



产品设计可制造性技术丛书

复合材料件可制造性技术

FUHE CAILIAOJIAN KEZHIXAOXING JISHU

郭金树 主编

航空工业出版社

TB33
0784
2

产品设计可制造性技术丛书

复合材料件可制造性技术

郭金树 主编

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书以复合材料结构件的制造性为中心,系统地介绍了复合材料的特点和应用,材料及其工艺性,成形工艺技术,复合材料的试验和质量控制,复合材料结构的生产性设计等方面的知识。对设计选材、工艺选择、可修理性设计、提高结构工艺性的设计措施等方面提出了一些基本原则。

本书适合于从事复合材料设计和制造的专业技术人员和高等院校复合材料专业的师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料件可制造性技术/郭金树主编. —北京:航空工业出版社, 2009. 6

(产品设计可制造性技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 80243 - 074 - 7

I. 复… II. 郭… III. 复合材料—制造 IV. TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 196999 号

复合材料件可制造性技术

Fuhe Cailiaojian Kezhizaoxing Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010 - 64815615 010 - 64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2009 年 6 月第 1 版

2009 年 6 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 17.75

字数: 439 千字

印数: 1—4000

定价: 55.00 元

产品设计可制造性技术丛书

编委会

主任 张新国

副主任 魏金钟

秘书长 肖治垣

委员 (按姓氏笔画为序)

马建宁 王西彬 王向明 王俊彪 白仲栋 冯子明

冯吉才 宁汝新 朱 荻 刘 鑫 刘青海 刘善国

许旭东 李 军 李 晨 李圣怡 李志强 李宏运

李松法 杨 旭 杨建军 肖为国 冷毅勋 陈 磊

苗 冰 郭金树 唐景峰 黄俊勇 韩克岑

编委会办公室 史晋蕾 高凤勤 李苏楠 林佳毅

序

缩短生产周期、提高产品质量、降低制造成本是企业赢得竞争的主要途径。

产品设计可制造性是指所设计的产品的可加工性（我国工业部门一般称为工艺性），在产品设计或论证阶段，如果不认真考虑可制造性，则会在组织生产时出现制造周期延长、成本提高或材料供应困难等问题。

产品在进入生产制造环节前需要对可制造性进行衡量，产品设计是否考虑了制造加工的工艺可行性尤为重要，系统设计能力和水平是装备制造技术水平最直观、最集中的表现。在我国军工行业的发展过程中，通过引进技术、合作设计、合作生产、自主开发等多种途径，已能生产大批高水平、高质量的产品。

一直以来，尤其是“十一五”期间，我国军工系统各行业科研、生产任务繁重，新材料、新技术、新设备不断出现，新产品、新型号的设计、生产始终是一个制约军品发展的瓶颈问题，实践经验丰富、熟知生产工艺过程的工程技术人员严重匮乏，经验丰富的设计、工艺、生产人员相对较少，而且随着产品生命周期的不断缩短，越来越需要快速开发生产新的、工艺成熟的产品，以增加企业的竞争力，这就需要提高产品设计工程师及制造工程师的综合能力，使其工作更易于衔接，既可帮助产品设计人员提高对工艺知识的了解，又能帮助制造人员组织产品可制造性评审及生产组织工作。

军工制造业发展的一个方面就是需要加速行业人才的培养，而制造业需要的人才多层次、全方位的，尤其是复合型人才。多层次、复合型人才体现在其知识架构的完善，了解基本的研发设计、生产工艺。加强制造业人才队伍建设，需要大批熟悉产品设计制造特点的、能快速熟练掌握先进技术、工艺和技能的高级技能人才。

