

纤维缠绕复合材料 成型原理及工艺

许家忠 乔明 尤波 著



科学出版社

纤维缠绕复合材料 成型原理及工艺

许家忠 乔明 尤波 著

本专著由国家自然科学基金项目
(50902039)资助出版

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了树脂基纤维缠绕复合材料成型原理及工艺。全书共6章:首先介绍了树脂基纤维缠绕复合材料成型工艺、成型设备、纤维缠绕制品及其应用;其次分析了内固化工艺的内部机理,并通过实例探讨复合材料固化过程以及芯模传热过程的仿真分析和工艺优化方法;最后介绍了纤维缠绕复合材料工艺的最新进展。

本书在内容上追求理论与实践相结合,适合从事先进复合材料研究、开发、设计、应用的工程技术人员以及高等院校的大学生、研究生和教师阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

纤维缠绕复合材料成型原理及工艺/许家忠,乔明,尤波著.—北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-036256-8

I. ①纤… II. ①许…②乔…③尤… III. ①复合材料-成型 IV. ①TB33

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第310429号

责任编辑:余 丁 / 责任校对:李 影

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2013年1月第一次印刷 印张:11 3/4

字数:222 000

定价:48.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第一作者简介

许家忠,男,1977年12月生,黑龙江省鸡东县人,哈尔滨理工大学教授,2007年于哈尔滨理工大学获工学博士学位,2011年10月在哈尔滨工业大学复合材料结构研究所做博士后研究工作,主要研究方向为纤维缠绕复合材料成型工艺及技术。主持的项目有国家自然科学基金、黑龙江省普通高等学校新世纪优秀人才培养计划项目、黑龙江省青年基金、哈尔滨市优秀学科带头人项目等7项;发表论文30余篇,SCI、EI检索19篇,申请专利8项;获中国机械工业科学技术三等奖1项(负责人),黑龙江省科技进步二等奖2项(排名第二)。主持企业合作项目30余项,研究成果广泛应用于国内一流复合材料管道制造企业。

前 言

伴随着科技的发展,当今世界上新材料的发展趋势是多样化和复合化,复合材料由于具有质量轻、强度高、模量高、耐腐蚀、可设计性强等优点,在航空航天、军事、工业和民用等领域获得了广泛的应用。在复合材料成型技术中,纤维缠绕是开发最早且使用最广泛的加工技术之一,也是目前生产复合材料的重要工艺和技术。在日趋激烈的材料市场竞争中,价格、制造工艺自动化程度以及生产工艺的高效性和稳定性,成为当代制造业竞争的主要指标。纤维缠绕技术的优势在经济竞争中已经表现得越来越突出。

科技的进步使通用纤维缠绕技术不断完善和提高,原材料和辅助材料配套体系能够满足更高的使用要求,使复合材料高结构效率这一特性更加突出,更有吸引力,一系列新的缠绕技术的出现使纤维缠绕技术已经可以解决各种特殊结构形状成型问题。在越来越多的新领域中,纤维缠绕技术已经被使用,也为市场带来了新的机遇。纤维缠绕的生产效率更高,成本更低。与其他成型方法相比,采用缠绕工艺获得的复合材料制品具有纤维排列整齐、准确率高等特点,因此比刚度和比强度均较高。20世纪50年代发展起来的纤维缠绕技术,随着材料工艺技术、装备技术和设计理论与方法的进步,得到了快速发展。

本书主要介绍纤维缠绕复合材料成型原理及工艺,具体如下:介绍树脂基纤维缠绕复合材料成型工艺、纤维缠绕规律分析及线型设计,纤维缠绕成型设备、纤维缠绕制品及其应用,以及纤维缠绕生产工艺;对热固性复合材料的固化成型过程进行理论分析,通过内部变化历程,分析其机理并建立模型;介绍内固化工艺以及由内固化工艺改进而来的热芯缠绕工艺,着重通过实例探讨复合材料固化过程以及芯模传热过程的仿真分析和工艺优化方法;最后介绍纤维缠绕复合材料在原材料、工艺和成型装备方面的进展。

