



工业和信息化部“十二五”规划教材

先进复合材料 研究进展

XIANJINFUHECAILIAO
YANJIUJINZHAN

王振清 梁文彦 吕红庆 编著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社



工业和信息化部“十二五”规划教材

先进复合材料 研究进展

XIANJINFUHECAILIAO
YANJIUJINZHAN

王振清 梁文彦 吕红庆 编著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

复合材料已成为工业产品不同领域发展的关键材料,本书在对国内外复合材料研究现状介绍的基础上,将作者近几年的最新研究成果融入其中。全书共分为7章,分别介绍了热固性树脂基复合材料的力学性能和机械连接性能、热塑性复合材料力学性能、纳米复合材料力学性能、形状记忆合金复合材料界面力学性能等内容,总结了不同种类复合材料的研究现状、发展趋势和力学性能等内容。

本书可作为力学专业本科生的教材,也可作为复合材料研究方向的研究生和相关专业领域工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

先进复合材料研究进展/王振清,梁文彦,吕红庆编著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2014. 10

ISBN 978 - 7 - 5661 - 0928 - 6

I. ①先… II. ①王… ②梁… ③吕… III. ①复合材料 - 材料研究 - 研究进展 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 231010 号

出版发行	哈尔滨工程大学出版社
社 址	哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码	150001
发行电话	0451 - 82519328
传 真	0451 - 82519699
经 销	新华书店
印 刷	黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂
开 本	787 mm × 1092 mm 1/16
印 张	22.5
字 数	552 千字
版 次	2014 年 10 月第 1 版
印 次	2014 年 10 月第 1 次印刷
定 价	49.00 元

<http://www.hrbeupress.com>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前言

随着科学技术的进步,复合材料的发展一日千里。从早期简单的飞机雷达罩到现在的整体复合材料船舶,从早期的手糊工艺到现在的一体化成型,从早期的非承力构件到现在的主承力结构,都标志着人类改造自然的进步,在给人类生活带来了巨大改变的同时,也体现了一个国家科学技术发展的水平。进入 21 世纪,对复合材料的要求日益苛刻,复合材料被赋予功能一体化的智能材料,许多国家把它作为重点发展的一门新学科和新技术。

本书是作者基于多年研究成果编写而成,全书共分为 7 章,分别介绍了复合材料连接性能、纤维增强复合材料的力学性能、纳米不锈钢层合复合材料拉伸性能、形状记忆合金复合材料界面力学性能、热塑性树脂基复合材料及其力学性能、纳米颗粒改性环氧树脂及其复合材料力学性能等内容,系统讲述了不同类别复合材料的发展趋势、制备工艺和力学性能等内容,重点给出了作者最新的研究成果。

本书是作者十多年来在复合材料领域的科学研究工作的总结,并查阅了国内外有关复合材料方面的最近研究资料编著而成,力求科学严谨,系统深入,反映复合材料的最新成果,本书可供从事复合材料研究的本科生及高年级研究生参考。

本书在编著过程中,周松博士、王晓强博士、郝扣安博士、王玉龙博士、刘方博士在文献查找和图片处理方面给予了很大帮助,在此表示感谢。

由于作者学识和精力所限,书中难免会有疏漏及不妥之处,敬请读者批评指正!

编著者
2014 年 7 月

目录

第1章 复合材料概论	1
1.1 复合材料的发展概述	1
1.2 复合材料的定义和分类	2
1.3 复合材料的特性	4
1.4 复合材料成型工艺	5
1.5 复合材料的应用	9
参考文献	19
第2章 复合材料的连接性能	20
2.1 概述	20
2.2 复合材料接头分类	20
2.3 复合材料胶接连接和机械连接	20
2.4 复合材料螺栓连接 T 型接头性能分析	31
2.5 T 型接头的有限元数值分析	32
2.6 基于扩展有限元法的螺栓连接复合材料接头失效分析	40
2.7 基于 VARI 工艺的复合材料螺栓连接单搭接接头几何参数实验	52
2.8 螺栓连接复合材料单搭接接头渐进损伤的有限元分析	62
参考文献	74
第3章 纤维增强复合材料的力学性能	80
3.1 概述	80
3.2 复合材料的力学行为	80
3.3 尺度水平的定义	82
3.4 材料损伤和失效的概念与建模方法	84
3.5 纤维增强复合材料横向微结构表征与分析	94
3.6 复合材料横向力学分析	107
3.7 考虑界面相的横向拉伸失效分析	114
3.8 单向复合材料的纵向拉伸性能研究	121
3.9 数值计算结果与分析	126
参考文献	132

