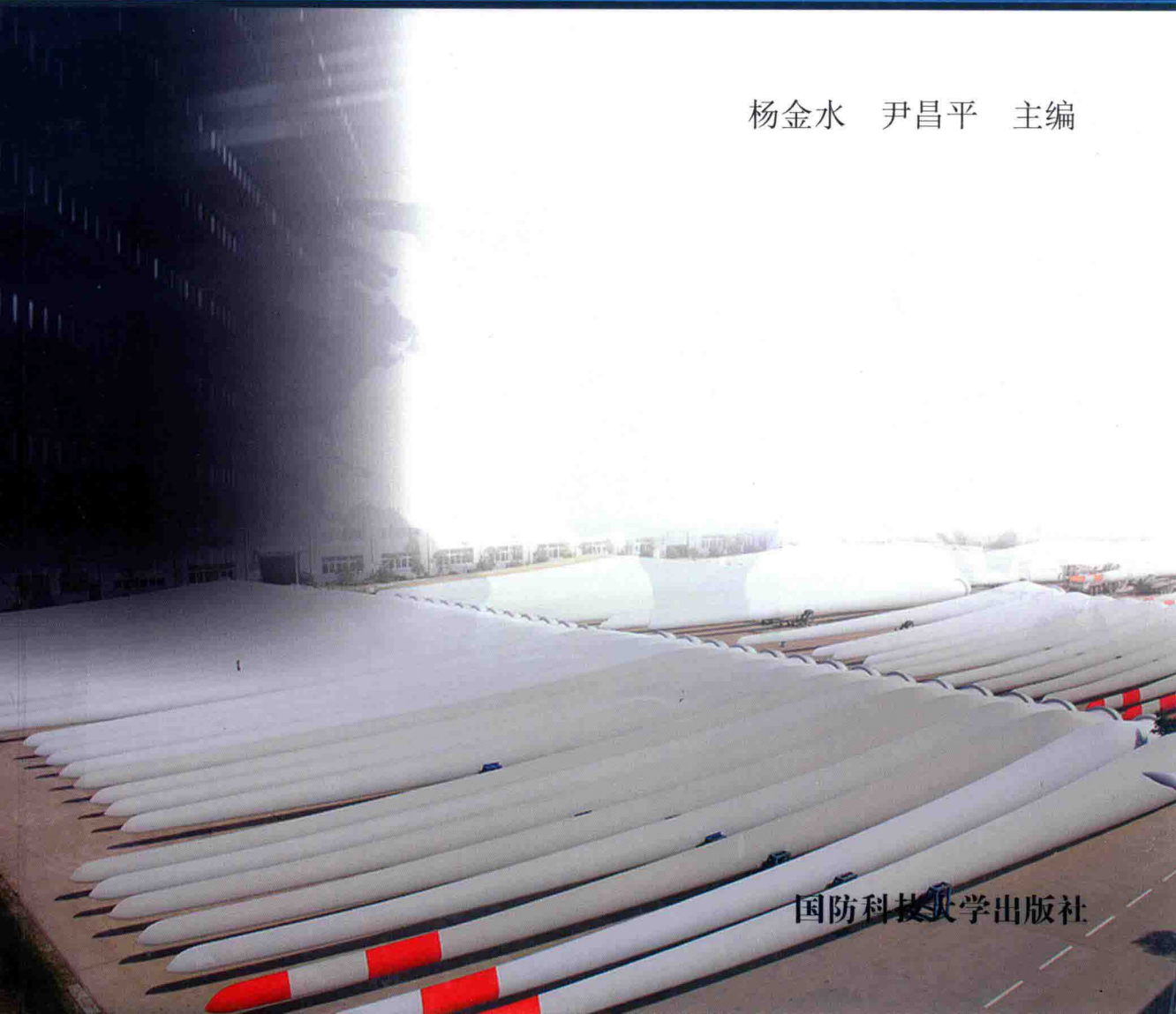


复合材料液相成型技术

FUHE CAILIAO YEXIANG CHENGXING JISHU

杨金水 尹昌平 主编



国防科技大学出版社

复合材料液相成型技术

主 编：杨金水 尹昌平

副主编：鞠 苏 彭超义 邢素丽

刘 钧 曾竟成 肖加余

国防科技大学出版社

· 长沙 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

复合材料液相成型技术/杨金水, 尹昌平主编. —长沙: 国防科技大学出版社, 2018. 6

ISBN 978 - 7 - 5673 - 0370 - 6

I. ①复… II. ①杨… ②尹… III. ①复合材料—成型—高等学校—教材
IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 104327 号

国防科技大学出版社出版发行

电话: (0731) 84572640 邮政编码: 410073

责任编辑: 石少平 责任校对: 熊立桃

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 16.5 字数: 391 千

2018 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5673 - 0370 - 6

定价: 36.00 元

前 言

材料是人类赖以生存和发展的物质基础。新材料的研究、发展与应用一直是当代高新技术的重要内容之一。先进复合材料是新材料家族中的一支新秀,近年来发展日新月异、突飞猛进,在新材料技术领域占有重要的地位,对促进世界各国军用和民用领域的高科技现代化起到了至关重要的作用。先进复合材料不仅广泛应用于航空航天、航海、国防军工、原子能等领域,而且已应用到机械、化工、交通、建筑、能源等普通工业技术领域以及人们的日常生活之中。

