

先进复合材料 制造技术手册

张玉龙 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

先进复合材料制造技术手册

主 编 张玉龙
副主编 李长德 王喜梅
杜龙安 张 塞
王俊英



机械工业出版社

本手册主要介绍了树脂基复合材料及其预浸料、碳/碳复合材料、陶瓷基复合材料和金属基复合材料的各种制造成型方法、工艺条件、工艺参数和注意事项等内容,且列举了大量有实际应用价值的制造实例,内容较为全面、翔实,可供从事复合材料研究、生产的技术人员及教学人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进复合材料制造技术手册/张玉龙主编. —北京:
机械工业出版社, 2003.6
ISBN 7-111-12192-9

I. 先… II. 张… III. 复合材料-制造-技术手册 IV. TB33-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第037348号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:张秀恩 封面设计:姚毅

北京蓝海印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003年6月第1版第1次印刷
787mm×1092mm1/16 41.25印张·1025千字
0 001—4000册
定价:78.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

前 言

先进复合材料主要包括那些具有优良综合性能和使用特性，制造工艺先进，产品技术含量高，在高新技术装备中具有不可替代作用的和代表未来材料科学发展方向，且具有深远应用潜力的复合材料品种。本书涉及的先进复合材料及其制造技术主要是指高性能纤维增强的树脂基复合材料、碳/碳复合材料、陶瓷基复合材料和金属基复合材料。

先进复合材料及其制造技术属于高新技术之列，就其对社会的推动作用而言，不亚于20世纪70~80年代的微电子技术。就其应用而言，已涉及到国民经济和国防建设的各个领域，已成为不可缺少的重要材料。其发展势头大有取代传统材料之势。

为推广先进复合材料制造技术，使之在国民经济建设和国防建设中发挥更大的作用，我们参照国内外文献资料，结合我们在研究和生产中形成的经验和体会，编写了《先进复合材料制造技术手册》一书。本书共分四篇，26章，着重介绍了树脂基复合材料的选材、设计、预浸料制造和模压、层压、挤塑、缠绕、挤拉、树脂传递模塑、注射、滚塑、热成型等工艺技术。还包括C/C复合材料制造技术及陶瓷基和金属基复合材料制造技术。

此书注重实用性、先进性、科学性和技术的可操作性。语言通俗易懂，图文并茂，可供相关专业的研究人员、教学人员和技术工人参考。若本书能对我国复合材料技术进步发挥一定作用或有一定的帮助，作者将感到无比欣慰。

参加编写的人员还有：王瑞君、杨淑丽、张振英、宋学智、郭斌、刘训英、夏敏、张玉香、孙红彦、林淑红、郝向阳、张志毫、田淑玲、张吉鲁、曲本山、孙秀香、李淑娥、刘承东、艾克聪、张喜生、王友存、董海斌、罗西友、梁建培、蔡江涛、孙莉、俞宁、范海容、苏庆伟、张洪信、苏庆勋、李禅柱、朱中利。现仅借此书出版之际向支持、帮助本书出版的各位专家和同行表示深切的感谢。

由于水平有限，书中错误在所难免，敬请读者予以批评指正。

编者
2003年3月

目 录

前言

第一篇 树脂基复合材料制造技术篇

| | |
|----------------------------------|----|
| 第 1 章 概论 | 2 |
| 1.1 概述 | 2 |
| 1.1.1 基本概念与发展 | 2 |
| 1.1.2 复合材料及其制造技术的发展 | 2 |
| 1.2 树脂基复合材料的特点 | 18 |
| 1.3 复合材料的组成 | 20 |
| 1.3.1 基体材料 | 21 |
| 1.3.2 增强材料 | 25 |
| 1.3.3 助剂 | 31 |
| 第 2 章 树脂基复合材料的选材与设计 | 36 |
| 2.1 选材 | 36 |
| 2.1.1 选材的基本原则 | 36 |
| 2.1.2 选材的一般程序 | 37 |
| 2.1.3 选材的步骤及注意事项 | 39 |
| 2.1.4 选材的依据 | 40 |
| 2.2 配方设计 | 49 |
| 2.2.1 树脂基复合材料的组成、功能与组分设计 | 49 |
| 2.2.2 注意事项 | 51 |
| 2.3 树脂基复合材料的结构设计 | 51 |
| 2.3.1 结构设计的基本内容 | 51 |
| 2.3.2 结构设计的方法 | 52 |
| 2.3.3 结构设计中的注意事项 | 54 |
| 2.4 树脂基复合材料制品设计 | 54 |
| 2.4.1 设计的一般程序 | 54 |
| 2.4.2 一般设计原则 | 56 |
| 2.4.3 纤维增强树脂基复合材料制品的设计特点 | 56 |
| 2.4.4 树脂基复合材料的制品设计项目 | 57 |
| 第 3 章 复合材料预浸料的制造 | 63 |
| 3.1 概述 | 63 |
| 3.1.1 对预浸料的基本要求及基本特征和原材料 | 63 |
| 3.1.2 预浸料的制备工艺 | 67 |
| 3.2 连续纤维（或织物）预浸料 | 77 |