第4章 纳米不锈钢层合复合材料拉伸失效分析	141
4.1 概述	141
4.2 表面纳米化和温轧工艺	141
4.3 内聚有限元模型的建立	142
4.4 材料性能	143
4.5 内聚有限元模型的验证	144
4.6 轧压表面纳米化 304 不锈钢粗晶基体性质的影响	146
4.7 纳米晶层性质的影响	149
4.8 纳米晶层体积含量的影响	154
4.9 粘接纳米晶层复合材料的力学分析	156
参考文献	157
第5章 形状记忆合金复合材料界面力学特性分析	159
5.1 概述	159
5.2 形状记忆合金复合材料的研究概述	159
5.3 形状记忆合金的热力学特性	161
5.4 形状记忆合金复合材料内应力分析	164
5.5 形状记忆合金复合材料界面脱粘的理论分析与有限元模拟	181
5.6 形状记忆合金复合材料界面强度的实验研究	196
5.7 形状记忆合金复合材料界面脱粘的实验研究	215
参考文献	230
第6章 热塑性树脂基复合材料及其力学性能	232
6.1 概述	232
6.2 热塑性树脂基复合材料及 CBT 树脂	233
6.3 CBT 开环聚合过程的流变行为及热学性能	236
6.4 热塑性复合材料制备技术及二次成型方法	252
6.5 平板复合材料及复合曲梁的力学性能	266
6.6 复合材料层合曲梁抗弯力学性能分析	279
参考文献	290
第7章 纳米颗粒改性环氧树脂及其复合材料力学性能	294
7.1 概述	294
7.2 纳米颗粒改性环氧树脂的拉伸性能	296
7.3 纳米颗粒改性环氧树脂的压缩性能	308
7.4 纳米颗粒改性环氧树脂的断裂性能及其机理	322
7.5 纳米颗粒改性单向纤维/环氧树脂复合材料力学性能	337
参考文献	351

第 1 章 复合材料概论

1.1 复合材料的发展概述

历史的进程证明,材料是社会发展的基础和社会进步的里程碑。随着科学技术的不断进步,对材料的性能提出越来越高的要求,在很多领域单一的材料已经不能满足实际的需要。复合材料是由两种或者多种不同性质的材料用物理或化学方法制成的具有某种新性能的材料,一般复合材料的性能要比其组分材料的性能优越,并且有些性能还可能是原来组分材料所没有的。从人类文明之初,复合材料就一直伴随着人类文明的不断进步而逐渐发展。除去木材之类的天然复合材料,早在远古时代,人类就在各种结构中应用了多相材料。其中最著名的就是中国的古城墙,它的耐久性和稳定性得益于把性质不同的多种材料混合到同一个结构中,里面的稻草或麦秆起着增强黏土的作用。另外一个闻名的应用是在中世纪的欧洲中部,人们把砖块填充到木质骨架中砌成的普鲁士城墙。

现代复合材料历史中一个具有重要意义的里程碑是在 19 世纪后期的法国,钢筋混凝土的出现与应用。现代复合材料因其强度高、刚度大、质量轻,并具有抗疲劳、减震、耐高温、可设计等优点,近几十年来在航空、航天、能源、交通、建筑、机械、生物医学和体育运动等部门日益得到广泛的应用,全世界每年的生产量超过千万吨,并且还在以每年 5% ~ 10% 的市场需求增长,作为一类应用非常广泛和重要的工程材料,可以断言,21 世纪是复合材料的时代。

在 20 世纪 60 年代末期,树脂基高性能复合材料被用于飞机的承力结构,后又逐渐进入工业其他领域。为了克服树脂基复合材料耐热性差、导热性低等缺点,20 世纪 70 年代末期,科学家们研究出了高强度、高模量的耐热碳纤维和陶瓷纤维与金属复合材料,并成功地应用于航空航天等高科技领域。进入 20 世纪 80 年代,陶瓷复合材料逐渐发展与应用起来。复合材料因其具有可设计的特点受到广泛的重视,因而发展极快。目前全世界复合材料的年产值达 1 300 亿美元以上。从工程应用角度来看,复合材料在美国和欧洲主要用于航空航天、汽车等行业。2000 年,美国汽车零件的复合材料用量达 14.8 万吨;2003 年,欧洲汽车复合材料用量达到 10.5 万吨。同时,随着近年来人们对环保问题的日益重视,高分子复合材料取代木材方面的应用也得到了进一步推广,例如,用植物纤维与废塑料加工而成的复合材料,在北美已被大量用作托盘和包装箱,用以替代木制产品。而目前悉尼大学、香港理工大学、哈尔滨工程大学等研究单位正在研究热塑性 CBT 复合材料在船舶等领域中的应用,其特点在于可降解性能,所以可降解复合材料也成为国内外开发研究的重点。复合材料发展简图如图 1.1 所示。

