

普通高等教育“十三五”规划教材

复合材料成型工艺及应用

FUHE CAILIAO CHENGXING GONGYI JI YINGYONG

徐竹 主编 党杰 主审



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等教育“十三五”规划教材

复合材料成型工艺 及应用

徐 竹 主编
党 杰 主审

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书结合目前航空航天领域的复合材料成型技术的实际应用,主要介绍了复合材料的典型成型工艺,包括手糊成型工艺、模压成型工艺、缠绕工艺、热压罐成型工艺、拉挤成型工艺、夹层结构成型工艺、复合材料液态成型工艺、热塑性复合材料成型工艺、低成本成型技术等内容。特别是重点介绍了树脂基复合材料各种成型工艺过程,包括复合材料生产中的材料选用、成型工艺方法、成型工艺原理、成型设备等方面的系统知识。本书既关注成型技术知识的基础性、系统性、完整性和实用性,也特别注意介绍近年来有关成型工艺各方面发展的新颖性。

本书实用性强,适合作为普通高等院校、高等职业院校相关专业的教材,也可作为从事复合材料生产开发的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料成型工艺及应用/徐竹主编. —北京:
国防工业出版社, 2017. 3

普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-118-11366-2

I. ①复… II. ①徐… 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(2017)第 108507 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市德鑫印刷有限公司印刷
新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15½ 字数 350 千字
2017 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777
发行传真: (010) 88540755

发行邮购: (010) 88540776
发行业务: (010) 88540717

《复合材料成型工艺及应用》

编 委 会

主 编 徐 竹

副主编 张颖云 王 凡

参 编 刁金香 牛芳芳 唐 婷 何 栋

主 审 党 杰

前 言

复合材料行业近年来发展迅速,尤其是复合材料的轻质高强特性使其在航空航天领域得到广泛的应用。进入 21 世纪以后,先进复合材料在航空航天飞行器中的结构用量逐渐超过金属材料,成为使用量最大的结构材料。编者根据国内外复合材料行业的发展现状,结合航空航天复合材料相关企业实际岗位需求和复合材料专业的特色,以培养具备复合材料成型技术相关职业技能的高技能应用性人才为导向,编写了这本兼具航空航天特色和复合材料专业特色的教材。本书可用于普通高等院校复合材料专业学生的教学用书。

本书在编写过程中,根据与复合材料成型相关的社会任务及相应要求,选取典型的航空航天复合材料成型方法热压罐成型工艺、缠绕成型工艺、手糊成型工艺、模压成型工艺、夹层结构成型工艺、RTM 成型工艺等,着重介绍复合材料成型工艺原理、成型生产中的原材料选用、成型设备的安全操作、成型过程中的具体事项及复合材料制品的实际应用等方面的系统知识。本书既关注成型技术知识的基础性、系统性、完整性和实用性,也特别注意介绍近年来有关成型工艺各方面发展的新颖性。在编写过程中力求突出实用,理论知识以够用为度,书中内容尽量与实际生产紧密结合,突出了工学结合的特点。

本书由西安航空职业技术学院中央财政支持建设的复合材料实训基地徐竹主编,其中绪论、项目 2、项目 7 和项目 8 由徐竹编写,项目 1 和项目 9 由牛芳芳编写,项目 3 由刁金香编写,项目 4 由何栋编写,项目 5 由王凡编写,项目 6 由唐婷编写,项目 10 由中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司张颖云编写。全书由西安航空职业技术学院党杰主审。

在本书编写过程中,编者收集了国内航空航天复合材料企业的相关资料,并得到国内开设复合材料专业的院校老师的帮助,在此对西安航天复合材料研究所、菲舍尔航空部件(镇江)有限公司、安徽理工大学、西安航空学院、成都航空职业技术学院等相关人员表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,诚挚地希望读者批评指正,并对本书所引用的参考文献的作者表示衷心感谢。