制备低成本化是复合材料领域研究者的永恒追求。欧美先进工业国家先后提出了先进复合材料的低成本化(Cost-effective Composites)及买得起的复合材料(Affordable Composites)等概念和技术发展方向,开展了低成本复合材料CAI(Composites Affordability Initiative)和先进低成本复合材料制造技术ACT(Advanced Composite Technology)等计划项目,旨在降低复合材料的成本。其中制备低成本化是降低成本的重点,在确定原材料体系的基础上开发先进低成本制造技术是当今世界各国复合材料科学与技术界共同关注的重大课题。

复合材料液相成型技术(Liquid Composite Molding, LCM)就是一种低成本先进复合材料制备技术,其原理是在驱动力(注射机、真空泵等设备提供)的作用下,利用树脂的流动、渗透实现树脂对纤维增强材料的浸渍,并固化成型复合材料构件。LCM工艺可一步浸渍成型带有夹芯、加筋、预埋件的复杂和大型复合材料构件,可按结构和性能要求铺放增强材料。采用其制备超大型复合材料构件,可实现一步整体成型,且具有高性能低成本的制造优势,其已成为超大型复合材料构件整体成型的主要发展方向。

LCM工艺中的物理和化学过程涉及许多耦合和瞬态现象,包括大量的科学问题,这些科学问题的深入研究是LCM工艺成功制备复合材料的前提条

件。LCM 工艺种类繁多,为许多种类、结构和功能特殊的聚合物基复合材料构件的成型提供了技术支撑。其中,应用最广泛最典型的是树脂膜熔渗(Resin Film Infusion, RFI)工艺、树脂传递模塑(Resin Transfer Molding, RTM)工艺和真空导入模塑工艺(Vacuum Infusion Molding Process, VIMP)三种,本书在这三种典型制备方法工艺实践的基础上,结合相关的热力学、流体力学、弹性力学、固化动力学和流变学理论模型,描述和分析了复合材料液相成型技术的基本原理、关键技术和典型应用,具有重要的理论指导意义和实践参考价值。

本书归纳了国防科技大学近 10 年来在高性能复合材料低成本制备技术方面取得的研究成果,通过分析 LCM 工艺过程中树脂对纤维的润湿、树脂充模流动、树脂固化反应、树脂流变特性变化等关键过程和关键技术,解释了 LCM 工艺制备复合材料过程中的物理化学机制。全书共分五章:第一章,介绍复合材料的概念、制备技术和 LCM 工艺的关键过程;第二章,描述复合材料制备技术的理论基础;第三章,描述树脂传递模塑工艺的基本原理和关键技术;第四章,描述树脂膜熔渗工艺的基本原理和关键技术;第五章,描述真空导入模塑工艺的基本原理和关键技术。