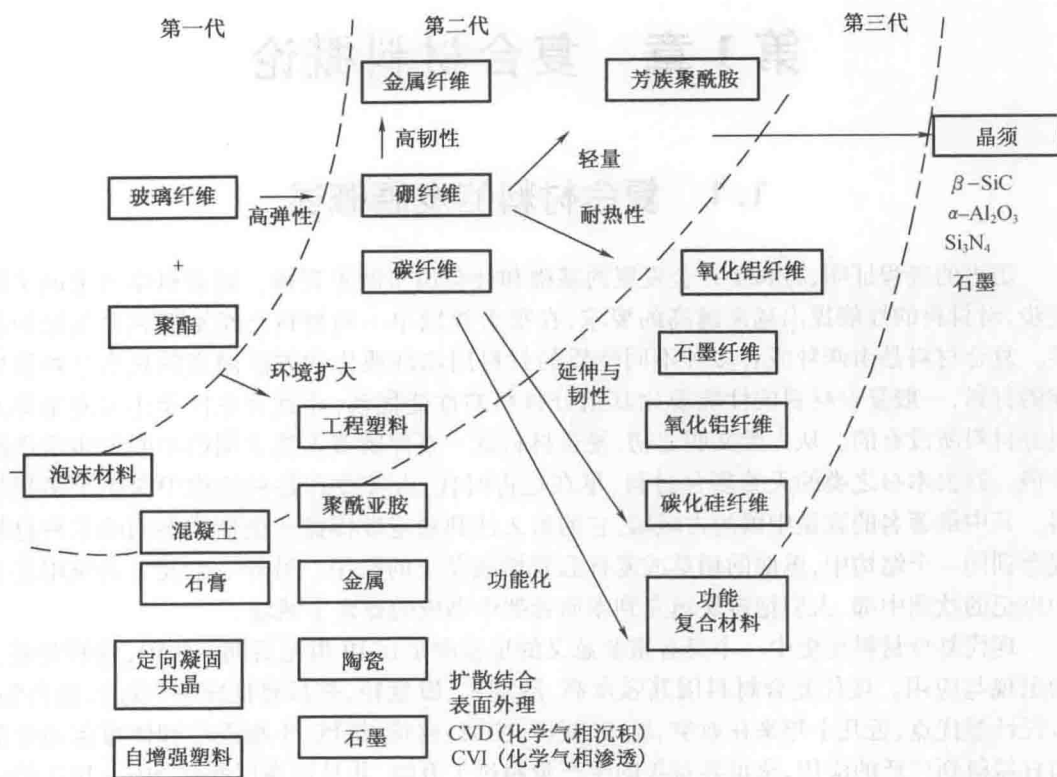


图 1.1 复合材料发展简图

1.2 复合材料的定义和分类

1.2.1 复合材料的定义

复合材料(Composite Materials)一词,起源于国外,20 世纪 60 年代国内开始使用。复合材料是成分复杂的多元多相体系,很难准确地予以定义。国际标准化组织的定义为:由两种以上在物理和化学上不同的物质组合起来而得到的一种多相固体材料。复合材料具有如下特征:①微观上是非均相材料,组分材料间有明显的界面;②组分材料性能差距很大;③组成复合材料后性能有较大的改进;④组分材料的体积分数大于 10%。按这种定义,复合材料所包含的范围很广,草泥墙、钢筋混凝土、帘子线轮胎等均属于复合材料的范畴。

《材料科学技术百科全书》把复合材料定义为:复合材料是由有机高分子、无机非金属材料或金属等几类不同材料通过复合工艺组合而成的新型材料。它既保留原组成材料的重要特色,又通过复合效应获得原组分所不具备的性能。可以通过材料设计使各组分的性能互相补充并彼此关联,从而获得更优越的性能,与一般材料的简便混合有本质区别。

《材料大辞典》把复合材料定义为:复合材料是根据应用的需要进行设计,把两种以上的有机聚合物材料,或无机非金属材料,或金属材料组合在一起,使之互补性能优势,从而制成的一类新型材料。它一般由基体组元与增强材料或功能体组元所组成,因此亦属于多

相材料范畴。该定义强调了复合材料具有可设计的重要特点。在工业方面,复合材料通常是指高强度、高模量、脆性的增强剂和低模量韧性的基体材料经过一定的成型加工方法而制成综合性能优良的材料。

从现代材料科学角度出发,其复合材料一般是指纤维增强、薄片增强、颗粒增强或自增强的聚合物基、陶瓷基或金属基复合材料。目前使用最广泛、效果最好的增强剂是纤维材料,因此人们通常讲的复合材料是狭义的复合材料——纤维增强复合材料。

1.2.2 复合材料的分类

复合材料的分类方法很多,常见的分类方法有以下几种。

1. 按分散相的几何形态分类

(1)长纤维(连续)增强复合材料:增强体为连续长纤维,纤维方向可谓单一方向(如图 1.2 所示),或双向正交(如图 1.3 所示),或多方向(如图 1.4 所示);当纤维方向为单一或双向正交,该复合材料可视为具有正交性,若排成多方向,则将复合材料视为类等向性。

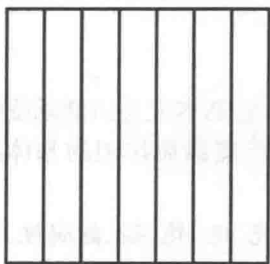


图 1.2 单一方向示意图

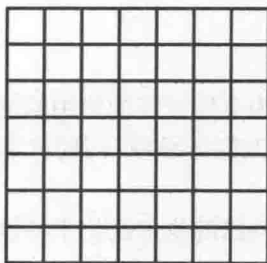


图 1.3 双向正交示意图

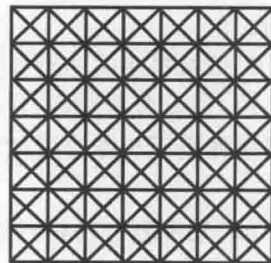


图 1.4 多方向示意图

(2)颗粒增强复合材料:可分为弥散增强复合材料(颗粒等效直径为 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$, 粒子间距为 $0.01 \sim 0.3 \mu\text{m}$)和粒子增强复合材料(颗粒等效直径为 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$, 粒子间距为 $1 \sim 25 \mu\text{m}$)。