虽然军工行业已拥有大量先进的加工技术及设备，但必须从总体上掌握产品设计可制造性技术的相关基本概念和内涵，能在产品设计时考虑可制造性及制造时的组织实施，考虑与其他生产技术专业的关系和可制造性所必需的基础知识，以及对各种零件的通用的可制造性考虑等基本知识和实用案例；考虑产品的一般可制造性问题、机械加工工艺方法、重型结构件以及金属零件的选材考虑、加工方法以及易出现的问题；考虑常用设备、元器件等的选择与管理、设计与制造方法、可靠性保障的概念与措施、系统的装配和封装、生产和使用期间的可靠性；考虑新材料的选择、制造技术、试验、检验和质量控制以及可制造性设计，为产品的成形、制造打好基础，保证产品的可制造性。

因此，这套丛书针对航空、航天、船舶、电子、兵器等国防行业产品的设计、制造特点，及现存的主要问题，有的放矢，具有较高的学术价值和学术水平，具有较强的实用价值及创新性，能够满足航空工业及国防工业的急需。可作为国防工业系统及其他工业系统的产品设计人员、工艺技术人员、产品生产与管理人员，以及相关专业师生等非常实用的参考书籍。

中国航空工业集团公司副总经理

2009年5月

前 言

产品设计可制造性是指所设计的产品的可加工性，用于解决在组织生产时可能出现的制造周期延长、成本提高或材料供应困难等问题。为全面提高产品设计工程师及制造工程师的综合能力，使其工作更易于衔接，帮助产品设计人员提高对工艺知识的了解，帮助制造人员组织产品可制造性评审等工作，特别组织出版了产品设计可制造性技术丛书（共5册），各册及其主要内容如下：

《产品设计可制造性与生产系统》

全面介绍了产品设计可制造性的基本概念和内涵，对军工产品设计时如何考虑可制造性，制造时如何组织实施，与其他生产技术的关系，可制造性工程师所必需的基础知识和最新实用技术，以及对各种零件的通用可制造性考虑等基本知识和实用案例等。

《金属零件可加工性技术》

介绍了金属零件可加工性技术的基本概念，并分类介绍了各种典型金属零件的制造方法和检验方面的数据。通过对各种加工方法的介绍和分析，揭示了金属零件生产性问题产生的普遍原因及解决措施。

《产品设计可装配性技术》

从产品设计总体出发，针对产品装配中的工艺规划、手工装配、自动装配以及装配中的连接方法等进行了详细的分析；对产品设计中应当考虑的与装配工艺过程密切相关的设计要素、设计原则进行了分析和总结。书中的内容既参考了当前装配工艺理论研究的最新成果，也对我国制造业中的实际经验进行了总结。

《复合材料件可制造性技术》

以复合材料结构件的制造性为中心，系统地介绍了复合材料的特点和应用，

材料及其工艺性,成形工艺技术,复合材料的试验和质量控制,复合材料结构的可制造性设计等方面的知识。对设计选材、工艺选择、可修理性设计、提高结构工艺性的设计措施等方面提出了一些基本原则。

《电子元器件应用技术》

内容涉及各类电子元器件,包括真空电子器件、微电子器件、光电子器件、微特电机和特种元器件等。书中概要介绍了各类电子元器件的基本特性、当前的产品情况以及所采用的国家标准,讨论了如何正确管理、选择、使用元器件以及在使用过程中可能出现的问题。

本套丛书的作者及审稿专家均来自国防行业各领域,具有一流的学术水平和丰富的实践经验,保证了本套丛书在航空、航天、船舶、电子、兵器等国防行业的适用性。

书 名	作 者	审稿专家
《产品设计可制造性与生产系统》	杨建军	苗 冰
《金属零件可加工性技术》	王西彬, 龙振海, 刘志兵	刘善国
《产品设计可装配性技术》	张 旭, 王爱民, 刘检华	宁汝新
《复合材料件可制造性技术》	郭金树	冯子明
《电子元器件应用技术》	李松法	周寿桓

本套丛书的顺利出版与各册作者和审稿专家百忙之中的辛勤工作密不可分,在此对他们以及为本套丛书的出版提供帮助的有关单位、专家表示诚挚的感谢!殷切期望广大读者能将在使用这套丛书时发现的问题以及改进意见和建议及时反馈给我们,以便修订,更好地服务读者。