在本书撰写过程中,得到了哈尔滨理工大学复合材料壳体高效成型技术工程研究中心各位成员的支持与帮助,在此表示衷心的感谢。

书中难免有不当之处,敬请广大读者批评指正。

许家忠

2012年7月

目 录

前言

第 1 章 复合材料及缠绕工艺概述	1
1.1 复合材料定义及特点	1
1.1.1 复合材料的定义与分类	1
1.1.2 树脂基复合材料的特点	1
1.2 复合材料的非均质性和各向异性	3
1.3 树脂	6
1.3.1 树脂的特性要求	6
1.3.2 树脂类型	7
1.4 纤维	11
1.5 复合材料界面的形成	13
1.5.1 概述	13
1.5.2 界面的形成	15
1.5.3 界面作用机理	16
1.6 缠绕成型工艺	16
1.6.1 纤维缠绕成型工艺的特点	18
1.6.2 纤维缠绕成型工艺的分类	19
1.7 纤维缠绕技术的发展历程与发展趋势	20
1.7.1 纤维缠绕技术的发展历程	20
1.7.2 纤维缠绕技术的发展趋势	21
第 2 章 纤维缠绕规律分析及线型设计	23
2.1 缠绕规律分类	23
2.2 螺旋缠绕规律分析	25
2.2.1 相关术语解释	26
2.2.2 相关计算公式	27
2.2.3 用标准线法分析螺旋缠绕规律	27
2.2.4 切点法描述螺旋缠绕规律	32
2.3 缠绕工艺设计	45
2.3.1 内压容器的结构选型	45
2.3.2 缠绕类型的选择	48

2.3.3	强度设计	49
2.3.4	缠绕张力制度设计	52
2.3.5	缠绕线型设计	54
第3章	缠绕成型设备及生产工艺	57
3.1	缠绕设备	58
3.1.1	缠绕机的自由度概念	58
3.1.2	缠绕机的类型	59
3.1.3	缠绕设备部件	74
3.2	缠绕制品及其应用	78
3.2.1	缠绕制品的结构	78
3.2.2	缠绕制品的应用	80
3.2.3	典型缠绕制品	83
3.3	纤维缠绕生产工艺	89
3.3.1	缠绕用纤维	90
3.3.2	缠绕用树脂体系	91
3.3.3	芯模或内衬的制造	92
3.3.4	浸胶方法及浸胶量的控制	96
3.3.5	张力控制	100
3.3.6	纱片宽度及缠绕速度	103
3.3.7	固化制度	103
第4章	纤维缠绕成型工艺模型	106
4.1	热化学模型	106
4.2	纤维运动子模型	108
4.3	应力应变子模型	112
4.3.1	初始纤维张力引起的应力和应变	112
4.3.2	纤维张力变化引起的应力和应变	116
4.3.3	热膨胀或收缩和化学变化引起的应力和应变	118
4.3.4	总的应力和应变	121
4.3.5	总的纤维张力和纤维位置	121
4.3.6	芯轴与复合材料的分离	121
4.4	气泡活动子模型	122
4.4.1	气泡的形成	122
4.4.2	气泡体积的变化	123
4.4.3	气泡的移动	124
4.5	强度子模型	125

4.6	固化过程模型的数值解法	127
第5章	内固化工艺及其优化	128
5.1	内固化成型工艺原理	128
5.2	复合材料固化过程基本模型	129
5.2.1	热传导方程	129
5.2.2	环氧树脂固化反应动力模型	130
5.3	有限元计算公式	132
5.3.1	空间域上的离散	133
5.3.2	时间域上的离散	134
5.3.3	牛顿-拉弗森算法	135
5.3.4	质量集中	136
5.3.5	自适应时间步控制	138
5.4	壳体内部温度、固化度和应力应变分析	139
5.5	芯模加热过程的模型描述	144
5.5.1	蒸汽湍流模型	144
5.5.2	蒸汽相变模型	144
5.5.3	固流耦合的动力学模型	145
5.5.4	边界条件	145
5.6	芯模内部蒸汽流动和传热分析	146
5.6.1	压力分布	146
5.6.2	流场分布	146
5.6.3	温度分布	148
5.7	热芯缠绕工艺加温历程优化	150
5.7.1	模型建立和材料属性	151
5.7.2	缠绕过程数值模拟分析	152
5.7.3	缠绕过程加温历程的优化	154
5.7.4	基于优化加温历程的壳体内部多场分析	155
5.8	热芯缠绕过程芯模轴向温度分布优化	157
5.8.1	流场分析	158
5.8.2	温度场分析	160
5.8.3	综合分析	161
第6章	缠绕成型工艺最新进展	162
6.1	原材料方面的进展	162
6.2	工艺方面的进展	163
6.2.1	多工艺复合化	164