(3)短纤维(不连续)增强复合材料:是指晶须、短切纤维无规则地分散在基体材料中制成的复合材料,如图 1.5 所示。

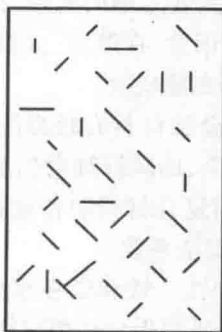


图 1.5 短纤维复合材料示意图

2. 按增强体的纤维种类分类

(1) 玻璃纤维复合材料。

(2) 碳纤维复合材料。

(3) 芳纶纤维复合材料。

(4) 金属纤维(如钨纤维、不锈钢丝等)复合材料:此类复合材料最高使用温度受金属基体本身熔化温度或熔点所限,约 800 ℃。

(5) 陶瓷纤维(如氧化铝纤维、碳化硅纤维、硼纤维等)复合材料:适合于相对高温使用,约 1 000 ℃。

3. 按基体材料分类

(1) 聚合物基复合材料:以有机聚合物(主要为热固性树脂、热塑性树脂及橡胶)为基体制成的复合材料。

(2) 金属基复合材料:以金属为基体制成的复合材料,如铝基复合材料、铁基复合材料和铜基复合材料等。

(3) 无机非金属基复合材料:以陶瓷材料(包括玻璃、水泥和碳)为基体制成的复合材料。

4. 按材料使用功能分类

(1) 结构复合材料:主要是作为支撑力结构使用的复合材料,它基本上是由能承受载荷的增强体组元与能连接增强体成为整体承载,同时又起分配与传递载荷作用的基体组元构成。

(2) 功能复合材料:具有某种特殊的物理或化学特性,如声、光、电、热、磁、耐腐蚀、零膨胀、阻尼、摩擦或换能等。

1.3 复合材料的特性

复合材料是由多相材料复合而成的,与金属等材料比较,其优越性在于:

(1) 质量轻,比强度、比模量高:复合材料具有高的比刚度(刚度与密度之比),复合材料提供钢的刚度,但质量是钢的 1/5,是铝的 1/2。复合材料的比强度相当高,是钢和铝合金的 3~5 倍。如果以 CFRP(碳纤维增强复合材料,Carbon Fiber Reinforced Polymer/Plastic)为例:与钢相比,密度仅为钢的 1/5,比强度为钢的 8 倍,比模量为钢的 3.6 倍,疲劳强度为钢的 2.7 倍,抗拉强度为钢的 1.4 倍。因此,在航空、火箭、宇宙飞行器、高压容器以及其他需要减轻自重的制品应用中,都具有卓越成效。

(2) 耐疲劳性能好:复合材料比金属材料有较高的耐疲劳特性。通常金属材料的疲劳强度极限是其拉伸强度的 30%~50%,而碳纤维增强聚合物基复合材料的疲劳强度极限为其拉伸强度的 70%~80%。因此,用复合材料制备成在长期交变载荷条件下工作的构件,具有较长的使用寿命和较大的破损安全系数。

(3) 复合材料具有良好的耐腐蚀性。铁和铝在水和空气存在下会腐蚀,需要特殊的涂层保护或合金化,而复合材料的耐腐蚀和化学性相当好。

(4) 复合材料的冲击性能好。玻璃纤维和 Kevlar 纤维增强的复合材料的冲击强度比金高;长纤维比短纤维更耐冲击;热塑性复合材料比热固性复合材料高。

(5) 复合材料抗噪声、振动特征比金属好。复合材料具有较高的自振频率,同时复合材

料的基体纤维界面具有较大的吸收振动能量,使材料的振动阻尼较高。复合材料的振动阻尼比金属高一个数量级,在飞机等领域获得了良好的应用。

(6)复合材料的可设计性强。通过选择纤维、树脂和复合方式或复合结构,可获得不同性能的复合材料。其复合材料的力学、机械、化学等性能都可以按照制品的使用要求和环境条件要求,通过组分材料的选择和匹配以及界面控制等材料设计手段,获得不同的使用性能。

(7)复合材料可整合性强。对于某些复杂的部件和特殊的轮廓有时用金属制造根本不可能,但用复合材料可以制造这种部件。不仅如此,更重要的是复杂部件不用焊接、铆接,这大大增加了可靠性并减少了生产时间。

(8)复合材料的复合效应好。复合材料的整体性能并不是其组分材料的性能的简单叠加或平均,其中涉及到复合效应。复合效应实际上是原相材料及其所形成的界面相互作用、相互依存、相互补充的结果。它表现为复合材料的性能在其组分基础上的线性或非线性的综合。

1.4 复合材料成型工艺

复合材料的成型与金属材料的制造有着一定的区别。对于金属材料而言,各种产品是利用原材料的金属材料经过加工而制成的。但是对于复合材料的成型和制作,实际上是把复合材料的制造和产品的制造融合为一体。例如,高分子基复合材料的制造主要涉及怎样把纤维等增强体均匀地分布在基体的树脂中,怎样按产品设计的要求实现成形、固化等。因此,与金属材料的制造相比,复合材料在成型和制造等方面具有很大的灵活性。复合材料的成型工艺技术多种多样,产品的制造可根据实际情况,选择适当的工艺技术进行加工。常见的复合材料成型工艺如图 1.6 所示。