本书可供高等院校、科研院所和工业部门中从事材料科学与工程领域尤其是复合材料方向的教学、科研和工程技术的人员参考。



2017 年 10 月

目 录

第一章 绪 论

1.1 复合材料概念	(1)
1.1.1 复合材料定义	(1)
1.1.2 复合材料分类与特点	(1)
1.2 复合材料制备技术	(2)
1.2.1 复合材料制备技术定义	(2)
1.2.2 复合材料制备技术分类	(2)
1.3 复合材料液相成型技术	(3)
1.3.1 复合材料液相成型技术种类	(3)
1.3.2 复合材料液相成型技术特点	(3)
1.3.3 复合材料液相成型技术关键过程	(4)
1.4 本书内容简介	(4)
1.4.1 本书内容概要	(4)
1.4.2 本书内容适合对象	(4)

第二章 复合材料液相成型技术基础

2.1 概 述	(5)
2.1.1 液相法原理与种类	(5)
2.1.2 液相法优缺点及影响因素	(6)
2.2 树脂对纤维的润湿性	(7)
2.2.1 概述	(7)
2.2.2 表面物理化学基础	(7)
2.2.3 润湿现象	(24)
2.2.4 影响润湿的因素	(29)
2.3 树脂充模流动基础	(34)
2.3.1 静态液体的平衡方程	(34)

2.3.2	非粘性树脂液体的流动	(36)
2.3.3	粘性树脂液体的流动	(38)
2.4	达西定律	(46)
2.4.1	达西试验	(46)
2.4.2	达西定律表达	(47)
2.5	树脂渗流过程	(48)
2.5.1	渗流过程力学量与假设	(48)
2.5.2	树脂渗流过程基本方程	(49)
2.5.3	稳定单向渗流	(55)
2.5.4	稳定径向渗流	(57)
2.6	树脂体系固化分析	(60)
2.6.1	固化中的能量守恒	(60)
2.6.2	固化中的物料守恒	(62)
2.6.3	固化反应动力学	(63)
2.6.4	固化动力学参数的影响因素	(74)
2.6.5	固化工艺参数确定	(76)
2.6.6	树脂体系固化过程中的流变行为	(78)
2.6.7	化学增粘机制与物理减粘机制	(84)
	参考文献	(85)

第三章 树脂传递模塑工艺

3.1	RTM 基本原理	(89)
3.1.1	技术内涵	(89)
3.1.2	工艺步骤	(90)
3.1.3	优缺点	(90)
3.2	RTM 关键技术	(90)
3.2.1	RTM 工艺中树脂对纤维的润湿	(91)
3.2.2	RTM 树脂渗流	(93)
3.2.3	RTM 预成型体渗透率	(96)
3.2.4	RTM 工艺中的树脂固化	(105)
3.2.5	RTM 树脂流变行为	(118)
3.2.6	RTM 模拟流动分析	(127)
	参考文献	(135)

第四章 树脂膜熔融浸渍工艺

4.1 RFI 基本原理	(137)
4.1.1 技术内涵	(137)
4.1.2 工艺步骤	(137)
4.1.3 优缺点	(138)
4.1.4 发展简史	(138)
4.2 RFI 关键技术	(139)
4.2.1 RFI 树脂膜熔融浸渍规律	(139)
4.2.2 RFI 预成型体 Z 向渗透率	(149)
4.2.3 RFI 树脂配方体系研制	(156)
参考文献	(186)

第五章 真空导入模塑工艺

5.1 VIMP 基本原理	(188)
5.1.1 技术内涵	(188)
5.1.2 工艺步骤	(188)
5.1.3 优缺点	(189)
5.1.4 发展简史	(189)
5.2 VIMP 关键技术	(190)
5.2.1 VIMP 树脂流动规律	(190)
5.2.2 VIMP 中预成型体特性	(199)
5.2.3 VIMP 流道的合理设计	(235)
5.2.4 VIMP 树脂体系研发	(241)
参考文献	(252)