6.2.2	热塑性树脂缠绕工艺应用多元化	166
6.2.3	新型固化技术	166
6.2.4	连续缠绕玻璃钢管道生产工艺	167
6.3	设备方面的进展	167
6.3.1	CAD/CAM 技术应用前景广阔	168
6.3.2	成型设备与机器人结合	168
6.3.3	新型缠绕装备及技术	169
参考文献	174

第 1 章 复合材料及缠绕工艺概述

随着科技的发展,当今世界上新材料的发展趋势是多样化和复合化,复合材料由于具有质量轻、强度高、模量高、耐腐蚀、可设计性强等优点,在航空航天、军事、工业和民用等领域获得了广泛的应用。本章主要介绍树脂基复合材料的基础知识及纤维缠绕成型工艺概况。

1.1 复合材料定义及特点

1.1.1 复合材料的定义与分类

“由两个或两个以上独立的物理相,包括黏结材料(基体)和颗粒、纤维或片状材料组成的一种固体产物”称为复合材料(GB3961)^[1]。复合材料主要由两大部分组成:基体与增强材料。复合材料通常按其基体材料不同,分为 3 大类:聚合物基复合材料,通常所说的树脂基复合材料归属此类;金属基复合材料,如铝基、铜基、高温合金基复合材料等;无机非金属基复合材料,如陶瓷基复合材料。

3 类复合材料中,以树脂基复合材料用量最大,占有复合材料总量的 90% 以上。树脂基复合材料中又以玻璃纤维增强型塑料(俗称“玻璃钢”)用量最大,占树脂基复合材料用量的 90% 以上。

复合材料的最大特点是复合后的材料特性优于组成该复合材料的各单一材料的特性,增强材料的性能随其组成材料的含量及分布情况而变。基体材料的性能、含量,增强材料与基体材料之间的界面结合情况及其复合方式与生产工艺等是决定复合材料性能的基本因素。复合材料的性能与其生产工艺关系颇大,如树脂基复合材料中,采用纤维缠绕法制造的产品具有优异的力学性能,而拉挤产品则轴向强度高。同一类复合材料,同一种生产工艺也因材料选择、配比的不同,而导致产品性能上的差异。

1.1.2 树脂基复合材料的特点

与传统材料相比,在设计与制造上树脂基复合材料有 3 个明显的特点:材料性能指标的自由度设计性;材料与结构的一致性;产品形体设计的自由性。

树脂基复合材料的特性概括如下。

1. 优点

① 轻质高强,比强度、比模量高。玻璃钢的比强度可达钢的 4 倍;碳纤维增强环氧树脂复合材料的比强度可达钛的 4.9 倍,比模量可达铝的 5.7 倍多,这对要求自重轻的产品意义颇大。由表 1.1 可见,树脂基复合材料的力学性能相当出众。

表 1.1 几种常用材料与复合材料的比强度、比模量

材料名称	密度 /(g/cm ³)	拉伸强度 /(10 ⁴ MPa)	弹性模量 /(10 ⁶ MPa)	比强度 /(10 ⁶ cm)	比模量 /(10 ⁹ cm)
钢	7.8	10.10	20.59	0.13	0.27
铝	2.8	4.61	7.35	0.17	0.26
钛	4.5	9.41	11.18	0.21	0.25
玻璃钢	2.0	10.40	3.92	0.53	0.21
Ⅱ 碳纤维-环氧树脂	1.5	14.71	13.73	—	0.21
Ⅰ 碳纤维-环氧树脂	1.6	10.49	23.54	—	1.50
芳纶纤维-环氧树脂	1.4	13.73	7.85	—	0.57
硼纤维-环氧树脂	2.1	13.53	20.59	—	1.00
硼纤维-铝	2.7	9.81	19.61	—	0.75