徐 竹

目 录

绪论	1
模块 1 复合材料成型的原材料	13
1.1 增强材料	13
1.1.1 玻璃纤维	13
1.1.2 碳纤维	16
1.1.3 芳纶纤维	19
1.1.4 其他纤维	20
1.2 基体材料	21
1.2.1 不饱和聚酯树脂	21
1.2.2 环氧树脂	22
1.2.3 酚醛树脂	25
1.2.4 聚酰亚胺树脂	26
1.2.5 双马来酰亚胺树脂	27
1.2.6 高性能热塑性树脂	28
1.3 预浸料	28
1.3.1 预浸料的分类与性能	28
1.3.2 预浸料的基本要求	29
1.3.3 预浸料的制备方法	29
1.4 辅助材料	33
1.4.1 固化剂	33
1.4.2 促进剂	34
1.4.3 脱模剂	34
1.4.4 其他辅助材料	34
模块 2 手糊成型工艺	36
2.1 手糊成型原材料选择	36
2.1.1 基体材料选择	36
2.1.2 增强材料选择	37
2.1.3 辅助材料选择	39
2.2 手糊成型模具	42

2.2.1	手糊成型模具结构与材料	42
2.2.2	手糊成型模具设计	43
2.2.3	玻璃钢模具的制造	44
2.3	手糊成型工艺	46
2.3.1	生产准备与劳动保护	46
2.3.2	手糊成型过程	49
2.3.3	手糊成型工艺优缺点	55
2.3.4	手糊成型制品及其应用	56
2.4	喷射成型工艺	57
2.4.1	喷射成型工艺分类	58
2.4.2	喷射成型生产准备	58
2.4.3	喷射成型工艺	62
2.4.4	喷射成型工艺的应用与发展	65
2.5	袋压法、热压釜法、液压釜法和热膨胀模塑法成型工艺	65
2.5.1	袋压法	65
2.5.2	热压釜和液压釜法	66
2.5.3	热膨胀模塑法	67
模块 3	模压成型工艺	69
3.1	模压料及制备工艺	70
3.1.1	短纤维模压料及制备	70
3.1.2	片状模塑料及制备工艺	75
3.1.3	模压料的工艺性	79
3.2	模压成型模具及设备	82
3.2.1	模压成型模具	82
3.2.2	模压设备	87
3.3	模压成型工艺	88
3.3.1	短纤维模压料模压成型工艺	88
3.3.2	SMC 模压成型工艺	91
3.3.3	模压成型制品缺陷	92
3.3.4	模压成型工艺的特点及应用	93
模块 4	缠绕成型工艺	95
4.1	缠绕成型工艺概述	95
4.1.1	缠绕成型的特点	95
4.1.2	缠绕成型工艺的分类	96
4.1.3	缠绕成型工艺的发展现状及发展趋势	98
4.2	缠绕成型的原材料与设备	99
4.2.1	缠绕成型的原材料	99

4.2.2	芯模与内衬	100
4.2.3	缠绕设备	102
4.3	缠绕成型工艺	109
4.3.1	缠绕规律	109
4.3.2	缠绕成型工艺流程	115
4.3.3	缠绕成型工艺参数	118
4.3.4	缠绕成型的特点及应用	122
模块 5	热压罐成型工艺	126
5.1	热压罐成型工艺	126
5.1.1	热压罐成型工艺中的物理和化学过程	126
5.1.2	热压罐成型的原材料	127
5.1.3	热压罐成型的工艺流程	128
5.2	热压罐成型设备认识与安全运行	131
5.2.1	热压罐结构与技术参数	131
5.2.2	热压罐设备操作与安全运行	137
5.2.3	压力容器定期检验	140
5.2.4	压力容器的维护保养	141
5.2.5	热压罐典型事故与预防	143
5.2.6	热压罐事故的应急预案	145
5.3	热压罐成型的特点和应用	146
5.3.1	热压罐成型的主要优点	146
5.3.2	热压罐成型的主要缺点	146
5.3.3	热压罐成型的应用	147
模块 6	拉挤成型工艺	149
6.1	拉挤成型概述	149
6.1.1	拉挤成型工艺的发展	149
6.1.2	拉挤成型工艺特点及分类	150
6.2	拉挤成型工艺原材料及模具	151
6.2.1	拉挤成型的原材料	151
6.2.2	拉挤成型模具	158
6.3	拉挤成型工艺	160
6.3.1	拉挤成型工艺过程	160
6.3.2	拉挤成型工艺参数	164
6.3.3	拉挤制品缺陷类型分析	166
6.4	拉挤成型工艺应用	168
模块 7	夹层结构成型工艺	171
7.1	蜂窝夹层结构的制造工艺	172