第一章 绪 论

1.1 复合材料概念

1.1.1 复合材料定义

根据 ISO 标准的定义:复合材料是由两种或两种以上物理和化学性质不同的物质组合而成的一种多相固体材料。

在复合材料中,通常有一相为连续相,称为基体,基体的主要作用是传递载荷和赋予复合材料形状;另一相为分散相,称为增强材料,即增强相(增强体)。分散相通常是连续纤维或颗粒增强材料,主要作用是增强、增韧和赋予复合材料功能。分散相以独立的形态分布在连续相中,两相之间存在着界面,界面的主要作用是传递载荷。

复合材料可分为广义复合材料和狭义复合材料,广义复合材料是指具有不同性质的多相体系(Multiphase material system)。广义复合材料包括人工复合材料(Artificial composites)和天然复合材料(Natural composites)。

狭义复合材料则是指由两种或两种以上的原材料,通过一定的工艺方法制备而成的多相材料体系。

狭义复合材料内涵:复合材料是组分经人工选择的、采用一定工艺方法制成的、具有明显界面的、能够保持各组元特性、获得新性能的多相材料体系。

根据狭义复合材料的定义,复合材料不包括天然复合材料、化合物、单相合金和多相合金。通常我们说的复合材料是指狭义的复合材料。

1.1.2 复合材料分类与特点

复合材料的分类方法很多,常见的分类方法通常是按增强材料和基体材料的形态或者种类来分,主要有以下几种:

按增强材料的形态,复合材料可分为连续纤维复合材料、短切纤维复合材料、颗粒填料复合材料和编织复合材料。

按增强纤维种类分,可分为玻璃纤维复合材料、碳纤维复合材料、有机纤维复合材料、陶瓷纤维复合材料和混杂纤维复合材料。

按基体的种类,复合材料可分为聚合物基(树脂基)复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料和碳基复合材料。如无特殊说明,本书所指的复合材料通常是聚合物基复合材料。

按材料的作用,还可分为结构复合材料和功能复合材料。

复合材料由多相材料复合而成,可综合发挥各组成材料的优点,概括起来其具有性能可设计性(Design flexibility)、材料与构件一体性(Integrity)和好的使用性(Usability)等性能特点。

性能可设计性是指可按材料性能的需要进行材料的设计和制造。例如,针对方向性材料强度和复合材料功能性的设计。

材料与构件一体性是指可进行材料、性能和制备技术的一体化设计,整体成型复合材料构件,减少部件数量。

好的使用性是指复合材料具有高比强度(High specific strength)、高比模量(High specific modulus)、疲劳强度和疲劳寿命高(High fatigue strength and life)、阻尼减震(Damping and shock absorption)性能好、具有多功能(两种或两种以上)、耐腐蚀等优越性能。

1.2 复合材料制备技术

1.2.1 复合材料制备技术定义

复合材料制备技术是指将增强材料和基体材料复合、组成一个整体结构,从而获得性能优异的多相材料体系的适当方法或技术。增强材料和基体材料确定后,复合材料的性能主要取决于其制备技术。

1.2.2 复合材料制备技术分类

从上世纪40年代开始,随着复合材料工业的迅速发展,新的复合材料制备技术不断出现,目前生产中采用的典型制备技术有接触成型工艺、模压成型工艺、缠绕成型工艺、拉挤成型工艺、预浸料成型工艺和液相成型工艺。

1.3 复合材料液相成型技术

1.3.1 复合材料液相成型技术种类

复合材料液相成型技术(Liquid Composite Molding, LCM)是一种低成本化的先进复合材料成型技术,是指将液态树脂体系注入铺放有纤维增强材料预成型体(简称增强体)的闭合成型模腔中,或加热熔化预先放入模腔内的树脂膜,液态聚合物流动浸渍模腔中的增强材料同时排除模腔中的气体,浸渍完成后固化成型得到复合材料制品的一类制备工艺。