| | | |
|------------|--------------------------|------------|
| 3.2.1 | 浸胶布制造工艺 | 77 |
| 3.2.2 | 胶纱带预浸料制造工艺 | 83 |
| 3.2.3 | 无纬布预浸料制造工艺 | 87 |
| 3.2.4 | 带状预浸料制造工艺 | 89 |
| 3.3 | 短切纤维预浸料 | 90 |
| 3.3.1 | 高强度短纤维模塑料的制造工艺 | 90 |
| 3.3.2 | 片状模塑料 (SMC) | 93 |
| 3.3.3 | 团状模塑料 (DMC) 与散状模塑料 (BMC) | 99 |
| 3.3.4 | 其他模塑料 | 101 |
| 3.3.5 | 胶衣 | 104 |
| 3.3.6 | 预成型坯模塑料制造 | 105 |
| 3.4 | 模塑粉料的制造 | 107 |
| 3.4.1 | 日用 (R) 类酚醛塑料粉 | 108 |
| 3.4.2 | 电气 (I) 类酚醛塑料粉 | 109 |
| 3.4.3 | 绝缘 (U) 类酚醛塑料粉 | 111 |
| 3.4.4 | 无氨 (A) 类酚醛塑料粉 | 112 |
| 3.4.5 | 耐高频 (P) 类酚醛塑料粉 | 113 |
| 3.4.6 | 耐高电压 (Y) 类酚醛塑料粉 | 115 |
| 3.4.7 | 耐酸 (S) 类酚醛塑料粉 | 116 |
| 3.4.8 | 耐湿热 (H) 类酚醛塑料粉 | 117 |
| 3.4.9 | 耐冲击 (J) 类酚醛塑料粉 | 119 |
| 3.4.10 | 耐热 (E) 类酚醛塑料粉 | 120 |
| 3.4.11 | 特种 (T) 类酚醛塑料粉 | 121 |
| 3.4.12 | 耐电弧酚醛塑料粉 | 123 |
| 3.4.13 | 注射模塑酚醛塑料粉 | 125 |
| 3.5 | 粒状模塑料制造 | 127 |
| 3.5.1 | 长纤维型粒料的制造工艺 | 127 |
| 3.5.2 | 短纤维型粒料的制造工艺 | 130 |
| 3.6 | 预浸料的质量控制 | 130 |
| 3.6.1 | 生产线上的质量控制 | 131 |
| 3.6.2 | 原材料的质量控制 | 132 |
| 3.6.3 | 环境控制 | 132 |
| 3.6.4 | 预浸料成品的质量控制 | 133 |
| 第4章 | 模压成型技术 | 135 |
| 4.1 | 概述 | 135 |
| 4.2 | 成型设备 | 135 |
| 4.2.1 | 液压机的分类 | 136 |
| 4.2.2 | 液压机的工作原理 | 137 |
| 4.2.3 | 液压机的主要技术参数及使用中的注意事项 | 138 |