7.1.1	蜂窝夹层结构用原材料	173
7.1.2	蜂窝夹芯的制造方法	174
7.1.3	蜂窝夹层结构的制造	178
7.1.4	蜂窝夹层结构成型中常见的缺陷及解决措施	179
7.2	泡沫塑料夹层结构的制造	179
7.2.1	泡沫塑料夹层结构的原材料	179
7.2.2	泡沫塑料夹芯的制造工艺	180
7.2.3	泡沫塑料夹层结构的制造	181
7.3	夹层结构的应用	183
模块 8	复合材料液体成型工艺	186
8.1	树脂传递模塑成型工艺	186
8.1.1	RTM 成型原材料	187
8.1.2	RTM 成型设备及模具	192
8.1.3	纤维预成型技术	196
8.1.4	RTM 成型工艺	197
8.1.5	RTM 产品的典型应用	198
8.2	RTM 的衍生工艺	201
8.2.1	VARTM(真空辅助 RTM) 工艺	201
8.2.2	Light-RTM 成型工艺	201
8.2.3	树脂浸渍模塑成型工艺(SCRIMP)	202
8.2.4	树脂膜渗透成型工艺(RFI)	204
8.2.5	结构反应注射模塑(SRIM)	205
模块 9	热塑性树脂基复合材料的成型工艺	207
9.1	注射成型工艺	207
9.1.1	注射成型原理	207
9.1.2	注射成型设备	208
9.1.3	注射成型工艺	210
9.2	挤出成型工艺	214
9.2.1	挤出成型原理	214
9.2.2	挤出成型设备	215
9.2.3	挤出成型工艺	216
9.3	玻璃纤维毡增强热塑性树脂基复合材料的成型工艺	218
9.3.1	GMT 的原材料	219
9.3.2	GMT 成型过程	220
9.3.3	GMT 的应用及发展	224
模块 10	复合材料低成本技术	226
10.1	自动铺放技术	226

10.1.1	自动铺带技术	227
10.1.2	自动铺丝技术	228
10.2	辐射固化技术	230
10.2.1	电子束固化技术	231
10.2.2	光固化技术	234
10.2.3	紫外线固化技术	235
参考文献		236

绪 论

材料是人类社会进步的物质基础,是人类进步的里程碑,材料的水平决定着一个领域乃至一个国家科技发展的整体水平。现代高科技的发展对新材料也提出了更高、更苛刻的要求,传统的单一材料无法满足综合需求。复合材料的出现是近代材料科学的伟大成就,也是材料设计的一个重大突破,它将人类物质文明推向新的台阶。

一、复合材料的定义与分类

1. 复合材料的定义

复合材料是由有机高分子、无机非金属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,它既能保留原组分材料的主要特点,又能通过复合效应获得原组分所不具备的性能;通过材料设计使各组分的性能互相补充并彼此关联,从而获得新的优越性能,与一般材料的简单混合有本质的区别。

国标 GB/T 3961—93 中定义复合材料是由两个或两个以上独立的物理相,包含黏结材料(基体)和粒料、纤维或片状材料所组成的一种固体材料。

通常所说复合材料主要由基体材料和增强材料两大部分组成。

2. 复合材料的命名

复合材料可根据增强材料和基体材料的名称来命名。将增强材料的名称放在前面,基体材料的名称放在后面,再加上“复合材料”即可,例如,玻璃纤维和环氧树脂构成的复合材料称为“玻璃纤维环氧树脂复合材料”。为书写简便,也可仅写增强材料和基体材料的缩写名称,中间加一斜线隔开,后面再加“复合材料”。如上述玻璃纤维和环氧树脂构成的复合材料也可写为“玻纤/环氧复合材料”。碳纤维金属基体构成的复合材料称“金属基复合材料”,也可写为“碳/金属基复合材料”。碳纤维和碳构成的复合材料称“碳/碳复合材料”或“C/C 复合材料”。