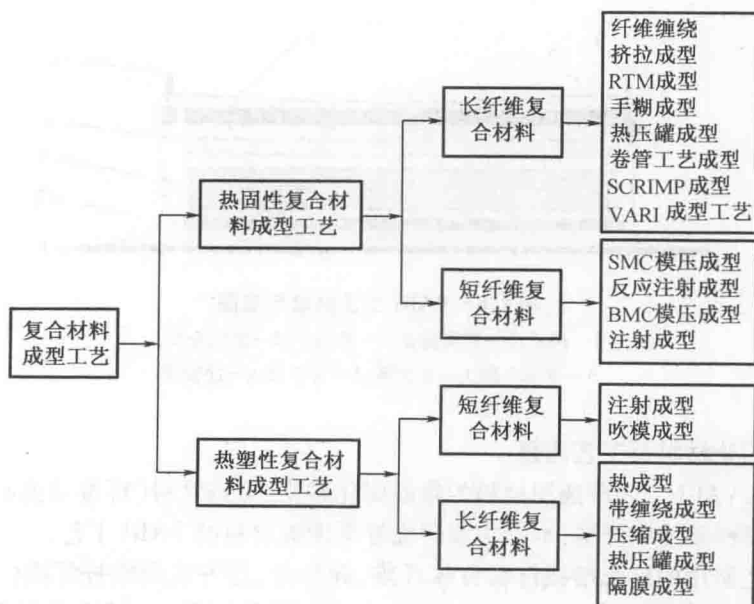


图 1.6 复合材料成型工艺示意图

1.4.1 VARI 成型工艺

1. VARI 工艺简介

VARI 工艺是真空辅助树脂注射工艺 (Vacuum Assisted Resin Injection) 的简称, 是在树脂传递模塑成型技术 (RTM 技术) 基础上发展起来的新型复合材料成型工艺。它是在单面光滑刚性模具上铺设增强纤维, 并以柔性的薄膜袋包覆密封, 利用真空负压排除增强纤维中的空气, 同时按一定配比制好的树脂在负压力的作用下渗透到增强纤维体中, 待渗浸完毕后, 在室温条件下保持一定的时间固化成型, 从而得到一定树脂/纤维比例的纤维增强复合材料的一种工艺方法。如图 1.7、图 1.8 和图 1.9 所示, 分别为 VARI 工艺流程图与封装图。

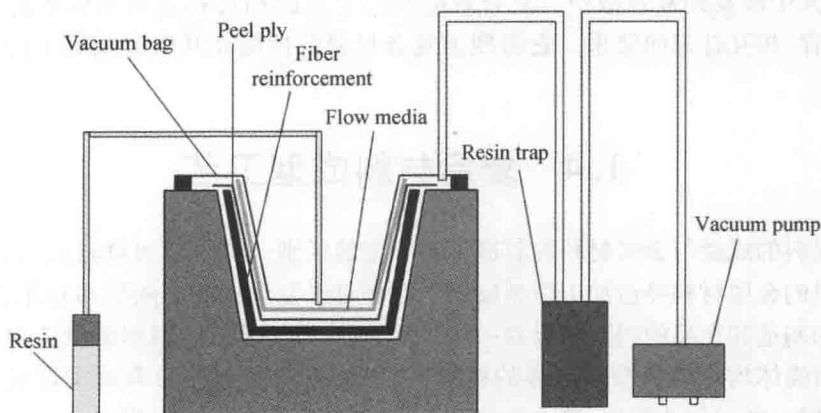


图 1.7 VARI 工艺示意图

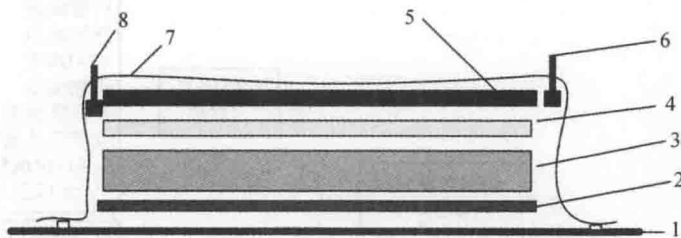


图 1.8 VARI 工艺封装示意图

1—模具; 2—聚酯薄膜; 3—预制件; 4—膜模介质;
5—导流介质; 6—真空嘴; 7—真空袋; 8—注胶嘴

2. VARI 工艺材料及工艺流程

一般来说, VARI 工艺所选用材料为常温固化树脂, 增强材料 (纤维或夹心材料等)。一般来说, 增强材料多选取纤维, 本书主要研究纤维增强材料的 VARI 工艺。

VARI 工艺所用的纤维增强材料有碳纤维、硼纤维、芳香族聚酰胺纤维 (芳纶)、高性能玻璃纤维、高强高模聚乙烯纤维、玄武岩纤维、晶须增强体、碳化硅纤维和氮化硅纤维等, 其中以玻璃纤维的应用最为广泛。