| | | |
|------------|-------------------------------------|------------|
| 4.3 | 模压成型模具 | 139 |
| 4.4 | 模压成型工艺 | 140 |
| 4.4.1 | 模压成型的基本原理与条件 | 140 |
| 4.4.2 | 模压成型工艺过程 | 141 |
| 4.4.3 | 模压成型工艺步骤 | 144 |
| 4.4.4 | 温度、压力、时间三要素的影响与控制 | 146 |
| 4.5 | 模压成型中易出现的问题与解决方法 | 149 |
| 4.5.1 | 粉状模塑料成型加工中易出现的问题及解决方法 | 149 |
| 4.5.2 | 玻纤增强树脂基复合材料模压成型加工中易出现的问题与解决方法 | 151 |
| 4.5.3 | 模压制品裂纹产生的原因与解决办法 | 154 |
| 4.6 | 不同树脂基复合材料制品的模压成型 | 157 |
| 4.6.1 | 玻纤增强酚醛复合材料工业零部件的成型 | 157 |
| 4.6.2 | 玻纤增强环氧复合材料工业零部件的成型 | 160 |
| 4.6.3 | 玻纤增强不饱和聚酯复合材料工业零部件的成型 | 160 |
| 4.6.4 | 石棉纤维增强酚醛复合材料工业零部件的成型 | 163 |
| 4.6.5 | 金属纤维增强酚醛复合材料工业零部件的成型 | 165 |
| 4.7 | 模压成型技术的应用 | 167 |
| 4.7.1 | 树脂基复合材料整体卫生间的制造 | 167 |
| 4.7.2 | 人造大理石卫生洁具及人造大理石材的制造 | 168 |
| 4.7.3 | 线管的模压成型加工 | 171 |
| 第5章 | 层压成型技术 | 174 |
| 5.1 | 概述 | 174 |
| 5.1.1 | 概念与原材料 | 174 |
| 5.1.2 | 层压成型工艺特点 | 174 |
| 5.1.3 | 层压成型制品的类型 | 174 |
| 5.2 | 底材的制备 | 175 |
| 5.2.1 | 底材表面处理 | 175 |
| 5.2.2 | 树脂胶液的配制 | 176 |
| 5.2.3 | 底材浸渍 | 176 |
| 5.2.4 | 底材干燥 | 178 |
| 5.2.5 | 底材树脂含量的测定 | 178 |
| 5.3 | 层压成型工艺过程 | 179 |
| 5.3.1 | 层压设备 | 179 |
| 5.3.2 | 层压模具 | 179 |
| 5.3.3 | 层压成型操作步骤 | 180 |
| 5.3.4 | 层压管材与棒材的成型加工 | 181 |
| 5.3.5 | 复铜层压制品的成型 | 182 |
| 5.3.6 | 制品缺陷与解决办法 | 183 |
| 5.4 | 其他层压制品的制造 | 187 |

| | | |
|------------|------------------------------|------------|
| 5.4.1 | 超混杂结构层压制品的成型 | 187 |
| 5.4.2 | 耐热高强度环氧玻璃布层合板的研制 | 190 |
| 第6章 | 挤塑成型技术 | 193 |
| 6.1 | 概述 | 193 |
| 6.2 | 挤塑成型模具 (又称铸压模) | 194 |
| 6.2.1 | 挤塑模具的分类 | 194 |
| 6.2.2 | 模具设计中应注意的事项 | 195 |
| 6.2.3 | 设计实例 | 196 |
| 6.2.4 | “抬模”现象分析与解决的方法 | 199 |
| 6.3 | 挤塑成型工艺 | 202 |
| 6.3.1 | 基本原理 | 202 |
| 6.3.2 | 成型工艺简介 | 202 |
| 6.3.3 | 玻纤增强酚醛复合材料某装置线圈骨架的挤塑成型 | 203 |
| 6.4 | 低压塑封成型工艺 | 208 |
| 6.4.1 | 环氧塑封料的配方组成与成型工艺 | 209 |
| 6.4.2 | 半导体器件环氧塑封料封装技术 | 215 |
| 第7章 | 纤维缠绕成型技术 | 218 |
| 7.1 | 概述 | 218 |
| 7.1.1 | 缠绕成型的基本原理 | 218 |
| 7.1.2 | 纤维缠绕成型的特点 | 218 |
| 7.1.3 | 工艺的适用性 | 218 |
| 7.2 | 缠绕设备 | 219 |
| 7.2.1 | 机械缠绕机的类型 | 219 |
| 7.2.2 | 程序控制缠绕机 | 224 |
| 7.2.3 | 弯管缠绕设备 | 226 |
| 7.3 | 芯模 | 229 |
| 7.3.1 | 对芯模的要求与类型 | 229 |
| 7.3.2 | 芯模的制造 | 230 |
| 7.4 | 缠绕成型工艺 | 231 |
| 7.4.1 | 原材料 | 231 |
| 7.4.2 | 内衬 | 232 |
| 7.4.3 | 封头 | 232 |
| 7.4.4 | 纤维缠绕线型设计 | 233 |
| 7.4.5 | 缠绕方法 | 241 |
| 7.4.6 | 缠绕张力的控制方法 | 242 |
| 7.4.7 | 制品的固化 | 243 |
| 7.4.8 | 缠绕工艺分析 | 244 |
| 7.5 | 纤维缠绕成型实例 | 247 |
| 7.5.1 | 热固性树脂基复合材料管材的缠绕成型 | 247 |