3. 复合材料的分类

复合材料的分类方法很多。通常有以下几种分类方法。

(1) 按基体材料,复合材料可分为树脂基(聚合物基)复合材料、金属基复合材料、无机非金属基复合材料。

树脂基复合材料是以有机聚合物(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。金属基复合材料是以金属为基体制成的复合材料,如铝基复合材料、铁基复合材料等。无机非金属基复合材料是以陶瓷材料(包括玻璃和水泥)为基体制成的复合材料。

树脂基复合材料是最先开发和产业化推广的,因此应用面最广、产业化程度最高,树脂基复合材料的用量占有复合材料总量的 90% 以上。树脂基复合材料中,以玻璃纤维

作为增强相的树脂基复合材料在世界范围内已形成了产业,在我国俗称玻璃钢。

(2) 按增强材料种类,复合材料可分为玻璃纤维复合材料、碳纤维复合材料、有机纤维(芳香族聚酰胺纤维、芳香族聚酯纤维、高强度聚烯烃纤维等)复合材料、金属纤维(如钨丝、不锈钢丝等)复合材料、陶瓷纤维(如氧化铝纤维、碳化硅纤维、硼纤维等)复合材料等。

(3) 按增强材料形态,复合材料可分为连续纤维复合材料、短纤维复合材料、颗粒填料复合材料、编织复合材料。

连续纤维复合材料是作为分散相的纤维,每根纤维的两个端点都位于复合材料的边界处。短纤维复合材料是短纤维无规则地分散在基体材料中制成的复合材料。颗粒填料复合材料是增强材料以微小颗粒状分散在基体中制成的复合材料。编织复合材料是以平面二维或立体三维纤维编织物为增强材料与基体复合而成的复合材料。

(4) 按用途,复合材料可分为结构复合材料和功能复合材料。

结构复合材料主要用作承力和次承力结构,要求它质量轻,强度和刚度高,且能耐受一定温度,在某种情况下还要求有膨胀系数小、绝热性能好或耐介质腐蚀等其他性能。功能复合材料指具有除力学性能以外其他物理性能的复合材料,即具有各种电学性能、磁学性能、光学性能、声学性能、摩擦性能、阻尼性能以及化学分离性能等的复合材料。

目前结构复合材料占绝大多数,而功能复合材料有广阔的发展前途。随着材料技术的发展,将会出现结构复合材料与功能复合材料并重的局面,而且功能复合材料更具有与其他功能材料竞争的优势。

在复合材料中,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。本书主要介绍纤维增强树脂基复合材料。

二、复合材料的发展概况

1. 国外发展概况

树脂基复合材料自 1932 年在美国诞生之后,至今已有 80 多年的发展历史。1940 年至 1945 年期间,美国首次用玻璃纤维增强聚酯树脂以手糊工艺制造军用雷达罩和飞机油箱,为树脂基复合材料在军事工业中的应用开辟了途径。1944 年,美国空军第一次用树脂基复合材料制造飞机机身、机翼,并在莱特-帕特空军基地试飞成功,从此纤维增强复合材料开始受到军界和工程界的注意。1946 年,纤维缠绕成型技术的出现为纤维缠绕压力容器的制造提供了技术储备。1949 年,玻璃纤维预混料研制成功并制出了表面光洁,尺寸、形状准确的复合材料模压件。1950 年,真空袋和压力袋成型工艺研究成功并试制成功直升机的螺旋桨。20 世纪 60 年代,美国利用纤维缠绕技术制造出北极星、土星等大型固体火箭发动机的壳体,为航天技术开辟了质轻高强结构的最佳途径。在此期间,玻璃纤维-聚酯树脂喷射成型技术也得到了应用,使手糊工艺的质量和生产效率大为提高。1961 年,片状模塑料(Sheet Molding Compound, SMC)在法国问世,利用这种技术可制出大幅面表面光洁,尺寸、形状稳定的制品,如汽车、船的壳体以及卫生洁具等大型制品,从而扩大了树脂基复合材料的应用领域。1963 年前后,美国、法国、日本等先后开发了高产量、大幅宽、连续生产的玻璃纤维复合材料板材生产线,使复合材料制品形成了规模化生