LCM 工艺种类繁多,为许多种类、结构和功能特殊的聚合物基复合材料构件的成型提供了技术支撑。其中,应用最为广泛最典型的是树脂膜熔渗工艺(Resin Film Infusion, RFI)、树脂传递模塑工艺(Resin Transfer Molding, RTM)和真空导入模塑工艺(Vacuum Infusion Molding Process, VIMP)三种。

LCM 工艺可一步浸渍成型带有夹芯、加筋和预埋件的大型复合材料构件,可按性能和结构要求设计和铺放增强材料,具有高性能低成本的制造优势,而且闭模成型,环保高效,目前在航空航天领域、汽车工业和一些非传统的复合材料工业中的应用越来越广泛。

1.3.2 复合材料液相成型技术特点

LCM 工艺的本质是树脂流动浸渍纤维增强材料、固化成型的过程,制备成功与否关键取决于树脂凝胶前能否完全浸润增强材料。LCM 工艺树脂流动浸渍增强材料的过程具有以下特点:

(1)树脂在流动充模过程中同时完成对纤维的浸润,属于一步浸渍(One step wetting)机理。

(2)树脂流动浸渍纤维的过程包含多种复杂的流动浸渍过程和机理,如层间和纤维束间的宏观流动浸润(Macro-flow impregnating)和纤维束内的微观流动浸润(Micro-flow impregnating)。

(3)树脂渗流同时发生复杂的固化反应。

(4)树脂在具有各向异性的多孔介质中流动时自身具有复杂的化学流变特性。

LCM 工艺中的物理和化学过程存在许多耦合和瞬态现象,涉及到热力学、流体力学、弹性力学、固化动力学和流变学等多学科问题,包括大量的科学问题,这些科学问题的深入研究是保证 LCM 工艺成功制备复合材料的前提条件。

1.3.3 复合材料液相成型技术关键过程

根据所涉及的学科,LCM 工艺的关键过程可概括为:

- (1)树脂对纤维的润湿过程
- (2)树脂充模流动过程
- (3)树脂固化过程
- (4)树脂流变特性变化过程

1.4 本书内容简介

1.4.1 本书内容概要

本书围绕聚合物基复合材料的制备技术,结合 LCM 工艺的基本原理和典型应用,分析 LCM 工艺的关键过程和关键技术,解释制备过程中物理化学机制。全书共分五章:第一章,介绍复合材料的概念、制备技术和 LCM 工艺的关键过程;第二章,复合材料制备技术的理论基础;第三章,树脂传递模塑工艺的基本原理和关键技术;第四章,树脂膜熔融工艺的基本原理和关键技术;第五章,真空导入模塑工艺的基本原理和关键技术。

1.4.2 本书内容适合对象

目前国内外许多高等院校已将复合材料设计和制备技术列为相关专业本科生和研究生的必修课与选修课。本书重点介绍液相法复合材料制备技术的基本原理、关键技术和典型应用,适合于作为相关专业研究生课程的教材或参考书,读者最好具备有机化学、高分子物理与化学、复合材料学、复合材料力学等课程基础。

第二章 复合材料液相成型技术基础

2.1 概 述

复合材料液相成型技术(Liquid Composite Molding,简称 LCM)具有高性能、低成本的制造优势,已经成为先进复合材料制造技术的典型代表,是当前树脂基复合材料制造技术的主导方向之一。与传统复合材料成型工艺相比,LCM 类成型工艺的设计具有很强的适应性,可以针对各种不同的用途进行模具、材料和具体工艺实施方案的灵活调整。