② 耐疲劳性好。疲劳破坏是材料在交变载荷作用下,由于微观裂缝的形成和扩展而造成的低应力破坏。由于纤维增强复合材料中纤维与基体的界面能阻止裂纹扩展,所以其疲劳破坏从材料的薄弱环节开始,逐渐扩展,破坏前有明显的征兆;而金属材料的疲劳破坏不同,是由里向外突然发展的,往往事先无征兆。通常,大多数金属材料的疲劳极限是其拉伸强度的 40%~50%,碳纤维复合材料则可达其拉伸强度的 70%~80%。

③ 减振性好。由于复合材料中的特殊组分和结构,其振动阻尼很高,具有较好的吸振能力。分别用形状、尺寸相同的轻金属合金和碳纤维复合材料制造的悬臂梁做振动试验,前者需 9s 才能停止振动,后者仅需 2.5s。同时,通过对其结构和组分的优化,可设计构件的固有频率,从而避免共振导致的破坏。

④ 破损安全性好。纤维复合材料基体中有大量独立的纤维,每平方厘米上的纤维少则几千根,多至上万根。从力学观点上看,是典型的静不定体系。当构件超载并有少量纤维断裂时,载荷会迅速重新分配在未破坏的纤维上。这样,在短期内不至于使整个构件丧失承载能力。

⑤ 耐化学腐蚀。一般而言,耐化学腐蚀性主要取决于基体。常见的热固性玻璃钢一般都具备耐酸、稀碱、盐、有机溶剂、海水等介质侵蚀的性质。玻璃纤维

不耐氢氟酸等氟化物,在生产适应氢氟酸等氟化物的复合材料产品时,接触氟化物表面的增强材料不能用玻璃纤维,可采用饱和聚酯或丙纶纤维(薄毡),基体也须采用耐氢氟酸的树脂,如乙烯基酯树脂等。

⑥ 电性能好。复合材料可以根据应用的需要,设计成绝缘材料或是导电材料。通常,玻璃纤维增强的复合材料具有较好的绝缘性能。另外,玻璃纤维增强复合材料具有较好的高频介电性能,应用其不反射电磁波、能透过微波的特性,可制造天线罩等产品。

⑦ 可设计性强。可根据需要通过加强肋、夹芯和波纹等结构,使制品获得所需的强度与刚度;各种组件、构件可在主体成型中一并嵌入成型;可根据产品的结构与使用要求及生产数量,合理地灵活选择原辅材料及成型工艺。

2. 缺点

① 耐热性差。目前高性能树脂基复合材料长期使用温度在 250°C 以下,一般玻璃钢在 $60\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。

② 表面硬度低,易出现划伤。

③ 存在老化问题。在日晒雨淋、机械应力以及介质侵蚀下,尤其是在湿热条件下,会导致外观及性能变差。

④ 材料性能离散较大。由于其由多种材料复合而成,同时生产工艺、生产环境、模量结构等影响产品性能的因素众多,因此产品质量离散系数大,难以达到理想的性能。

1.2 复合材料的非均质性和各向异性

复合材料由纤维和树脂体系组成,通常平均纤维体积分数为 $0.5\sim 0.7$ 。要求如此高体积分数的原因很简单,一般来讲,纤维是增加刚度和强度的组分,纤维含量越高,结构的刚度和强度越大。为了获得高的纤维体积分数,纤维必须整齐排列在一起,这本质上导致了结构的各向异性,如图 1.1 所示的材料坐标系。对于复合材料,大多数物理性能(张量)是各向异性的,例如,刚度(4 阶张量)是各向异性,渗透率(2 阶张量)是各向异性,而密度(标量)却不是。复合材料的各向异性使分析变得非常复杂,但同时也提供了独特的可优化和可设计性。图 1.2 表示了弹性模量 E 对角度 θ 的依赖关系 $E(\theta)$; 可以看到, $E(\theta=0^{\circ})=E_{11}$ 是轴向模量, $E(\theta=90^{\circ})=E_{22}$ 是横向模量。对图中表示的碳纤维/环氧体系来讲, E_{11}/E_{22} 的比值约为 16, 同样,轴向和横向的渗透率之比也在同一数量级上,所以复合材料的各向异性程度是非常大的。