产。拉挤成型工艺的研究始于 20 世纪 50 年代,60 年代中期实现了连续化生产。在 20 世纪 70 年代拉挤技术又有了重大的突破。在 20 世纪 70 年代树脂反应注射成型 (Reaction Injection Molding, RIM) 和增强树脂反应注射成型 (Reinforced Reaction Injection Molding, RRIM) 两种技术研究成功,改善了手糊工艺,制成的产品两面光洁,已大量用于卫生洁具和汽车的零件生产。20 世纪 80 年代初,热塑性复合材料得到发展,其生产工艺主要是注射成型和挤出成型,用于生产短纤维增强塑料。1972 年,美国 PPG 公司研制成功玻璃纤维毡增强热塑性片状模塑料 (GMT),1975 年投入生产,其最大特点是成型周期短,废料可回收利用。20 世纪 80 年代,法国研究成功湿法生产热塑性片状模塑料 (GMT) 并成功地用于汽车制造工业。离心浇铸成型工艺于 20 世纪 60 年代始于瑞士,80 年代得到发展,英国用此法生产 10m 长复合材料电线杆,而用离心法生产大口径压力管道用于城市给水工程,技术经济效果十分显著。到目前为止,树脂基复合材料的生产工艺已有近 20 种之多,而且新的生产工艺还在不断出现,推动着聚合物复合材料工业的发展。

进入 20 世纪 70 年代后,人们对复合材料的研究打破了仅采用玻璃纤维增强树脂的局面,也开发了一批如碳纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维、硼纤维、芳纶纤维、高密度聚乙烯纤维等高性能增强材料,并使用高性能树脂、金属与陶瓷为基体,制成先进复合材料 (Advanced Composite Materials, ACM)。这种先进复合材料具有比玻璃纤维复合材料更好的性能,是用于飞机、火箭、卫星、飞船等航空航天飞行器的理想材料。从应用上看,复合材料在美国和欧洲主要用于航空航天、汽车等行业,而在日本主要用于住宅建设(如卫浴设备)等。复合材料的树脂基体仍以热固性树脂为主。

2. 我国发展概况

我国树脂基复合材料的应用始于 1958 年,当年以手糊工艺研制了树脂基复合材料渔船,以层压和卷制工艺研制成功树脂基复合材料板、管和火箭筒等。1961 年,研制成耐烧蚀端头。1962 年,引进不饱和聚酯树脂和蜂窝成型机及喷射成型机,开发了飞机螺旋桨和风机叶片。1962 年,研究成功缠绕工艺并生产了一批氧气瓶等压力容器。1970 年,用手糊夹层结构板制造了直径 44m 的大型树脂基复合材料雷达罩。1971 年以前,我国的树脂基复合材料工业主要是军工生产,70 年代后开始转向民用。1987 年起,各地大量引进国外先进技术,如池窑拉丝、短切毡、表面毡生产线及各种牌号的聚酯树脂(引自美国、德国、荷兰、英国、意大利、日本)和环氧树脂(引自日本、德国)等生产技术;在成型工艺方面,引进了缠绕管、罐生产线、拉挤工艺生产线、SMC 生产线、连续制板机组、树脂传递模塑 (RTM) 成型机、喷射成型技术、树脂注射成型技术及渔竿生产线等,形成了从研究、设计、生产到原材料配套的完整的工业体系,截至 2000 年底,我国树脂基复合材料生产企业达 3000 多家,已有 51 家通过 ISO9000 质量体系认证,产品 3000 多种,总产量达 73 万 t/年,居世界第二位。产品主要用于建筑、防腐、轻工、交通运输、造船等领域。

在建筑方面,树脂基复合材料已广泛应用于内外墙板、透明瓦、冷却塔、空调罩、风机、玻璃钢水箱、卫生洁具、净化槽等。

在石油化工方面,主要用于管道及贮罐。其中玻璃钢管道有定长管、离心浇铸管及连续管道。按压力等级分为中低压管道和高压管道。我国在早期引进多条管罐生产线,现场缠绕大型贮罐最大直径 12m,贮罐最大容积 10000m³。国内研制与生产的玻璃钢管罐生产设备部分技术指标已超过国外同类设备的技术水平。

在交通运输方面,为了使交通工具轻型化,节约耗油量,提高使用寿命和安全系数,目前在交通工具上已经大量使用复合材料。汽车上主要有车身、引擎盖、保险杠等配件;火车上有车厢板、门窗、座椅等;在船艇方面主要有气垫船、救生艇、侦察艇、渔船等,目前我国制造的玻璃钢渔船最长达 33m;在机械及电器领域,如屋顶风机、轴流风机、电缆桥架、绝缘棒、集成电路板等产品都具有相当的规模。