2.1.1 液相法原理与种类

2.1.1.1 液相法原理

复合材料液相成型技术(简称 LCM,即液相法)^[1-3],是指将液态聚合物注入铺放好纤维预成型体的闭合模腔中,或加热熔化预先放入模腔内的树脂膜,液态聚合物在充模流动的同时完成对纤维的浸润,并固化成型得到复合材料制品的一类制备技术。该技术需要设计、制备闭合模腔的模具,模具要求有周边密封、紧固、排气和注射系统,通常还需配置加热系统。同时,还需要研制专用液态树脂体系,或者是能在适当温度下熔融成液态的树脂膜体系。LCM 技术原理如图 2.1 所示。

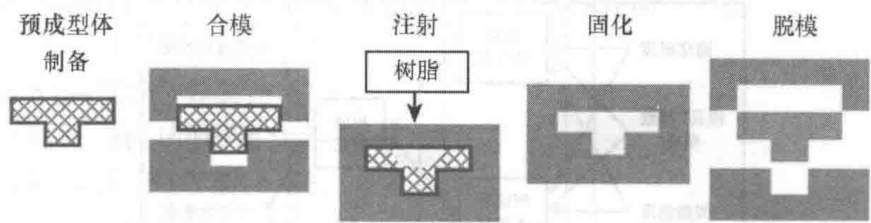


图 2.1 LCM 技术原理

2.1.1.2 液相法种类

树脂传递模塑(Resin Transfer Moulding,简称 RTM)、树脂膜熔渗(Resin Film Infusion,简称 RFI)和真空导入模塑(Vacuum Infusion Molding Process,简称 VIMP)是最常见的 LCM 工艺技术。此外,还有真空辅助树脂传递模塑(Vacuum Aided Resin Transfer Molding,简称

VARTM)、结构反应注射成型 (Structure Reaction Injection Molding, SRIM)、Seemann 法成型工艺 (Seemann Composites Resin Injection Molding Process, 简称 SCRIMP) 等^[4-6]。

LCM 工艺技术可一步浸渍成型带有夹芯、加筋、预埋件的大型复合材料构件,可按结构、性能要求铺放纤维,具有高性能、低成本的制造优势,是现今复合材料低成本制造技术的主要发展方向。

2.1.2 液相法优缺点及影响因素

2.1.2.1 液相法主要优缺点

液相法的优点主要有:制件尺寸精度较高(如 RTM),制件紧贴模面的表面质量好;可低压成型(通常低于 0.7MPa),与热压罐等工艺相比其设备、模具费用较低;可设计性好;制品机械性能好(缺陷少);可整体成型形状复杂的大型复合材料构件。

液相法的缺点主要有:预成型体制备和装配困难,模具设计必须建立在良好的流动模拟分析基础上,模具密封要求高,需要专用的低粘度树脂体系,充模过程不可见,工艺控制困难,制品增强相体积分数相对较小。

2.1.2.2 液相法主要影响因素

液相法能否成功、能否制备出高质量的复合材料制品,主要受诸于如原材料性能、工艺参数及其过程控制、树脂液体浸渍固化质量等因素的影响。其中,原材料的性能主要有:纤维预成型体的种类、类型、结构及其渗透率,树脂液体体系的粘度特性(粘温性能和粘时性能等)、固化反应动力学。工艺参数及其过程控制包括:初始模具/纤维温度、树脂对纤维的浸润性能、树脂注射温度和压力、树脂充模情况等。树脂液体浸渍固化质量主要有:是否有不完全充模、是否形成干斑或孔隙、是否存在不完全固化或固化不均匀等,此即液相法的主要影响因素^[4-6],这些因素及其之间的关系可用图 2.2 来表示。