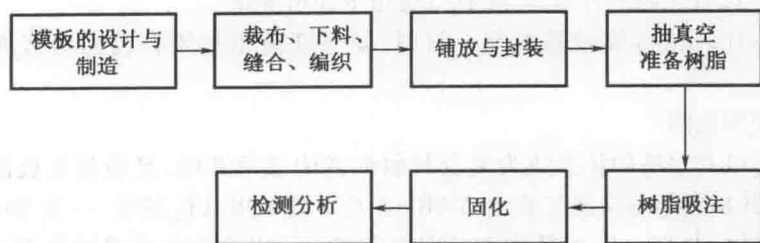


图 1.9 VARI 成型工艺流程示意图

树脂是 VARI 技术的基础材料。目前针对 VARI 工艺开发了一系列基体树脂,主要有聚酯树脂、环氧树脂、乙烯基树脂、双马来酰亚胺树脂、氰酸酯树脂等。其中,聚酯树脂由于强度和耐热性较差,成本低廉,具有良好的耐海洋大气和耐海水老化性能,因此主要用于船舶领域;环氧树脂的力学性能和耐水性能优于聚酯树脂,但价格较贵,一般用作胶粘剂、耐水涂层和特殊构件的基体树脂;航空航天领域主要采用低黏度环氧树脂、双马来酰亚胺树脂。另外,树脂要配合固化剂和促进剂一起使用。

VARI 工艺的主要制作流程包括以下几个步骤。

(1) 模板设计准备:根据结构件的尺寸形状设计模板,通常采用硬铝板作为模板材料。

(2) 下料:将纤维布按设计好的尺寸进行裁剪。同一层非纤维方向可以拼接,但纤维方向不能拼接,实在需要可以编织缝合。

(3) 铺放封装:在刚性模板上涂刷脱模剂,然后按设计的铺层顺序进行铺层,层与层之间可以喷胶黏结,铺设完成后在叠层块表面贴一层脱模布,便于成型后模具与制件的分离,叠层块在铺设过程中可按设计铺设导流槽、吸脂管、真空管等插件,最后上覆柔性密封袋完成密封。

(4) 抽真空:完成封装后,打开真空泵抽真空,保持一段时间,检查密封性,保证负压不低于 0.09 MPa,便于树脂的吸注。

(5) 吸注树脂:确认密封良好后,按设计配合比完成树脂的制备,连接吸脂管进行树脂吸注,待树脂完全渗浸试件后,用大力钳等密封夹具夹紧吸脂管和真空管,保持负压。

(6) 固化:在一定的温湿度条件下,将试件保持负压,静置一段时间至树脂完全固化。

(7) 检测分析:制成的复合材料层合板件外观应平整、光滑,并应对制件进行无损检测分析,确认质量后,按照国标要求切割成满足各种性能测试的试件,测试各项性能参数。

3. VARI 工艺技术要求

由于工艺的特殊性,VARI 工艺对树脂体系、封装系统、控制系统有着特定的要求:

(1) 合理设计树脂的流通管道,保证树脂在低黏度时间段内能够均匀地渗浸叠层块;

(2) 恰当地选择制品的铺层数和厚度;

(3) 保证良好的密封性工艺,提供较大的真空负压(真空负压值 ≥ 0.09 MPa),便于树脂的均匀流通渗浸和纤维铺层的致密压实,减少孔隙率;

(4) 树脂应具有良好的力学性能和阻燃性能;

(5) 树脂基体能够在常温条件下固化成型,而且黏度要低,仅借助真空负压即可在预成型制品中流动渗浸,最佳黏度范围为 $100 \sim 300$ MPa $\cdot$ s;

(6) 树脂固化前要有一定的低黏度时间段,以保证树脂能充分渗浸试件;

(7) 树脂固化时无需额外压力,在真空负压下即可固化;

(8) 对于使用环境温度较高的复合材料,要保证树脂基体有较高的玻璃化转变温度(T_g)。

4. VARI 使用范围

VARI 工艺以其独特的优点成为复合材料制造中最活跃的,且最具发展潜力的低成本制造工艺。尤其是在船舶制造工业中,VARI 工艺更显示出其优越性,一块 20 m 长,3 m 宽的船用复合材料板在 45 min 内就能充模成型完毕。值得注意的是美国海军水面作战中心对 VARI 工艺制件进行力学性能分析后对其大为赞赏,认为其具有很高的性价比,认为使用 VARI 成型工艺制成的制件性能甚至要优于采用昂贵的材料与高成本的成型工艺制造的航空航天结构的性能。认为 VARI 工艺将是制造未来战舰壳体结构的重要成型手段,如图 1.10 所示。而国内对于 VARI 工艺的使用多集中于民用小型船舶或游艇的制造,而对于军用船舶的制造则刚刚兴起。