在航空航天及军事领域,如轻型飞机、尾翼、卫星天线、火箭喷管、防弹板、防弹衣、鱼雷等都取得了重大突破,为我国的国防事业做出了重大贡献。

三、复合材料的特点及应用

1. 复合材料的特点

复合材料是由多种组分材料组成,许多性能优于单一组分材料。例如纤维增强的树脂基复合材料,具有质量轻、强度高、可设计性好、耐化学腐蚀、介电性能好、耐烧蚀及容易成型加工等优点。

1) 轻质高强,比强度和比刚度高

复合材料的突出优点是比强度和比模量(即强度、模量与密度之比)高。比强度和比模量是衡量材料承载能力的一个指标,比强度越高,同一零件的比重越小;比模量越高,零件的刚性越好。玻璃纤维增强树脂基复合材料的密度为 $1.5 \sim 2.0 \text{g/cm}^3$,是普通碳钢的 $1/4 \sim 1/5$,比铝合金还要轻 $1/3$ 左右,而机械强度却能超过普通碳钢的水平,具体数据见表 0-1。若按比强度计算,玻璃纤维增强的树脂基复合材料不仅超过碳钢,而且可超过某些特殊合金钢。

表 0-1 几种常用材料与复合材料的比强度、比模量

材料名称	密度 $/(\text{g/cm}^3)$	拉伸强度 $/\text{GPa}$	弹性模量 $/(\times 10^2 \text{GPa})$	比强度 $/\text{10}^6 \text{cm}$	比模量 $/\text{10}^8 \text{cm}$
结构钢	7.85	1.19	2.06	1.49	2.57
铝合金	2.78	0.39	0.72	1.37	2.54
钛合金	4.52	0.71	1.16	1.54	2.52
玻璃纤维聚酯复合材料	2.00	1.24	0.48	6.08	2.35
碳纤维/环氧复合材料 II	1.45	1.47	1.37	9.94	9.26
碳纤维/环氧复合材料 I	1.60	1.05	2.35	6.43	14.39
芳纶纤维/环氧复合材料	1.40	1.37	0.78	9.59	5.46
硼纤维/环氧复合材料	2.10	1.38	2.1	6.6	10
硼纤维/铝基复合材料	2.65	1.00	2.0	3.8	7.5

碳纤维复合材料、有机纤维复合材料具有比玻璃纤维复合材料更低的密度和更高的强度,因此具有更高的比强度。

2) 可设计性

复合材料可以根据不同的用途要求灵活地进行产品设计,具有很好的可设计性。对于结构件来说,可以根据受力情况合理布置增强材料,达到节约材料、减轻质量的目的。对于有耐腐蚀性能要求的产品,设计时可以选用耐腐蚀性能好的基体树脂和增强材料;对

于其他一些性能要求,如介电性能、耐热性能等,都可以方便地通过选择合适的原材料来满足要求。复合材料良好的可设计性还可以最大限度地克服其弹性模量、层间剪切强度低等缺点。

3) 电性能

复合材料具有优良的电性能,通过选择不同的树脂基体、增强材料和辅助材料,可以将其制成绝缘材料或导电材料。例如:玻璃纤维增强的树脂基复合材料具有优良的电绝缘性能,并且在高频下仍能保持良好的介电性能,因此可作为高性能电机、电器的绝缘材料;玻璃纤维增强的树脂基复合材料还具有良好的透波性能,被广泛地用于制造机载、舰载和地面雷达罩。复合材料通过原材料的选择和适当的成型工艺可以制得导电复合材料,这是一种功能复合材料,在冶金、化工和电池制造等工业领域具有广泛的应用前景。

4) 耐腐蚀性能

聚合物基复合材料具有优异的耐酸性能、耐海水性能,也能耐碱、盐和有机溶剂。因此,它是一种优良的耐腐蚀材料,用其制造的化工管道、贮罐、塔器等使用寿命较长、维修费用极低。

