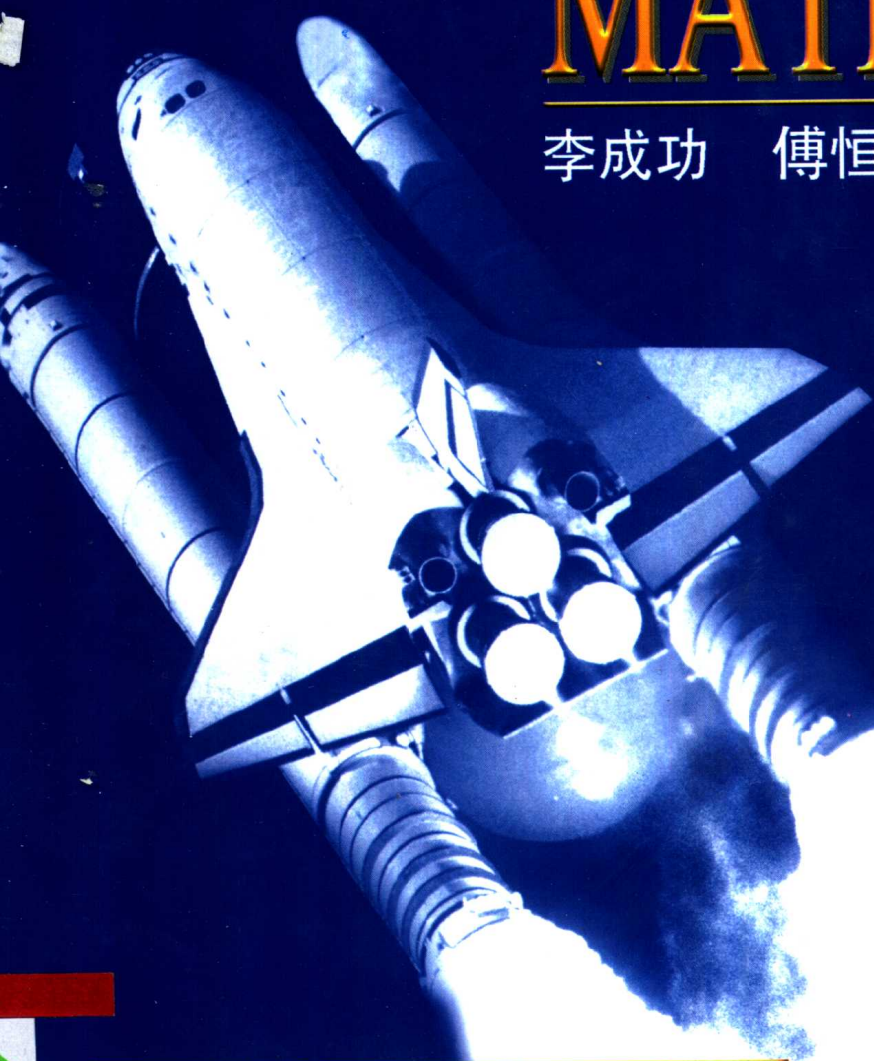


航空航天材料

AEROSPACE MATERIALS

李成功 傅恒志 于翹 等编著



國防工業出版社

航空航天材料

AEROSPACE MATERIALS

李成功 傅恒志 于翹 等编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

航空航天材料/李成功等编著. —北京:国防工业出版社,2002.1

ISBN 7-118-02597-6

I. 航... II. 李... III. ①航空材料 ②航天材料 IV. V25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 042312 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 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 22½ 插页 2 499 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:49.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄 宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎
秘 书 长	崔士义			
委 员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