| | | |
|------------|-------------------------|------------|
| 7.5.2 | 锥形壳体缠绕成型 | 249 |
| 7.5.3 | 内压容器的缠绕成型 | 251 |
| 第8章 | 复合材料低压成型技术 | 260 |
| 8.1 | 手糊成型技术 | 260 |
| 8.1.1 | 概况 | 260 |
| 8.1.2 | 模具 | 261 |
| 8.1.3 | 脱模剂与工具 | 263 |
| 8.1.4 | 成型工艺过程 | 265 |
| 8.1.5 | 手糊成型技术的应用 | 275 |
| 8.2 | 喷涂成型 | 285 |
| 8.2.1 | 概况 | 285 |
| 8.2.2 | 喷射设备 | 287 |
| 8.2.3 | 几点要求 | 289 |
| 8.2.4 | 喷射工艺过程 | 289 |
| 8.2.5 | 喷射制品的缺陷分析 | 291 |
| 8.2.6 | 喷射成型技术的应用 | 292 |
| 8.3 | 铺层成型技术 | 296 |
| 8.3.1 | 工艺过程 | 297 |
| 8.3.2 | 铺层加压固化方法 | 298 |
| 8.3.3 | 加压设备 | 301 |
| 8.3.4 | 铺层成型技术的应用 | 301 |
| 第9章 | 挤拉成型技术 | 309 |
| 9.1 | 概述 | 309 |
| 9.1.1 | 基本原理与特点 | 309 |
| 9.1.2 | 挤拉成型的特性 | 310 |
| 9.1.3 | 挤拉制品的应用 | 310 |
| 9.1.4 | 挤拉成型工艺发展 | 311 |
| 9.2 | 挤拉成型设备 | 312 |
| 9.2.1 | 挤拉成型机形式 | 312 |
| 9.2.2 | 装置说明 | 313 |
| 9.3 | 挤拉成型模具 | 319 |
| 9.3.1 | 模具结构与特点 | 319 |
| 9.3.2 | 模具的工况及要求 | 322 |
| 9.3.3 | 模具材料的选择 | 322 |
| 9.3.4 | 模具的设计 | 323 |
| 9.4 | 成型工艺过程 | 324 |
| 9.4.1 | 适用的原材料 | 324 |
| 9.4.2 | 挤拉成型加工 | 325 |
| 9.4.3 | 挤拉工艺过程 | 326 |

| | | |
|---------------|----------------------|------------|
| 9.4.4 | 挤拉过程中的主要工艺参数与控制 | 328 |
| 9.4.5 | 挤拉成型制品的性能 | 328 |
| 9.4.6 | 挤拉成型中应注意事项和常见缺陷及改进方法 | 330 |
| 9.5 | 挤拉成型工艺中的影响因素与控制 | 331 |
| 9.5.1 | 树脂基体的室温固化特性的影响 | 331 |
| 9.5.2 | 成型工艺条件的影响 | 331 |
| 9.5.3 | 引发剂的影响 | 331 |
| 9.5.4 | 挤拉模具内三段加热温度的设置及其影响 | 333 |
| 9.6 | 挤拉成型技术的应用与发展 | 334 |
| 9.6.1 | 适于加工的制品形式 | 334 |
| 9.6.2 | 曲面型材的挤拉工艺 | 335 |
| 9.6.3 | 横截面积可变的挤拉工艺 | 335 |
| 9.6.4 | 挤拉后成型技术 | 336 |
| 9.6.5 | 热塑性基体复合材料的挤拉技术 | 336 |
| 第 10 章 | 树脂传递模塑 (RTM) | 337 |
| 10.1 | 概述 | 337 |
| 10.1.1 | RTM 工艺基本原理和工艺特点 | 337 |
| 10.1.2 | RTM 工艺优点 | 339 |
| 10.1.3 | RTM 工艺与其他工艺的比较 | 339 |
| 10.1.4 | RTM 工艺发展中的关键技术 | 341 |
| 10.2 | 原材料及工装设备 | 342 |
| 10.2.1 | 原材料 | 342 |
| 10.2.2 | 设备 | 350 |
| 10.2.3 | 工艺参数 | 350 |
| 10.3 | 预成型工艺 | 351 |
| 10.3.1 | 缝合法 | 351 |
| 10.3.2 | 喷涂法 | 352 |
| 10.3.3 | 冲压法 | 352 |
| 10.4 | 树脂传递模塑 (RTM) 工艺过程 | 353 |
| 10.4.1 | 原材料准备 | 353 |
| 10.4.2 | 模具准备 | 353 |
| 10.4.3 | 预置增强件 | 354 |
| 10.4.4 | 模具关闭与锁紧 | 354 |
| 10.4.5 | 混合、注射和充模 | 355 |
| 10.4.6 | 反应和固化 | 355 |
| 10.4.7 | 开模和脱模 | 355 |
| 10.4.8 | 修整与表面处理 | 356 |
| 10.4.9 | RTM 工艺的模拟 | 356 |
| 10.5 | RTM 主要成型参数及其对成型加工的影响 | 357 |