5) 热性能

玻璃纤维增强的聚合物基复合材料具有较低的导热系数,是一种优良的绝热材料。选择适当的基体材料和增强材料可以制成耐烧蚀材料和热防护材料,能有效地保护火箭、导弹和宇宙飞行器在 2000℃ 以上承受高温、高速气流的冲刷。

6) 抗疲劳性能

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,而且疲劳破坏前有明显的征兆,一般碳纤维复合材料的疲劳极限可达到其拉伸强度的 70%~80%。

7) 减振性能

复合材料的比模量高,所以它的自振频率很高,不容易发生共振而快速脆断;另外,复合材料是一种非均质多相体系,在复合材料中振动衰减都很快。

8) 工艺性能

纤维增强的聚合物基复合材料具有优良的工艺性能,能满足各种类型制品的制造需要,特别适合于大型、形状复杂、数量少的制品制造。

9) 耐热性

金属基和陶瓷基复合材料能在较高的温度下长期使用,但是聚合物基复合材料不能在高温下长期使用,即使耐高温的聚酰亚胺基复合材料,其长期工作温度也只能在 300℃ 左右。

10) 老化现象

在自然条件下,由于紫外光、湿热、机械应力、化学侵蚀的作用,会导致复合材料的性能变差,即发生所谓的老化现象。复合材料在使用过程中发生老化现象的程度与其组成、结构和所处的环境有关。

2. 复合材料的应用

与传统材料(如金属、木材、水泥等)相比,复合材料是一种新型材料。它具有许多优良的性能,并且其成本在逐渐地下降,成型工艺的机械化、自动化程度也在不断提高。因

此,复合材料的应用领域日益广泛。

1) 在航空、航天方面的应用

由于复合材料的轻质高强特性,使其在航空航天领域得到广泛的应用。进入 20 世纪 90 年代后,西方的战斗机都大量采用复合材料结构,用量一般都在 25% 以上,结构减重效率达 30%。应用零部件包括垂直尾翼、水平尾翼、机身蒙皮以及机翼的壁板和蒙皮等。表 0-2 列出了 6 种军用飞机上复合材料应用的情况。

表 0-2 6 种军用飞机上复合材料的应用情况

机种	国家	用量	应用部位	首飞时间
“阵风”	法国	30%	垂尾、机翼、机身结构的 50%	1986 年
JAS-39	瑞典	30%	机翼、垂尾、前翼、舱门	1988 年
F-22	美国	25%	机翼、前中机身、垂尾、平尾及大轴	1990 年
EF-2000	英国、德国、意大利、西班牙	43%	机翼、前中机身、垂尾、前翼、腹鳍	1994 年
F-35	美国	35%	机翼、机身、垂尾、平尾、进气道	2000 年
B-2	美国	>20%	机翼、机身	

在民用飞机方面,波音 787、空客 A380 等机型的结构件都采用了大量的复合材料,如图 0-1 所示为新一代民用客机。图 0-1(a) 所示为欧洲空中客车公司的超大型客机 A380,该客机是目前世界上唯一采用全机身长度双层客舱,最先进、最宽敞和最高效的飞机。A380 客机在 2007 年 10 月首次进行商业航行,其中复合材料占全机结构重量的 25% 左右,主要应用在中央翼、外翼、垂尾、平尾、机身地板梁和后承压框等部位。图 0-2 所示为 A380 飞机上复合材料的具体应用部件。A380 是第一个将复合材料用于中央翼盒的大型民用客机,该翼盒尺寸为 8m×7m×2.4m,重 8.8t,用复合材料 5.3t,减重 1.5t,机身上壁板则大量应用了玻璃纤维增强铝合金复合材料 GLARE 层板,共 27 块 470m²。A380 机身后承压框尺寸为 6.2m×5.5m,号称是世界上最大的树脂膜转移成型(RFI)整体成型构件。A380 开创了先进复合材料在大型客机上大规模应用的先河。图 0-1(b) 所示为波音 787,复合材料用量达到 50%,主要应用于机翼、机身、垂尾、平尾、机身地板梁和后承压框等部位,它是第一型采用复合材料机翼和机身的大型商用客机。



(a)



(b)