“中国材料发展现状及迈入新世纪对策”咨询项目 执行委员会名单

顾	问	朱丽兰	王淀佐	侯祥麟	林兰英
		严东生	白春礼		
主	任	师昌绪			
常	常务副主任	李恒德	殷瑞钰		
	常务委员	师昌绪	李恒德	殷瑞钰	左铁镛
委	员	袁晴棠	干福熹	宋家树	
		师昌绪	李恒德	殷瑞钰	左铁镛
		袁晴棠	干福熹	宋家树	翁宇庆
		张寿荣	仲增镛	李尚诒	潘家柱
		周 廉	黄伯云	李成功	于 翹
		傅恒志	杨元一	张德义	胡炳镛
		黄书谋	龚方田	王媛俐	郑敏政
		陈小筑	袁 桐	马德秀	李 健
		袁海波	李克健	王建曾	才鸿年
		吴世平	高志强	张 力	邹祖烨
		屠海令	干 勇	刘伯操	欧阳世翕
		石力开			
秘 书 组		徐世江	马春来	高战军	

“中国材料发展现状及迈入新世纪对策”咨询项目
《航空航天材料发展现状及迈入新世纪对策》
咨询研究组名单

组 长	李成功			
副组长	傅恒志	于 翹		
成 员	李成功	傅恒志	于 翹	周利珊
	陈昌麒	陈祥宝	周瑞发	张立同
	巫世杰	林德春	唐其庆	李金桂
	赵连城	钱 冰	曾凡昌	黄雨祝
秘书组	王乐安	李凤梅	黄立群	

序

航空航天材料是航空航天高技术发展的重要物质基础,许多先进材料及材料科学技术都是首先从航空航天高技术领域的需求推动而发展起来的,例如先进复合材料、高温结构材料、信息功能材料、智能材料等。但迄今为止国内外尚缺少综合全面阐述航空航天材料科学技术的专著,在世纪之交本书的出版,无疑对推动航空航天材料科学技术乃至整个材料科学技术的发展都具有重要的作用。本书是在中国工程院《中国材料发展现状及迈入新世纪对策》总咨询报告的《航空航天材料发展现状及迈入新世纪对策》分咨询报告出版的基础上,另外组织编写的专著。这本航空航天材料科技著作的作者,都是航空航天部门的生产、研究、教学领域中工作多年的有丰富经验的材料科技专家,其中有两位院士。他们在总结整理国内航空航天材料研究发展经验的同时,参照国外航空航天材料的发展和演化规律,对航空航天材料综合发展趋势、轻质高强金属材料、高温金属结构材料、聚合物基复合材料、金属基、陶瓷基及碳/碳复合材料和航空航天功能材料等作了较为深入系统的论述。全书的信息量丰富,图文并茂,将材料科学论述与材料工程应用密切相结合,在国内是第一本综合论述航空航天材料的科技图书,具有新颖性和实用性,学术水平较高。对广大材料科研、生产和教学领域的多方面人士都将具有很好的学习参考和应用的价值。

倪昌绪
李俊峰
殷瑞钰

前 言

航空航天材料是航空航天产品发展的重要物质基础,目前航空航天材料正朝着高性能化、高功能化、多功能化、结构功能一体化、复合化、智能化、低成本化以及环境相容化的方向发展。本书是航空航天材料科学与工程在 21 世纪初出版的一本专著,其主要内容包括:航空航天高技术产业的发展概况及航空航天材料的重要作用与发展方向;铝、镁、钛合金及超高强度钢;高温钛合金、镍基高温合金、金属间化合物及难熔金属及合金;聚合物基复合材料;金属基复合材料;陶瓷基复合材料及碳/碳复合材料;航空航天功能材料等。

目前国内尚无综合论述航空航天材料的专著,只有两部分别论述航空材料及航天材料的著作:《航空材料学》(1985 年出版),《导弹和航天丛书·材料工艺》(1989 年),均为 10 年以前所出版。检索到国外有一本论述航空航天材料的著作是德国宇航院 1992 年出版的《先进宇航材料》,但重点是描述各类复合材料及其力学性能评价,其涵盖范围远不及本书广泛,完全不包括功能材料的描述。本书力图反映世纪之交国内外航空航天材料的发展趋势和规律,并从学科的高度给予理论结合实际的描述,并尽量使全书的数据和信息量丰富,图文并重,内容具有新颖性、科学性和实用性,具有较为广泛的理论和实用价值。