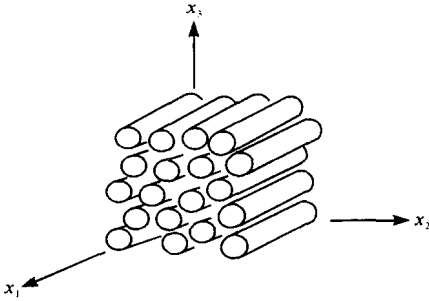


图 1.1 丝束排列单元示意图

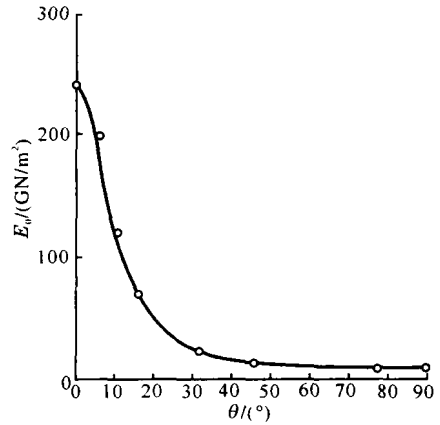


图 1.2 碳纤维/环氧单向层板的刚度和测试角度的关系^[2]

复合材料高纤维体积含量带来的第二个后果是纤维之间的间距非常小。例如,如果实际纤维排列结构为正方形阵列,其中最大可能的纤维体积含量为 $\pi/4$,那么,纤维之间的平均间距为

$$\delta = d_f \left(\sqrt{\frac{\pi/4}{V_f}} - 1 \right) \tag{1-1}$$

式中, d_f 为纤维直径。

因此对于典型的情况(碳纤维/环氧) $d_f = 7\mu\text{m}$, $V_f = 0.62$,可以得到 $\delta = 0.88\mu\text{m}$ 。

小纤维间距引出的问题是:在固体复合材料中,树脂被限制在纤维之间很小的空间内,这会导致高度的应力集中和由基体决定的性能的下降;在加工过程中,也会带来一些严重后果,例如,真正复合材料中纤维间距的变化是很大的,小的平均纤维间距意味着相当多的纤维与纤维的接触,当在纤维横向加压时纤维束就可能承载,直接的后果就是降低了树脂固化时的压力,并可能导致缺陷的产生;小纤维间距的另一个重要影响是带来大的综合剪切阻力,这将影响到纤维的铺敷性,进而导致制造时操作性能变差;最后,纤维束尺寸范围内的渗透率大约可以表示为 δ^2 ,因此小的纤维间距将导致很小的渗透率。这 4 个因素的作用限制了实际的最大纤维体积分数。通常实际纤维体积含量远低于理论的体积分数,对纤维正方形排列情形,最大体积分数为 0.785;对六边形排列,最大纤维体积分数为 0.907。减小纤维间距(增加纤维体积分数)对轴向渗透率和横向丝束承载能力的影响如图 1.3 和图 1.4 所示。

