

复合材料手册

益小苏 杜善义 张立同 主编



化学工业出版社



复合材料手册

益小苏 杜善义 张立同 主编



化学工业出版社

·北京·

《复合材料手册》是反映复合材料当前开发和应用水平的专业工具书。其主要内容包括：复合材料理论和应用基础，如增强体材料、复合材料界面等；各种类型的复合材料，如工业聚合物基复合材料与玻璃钢、先进树脂基复合材料、热塑性聚合物基复合材料、金属基复合材料、陶瓷（玻璃）基复合材料、碳基复合材料、水泥基复合材料、功能复合材料与新型复合材料；复合材料的应用和分析检测技术，如复合材料力学问题与设计、复合材料结构设计与分析、复合材料性能实验、表征与质量控制等。本书以国内外复合材料领域中产量、应用等需求较大的品种为重点，选择其中关键性、共性的技术参数、图表、科研与应用成果为核心。力求对复合材料各领域进行比较全面、比较系统、能够综合反映其当前现状及发展前景的介绍。

本书可供从事材料科学与工程、制造业及相关行业的科研、教学、工程技术及管理人员参考阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

复合材料手册/益小苏, 杜善义, 张立同主编. —北京:
化学工业出版社, 2009. 6
ISBN 978-7-122-05339-8

I. 复… II. ①益…②杜…③张… III. 复合材料-技术
手册 IV. TB33-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 057708 号

责任编辑: 段志兵 周国庆
责任校对: 陶燕华

装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京蓝海印刷有限公司
装 订: 三河市前程装订厂
880mm×1230mm 1/16 印张 67 字数 2976 千字 2009 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 210.00 元

版权所有 违者必究

前 言

复合材料被公认为是除金属材料、无机非金属材料和高分子材料之外的第四大类材料。复合材料的崛起与发展极大地丰富了现代材料的家族，为人类社会的发展开辟了无限的想象与实现空间，也为材料科学与工程学的持续发展注入了强大的生机与活力。本书的编写原则是：以国内外复合材料领域中产量、应用等需求较大的品种为重点，选择其中关键性、共性的技术参数、图表、科研与应用成果为核心。力求对复合材料各领域进行比较全面、比较系统、能够综合反映其当前现状及发展前景的介绍。

本书邀请了北京航空材料研究院、国防科技大学、东华大学、哈尔滨工业大学、哈尔滨玻璃钢研究所、北京钢铁研究设计院、北京航空航天大学、中国科学院理化技术研究所、中国科学院化学所、西北工业大学、同济大学、中国飞机强度研究所、南京航空航天大学、浙江大学、中国科技大学等单位的 40 多位专家教授参加编写和审稿。全书由益小苏、杜善义、张立同任主编，陈亚莉任秘书，历时 3 年完稿。本书共分 16 篇约 300 万字，各篇主编如下。

第 1 篇	复合材料导论	益小苏教授
第 2 篇	复合材料用增强体材料	冯春祥教授 楚增勇教授
第 3 篇	聚合物基体材料	陈祥宝教授
第 4 篇	纺织复合材料	丁辛教授
第 5 篇	复合材料界面	黄玉东教授
第 6 篇	工业聚合物基复合材料与玻璃钢	刘其贤教授 刘在阳教授 高红梅教授
第 7 篇	先进树脂基复合材料	杨乃宾教授
第 8 篇	热塑性聚合物基复合材料	傅绍云教授
第 9 篇	金属基复合材料	耿林教授 吴昆教授
第 10 篇	陶瓷（玻璃）基复合材料	张立同院士 黄勇教授
第 11 篇	碳基复合材料	张立同院士 李贺军教授
第 12 篇	水泥基复合材料	吴科如教授
第 13 篇	复合材料力学问题与设计	杜善义院士 梁军教授
第 14 篇	复合材料结构设计与分析	沈真教授
第 15 篇	复合材料性能试验、表征与质量控制	张佐光教授 张子龙教授
第 16 篇	功能复合材料与新型复合材料	刘献明教授 傅绍云教授 张忠教授