本书由中国材料研究学会副理事长、原中国航空工业总公司科技常委李成功研究员、西北工业大学前任校长傅恒志院士以及中国复合材料学会前任副理事长、原中国航天工业总公司一院科技委副主任于翹研究员负责主编。各章执笔人为:第一章李成功研究员、于翹研究员及曾凡昌研究员,第二章陈昌麒教授,第三章傅恒志院士,第四章林德春研究员、于翹研究员、兰立文教授,第五章张立同院士、成来飞教授和杨德庄教授,第六章赵连城教授、钱冰研究员及周利珊研究员。

本书是在中国工程院及中国科学院“中国材料发展现状及迈入新世纪对策”咨询项目执行委员会常务委员会主任师昌绪院士、常务副主任李恒德院士以及副主任殷瑞钰院士的关心、支持与指导下完成的,同时《航空航天材料发展现状及迈入新世纪对策》咨询研究组的专家参与编写、审稿、统稿及有关组织工作的有:李成功、傅恒志、于翹、周利珊、陈昌麒、陈祥宝、周瑞发、张立同、巫世杰、林德春、唐其庆、李金桂、赵连城、钱冰、曾凡昌、王乐安及李凤梅。本书获得了国防科技图书出版基金的资助,由国防工业出版社杜豪年编审担任责任编辑。在编著过程中还获得了航天材料及工艺研究所、航空材料研究院与法尔胜集团公司的赞助,并得到了王占国院士等有关材料科技界专家们的具体帮助与指导,北京航空航天大学、航天科技集团公司 703 所、四院及航空材料研究院等单位的专家提供了部分素材,同时还参考了国内外有关资料,由于篇幅有限,不能一一列出,我们在此一并表示衷心感谢。本书如有错误和不当之处,敬请指正。

李成功、傅恒志、于翹 2001 年 9 月

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 航空航天高技术产业	1
1.1.1 航空航天高技术产业的概况	1
1.1.2 航空航天高技术产业的特点	3
1.2 航空航天材料的重要作用与发展方向	4
1.2.1 航空航天材料的重要作用	4
1.2.2 航空航天材料的发展方向	7
1.3 航空材料	9
1.3.1 飞机机体材料	9
1.3.2 发动机材料	11
1.3.3 机载设备材料	13
1.4 航天材料	14
1.4.1 运载火箭及导弹(含火箭发动机)材料	14
1.4.2 航天飞行器材料	20
1.4.3 航天功能材料	25
参考文献	27
第二章 轻合金及超高强度钢	28
2.1 引言	28
2.2 铝合金	28
2.2.1 铝合金的基本特点,分类及其在航空航天上的应用	28
2.2.2 合金化和沉淀强化基本原理	29
2.2.3 变形铝合金	30
2.2.4 铸造铝合金	36
2.2.5 含锂铝合金	38
2.2.6 粉末铝合金	39
2.3 钛合金	41
2.3.1 钛合金的合金化原理和合金分类	42
2.3.2 变形钛合金	43
2.3.3 铸造钛合金	47
2.3.4 粉末钛合金	49
2.3.5 国外常用钛合金	50
2.4 镁合金	51
2.4.1 镁合金的特点和合金化	51
2.4.2 铸造镁合金	52
2.4.3 变形镁合金	54