复合材料的非均质性和各向异性是建立和分析模型的主要困难所在。在多数情况下,将非均质问题作某种平均化处理,并允许考虑成连续体系,而将各向异

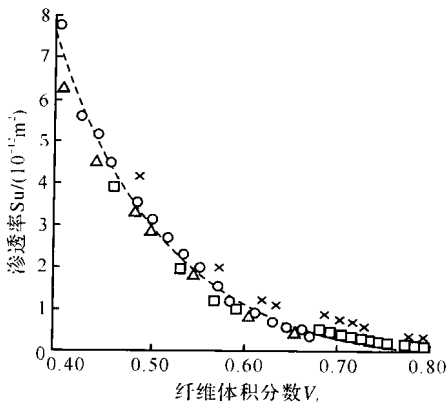


图 1.3 平均纤维体积分数对定向纤维束轴向渗透的影响

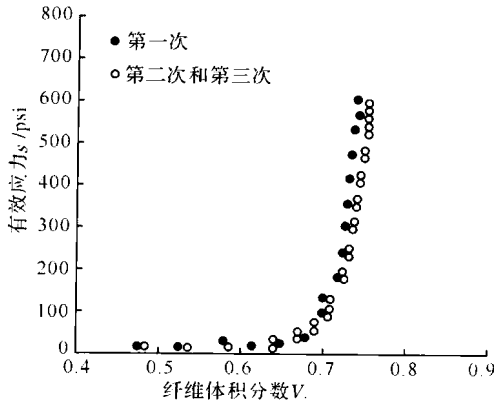


图 1.4 带润滑的碳纤维在压缩、压力释放和在压缩过程中压缩应力和纤维体积分数的关系

性仍然保留。这类似于固体力学的假设,固体力学形成了经典层合板理论的基础。然而,在加工过程中树脂是软的,纤维可以自由移动,通常,这意味着纤维体积分数是空间位置函数

$$V_f = V_f(x_1, x_2, x_3) \quad (1-2)$$

由此可以得到结论,像复合材料渗透率和丝束承载能力这样重要的性能也是从一点到另一点变化的。对这种空间分布的连续性处理有两个本质的约束条件

$$\Delta V_f \leq 1 \quad (1-3)$$

$$\Delta x_2 > d_f, \Delta x_3 > d_f \quad (1-4)$$

因此,体积分对于纤维方向的梯度需满足条件

$$\frac{dV_f}{dx_2} \leq \frac{1}{d_f}, \frac{dV_f}{dx_3} \leq \frac{1}{d_f} \tag{1-5}$$

1.3 树脂

1.3.1 树脂的特性要求

用于纤维增强复合材料的树脂系统均必须具备如下基本特性：良好的力学性能；良好的黏结性能；良好的韧性；良好的耐候性。

1. 树脂系统的力学性能

理想的树脂系统的应力/应变曲线如图 1.5 所示^[3]。此曲线展示了高的极限强度、高的刚度(以初始梯度表示)及高的失效应变。这意味着树脂最初是刚性的,但同时不致脆性失效。

必须注意:当复合材料承受拉伸荷载时,为了充分发挥纤维组分的力学性能,树脂必须能变形,其变形程度至少与纤维相同。图 1.6 给出了 E 玻璃(无碱玻纤)、S 玻璃(高强玻纤)、高强碳纤及芳纶等纤维的自身失效应变(不是在复合材料内)^[3],从图中可见 S 玻璃纤维的断裂延伸率为 5.3%,则制造复合材料所用的树脂的断裂延伸率至少也要达到这个值,以获得材料的最大拉伸特性。

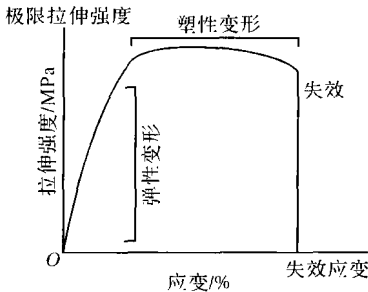


图 1.5 树脂系统理想的应力/应变曲线

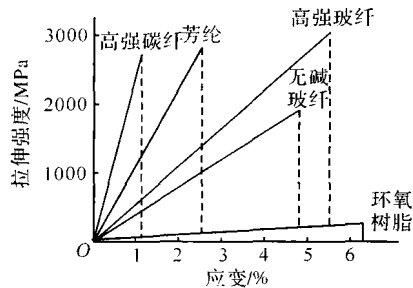


图 1.6 纤维自身的失效应变

2. 树脂的黏结性能

对于任何一种树脂系统,树脂与增强纤维之间的高黏结性都是必需的,这将保证当复合材料承受应力时,荷载得以有效地传递,避免裂纹纤维/树脂间脱胶。

3. 树脂的韧性

韧性表征材料抗裂纹扩展的能力。复合材料的韧性难以精确测量,然而树脂

系统自身的应力/应变曲线可作为材料韧性评价的参考指标。一般树脂失效前所能承受的变形愈大,则其韧性愈好,材料将愈不易产生裂纹。反之,失效应力低的树脂制作的复合材料则性脆,易龟裂。将树脂系统的韧性与用做增强的纤维的延伸率匹配是相当重要的。

4. 树脂的耐候性

良好的耐(气)候、耐水和耐其他腐蚀性的物质的能力及承受连续不断循环应力的能力,是任何树脂系统都必不可少的。树脂性能的耐候性对于在海上环境的应用尤为重要。

1.3.2 树脂类型

纤维增强复合材料所用的树脂亦称为聚合物,它们是由单体聚合的长链形分子复合而成的。人造聚合物通常称为合成树脂,简称树脂。树脂根据其热效应特性,可分为热塑性树脂和热固性树脂两种类型。

