6.3.2	浸胶工艺与设备	239	6.8.2.2	多层印刷电路板的生产工艺	265
6.3.3	预浸料的性能对层压制品性能的影响	240	6.8.2.3	层压过程中易出现的问题及其解决办法	270
6.3.3.1	含胶量	240	参考文献	271
6.3.3.2	挥发分含量	241	第七章	复合材料拉挤成型技术	272
6.3.3.3	可溶性树脂含量	241	7.1	概论	272
6.3.3.4	流动性	241	7.2	原材料	272
6.4	层压工艺与设备	242	7.2.1	增强材料	272
6.4.1	层压设备	242	7.2.2	树脂基体	274
6.4.1.1	热压机	242	7.2.3	催化及固化剂	276
6.4.1.2	装、卸料机构	244	7.2.4	脱模剂	276
6.4.1.3	翻板机构和传送机构	244	7.2.5	填料	277
6.4.1.4	加工整修设备	245	7.2.6	色料	278
6.4.1.5	辅助设备	245	7.2.7	其他添加剂	278
6.4.2	层压板生产工艺	245	7.3	拉挤制品设计概要	278
6.4.2.1	胶布裁剪	245	7.4	拉挤工艺理论模型	280
6.4.2.2	配料	245	7.4.1	热传递模型	280
6.4.2.3	胶布配送	246	7.4.2	压力模型	281
6.4.2.4	热压工艺	246	7.4.3	牵引力模型	282
6.4.2.5	后处理	250	7.5	拉挤设备与工艺	283
6.4.3	层压过程中出现废品的原因及其		7.5.1	排纱	284

7.5.2	浸渍	284	8.5.2	国外树脂注射设备介绍	325
7.5.3	预成型与固化	285	8.6	树脂注射	328
7.5.4	牵引	287	8.6.1	树脂宏观流动与充模	328
7.5.5	切割	288	8.6.2	树脂微观流动和浸润	335
7.6	拉挤工艺监控	289	8.6.3	非规则流动	336
7.7	复合材料拉挤新技术	291	8.6.4	过程监测	337
7.7.1	反应注射拉挤工艺	291	8.7	几种RTM的衍生技术	339
7.7.2	拉挤缠绕工艺	295	8.7.1	真空辅助RTM(VARTM)	339
7.7.3	拉挤编织工艺	296	8.7.2	压缩RTM(CRTM)	339
7.7.4	变截面拉挤技术	297	8.7.3	Seemann's 复合材料树脂渗透模塑 成型(SCRIMP)	339
7.8	拉挤复合材料的性能	299	8.7.4	树脂膜渗透成型(RFI)	340
7.8.1	拉挤复合材料的力学性能	299	8.7.5	热膨胀RTM(TERTM)	340
7.8.2	拉挤复合材料的物理性能	302	8.7.6	柔性RTM(FRTM)	340
7.8.3	耐腐蚀性能	303	8.7.7	共注射RTM(CIRTM)	341
7.8.4	燃烧性能	303	8.8	热固性塑料反应注射成型(RIM)	341
7.9	拉挤复合材料的应用	304	8.8.1	RIM工艺特点	341
7.9.1	电气设备	304	8.8.2	RIM用树脂体系和增强材料	342
7.9.2	耐腐蚀应用	304	8.8.3	RIM工艺及设备	343
7.9.3	体育及娱乐消费品	305	8.9	RTM技术的应用	346
7.9.4	建筑	305	参考文献	346	
7.9.5	交通运输	307	第九章 复合材料热压罐成型工艺	348	
7.9.6	在农业方面的应用	307	9.1	前言	348
7.9.7	在航空航天等军事领域中的应用	307	9.2	预浸设备和工艺	348
参考文献	307	9.2.1	设备	349	
第八章 树脂传递模塑(RTM)成型 技术	309	9.2.1.1	溶液法	349	
8.1	前言	309	9.2.1.2	热熔法预浸机	352
8.1.1	树脂传递模塑技术原理和发展 过程	309	9.2.2	浸渍工艺	353
8.1.2	树脂传递模塑技术(RTM)的技术 特点	309	9.2.2.1	溶液法	353
8.1.3	RTM技术的工艺路线	309	9.2.2.2	热熔胶膜法	356
8.2	RTM树脂	311	9.2.2.3	直接熔融法	358
8.2.1	树脂选择的一般原则	311	9.2.3	预浸料性能	359
8.2.2	常用树脂品种	311	9.3	热压罐系统的结构与成型模具	360
8.3	增强材料预成型体及制造技术	313	9.3.1	热压罐系统的结构	360
8.3.1	预成型体制造技术	313	9.3.1.1	压力容器	360
8.3.2	选择织物或预成型体时应考虑 的重要参数	318	9.3.1.2	加热与气体循环系统	361
8.4	RTM的模具技术	319	9.3.1.3	气体加压系统	362
8.4.1	RTM模具的构成和一般要求	319	9.3.1.4	真空系统	362
8.4.2	模具设计应考虑的因素	319	9.3.1.5	控制系统	362
8.5	树脂注射设备	323	9.3.2	成型模具	364
8.5.1	树脂注射设备的种类	323	9.3.2.1	框架结构金属模具	364
			9.3.2.2	电成型镍模具	366
			9.3.2.3	碳纤维增强复合材料模具	368
			9.3.2.4	橡胶模具	371