2.4.4 快速凝固粉末镁合金	56
2.4.5 国外常用镁合金	56
2.5 超高强度钢	57
2.5.1 低合金超高强度钢	58
2.5.2 中合金超高强度钢	58
2.5.3 高合金超高强度钢	59
参考文献	62
第三章 高温金属结构材料	64
3.1 引言	64
3.2 航空航天高温结构部件的工作特点及对材料的要求	65
3.2.1 高温结构部件的使用特点	65
3.2.2 先进高温结构材料的设计原则	73
3.3 高温钛合金	77
3.3.1 高温钛合金应用概况	79
3.3.2 高温钛合金合金化历程	82
3.3.3 新型高温钛合金的发展思路	84
3.3.4 阻燃钛合金	85
3.3.5 铸造热强钛合金	86
3.4 镍基高温合金	87
3.4.1 镍基高温合金和合金化原则	87
3.4.2 变形及粉末冶金高温合金	90
3.4.3 弥散强化高温合金	93
3.4.4 定向及单晶高温合金	94
3.4.5 镍基高温合金在航天工业中的应用	99
3.5 金属间化合物	100
3.5.1 Ti-Al 系金属间化合物	100
3.5.2 Ni-Al 金属间化合物	109
3.5.3 钼硅系金属间化合物	114
3.6 难熔金属及其合金	116
3.6.1 钼及其合金	116
3.6.2 钽合金	116
3.6.3 铌基合金	117
3.6.4 钨合金	118
3.7 高温金属结构材料的发展趋向	118
3.7.1 传统高温金属材料仍有巨大的潜力,在挖潜提高的基础上,将会有持续发展	118
3.7.2 瞄准高温高强需求,新材料体系的开发将进一步加强	119
3.7.3 制备成型及数值模拟是金属高温材料发展的关键环节,将受到更大的重视	119
3.7.4 加强应用基础研究,深化材料的科学设计	120
参考文献	122
第四章 先进聚合物基复合材料	123
4.1 引言	123

4.1.1 聚合物基复合材料(PMC)的分类和特点	124
4.1.2 先进聚合物基复合材料在航空航天上的应用	127
4.2 复合材料增强体材料	128
4.2.1 玻璃纤维	129
4.2.2 碳纤维	130
4.2.3 芳酰胺纤维	134
4.2.4 芳杂环纤维	138
4.2.5 超高模量聚乙烯纤维	139
4.2.6 增强织物	141
4.3 复合材料聚合物基体材料	142
4.3.1 环氧树脂	143
4.3.2 双马来酰亚胺树脂	150
4.3.3 热固性聚酰亚胺树脂	155
4.3.4 酚醛树脂	160
4.3.5 氰酸酯树脂	160
4.3.6 聚芳基乙炔树脂(PAA)	162
4.3.7 热塑性树脂	162
4.4 聚合物基复合材料制件的基本成型方法	165
4.4.1 概述	165
4.4.2 预浸料制备	165
4.4.3 热压罐成型	166
4.4.4 连续纤维缠绕成型	167
4.4.5 树脂传递模塑成型(RTM)	169
4.4.6 热塑性树脂基复合材料的成型	171
4.5 功能聚合物基复合材料	172
4.5.1 电磁波功能复合材料	172
4.5.2 防热烧蚀复合材料	174
4.5.3 推进剂复合材料(含能复合材料)	178
4.5.4 多功能复合材料	182
参考文献	184
第五章 先进金属基及无机非金属基复合材料	186
5.1 引言	186
5.1.1 先进金属基及无机非金属基复合材料的概念	186
5.1.2 先进金属基及无机非金属基复合材料在航空和航天系统发展中的作用	187
5.1.3 航空和航天用先进金属基及无机非金属基复合材料的研究与应用	188
5.2 复合材料的界面设计与增强材料	190
5.2.1 复合材料界面设计基础	190
5.2.2 主要增强材料	197
5.3 先进复合材料的制造技术	198
5.3.1 制造技术在复合材料发展中的地位	198
5.3.2 纤维预制体	198
5.3.3 复合技术	199