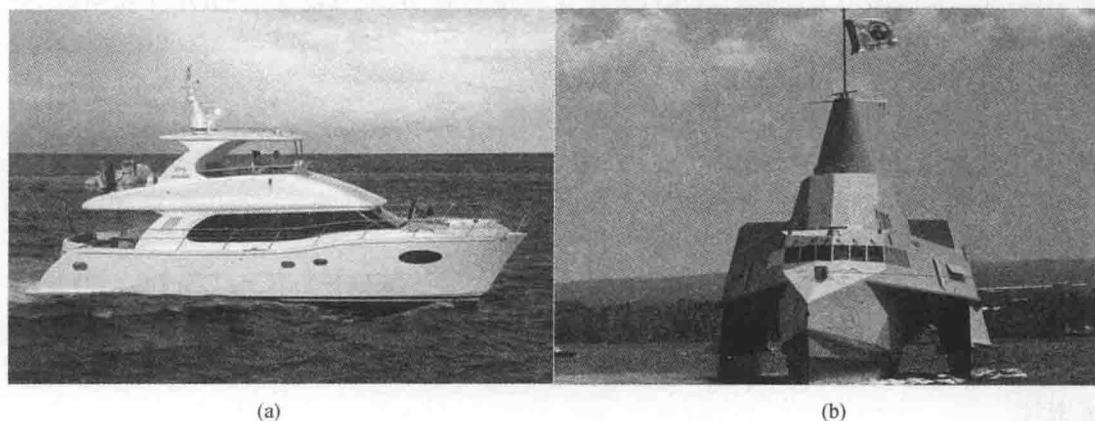


图 1.10 VARI 工艺制造船舶
(a) 成型后的赫涑森 PC60 游艇;(b) 印尼三体船

1.4.2 手工成型法

手工成型工艺是聚合物基复合材料制造中最早采用和最简单的方法。其工艺过程是:先在模具上涂刷含有固化剂的树脂混合物,再在其上铺贴一层按要求剪裁好的纤维织物,用刷子、压辊或刮刀压挤织物,使其均匀浸渍并排除气泡后,再涂刷树脂混合物和铺贴第二层纤维织物,反复上述过程直至达到所需厚度为止。其固化的条件主要根据树脂的固化条件而定,可以热压成形或者冷压成形,最后脱模得到复合材料制品,手工成型法的基本工艺流程如图 1.11 所示。

1.4.3 RTM 成型法

树脂传递模塑工艺简称 RTM,美国在 1996 年研究了该方法,主要是用于高强度主承力构件,并且该方法的制造成本较低,目前在中小型复合材料的零件中得了较广泛的应用。复合材料 RTM 成型法的基本工艺流程如图 1.12 所示。



图 1.11 复合材料手工成型工艺流程图



图 1.12 复合材料 RTM 成型工艺流程图

RTM 复合材料成型方法的优点是:成本低、环保、产品尺寸稳定、形成的层合板性能好且双面质量好,并且可以适用大型构件;其缺点是:纤维含量较低、树脂分布不均、浸渍不充分等。

1.5 复合材料的应用

为了满足飞机、导弹以及航空发动机发展对复合材料使用温度的需求,最早开发和用的是玻璃纤维增强的树脂基复合材料,20 世纪 40 年代,美国首先用玻璃纤维和不饱和聚酯树脂复合,以手糊工艺制造军用雷达罩和飞机油箱,为玻璃纤维复合材料在军事工业中的应用开辟了道路。进入 20 世纪 60 年代以后,为了满足在航空航天飞行器等领域对材料的高比模量和高比强度的要求,科学家们相继开发了碳纤维复合材料。至此复合材料在不同领域得到了广阔的发展和应用,图 1.13 给出了欧美等国家复合材料发展的历程。

1.5.1 复合材料在飞机领域中的应用

从目前的实际情况来看,虽然复合材料在航空航天领域应用的份额较小,但是复合材料的应用起源于航空和航天工业,同时,该领域的先进技术是引领着复合材料在其他领域应用的方向标。航空航天领域采用复合材料的根本原因是减轻质量,提升飞行器的性能和经济效益。从 20 世纪 80 年代后服役的战斗机,其机翼、尾翼等部件基本上都采用了 ACM,其用量已达机体结构质量的 20% ~ 30%。法国在 1980 年首飞的“Rafale”号飞机,其机翼、尾翼、垂尾、机身结构的 50% 均为 ACM,其复合材料的结构占 40%。美国在 1989 年首飞的美国隐形轰炸机 B-2 的复合材料结构用量为 50%,如图 1.14 所示。在近代直升机上,复合材料的用量比军用飞机还要多,目前高达 50% ~ 80%。