丛书编委会

2009年5月

前 言

随着现代科学技术日新月异，复合材料在航空航天、交通运输、体育休闲、医疗卫生、能源、建筑、机械、电子等领域的应用日益广泛，复合材料的材料技术、设计技术和制造技术得到了快速发展。然而，如何选择合适的材料和制造工艺，在提高复合材料产品性能的同时降低制造成本，一直是设计师所追求的目标。研制经验表明，产品的制造成本90%以上是由设计阶段决定的。因而在设计过程中，贯彻提高产品可制造性的设计理念，科学合理地进行设计，降低产品制造成本，是非常必要的。为此，本书编者在总结前人工作的基础上，作了一点研究探索，希望对年轻的复合材料技术工作者有所帮助。

本书由先进复合材料国防科技重点实验室郭金树主持编写。其中第1章、第5章由郭金树编写，第2章由李雪芹、彭勃编写，第3章由马宏毅、刘志真编写，第4章由张子龙编写。

限于作者水平，不妥之处难免；又由于本书的章节出自不同作者之手，写作风格不尽相同。所有这些，诚挚地希望得到读者的批评指正。

目 录

第1章 概述	(1)
1.1 复合材料的定义和分类	(1)
1.1.1 复合材料的定义	(1)
1.1.2 复合材料的分类	(1)
1.2 复合材料的特点	(2)
1.2.1 树脂基复合材料的性能特点	(4)
1.2.2 金属基复合材料的性能特点	(7)
1.2.3 陶瓷基和碳基复合材料的性能特点	(8)
1.3 复合材料的应用	(8)
1.3.1 树脂基复合材料的应用	(8)
1.3.2 金属基复合材料的应用	(17)
1.3.3 陶瓷基和碳基复合材料的应用	(18)
1.4 复合材料在航空航天领域的发展趋势	(19)
第2章 原材料	(20)
2.1 增强材料	(20)
2.1.1 增强纤维	(20)
2.1.1.1 玻璃纤维	(20)
2.1.1.2 碳纤维	(24)
2.1.1.3 芳纶纤维	(28)
2.1.1.4 其他纤维	(31)
2.1.1.5 纤维性能比较	(38)
2.1.2 织物	(38)
2.1.2.1 机织物	(38)
2.1.2.2 针织织物	(42)
2.1.2.3 编织织物	(44)
2.1.2.4 其他织物	(46)
2.1.2.5 织物性能比较	(47)
2.2 基体材料	(48)
2.2.1 环氧树脂	(49)

2.2.1.1	化学成分	(49)
2.2.1.2	主要种类	(49)
2.2.1.3	性能特点	(50)
2.2.1.4	固化剂、稀释剂和增韧剂	(51)
2.2.1.5	高性能环氧树脂	(52)
2.2.2	聚酰亚胺树脂	(53)
2.2.2.1	化学成分与分类	(53)
2.2.2.2	性能特点	(53)
2.2.2.3	高性能 PMR 型聚酰亚胺树脂	(54)
2.2.3	双马来酰亚胺树脂	(54)
2.2.3.1	化学成分与分类	(55)
2.2.3.2	性能特点	(55)
2.2.3.3	高性能双马来酰亚胺树脂	(55)
2.2.4	聚酯树脂	(56)
2.2.5	酚醛树脂	(57)
2.2.6	氰酸酯树脂	(58)
2.2.7	呋喃树脂	(59)
2.2.8	高性能热塑性树脂	(59)
2.2.8.1	聚醚醚酮(PEEK)树脂	(60)
2.2.8.2	聚醚酮酮(PEKK)树脂	(61)
2.2.8.3	聚苯硫醚(PPS)树脂	(61)
2.2.8.4	聚醚砜(PES)树脂	(62)
2.2.8.5	热塑性聚酰亚胺(PI)树脂	(62)
2.2.9	基体材料性能比较	(62)
2.3	预浸料	(63)
2.3.1	前言	(64)
2.3.1.1	预浸料分类	(64)
2.3.1.2	预浸料性能	(65)
2.3.2	预浸料基本要求	(67)
2.3.2.1	预浸料原材料要求	(67)
2.3.2.2	对预浸料的基本要求	(68)
2.3.3	典型预浸料性能	(68)
2.4	芯材和胶黏剂	(72)
2.4.1	芯材	(72)
2.4.1.1	泡沫	(72)
2.4.1.2	蜂窝	(73)
2.4.1.3	其他芯材	(75)
2.4.1.4	芯材工艺性	(75)