| | | |
|---------------|-------------------------------------|------------|
| 10.5.1 | 树脂的流动及其模型描述 | 357 |
| 10.5.2 | 非均相孔隙纤维介质中气泡的形成和排出 | 358 |
| 10.5.3 | 材料性能对 RTM 工艺的影响 | 358 |
| 10.5.4 | 注射压力 | 359 |
| 10.5.5 | 真空辅助手段 | 359 |
| 10.5.6 | 注意事项 | 359 |
| 10.6 | RTM 成型技术的应用 | 359 |
| 10.6.1 | 汽车用防护罩 RTM 成型 | 359 |
| 10.6.2 | 赛车车架 RTM 成型工艺 | 361 |
| 第 11 章 | 树脂基复合材料的注射成型技术 | 363 |
| 11.1 | 概述 | 363 |
| 11.2 | 热塑性树脂基复合材料的注射成型 | 364 |
| 11.2.1 | 热塑性树脂基复合材料的特性 | 364 |
| 11.2.2 | 热塑性树脂基复合材料的工艺特点 | 365 |
| 11.2.3 | 热塑性树脂基复合材料用注射机与制品模具设计 | 367 |
| 11.2.4 | 注射成型工艺 | 370 |
| 11.2.5 | 注射成型中常见问题 | 376 |
| 11.3 | 热固性树脂基复合材料注射成型 | 379 |
| 11.3.1 | 热固性注射成型树脂 | 381 |
| 11.3.2 | 热固性复合材料注射成型设备 | 385 |
| 11.3.3 | 注射成型过程 | 388 |
| 11.3.4 | 注射成型工艺参数 | 389 |
| 11.3.5 | 团状模塑料注射成型 | 390 |
| 11.3.6 | 制品强度下降的原因及补救措施 | 392 |
| 11.3.7 | 热固性复合材料注射制品缺陷及产生原因 | 392 |
| 11.4 | 反应注射成型 (RIM) 与增强反应注射成型 (RRIM) | 395 |
| 11.4.1 | RIM 与 RRIM 成型工艺 | 396 |
| 11.4.2 | 反应注射成型 (RIM) 与增强反应注射成型 (RRIM) 工艺的应用 | 400 |
| 第 12 章 | 其他成型技术 | 407 |
| 12.1 | 热固性树脂基复合材料旋转模塑技术 | 407 |
| 12.1.1 | 概况 | 407 |
| 12.1.2 | 旋转模塑成型设备 | 409 |
| 12.1.3 | 旋转成型模具 | 415 |
| 12.1.4 | 成型工艺 | 419 |
| 12.1.5 | 热固性树脂基复合材料的旋转模塑成型 | 424 |
| 12.1.6 | 旋转模塑成型与其他工艺的比较及局限性 | 425 |
| 12.2 | 挤拉-缠绕复合工艺 | 426 |
| 12.2.1 | 拉挤-缠绕系统 | 427 |
| 12.2.2 | 模具 | 428 |

| | |
|---------------------------------|------------|
| 12.3 树脂基超混杂复合材料成型技术 | 428 |
| 12.3.1 原材料准备 | 428 |
| 12.3.2 超混杂复合板材层压成型工艺 | 429 |
| 第 13 章 热固性树脂基复合材料制品的后处理 | 432 |
| 13.1 制品的后烘(热处理) | 432 |
| 13.2 飞(废)边的清除 | 432 |
| 13.2.1 飞边产生的部位 | 433 |
| 13.2.2 飞边的清除 | 433 |
| 13.3 抛光 | 436 |
| 13.3.1 抛光用设备 | 436 |
| 13.3.2 抛光的主要类型 | 437 |
| 13.4 机械加工 | 437 |
| 13.4.1 孔的加工 | 437 |
| 13.4.2 切螺纹 | 438 |
| 13.5 热固性树脂基复合材料制品的连接 | 439 |
| 13.5.1 机械连接法 | 439 |
| 13.5.2 树脂基复合材料的胶粘剂粘接(胶接) | 442 |
| 13.6 发展中的成型技术 | 449 |
| 13.6.1 树脂膜注入成型技术 | 449 |
| 13.6.2 西脉复合材料树脂注入模塑技术(Scrimp)简介 | 452 |
| 13.6.3 软模成型法简介 | 453 |
| 13.6.4 离心成型技术 | 453 |