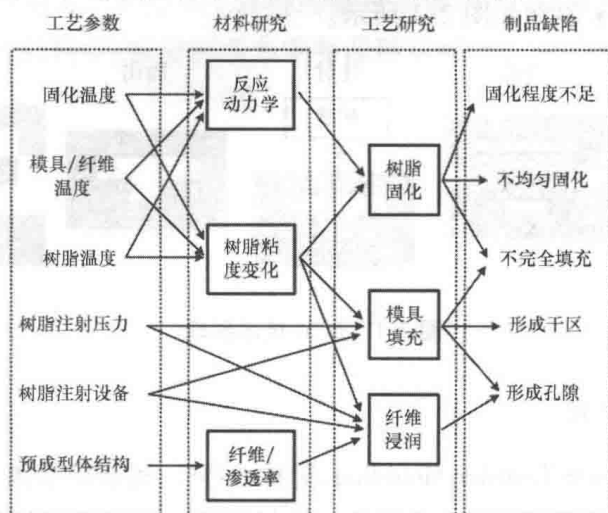


图 2.2 液相法复合材料制备技术的主要影响因素

2.2 树脂对纤维的润湿性

2.2.1 概述

润湿(Wetting, Wettability)是指固体表面由固(S) - 气(V)界面转变为固(S) - 液(L)界面的现象,是一种流体从固体表面置换另一种流体的过程。润湿的热力学定义是:固体与液体接触后,体系(固体 + 液体)的吉布斯自由能 G 降低时,就称润湿^[7-8]。

根据润湿情况的不同,润湿可分为三类:一是沾湿(Adhesion),指的是气液界面与气固界面变为液固界面的过程;二是浸湿(Immersion),指的是将固体完全浸入到液体中的过程;三是铺展(Spreading),指的是液滴在固体表面上自动展开形成液膜的过程。

液相法成型复合材料过程中,基体材料经历了树脂胶液配制、流动(树脂液体在外加压力驱动下运动)、浸渍(树脂液体在外加压力驱动下进入纤维之间的孔隙)、润湿(树脂溶液在增强体表面润湿铺展)、固化(树脂体系发生交联反应由液态变为固态)等过程。

液相法制备复合材料,首先经历的是树脂胶液在成型温度、压力条件下,润湿增强材料(如纤维)表面的过程。可见树脂溶液能否在增强材料表面润湿铺展,对液相法制备高质量复合材料制品至关重要。

因此,有必要理解树脂溶液润湿增强材料表面时所发生的现象及其物理化学机制。

2.2.2 表面物理化学基础

2.2.2.1 界面与表面

一般定义界面为两相的接触面,与气体接触的界面称为表面。物质以固(S)、液(L)、气(V)三种相态存在,三种相态相互接触可以产生五种界面^[7-8]:

- ① 液(L) - 气(V)界面: $L - V$;
- ② 固(S) - 气(V)界面: $S - V$;
- ③ 液(L_1) - 液(L_2)界面: $L_1 - L_2$;
- ④ 液(L) - 固(S)界面: $L - S$ 。

其中: $L - V$ 也称液体表面, $S - V$ 也称固体表面。

2.2.2.2 热力学定律及其基本关系

1. 热力学第一定律与焓的概念^[9-11]

(1) 热力学第一定律

热力学第一定律即能量守恒定律,是指热量可以从一个物体传递到另一个物体,也可以与机械能或其他能量互相转换,但在转换过程中,能量的总值始终保持不变。

系统由状态 1 变化到状态 2,如果假定其热力学能 U 变化为 $U = U_2 - U_1$;系统与环境的热交换为 Q ,功交换为 W ,如图 2.3 所示。

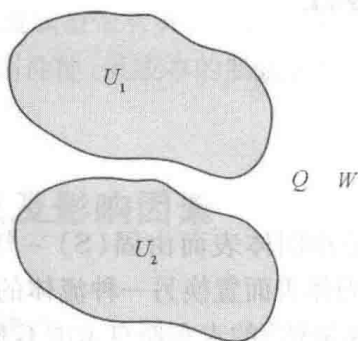


图 2.3 系统热力学能的变化以及系统与环境交换的热与功

则热力学第一定律表达为:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q + W \quad (2.1)$$