图 0-1 新一代民用客机
(a) 空客 A380;(b) 波音 787。

在直升机方面,直升机采用复合材料不仅可减重,而且对于改善直升机抗坠毁性能意

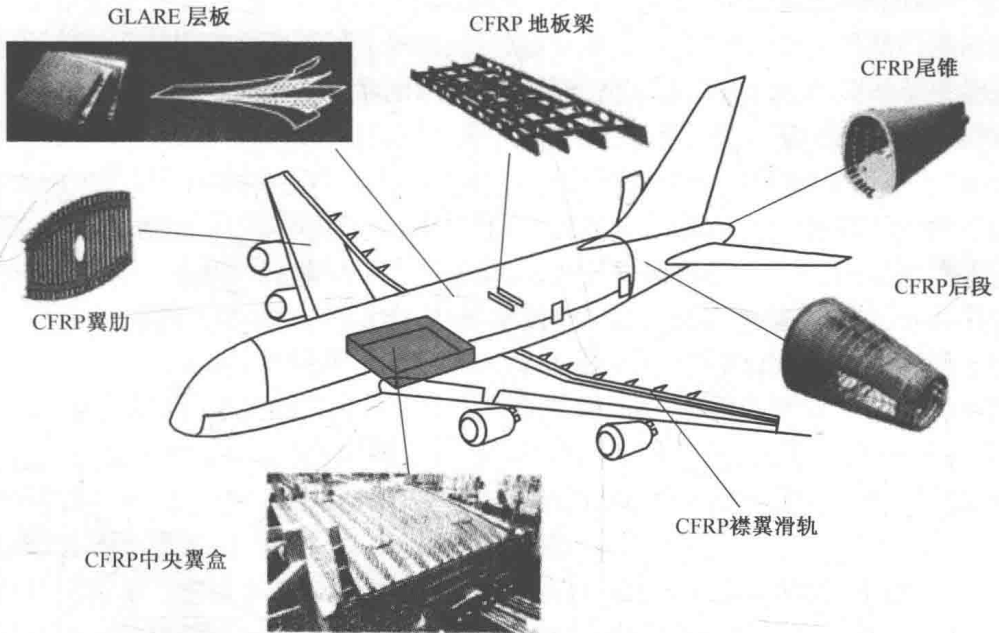


图 0-2 A380 飞机复合材料的应用

义重大,因而复合材料在直升机结构中应用更广、用量更大,不仅是机身结构中由桨叶和桨毂组成的升力系统,传动系统也大量采用树脂基复合材料。先进直升机结构件复合材料用量甚至占到了 80% 以上。随着碳纤维和基体树脂性能的不断提高,碳纤维增强树脂基复合材料的耐湿热性和断裂延伸率得到显著改善和提高。复合材料在飞机上的应用已由次承力结构材料发展到主承力结构材料,拓宽了在飞机工业中的应用。

在航空发动机上应用复合材料可以大幅度提高其推重比,因此先进复合材料已成为未来发动机的关键材料之一。发动机除用树脂基复合材料外,因温度要求的关系还用到金属基、陶瓷基和碳/碳复合材料,见表 0-3。

在航天领域,大量采用先进复合材料制成的“哥伦比亚”号航天飞机,用碳/环氧树脂制造长 18.2m、宽 4.6m 的主货舱门,用凯夫拉纤维/环氧树脂制造各种压力容器,用硼/铝制造主机身隔框和翼梁,用碳/碳制造发动机的喷管和喉衬,发动机组的传力架全用碳纤维增强钛合金复合材料制成,被覆在整个机身上的耐热瓦片是耐高温的陶瓷基复合材料。这架航天飞机上使用了树脂基、金属基和陶瓷基复合材料。

表 0-3 航空发动机用复合材料

种类	密度 / (g/cm ³)	耐温 / °C	应用部位
树脂基	1.6	427	压气机叶片、进气机匣
金属基	4.43	871	风扇、高压压气机
金属间化合物基	5.54	1371	高压压气机
陶瓷基	3.32	1760	燃烧室、高低压涡轮、喷嘴
碳/碳	2	2000	涡轮叶片和盘、热端部件等

据有关资料报道,航天飞行器的质量每减少 1kg,可提高升限 40m,对于发射到太空中的卫星,若质量每减少 1kg 就可使运载火箭减轻 1t。而一次卫星发射费用达几千万美