第二篇 C/C 复合材料制造技术篇

| | |
|----------------------------|------------|
| 第 14 章 C/C 复合材料概论 | 458 |
| 14.1 基本概念 | 458 |
| 14.1.1 简介 | 458 |
| 14.1.2 性能特点 | 458 |
| 14.2 C/C 复合材料制造技术的进展 | 459 |
| 14.2.1 碳纤维制备技术 | 460 |
| 14.2.2 编织技术 | 460 |
| 14.2.3 致密技术 | 461 |
| 14.2.4 工艺技术的进展 | 461 |
| 14.3 C/C 复合材料的应用 | 462 |
| 14.3.1 C/C 复合材料在先进飞行器上的应用 | 462 |
| 14.3.2 刹车材料方面的应用 | 463 |
| 14.3.3 其他方面的应用 | 463 |
| 14.3.4 C/C 复合材料的发展趋势与应用前景 | 463 |
| 第 15 章 C/C 复合材料的原材料 | 465 |

| | | |
|-------------|---------------------------|------------|
| 15.1 | 碳纤维 | 465 |
| 15.1.1 | 碳纤维的分类与制造方法 | 465 |
| 15.1.2 | 碳纤维品种(牌号)与性能 | 468 |
| 15.1.3 | C/C复合材料用碳纤维的选择 | 470 |
| 15.2 | C/C复合材料的基体前驱体 | 471 |
| 15.2.1 | 沥青 | 472 |
| 15.2.2 | 树脂 | 475 |
| 第16章 | C/C复合材料的制造工艺 | 479 |
| 16.1 | 预成型坯体 | 479 |
| 16.1.1 | 坯体的特点 | 479 |
| 16.1.2 | 碳纤维坯体的制造 | 480 |
| 16.1.3 | 模压工艺 | 481 |
| 16.1.4 | 注意事项 | 482 |
| 16.2 | C/C复合材料致密化、热解和热氧化处理 | 483 |
| 16.2.1 | 致密化处理 | 483 |
| 16.2.2 | 浸渍热解工艺 | 486 |
| 16.2.3 | 热氧化处理 | 488 |
| 16.3 | C/C复合材料的切削加工 | 491 |
| 16.3.1 | 刀具磨损原理 | 491 |
| 16.3.2 | 切削速度 | 492 |
| 16.3.3 | 刀具材料 | 492 |
| 第17章 | C/C复合材料制造技术的应用 | 494 |
| 17.1 | 几种C/C复合材料的制造 | 494 |
| 17.1.1 | 碳纤维毡增强C/C复合材料的制造 | 494 |
| 17.1.2 | 预氧化PAN基碳纤维增强酚醛树脂C/C复合材料制造 | 496 |
| 17.1.3 | 高致密化C/C复合材料的制造 | 497 |
| 17.1.4 | 硼酚醛前驱体二维C/C复合材料的制造 | 498 |
| 17.1.5 | 应用树脂传递模塑(RTM)制造C/C复合材料 | 500 |
| 17.2 | C/C复合材料固体火箭发动机(SRM)喷管的制造 | 501 |
| 17.2.1 | C/C复合材料喷管的性能与作用 | 501 |
| 17.2.2 | 整体碳毡C/C复合材料喉管衬的制造 | 502 |
| 17.2.3 | C/C复合材料新型低成本快速制造工艺 | 504 |
| 17.3 | 航空用C/C复合材料刹车盘 | 505 |
| 17.3.1 | 概况 | 505 |
| 17.3.2 | 用热梯度式CVD致密技术制造C/C复合材料刹车盘 | 507 |
| 17.3.3 | 用改进型CVD工艺制造C/C复合材料刹车盘 | 508 |
| 17.4 | C/C复合材料的生物应用 | 509 |
| 17.4.1 | 其相容特性适于生物应用 | 509 |
| 17.4.2 | C/C复合材料牙根种植体的制造 | 512 |