1. 热塑性树脂

热塑性树脂亦称热塑性塑料,制造复合材料时一般仅发生物理变化,而无化学反应。典型的热塑性树脂(塑料)有锦纶(PA)、聚丙烯(PP)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)、聚酯(PET, PBT)和聚甲醛(POM)等,通常采用10%~30%短切玻璃纤维增强。

一般热塑性树脂工作温度都不高,如常用的PVC为60℃以下,ABS仅为70℃左右,PA与PP也仅达100℃左右。采用耐高温的热塑性树脂(有的可在300℃高温下长期使用,400℃短期使用),其耐热性远胜过一般热固性树脂,耐高温热塑性树脂一般以连续纤维增强。单纯以热塑性树脂为基体多用于功能性复合材料。

热塑性树脂对无机酸(强氧化性酸除外)、碱、盐及各种水介质是稳定的。非极性的树脂对非极性的有机溶剂不稳定,会溶胀;极性的树脂对部分极性溶剂会溶胀。含氟塑料几乎都耐无机化合物和有机溶剂。聚丙烯、聚氯乙烯(PVC)耐化学腐蚀性亦甚佳。就耐腐蚀性而言,超高分子量聚乙烯(UHMWPE)最佳,锦纶、聚氯乙烯次之。热固性树脂中,聚氨酯(PU)较好。热塑性树脂以纤维增强后,力学性能(拉伸强度和弹性模量)视纤维加入量可提高1~2倍以上,改善其蠕变性能,提高热变形温度,降低线膨胀系数,增加尺寸稳定性,抑制应力开裂,提高抗疲劳性能。

2. 热固性树脂

热固性树脂是在使用时通过化学反应而形成的,树脂依次加入促进剂(有的

树脂有时不加促进剂)、固化剂并混合搅匀,然后进行不可逆的化学反应,形成硬的、不熔不溶的产品。某些热固性树脂,如酚醛树脂(PHR),当产品成型时产生一些挥发性物质(缩合反应)。其他热固性树脂,如不饱和树脂(UPR)和环氧树脂(EPR),基于其固化机理,在产品成型时则不产生任何挥发物。热固性树脂一经固化,再加热也不会变成液体,在高于一定温度的条件下,它们的力学性能衰减很大,这个温度称为玻璃化温度 T_g 。 T_g 变化取决于所用的树脂系统、树脂的固化度及是否被正确混合。温度高于 T_g 时,树脂呈弹性,由硬的结晶聚合物变为较具柔性的非结晶聚合物;温度低于 T_g 时,树脂呈脆性,这种变化是可逆的。高于 T_g 时,树脂性能如模量(刚度)明显下降,以其为基体材料的复合材料的压缩强度、剪切强度也随之下降;其他性能如耐水性和颜色稳定性等也显著下降。

纯热固性树脂的用途十分有限,通常加入一些其他化学组分,以改善其工艺性与复合材料的品质,并可降低成本。树脂系统常含促进剂、阻聚剂、固化剂(引发剂)、增强剂,有时还加入一些助剂,如消泡剂、分散剂、流平剂、触变剂、特种石蜡等。为了降低收缩率和产品成本以及一些功能性(如阻燃、防紫外线、耐热性、降低密度、防静电等)的需要,有时还加入一些无机的或有机的功能性填料。

热固性树脂通常在液态下使用,固化后变成固体。有些树脂可让固化过程到一个中间阶段,并可保持这种状态,此状态称为 B 阶段,因为树脂要完全固化(达到 C 阶段)还需要一段时间。B 阶段对复合材料制作工艺有利。虽然制造复合材料所用的热固性树脂有许多种,但制造大多数结构件主要采用 3 种类型的树脂:不饱和聚酯、乙烯基酯树脂和环氧树脂。

(1) 常用热固性树脂的特性比较

表 1.2 列出了常用热固性树脂的优缺点,应根据工况选用。选择亦应考虑价格因素,如邻苯型不饱和聚酯树脂、间苯型不饱和聚酯树脂、环氧树脂、乙烯基酯树脂,价格依次增高。

表 1.2 常用热固性树脂的优点和缺点

树脂类型	优点	缺点
环氧树脂	复合性能优良 化学稳定性优异 耐热性好 电性能良好 固化收缩率低 可以处于 B 阶段(做 B 阶段预浸料)	固化周期长 于较高温度下可获得较好的性能 易导致皮肤过敏