5.3.4 界面层的制造技术	200
5.4 先进金属基复合材料	201
5.4.1 金属基复合材料的性能特征	201
5.4.2 金属基复合材料在航空航天领域的研究与应用	202
5.4.3 铝基复合材料的体系和性能	207
5.4.4 钛基复合材料的体系和性能	208
5.4.5 其他先进金属基复合材料	213
5.5 先进金属间化合物基复合材料	213
5.5.1 金属间化合物的应用研究进展	213
5.5.2 金属间化合物基复合材料的性能特征	215
5.5.3 镍铝系复合材料及其性能	217
5.5.4 钛铝系复合材料及其性能	221
5.5.5 其他先进金属间化合物基复合材料的研究概况	223
5.5.6 金属间化合物基复合材料的发展动向	225
5.6 先进陶瓷基复合材料	226
5.6.1 应用背景	226
5.6.2 陶瓷材料的韧化	227
5.6.3 陶瓷基复合材料体系、制备方法和性能	232
5.6.4 非氧化物陶瓷基复合材料的氧化及防护	234
5.6.5 发展动向	235
5.7 先进碳/碳复合材料	235
5.7.1 先进碳/碳复合材料在航空和航天领域的研究应用	235
5.7.2 碳/碳复合材料的性能特征	237
5.7.3 碳/碳复合材料的制备方法	238
5.7.4 碳/碳复合材料的氧化行为	239
5.7.5 碳/碳复合材料的防氧化	240
5.7.6 防氧化碳/碳复合材料性能的评价体系	245
5.7.7 发展方向	246
参考文献	246
第六章 先进功能材料	249
6.1 引言	249
6.2 微电子材料	249
6.2.1 硅半导体材料	249
6.2.2 化合物半导体材料	260
6.3 光电子材料	273
6.3.1 半导体光电子材料	274
6.3.2 激光材料	276
6.3.3 红外探测器材料	280
6.3.4 红外光学材料和光学薄膜材料	288
6.4 信息显示、存储与传输材料	293
6.4.1 信息显示材料	294
6.4.2 信息存储材料	299

6.4.3 光纤材料	305
6.4.4 光导纤维在传感器中的应用	309
6.5 功能陶瓷与敏感材料	310
6.5.1 功能陶瓷	310
6.5.2 敏感材料	317
6.6 隐身材料	320
6.6.1 雷达吸波材料的吸波机理和电性能优化设计	320
6.6.2 雷达吸波材料的电磁性能表征	323
6.6.3 涂敷型雷达吸波材料	325
6.6.4 结构型雷达吸波材料和吸波-承载复合材料结构	327
6.6.5 红外隐身材料	329
6.6.6 多频谱兼容隐身材料	330
6.7 智能结构材料	331
6.7.1 智能结构传感元件材料	331
6.7.2 智能结构驱动元件材料	333
参考文献	335

contents

Chapter1 Introduction	1
1.1 Aerospace high-tech industry	1
1.1.1 General situation of aerospace industry	1
1.1.2 Characteristics of aerospace high-tech industry	3
1.2 Important role and development trends of aerospace materials	4
1.2.1 Important role of aerospace materials	4
1.2.2 Development trends of aerospace materials	7
1.3 Aeronautical materials	9
1.3.1 Aeroframe materials	9
1.3.2 Aeroengine materials	11
1.3.3 Avionics materials	13
1.4 Space materials	14
1.4.1 Rocket and missile materials	14
1.4.2 Space vehicles materials	20
1.4.3 Space functional materials	25
References	27
Chapter 2 Light metals and ultrahigh-strength steels	28
2.1 Introduction	28
2.2 Aluminum alloys	28
2.2.1 General characteristics, classification and aerospace application of aluminum alloys	28
2.2.2 General principles of alloying and precipitation hardening	29
2.2.3 Wrought aluminum alloys	30
2.2.4 Cast aluminum alloys	36
2.2.5 Li containing alloys	38
2.2.6 Powder metallurgy products	39
2.3 Titanium alloys	41
2.3.1 Principle of alloying and classification of titanium alloys	42
2.3.2 Wrought titanium alloys	43
2.3.3 Cast titanium alloys	47
2.3.4 Powder metallurgy products	49
2.3.5 Foreign titanium alloys	50
2.4 Magnesium alloys	51
2.4.1 Characteristics and alloying of magnesium alloys	51
2.4.2 Cast magnesium alloys	52
2.4.3 Wrought magnesium alloys	54