| | |
|---|------------|
| 17.4.3 制造过程中的控制因素 | 514 |
| 第 18 章 C/C 复合材料性能的影响因素与金相样品的制造 | 515 |
| 18.1 制造过程中对材料性能的影响 | 515 |
| 18.1.1 氧化处理对 C/C 复合材料性能的影响 | 515 |
| 18.1.2 增强材料织物结构对性能的影响 (以针刺结构为例) | 517 |
| 18.1.3 浸渍次数对 C/C 复合材料的影响 (以整体毡为例) | 519 |
| 18.1.4 界面对 C/C 复合材料性能的影响 (以滴织销钉 C/C 材料为例) | 520 |
| 18.2 C/C 复合材料金相样品的制备方法与步骤 | 522 |
| 18.2.1 取样 | 522 |
| 18.2.2 清洗样品 | 522 |
| 18.2.3 真空浸渍和镶样 | 522 |
| 18.2.4 磨光 | 523 |
| 18.2.5 抛光 | 523 |

第三篇 陶瓷基复合材料制造技术篇

| | |
|--|------------|
| 第 19 章 陶瓷基复合材料概述 | 526 |
| 19.1 原材料 | 527 |
| 19.1.1 陶瓷基体 | 527 |
| 19.1.2 增强材料与增韧改性 | 530 |
| 19.2 纤维增强陶瓷基复合材料界面 | 533 |
| 19.2.1 对 CMC 界面的要求 | 533 |
| 19.2.2 CMC 界面设计的原则 | 535 |
| 19.2.3 纤维表面涂层处理 | 535 |
| 第 20 章 连续纤维增强陶瓷基复合材料的制造 | 538 |
| 20.1 概述 | 538 |
| 20.1.1 原材料 | 538 |
| 20.1.2 选材注意事项 | 538 |
| 20.1.3 制造方法 | 539 |
| 20.2 制造方法与过程 | 539 |
| 20.2.1 料浆浸渍与热压烧结工艺 | 539 |
| 20.2.2 原位化学反应法 | 540 |
| 20.2.3 直接氧化沉积法 (DOD) | 542 |
| 20.2.4 先驱体热解法 | 542 |
| 20.3 制造技术的应用 | 544 |
| 20.3.1 高性能碳纤维增强 SiC 复合材料的制造 | 544 |
| 20.3.2 C/C/Al ₂ O ₃ 陶瓷基复合材料的制造 | 547 |
| 第 21 章 晶须 (短切纤维) 增强陶瓷基复合材料的制造 | 550 |
| 21.1 概述 | 550 |
| 21.1.1 基本概念 | 550 |

| | | |
|---------------|--|------------|
| 21.1.2 | 晶须(短切纤维)增强增韧机理 | 550 |
| 21.1.3 | 晶须增韧陶瓷基复合材料 | 551 |
| 21.2 | 制造方法与工艺 | 552 |
| 21.2.1 | 分散技术 | 553 |
| 21.2.2 | 成型技术 | 554 |
| 21.2.3 | 烧结工艺(高温致密化工艺) | 556 |
| 21.2.4 | 制造过程中的注意事项 | 557 |
| 21.3 | 晶须或短纤维增强陶瓷基复合材料制造技术的应用 | 558 |
| 21.3.1 | 制造工艺 | 558 |
| 21.3.2 | 性能 | 558 |
| 21.3.3 | 小结 | 560 |
| 第 22 章 | 陶瓷颗粒分散型复合材料的制造 | 561 |
| 22.1 | 概述 | 561 |
| 22.2 | 颗粒分散型陶瓷基复合材料的成型技术 | 561 |
| 22.2.1 | 原材料的处理技术 | 561 |
| 22.2.2 | 坯体成型方法 | 562 |
| 22.2.3 | 烧结技术 | 564 |
| 22.3 | 颗粒分散型陶瓷基复合材料制造技术的应用—— B_4C/Al 复合材料低温加工工艺 | 565 |
| 22.3.1 | 原材料选择 | 566 |
| 22.3.2 | 成型方法 | 566 |
| 22.3.3 | 性能 | 566 |
| 22.3.4 | 烧结(热处理) | 567 |
| 第 23 章 | 陶瓷基复合材料制造新技术——自蔓延高温合成技术 | 568 |
| 23.1 | 概述 | 568 |
| 23.1.1 | 自蔓延高温合成技术原理及其特点 | 568 |
| 23.1.2 | SHS 的燃烧方式与燃烧机理 | 568 |
| 23.1.3 | SHS 燃烧热力学 | 572 |
| 23.1.4 | SHS 应用效果 | 573 |
| 23.2 | 自蔓延高温合成技术 | 573 |
| 23.2.1 | SHS 技术 | 573 |
| 23.2.2 | 自蔓延离心工艺 | 575 |
| 23.3 | 自蔓延高温合成工艺技术的应用 | 578 |
| 23.3.1 | 合成氮化铝(ALN)陶瓷 | 578 |
| 23.3.2 | 六方BN基陶瓷复合材料自蔓延高温合成工艺 | 578 |
| 23.3.3 | 用离心自蔓延高温合成技术制造大规格耐磨陶瓷内衬钢管 | 580 |
| 23.3.4 | 应用SHS熔铸技术制造表面金属-陶瓷复合材料 | 582 |