9.3.2.5	石墨及陶瓷模具	375			
9.4	固化成型工艺流程	376			
9.4.1	工艺辅助材料	376			
9.4.2	成型工序	378			
9.4.2.1	模具准备	378			
9.4.2.2	裁剪与铺叠	378			
9.4.2.3	组合与装袋	385			
9.4.2.4	固化与出罐脱模	386			
9.4.3	工艺过程中形成的制件缺陷	386			
9.5	热压罐成型工艺模型	387			
9.5.1	树脂流动模型	387			
9.5.2	纤维形变模型	389			
9.5.3	纤维压实模型	389			
9.5.4	孔隙形成模型	391			
9.5.5	传热模型	393			
9.5.6	工艺模型应用	394			
9.6	热压罐成型技术的应用	395			
9.6.1	环氧树脂基复合材料热压罐成型	395			
9.6.2	双马来酰亚胺树脂基复合材料热				
	压罐成型	397			
9.6.3	聚酰亚胺树脂基复合材料热压				
	罐成型	401			
9.6.4	夹层结构复合材料的热压罐成型	402			
9.6.5	热压罐成型复合材料的应用	404			
	参考文献	406			
	第十章 纤维增强热固性塑料损伤修理	409			
10.1	前言	409			
10.2	常见缺陷和损伤	409			
10.3	修理材料	411			
10.4	修理设备和修理方法	413			
10.4.1	常用修理设备和工具	413			
10.4.2	常见修理方法	414			
10.4.3	实心层合板修理	416			
10.4.4	蜂窝夹层结构修理	418			
10.5	修理实例	423			
10.5.1	复合材料方向舵损伤修理	423			
10.5.2	TU-154 机头雷达罩修理	426			
	参考文献	427			

第一章 概 论

1.1 概论

热固性塑料具有特殊的化学结构和成型特性。通常热固性塑料，特别是纤维增强热固性塑料，具有高的尺寸稳定性，优异的耐腐蚀性能、耐热性、耐磨性、介电性能、电绝缘性能和综合力学性能以及性能的可设计性和成型工艺多样性等特点，在航空、航天、电子、电气、船舶、化工、建筑、交通运输等领域得到广泛应用。如玻璃纤维增强塑料具有良好的介电性能和透波性能，因此是制造飞机、导弹及地面雷达罩不可缺少的材料；纤维增强热固性塑料热导率低，瞬间耐超高温性能十分突出，可作为导弹头锥的烧蚀材料；碳纤维增强热固性塑料具有高比强度、比模量，因此广泛用作飞机结构材料。

为充分利用热固性塑料的特性，用其制备各种构件代替金属材料构件或在特殊领域应用，除合理选材，正确设计外，还应认真选择成型方法。只有使用适宜的成型方法，才有可能使热固性塑料构件在性能、价格方面具有竞争性。本章将简要介绍常用热固性塑料的结构与性能、增强纤维及纤维增强热固性塑料特性以及概述热固性塑料成型工艺。其后各章将分别详细系统介绍热固性塑料成型工艺与设备。

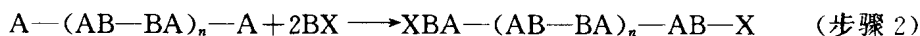
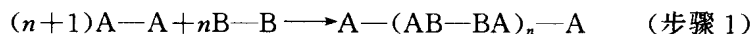
1.2 常用热固性塑料

1.2.1 热固性塑料的结构

塑料一般可分为2大类：热固性塑料和热塑性塑料。热塑性塑料由线型高分子量聚合物组成，能够熔融和溶解。高性能热塑性塑料的分子链中含有大量的芳杂环基团。这些基团的存在使其链段的刚性很大，因而具有高的玻璃化转变温度、良好的耐热性和高温性能保持率。聚合物中大量芳杂环结构热分解需要大量的能量，从而使高性能热塑性塑料具有较高的热分解温度，低的可燃性。典型的高性能热塑性塑料包括热塑性聚酰亚胺（PI [TP]）、聚酰胺（PA）、液晶聚酯、聚醚醚酮（PEEK）、聚醚酰亚胺（PEI）、聚苯并咪唑以及其他一些工程塑料。