对于微小变化,有:

$$dU = \delta Q + \delta W \quad (2.2)$$

热力学能是状态函数,其绝对值目前尚无法测定,只能求出其变化值,其单位为 J(焦耳)。

(2) 焓的概念

如果把功交换(δW)分为自由膨胀功(δW_{exp})和非自由膨胀功($\delta W_{\text{non-exp}}$),则:

$$\delta W = \delta W_{\text{exp}} + \delta W_{\text{non-exp}} \quad (2.3)$$

其中,膨胀功等于(模型见图 2.4,图中 p_i 为内压, p_e 为外压):

$$\delta W_{\text{exp}} = -F \cdot dl = -\left(\frac{F}{A}\right) \cdot A \cdot dl = -p \cdot dV \quad (2.4)$$

式中, F 为横截面积为 A (单位为 m^2)的受力面所受的压力,单位 N ; p 为膨胀压,等于内压 p_i 和外压 p_e 之差,单位为 Pa 。

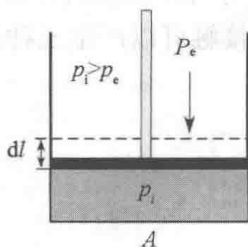


图 2.4 推导膨胀功的模型

将式(2.3)和(2.4)代入式(2.2),则:

$$dU = \delta Q + \delta W_{\text{exp}} + \delta W_{\text{non-exp}} = \delta Q - p \cdot dV + \delta W_{\text{non-exp}} \quad (2.5)$$

在等容($dV=0, \delta W_{\text{exp}}=0$)且不作非自由膨胀功($\delta W_{\text{non-exp}}=0$)时,系统的热力学能等于等容热效应(δQ_v):

$$dU = \delta Q_v \quad (2.6)$$

在等压($dp = 0$)且不作非自由膨胀功($\delta W_{\text{non-exp}} = 0$)时,根据式(2.5)并结合式(2.4),有:

$$dU = \delta Q_p - pdV \quad (2.7)$$

简单转换,则:

$$\delta Q_p = dU + pdV = d(U + pV) \Big|_{dp=0} \quad (2.8)$$

定义焓(H)为:

$$H = U + pV \quad (2.9)$$

$$dH = dU + pdV + Vdp \quad (2.10)$$

焓为状态函数。于是根据式(2.8),有:

$$\delta Q_p = dH \Big|_{dp=0, \delta W_{\text{non-exp}}=0} \quad (2.11)$$

$$Q_p = \Delta H \Big|_{dp=0, W_{\text{non-exp}}=0} \quad (2.12)$$

即等压且不作非体积功的条件下,系统的焓变(ΔH)等于等压热效应(Q_p)。

2. 熵及熵增原理^[9-11]

(1) 熵

1824年,法国工程师 *N. L. S. Carnot* 设计了一个热力学循环,即卡诺循环,如图 2.5 所示。该循环以理想气体为工作物质,从高温(T_h)热源吸收(Q_h)热量,一部分通过理想热机做功(W),另一部分的热量(Q_c)放给低温(T_c)热源,这种循环称为 Carnot 循环。

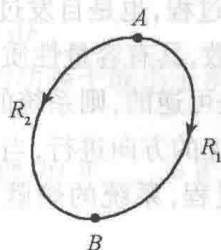
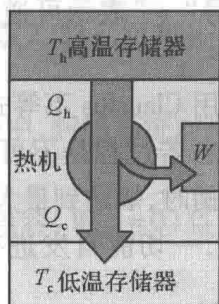


图 2.5 卡诺循环

在卡诺循环中,可以证明,热效应与温度商值(热温商)的加和等于零:

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_h}{T_h} = 0 \quad (2.13)$$

这说明任意可逆过程的热温商的值决定于始终状态,而与可逆途径无关,具有状态函数的性质。

熵的概念是由德国物理学家克劳修斯(*Clausius*)于 1865 年提出的。根据可逆过程的热温商值决定于始终态而与可逆过程无关这一事实定义了“熵”(Entropy)^①这个函数,用

① 1923 年,德国科学家普朗克来中国讲学用到 entropy 这个词,著名物理学家、教育家,中国近代物理学奠基人之一的胡刚复教授翻译时灵机一动,把“商”字加火旁来意译“entropy”这个字,创造了“熵”字。