2.4.2	胶黏剂	(76)
2.4.2.1	胶黏剂概述	(76)
2.4.2.2	胶黏剂工艺性	(79)
2.5	常用复合材料基本性能	(80)
2.5.1	环氧树脂基复合材料	(80)
2.5.1.1	环氧树脂基复合材料综合评估	(80)
2.5.1.2	国内环氧树脂基复合材料体系简介	(83)
2.5.2	双马来酰亚胺基复合材料	(84)
2.5.3	聚酰亚胺树脂基复合材料	(86)
2.5.4	纤维增强铝合金层合板	(87)
2.5.5	国外先进树脂基复合材料性能	(87)
第3章	制造技术	(90)
3.1	手糊成形	(90)
3.1.1	前言	(90)
3.1.2	原材料	(91)
3.1.2.1	玻璃纤维及其织物	(91)
3.1.2.2	树脂体系	(91)
3.1.2.3	固化剂	(91)
3.1.2.4	促进剂	(91)
3.1.2.5	触变剂	(91)
3.1.2.6	脱模剂	(92)
3.1.2.7	填料	(92)
3.1.3	模具	(92)
3.1.3.1	模具的结构形式	(93)
3.1.3.2	模具材料	(94)
3.1.4	工艺过程	(95)
3.1.4.1	材料的准备	(95)
3.1.4.2	模具的准备及脱模剂涂刷	(95)
3.1.4.3	胶衣层制备	(96)
3.1.4.4	制品的糊制及固化	(97)
3.1.4.5	脱模、修整及装配	(98)
3.1.4.6	工艺过程要点	(99)
3.1.5	手糊成形技术应用	(99)
3.2	模压成形	(100)
3.2.1	前言	(100)
3.2.2	模压料	(101)
3.2.2.1	模压料的组成	(101)

3.2.2.2	模压料的制备	(103)
3.2.2.3	影响模压料质量的因素	(104)
3.2.3	压机及模具	(105)
3.2.3.1	成形设备	(105)
3.2.3.2	成形模具	(105)
3.2.4	成形工艺	(107)
3.2.4.1	工艺过程	(107)
3.2.4.2	工艺参数	(110)
3.2.5	易出现的问题与解决方法	(112)
3.2.6	模压成形技术应用	(113)
3.3	热压罐成形	(113)
3.3.1	前言	(113)
3.3.2	原材料	(117)
3.3.2.1	预浸料	(117)
3.3.2.2	结构胶黏剂	(118)
3.3.2.3	夹芯结构	(118)
3.3.2.4	辅助材料	(118)
3.3.3	工艺流程	(118)
3.3.4	自动铺放技术	(120)
3.3.4.1	复合材料自动铺带技术	(121)
3.3.4.2	复合材料自动铺丝技术	(123)
3.3.5	成形的模拟	(127)
3.3.5.1	树脂流动的模拟	(127)
3.3.5.2	纤维形变	(129)
3.3.5.3	压实模型	(130)
3.3.5.4	空隙形成的模拟	(131)
3.3.5.5	热传递的模拟	(131)
3.3.5.6	固化动力学的模拟	(132)
3.3.6	热压罐成形技术应用	(133)
3.4	液态成形	(134)
3.4.1	前言	(134)
3.4.2	原材料	(136)
3.4.2.1	树脂基体	(136)
3.4.2.2	增强体	(137)
3.4.3	成形设备	(139)
3.4.3.1	树脂注射设备	(140)
3.4.3.2	注射和混合设备	(140)
3.4.3.3	模具操作和夹紧装置	(141)