热固性塑料由反应性低分子量预聚体或带有反应性基团的高分子聚合物交联而成。在成型过程中反应基团发生交联反应形成体型结构。理想的交联反应不但应能形成体型交联结构，而且在交联过程中能形成附加的刚性环结构，这样可进一步改善材料的耐热性能。交联反应过程中还不应有挥发性副产物产生，以便制备无孔隙高性能热固性塑料。固化后的热固性塑料不溶、不熔，可在恶劣环境条件下使用。

热固性塑料通常由二种单体（A—A，B—B），在非化学计量关系下，通过线形分段聚合而成。首先形成一个低分子量预聚体（步骤1），然后预聚体以功能性反应基团（B—X）封端（步骤2）。



聚合反应的数均聚合度理论上可通过 Carothers 公式进行预测。

$$n = (1 + \gamma) / (1 + \gamma - 2\gamma p)$$

其中, n 为数均聚合度; p 为在给定聚合阶段已经反应的 B 基团的分数; $\gamma = N_A/N_B$ ($N_A > N_B$); N_A 和 N_B 分别表示在反应起始时二种反应单体 A 和 B 基团的数目。为了控制产品的质量, 缩聚反应 (步骤 1) 进行的时间应足够长以保证聚合完全 ($p=1$)。

采用不同单体, 可以合成各种不同预聚体, 以满足各种不同使用条件对热固性塑料的要求。表 1-1 给出了有关预聚体链段, 如酰胺、酰胺-酰亚胺、氮 (杂) 萘、(苯) 醌、酰亚胺、酯、醚和醚酮链段的结构, 合成反应的单体及反应类型。

表 1-1 部分高性能热固性塑料预聚体结构

链段单元	化学结构	反应单体	反应类型
酰亚胺		芳香亚胺 芳香二酐	酰胺酸形成 亚胺化
(苯) 醌		二乙酰苯单体 二-(O-苯酰胺基苯)单体	缩聚 环化
氮 (杂) 萘		二-(O-二胺基苯)单体 二联苯酰单体	缩聚 环化
芳基醚	$-\text{Ar}-\text{O}-\text{Ar}'-\text{O}-$	芳基二卤化物 二苯酚	取代
芳基酮		二羧酸氯化物 联苯单体	Fridel-Crafts 反应
酯		二羧酸氯化物 二苯酚	缩聚
酰胺		二羧酸氯化物 芳香二胺	缩聚

随着分子量的减少, 热固性塑料的性能更明显地依赖于反应端基的性能。热固性塑料的降解往往从相对弱的交联结构处开始。为了获得高性能、低成本以及良好工艺性的热固性塑

料,应当选择适当的反应端基。表 1-2 给出了不同反应端基,如马来酰亚胺、氰酸酯、苯并环丁烯、乙炔基、环氧、亚苯基等的反应机理。

表 1-2 热固性塑料典型反应基团

结 构	共反应单体	固化机理	主要交联结构
	无 胺 烯烃 —OCN 共轭二烯烃	热聚合 Michael 加成 Diels-Alder 反应 Diels-Alder 反应 Diels-Alder 反应	琥珀酰亚胺 仲胺 脂肪环 杂环 脂肪环
—OCN	无 酚 胺 环氧 酸酐 不饱和烯烃 苯并环丁烯	二聚化反应 加成反应 加成反应 环化反应 加成反应 环化反应 Diels-Alder 反应	二聚结构 亚氨基碳酸酯 异脲醚 2-噁唑烷酮 亚氨基碳酸酯 杂环 杂环
	无 马来酰亚胺 氰酸酯 乙炔	开环聚合 Diels-Alder 反应 Diels-Alder 反应 Diels-Alder 反应	脂肪链结构 脂肪环 杂环 脂肪环
—C≡CH	无 苯并环丁烯	三聚化反应 Diels-Alder 反应	反式多烯烃 脂肪环
	无 马来酰亚胺	逆 Diels-Alder 反应+ 烯烃聚合反应 逆 Diels-Alder 反应+ 烯烃聚合反应	脂肪链结构 脂肪链结构
—C≡CPh	无 苯并环丁烯	自由基加成反应 Diels-Alder 反应	反式多烯烃 脂肪环
	胺 t-胺 酸酐 酸 氰酸酯 异氰酸酯	加成反应 阴离子聚合反应 加成反应 加成+阴离子聚合反应 环化反应 环化反应	胺+醚 醚 酯 酯+醚 2-异噁唑烷酮 2-噁唑烷酮
	无	自由基聚合	脂肪链结构
	无	开环加成	脂肪链结构
	无	成环聚合反应 线形聚合反应	三聚结构

热固性塑料的各种性能,如工艺性、热物理性能和力学性能必须满足实际应用的需要。热固性塑料的工艺性包括在溶剂中的溶解性、熔体粘度(流动性)和粘度的变化情况。分子链中大量芳杂环结构的存在会降低树脂在溶剂中的溶解性,增加树脂的熔体粘度,提高树脂的