2.4.4	Rapid solidified powder metallurgy products	56
2.4.5	Foreign magnesium alloys	56
2.5	Ultrahigh-strength steels	57
2.5.1	Low-alloy ultrahigh-strength steels	58
2.5.2	Medium-alloy ultrahigh-strength steels	58
2.5.3	High-alloy ultrahigh-strength steels	59
	References	62
Chapter 3	High temperature metallic structure materials	64
3.1	Introduction	64
3.2	Performance of high temperature structure parts and their requirements to materials	65
3.2.1	Performance of high temperature structure parts	65
3.2.2	Design principles of advanced structure materials at high temperature	73
3.3	High temperature titanium alloys	77
3.3.1	Application of high temperature titanium alloys	79
3.3.2	Alloying progress of high temperature titanium alloys	82
3.3.3	New approaches for development of advanced high temperature titanium alloys	84
3.3.4	Burn-resistance titanium alloys	85
3.3.5	Cast titanium alloys	86
3.4	Nickel-base Superalloys	87
3.4.1	Nickel-base superalloys and their alloying principle	87
3.4.2	Wrought and powder metallurgy superalloys	90
3.4.3	Dispersed strengthening superalloys	93
3.4.4	Directionally solidified and single crystal superalloys	94
3.4.5	Application of Nickel-base superalloys in aerospace industries	99
3.5	Intermetallic compounds	100
3.5.1	Ti-Al intermetallic compounds	100
3.5.2	Ni-Al intermetallic compounds	109
3.5.3	Mo-Si intermetallic compounds	114
3.6	Refractory metals and alloys	116
3.6.1	Mo and its alloys	116
3.6.2	Ta and its alloys	116
3.6.3	Nb and its alloys	117
3.6.4	W and its alloys	118
3.7	Development trends of high temperature metallic structure materials	118
3.7.1	Traditional high temperature materials still behave great potential for use	118
3.7.2	Focusing to the requirements of high temperature and strength, new material systems should be developed	119
3.7.3	More attention will be given to fabrication and forming technology and their numerical simulation	119
3.7.4	Strengthen applied basic research and deepen scientific design of materials	120
	References	122

Chapter 4 Advanced polymer matrix composites	123
4.1 Intruduction	123
4.1.1 Class and characteristic of advanced polymer matrix composites	124
4.1.2 Advanced polymer matrix composites in aerospace application	127
4.2 Reinforcement materials	128
4.2.1 Glass fiber	129
4.2.2 Carbon fiber	130
4.2.3 Aramid fiber	134
4.2.4 P-phenylene benzobisoxazole fiber	138
4.2.5 Upper high module polyethylene fiber	139
4.2.6 Reinforcement fabric	141
4.3 Polymer matrix materials	142
4.3.1 Epoxy resins	143
4.3.2 Bismaleimide resins	150
4.3.3 Polyimide resins	155
4.3.4 Phenolic resins	160
4.3.5 Aromatic cyanate esters resins	160
4.3.6 Polyarylacetylene resins	162
4.3.7 Thermoplastic resins	162
4.4 Manufacturing techrique of polymer matrix composite	165
4.4.1 Introduction	165
4.4.2 Prepreg manufacture	165
4.4.3 Autoclave curing	166
4.4.4 Filament winding	167
4.4.5 Resin transfer molding (RTM)	169
4.4.6 Thermoforming of thermoplastic composites	171
4.5 Functional polymer composites	172
4.5.1 Electromagnetic wave functional composites	172
4.5.2 Ablative thermal protection composites	174
4.5.3 Propellant composites	178
4.5.4 Multifunctional composites	182
References	184
Chapter 5 Advanced metal matrix and inorganic non-metal matrix composites	186
5.1 Introduction	186
5.1.1 Concepts of advanced metal matrix and inorganic non-metal matrix composites	186
5.1.2 Roles of advanced metal matrix and inorganic non-metal matrix composites in development of aero space systems	187
5.1.3 Research and applications of advanced metal matrix and inorganic non-metal matrix composites for aero space systems	188
5.2 Interface design and reinforcement materials for advanced composites	190
5.2.1 Basis of interface design for advanced composites	190
5.2.2 Main reinforcement materials	197