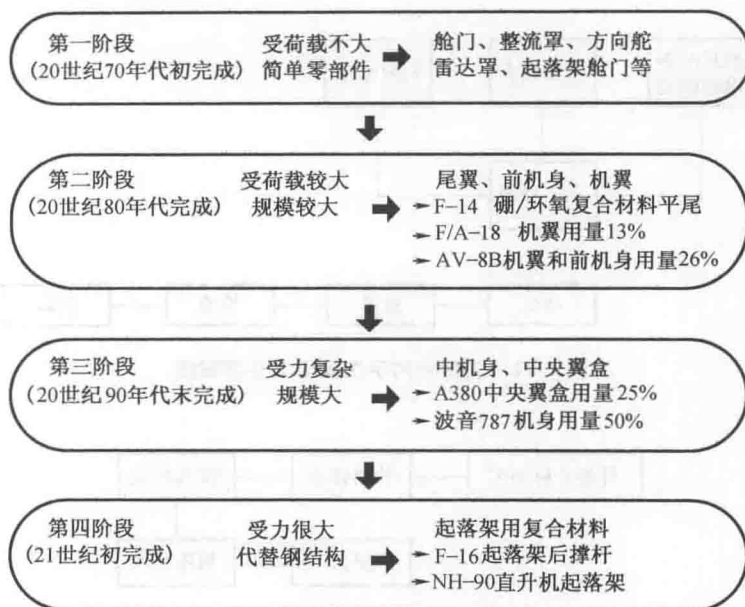


图 1.13 欧美等国家复合材料发展的历程

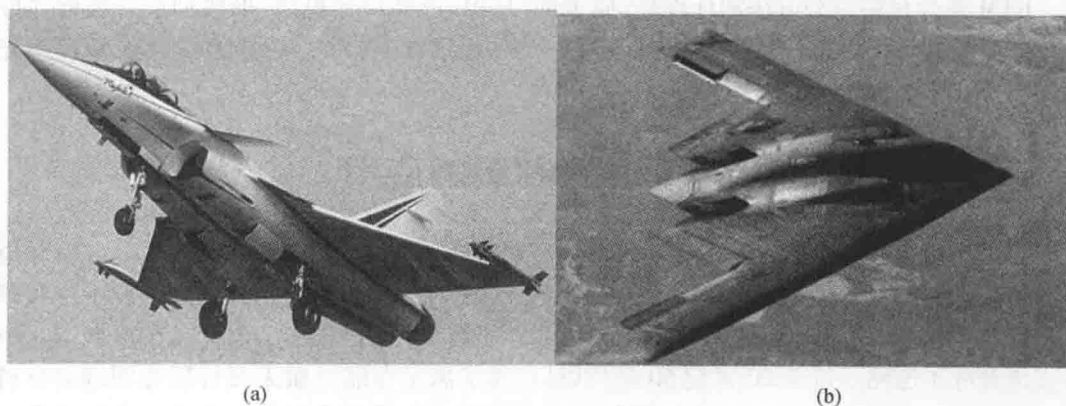


图 1.14 复合材料在飞机上的应用

(a) 法国“Rafale”号; (b) 美国隐形轰炸机 B-2

目前,虽然复合材料在飞机上的应用已非常广泛,但在 20 世纪 90 年代初,由于复合材料设计和制造的复杂性,加之较大的成本,使得复合材料的市场陷入低靡,尔后人们很好地平衡了重要性和成本的关系,才能使复合材料在之后重新得到发展。目前,随着复合材料先进技术的成熟,使其性能最优和低成本成为可能,大大推动了复合材料在航天航空等领域的应用。

以空客公司的 A380 客机(如图 1.15 所示)和波音公司最新推出的 787 客机为例,A380 长约 73 m,高约 24.1 m,机身直径约 7.14 m。飞机上最初采用复合材料的部位有舱门、整流罩、安定面等次承力结构,目前已广泛应用于机翼、机身等部位,逐渐向主承力结构过渡。从 1982 年开始,空客公司用复合材料制造飞行操纵面(如 A310-200 飞机的升降舵和方向

舵)。最近 A380 创造了一些新的纪录,如是第一个将复合材料用于中央翼盒的大型民机,机翼翼盒主要是由碳纤维复合材料再加上一些铝制翼肋制成,其体积为 $(2.4 \times 7 \times 7.8)\text{m}^3$,在 A380 的主要结构中,22%是由各种不同的增强型塑料复合材料制成的,而且大部分为碳纤维增强环氧树脂复合材料,还在飞机的垂直尾翼上应用了少许增强型玻璃纤维环氧树脂,同时在飞机的鼻锥体上应用了增强型石英环氧树脂,在其他部位,如横梁、上部机架、机翼翼肋、襟翼导轨都采用了复合材料。在 A380 上使用了令人惊讶的 CFRP 结构,尾翼和最大直径超过 6 m 的后机身就是由 CFRP 制造的。另外,A380 的 3% 的材料由 GLARE 组成,GLARE 是一种由铝和玻璃纤维层压形成的另一种完全不同的复合材料,空中客车在 A380 上大约使用了 5 000 平方英尺这种材料,主要用于机身上部外壳和尾翼的主边缘。由于在 A380 大量的使用了复合材料,仅中心翼盒就要比相同的铝制机翼翼盒轻 3 t,从而使飞机的有效载荷增加了 30 t。



图 1.15 A380 中复合材料的应用

相比空客的 A380,波音公司的 787 初步估计复合材料用量可达 50%,远远超过了 A380。在 787 客机上复合材料的应用则更让世人瞩目,其机身和机翼部位采用碳纤维增强层合板结构代替铝合金;发动机短舱、水平尾翼和垂直尾翼、舵面、翼尖等部位采用碳纤维增强夹芯板结构;机身与机翼衔接处的整流蒙皮采用玻璃纤维增强复合材料,如图 1.16 所示。与 A380 相比,其用量更大,主承载部位的应用更加广泛。在波音 787 上拥有多项技术创新,其中最引人注目的是波音 787 机体结构的一半左右都用更轻、更坚固的碳纤维合成材料代替铝合金,是第一款以碳纤维合成物为主体材料的民用喷气式客机。一方面是因为金属能够隐藏损伤问题,这种损伤很难发现,直到碎裂时才会被发现,而合成材料就不存在这种问题;另一方面,用合成材料制造的机身比较轻,这使得波音 787 将比现在的飞机节省燃油,而且也可以节省在维护方面的花费。复合材料在飞机上的应用进程如图 1.17 所示。

在 A380 之后,空中客车公司下一代商用飞机 A350 将大量使用复合材料,A350 结构质量的 39%将使用复合材料,主要是碳纤维增强塑料复合材料,这些材料在垂直尾翼、机翼和机身整流板等重要部件中已被使用,如图 1.18 所示。A350 复合材料使用量将比 A380 有很大增加,A380 结构质量的 25%使用复合材料,而 A380 之前的空中客车商用飞机使用比例仅 10%。大量使用复合材料以减轻飞机质量,减少燃油消耗,降低维修成本,延长飞机使用寿命。