第四篇 金属基复合材料制造技术篇

| | |
|---|-----|
| 第 24 章 概论 | 586 |
| 24.1 基本概念 | 586 |
| 24.1.1 金属基复合材料制造方法的类型 | 586 |
| 24.1.2 制造技术应具备的条件 | 586 |
| 24.1.3 金属基复合材料制造的关键性技术 | 586 |
| 24.2 固态制造技术 | 587 |
| 24.2.1 粉末冶金技术 | 587 |
| 24.2.2 热压和热等静压技术 | 588 |
| 24.2.3 热轧、热挤压和热拉技术 | 590 |
| 24.2.4 爆炸焊接技术 | 590 |
| 24.3 液态制造技术 | 591 |
| 24.3.1 真空压力浸渍技术 | 591 |
| 24.3.2 挤压铸造技术 | 592 |
| 24.3.3 液态金属搅拌铸造技术 | 593 |
| 24.3.4 液态金属浸渍技术 | 595 |
| 24.3.5 共喷沉积技术 | 597 |
| 24.3.6 热喷涂技术 | 598 |
| 24.4 新型制造技术 | 599 |
| 24.4.1 原位自生成技术 | 599 |
| 24.4.2 物理气相沉积技术 | 600 |
| 24.4.3 化学气相沉积技术 | 601 |
| 24.4.4 电镀、化学镀和复合镀技术 | 601 |
| 第 25 章 纤维增强金属基复合材料的制造 | 603 |
| 25.1 概述 | 603 |
| 25.1.1 增强材料——纤维 | 603 |
| 25.1.2 纤维增强金属基复合材料的制造工艺 | 604 |
| 25.1.3 几种典型的金属基复合材料及其应用 | 605 |
| 25.2 碳纤维 (CF) 金属基复合材料的制造技术 | 607 |
| 25.2.1 CF/Al 复合材料的挤压铸造技术 | 607 |
| 25.2.2 三维 C/SiC/Al 混杂复合材料的制造 | 608 |
| 25.2.3 B/Al 的制造 | 609 |
| 25.3 石墨增强金属基复合材料的制造技术——石墨/铜复合材料的半固态铸造 | 610 |
| 第 26 章 颗粒增强金属基复合材料的制造技术 | 613 |
| 26.1 碳化硅颗粒增强铝基复合材料的制造 | 613 |
| 26.1.1 SiC 颗粒增强铝基复合材料的制造与机加工性能 | 615 |
| 26.1.2 SiC 颗粒增强铝基复合材料制动盘的制造 | 616 |
| 26.2 陶瓷颗粒增强镁合金复合材料挤压制造 | 620 |

| | |
|---|------------|
| 26.2.1 陶瓷颗粒复合材料挤压件的性能····· | 620 |
| 26.2.2 镁合金+陶瓷颗粒复合材料挤压件的制造····· | 621 |
| 26.2.3 有发展前途的复合材料····· | 622 |
| 26.3 Al ₂ O ₃ /6-6-3 青铜复合材料的粉末冶金制造技术····· | 626 |
| 26.3.1 性能····· | 626 |
| 26.3.2 制造方法····· | 626 |
| 26.3.3 工艺条件对复合材料性能的影响····· | 626 |
| 26.4 SiC 颗粒增强铝合金基梯度复合材料的制造····· | 629 |
| 26.4.1 制造工艺与过程····· | 630 |
| 26.4.2 特性····· | 631 |
| 参考文献 ····· | 633 |