3.4.4	成形工艺模拟	(141)
3.4.4.1	树脂流动与固化模型	(141)
3.4.4.2	控制体积方法	(145)
3.4.5	液态成形技术应用	(149)
3.5	缠绕成形	(151)
3.5.1	前言	(151)
3.5.2	原材料	(152)
3.5.2.1	增强材料	(152)
3.5.2.2	树脂基体	(152)
3.5.2.3	填料	(153)
3.5.3	缠绕设备	(153)
3.5.3.1	缠绕机	(153)
3.5.3.2	芯模	(153)
3.5.3.3	张力控制系统	(154)
3.5.3.4	浸胶和纤维供给系统	(155)
3.5.3.5	固化系统	(156)
3.5.4	缠绕规律	(158)
3.5.4.1	环向缠绕	(158)
3.5.4.2	纵向缠绕	(158)
3.5.4.3	螺旋缠绕	(159)
3.5.4.4	切点法缠绕规律	(160)
3.5.5	工艺及分类	(161)
3.5.5.1	干法缠绕	(162)
3.5.5.2	湿法缠绕	(162)
3.5.5.3	半干法缠绕	(163)
3.5.6	工艺参数选择	(163)
3.5.6.1	纤维处理	(163)
3.5.6.2	浸胶和含胶量	(163)
3.5.6.3	缠绕张力	(164)
3.5.6.4	缠绕速度	(164)
3.5.6.5	固化	(164)
3.5.7	纤维缠绕成形技术应用	(165)
3.6	拉挤成形	(165)
3.6.1	前言	(165)
3.6.2	原材料	(167)
3.6.2.1	基体材料	(167)
3.6.2.2	辅助材料	(167)
3.6.2.3	增强材料	(167)

3.6.3	成形工艺	(168)
3.6.3.1	成形设备	(168)
3.6.3.2	成形工艺原理	(169)
3.6.3.3	成形工艺参数	(170)
3.6.3.4	成形工艺监控	(171)
3.6.3.5	质量控制与缺陷分析	(171)
3.6.4	拉挤成形技术应用	(171)
3.7	复合材料加工和连接	(172)
3.7.1	前言	(172)
3.7.2	机械连接	(172)
3.7.2.1	树脂基复合材料制孔技术	(173)
3.7.2.2	树脂基复合材料紧固件及制造工艺	(175)
3.7.2.3	树脂基复合材料机械连接设计与工艺	(175)
3.7.3	胶接	(177)
3.7.3.1	胶接机理	(177)
3.7.3.2	复合材料胶接技术特点	(179)
3.7.3.3	胶接接头设计	(179)
3.7.3.4	胶接材料	(181)
3.7.3.5	复合材料胶接工艺	(182)
3.7.3.6	胶接质量控制及检测	(183)
3.7.3.7	复合材料胶接技术展望	(185)
3.7.4	复合材料焊接工艺	(186)
3.7.4.1	复合材料的焊接过程	(186)
3.7.4.2	复合材料的焊接方法	(187)
3.7.4.3	复合材料的焊接设计	(188)
3.7.5	装配	(188)
第4章	复合材料试验与质量控制	(190)
4.1	试验方法与试验标准体系	(190)
4.1.1	多层次试验的内容	(190)
4.1.2	试验方法的选择	(192)
4.1.3	试验方法标准体系	(193)
4.1.4	质量控制常用试验标准	(194)
4.2	材料性能表征与质量控制	(195)
4.2.1	原材料及复合材料性能表征	(195)
4.2.1.1	增强体材料性能表征	(195)
4.2.1.2	基体材料性能表征	(199)
4.2.1.3	预浸料材料性能表征	(204)

4.2.1.4 层压板/单层性能表征	(205)
4.2.2 材料的检验、验收与质量控制	(223)
4.3 工艺制造过程中的质量控制	(226)
4.3.1 原材料的采购与存贮	(226)
4.3.2 制造工艺过程中的质量控制	(227)
4.3.2.1 复合材料工艺的质量控制	(227)
4.3.2.2 工艺中的过程检验	(228)
4.3.3 无损检测技术	(230)
4.3.4 破坏性检验	(230)
4.4 产品最终检验与质量评价	(231)
4.5 产品质量文件及其他技术文件	(232)
第5章 复合材料结构的生产性设计	(234)
5.1 材料与成形工艺的选择	(234)
5.1.1 设计选材原则	(235)
5.1.2 树脂的选择	(236)
5.1.3 纤维的选择	(237)
5.1.4 复合材料选材分析实例	(237)
5.1.5 模具的选择	(238)
5.1.6 成形工艺的选择	(238)
5.1.7 结构成形方案实施过程分析	(239)
5.2 结构工艺性的设计考虑	(241)
5.2.1 复合材料结构设计的一般原则	(241)
5.2.2 结构工艺性与设计的关系	(241)
5.2.3 提高结构工艺性的设计措施	(242)
5.3 结构可修理性设计	(248)
5.3.1 结构可修理性设计的原则	(248)
5.3.2 结构损伤类型	(248)
5.3.3 结构修理一般要求和修理方法	(248)
5.3.4 结构修理的一般过程	(249)
5.3.5 结构修理实例	(250)
5.4 低成本复合材料技术	(251)
5.4.1 低成本材料技术	(251)
5.4.2 低成本设计技术	(253)
5.4.3 低成本制造技术	(254)
参考文献	(262)

第1章 概 述

能源、材料和信息是现代国民经济的三大支柱，材料更是各行各业的基础。材料科学是当今世界的带头学科之一。复合材料的出现使材料领域发生了重大变革，从而形成了金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料和复合材料多角共存的格局。

1.1 复合材料的定义和分类

1.1.1 复合材料的定义

复合材料是由两种或两种以上不同性质的材料，用物理和化学方法在宏观尺度上复合而成的新型材料。

对于复合材料比较全面完整的定义应该是：复合材料是由不同材料（包括金属、无机非金属和有机高分子材料）互为基体或增强体，用物理和化学方法在宏观尺度上复合而成的具有新性能的材料；它既能保留原组分材料的主要特点，又通过复合效应获得原组分所不具备的新性能；通过材料设计和工艺设计，使各组分材料彼此关联，性能互补，从而获得新的性能。

从以上定义可知，决定复合材料性能的主要因素是：各组分材料的性能、各组分材料的比例、复合工艺、基体与增强体的界面黏结及处理。

1.1.2 复合材料的分类

复合材料的分类方式很多，通常有以下几种分类方法。

(1) 按基体材料类型不同，复合材料可分为树脂基复合材料、金属基复合材料、无机非金属基复合材料。

树脂基复合材料包括：环氧树脂基复合材料、酚醛树脂基复合材料、不饱和聚酯基复合材料、乙烯基酯树脂基复合材料、双马来酰亚胺基复合材料、热固性聚酰亚胺基复合材料、氰酸酯树脂基复合材料、有机硅基复合材料、三聚氰胺基复合材料、聚氨酯基复合材料等热固性树脂基复合材料；聚苯硫醚基复合材料、聚醚醚酮基复合材料、聚醚酮酮基复合材料、聚醚酮基复合材料、热塑性聚酰亚胺基复合材料、聚甲醛基复合材料、聚丙烯基复合材料、聚碳酸酯基复合材料、聚苯并咪唑基复合材料、聚砜基复合材料等