本书具有系统性、科学性、新颖性、先进性及实用性相统一的特点，可供复合材料领域及其相关行业的工程技术人员、管理人员，以及材料科学与工程专业的师生查阅。

由于内容多、时间紧和编著者水平所限，其中难免存在不少问题和不足，敬请广大读者批评指正。

益小苏 杜善义 张立同

编辑委员会^①

顾问：师昌绪 严东生 李恒德 何光远 陆燕荪 徐匡迪 李学勇 栾恩杰
王淀佐 朱道本 颜鸣皋 黄培云 周 廉 左铁镞

主任：路甬祥

副主任：李成功（常务） 钟群鹏 干 勇 黄伯云 江东亮 徐滨士 王占国
潘健生 杜善义 胡正寰 柳百成 徐祖耀 陈立泉

总策划：宋天虎 黄远东

总编辑：李骏带

秘书长：黄远东（兼）

委员（按姓氏笔画排列）：

丁 辛	丁传贤	干 勇	于月光	才鸿年	马世宁	马冲先	马济民	马眷荣
马福康	王占国	王务同	王尔德	王永岩	王亚军	王至尧	王克光	王克俭
王高潮	王淀佐	王琦安	王新林	王德志	方禹之	尹志民	邓 炬	左铁钊
左铁镞	石力开	石春山	卢世刚	叶小玲	叶光斗	田志凌	田荣璋	史耀武
冯 涤	冯 稷	冯春祥	宁远涛	邢建东	师昌绪	吕 炎	吕反修	同继锋
曲文生	朱万森	朱如瑾	朱绍华	朱道本	仲维卓	任家烈	华 林	刘 明
刘正才	刘世参	刘占阳	刘邦津	刘作信	刘其贤	刘郁丽	刘治国	刘建章
刘晋春	刘清友	刘献明	齐从谦	闫 洪	江东亮	许祖泽	许祖彦	阳明书
孙 坚	孙加林	杜善义	杨 合	杨 武	杨乃宾	杨才福	杨鸣波	杨忠民
杨晓华	杨海波	杨焕文	杨德仁	李 强	李 晋	李 楠	李长久	李龙土
李成功	李光福	李志刚	李明哲	李明辉	李学勇	李虹霞	李恒德	李贺军
李海军	李骏带	李鹤林	严东生	连克仁	肖亚庆	吴 行	吴 昆	吴 诚
吴永声	吴伟仁	吴性良	吴科如	吴恩熙	吴谊群	吴智华	吴德馨	何光远
何季麟	佟晓辉	邱 勇	邱冠周	邱德仁	余金中	邹广田	汪明朴	沈 真
沈万慈	沈德忠	宋天虎	张 力	张 扬	张 华	张 杰	张 金	张 崢
张子龙	张用宾	张立同	张永俐	张吉龙	张旭初	张佐光	张晋远	张康侯
张道中	张新民	陆燕荪	陈 琦	陈文哲	陈世朴	陈立泉	陈运远	陈志良
陈国钧	陈治明	陈南宁	陈祝年	陈晓慈	陈涌海	陈祥宝	陈超志	林慧国
欧阳世翥	卓尚军	易建宏	罗祥林	罗豪甦	果世驹	周 廉	周伟斌	周国庆
郑有焯	柳玉起	柳百成	胡玉亭	胡正寰	南策文	赵万生	赵有文	赵国群
赵金榜	赵梓森	赵慕岳	钟群鹏	施东成	施剑林	姜不居	姜晚霞	祖荣祥
姚 燕	贺守华	耿 林	聂大钧	贾成厂	顾冬红	夏巨谌	夏志华	俸培宗
徐匡迪	徐廷献	徐建军	徐祖耀	徐家文	徐跃明	徐滨士	殷树言	翁宇庆
郭会光	郭景杰	高瑞萍	栾恩杰	唐仁政	唐汝钧	唐志玉	唐昌世	益小苏
涂善东	黄 勇	黄天佑	黄玉东	黄本立	黄远东	黄伯云	黄校先	黄培云
曹勇家	曹湘洪	龚七一	崔 健	康喜范	梁 齐	梁 军	梁志杰	屠海令
隋同波	韩凤麟	彭艳萍	葛子干	董 瀚	董汉山	董首山	董祖珏	董湘怀
蒋力培	蒋建平	傅绍云	储君浩	谢邦互	谢里阳	谢建新	鄢国强	雷天民
路甬祥	解应龙	解思深	雍歧龙	蔡中义	漆 玄	谭 抚	熊守美	靳常青
樊东黎	黎文献	颜永年	颜鸣皋	潘正安	潘叶金	潘振甦	潘健生	燕 瑛
戴国强								

① 本书是原《中国材料工程大典》其中的一卷。《中国材料工程大典》由中国机械工程学会、中国材料研究学会组织编写，中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会及中国复合材料学会参加组织编写。本编辑委员会即为《中国材料工程大典》编委会。

目 录

第1篇 复合材料导论	1
第1章 复合材料科学与工程学梗概	3
第2章 材料表面、复合材料界面及其相关问题	4
1 纤维-金属层合板及其界面相结构	4
2 纤维-金属层合板界面相结构的力学特征与老化行为	6
3 纤维与树脂的界面及界面相问题	7
第3章 复合材料的多尺度、多层次结构构造与优化	8
1 发展背景与约束条件	8
2 “离位”增韧技术及其由来	8
3 “离位”液态成形技术	9
4 复合材料的多层次、多尺度优化	10
5 先进的液态成形树脂体系	11
6 “离位(Ex-situ)”与“原位(In-situ)”的对立和统一	11
7 小结与展望	12
第4章 复合材料及其制品的先进制造技术	13
1 航空结构一体化技术的内涵与发展背景	13
2 纺织复合材料技术与结构一体化(整体化)技术	13
3 复合材料自动铺放技术	14
4 从制造的角度看一体化技术中的预制技术	16
5 虚拟制造和智能加工技术	16
第5章 先进复合材料的发展走向	18
1 复合材料的低维化发展	18
2 复合材料的结构-功能一体化技术	21
3 复合材料的模型化技术	24
第6章 复合材料在国民经济和国家安全中的地位	28
参考文献	29
第2篇 复合材料用增强体材料	31
第1章 玻璃纤维	33
1 E-玻璃纤维	34
2 AR-玻璃纤维	34
3 S-玻璃纤维	34
4 M-玻璃纤维	34
5 高硅氧玻璃纤维	35
6 特种玻璃纤维	35
第2章 碳纤维	36
1 聚丙烯腈(PAN)碳纤维	39
2 沥青基碳纤维	40
3 黏胶基碳纤维	41
第3章 陶瓷纤维	43
1 氧化铝纤维	43
2 碳化硅系列纤维	44
3 氮化硼(BN)纤维	48
4 硼纤维	49
第4章 聚芳酰胺纤维	50
第5章 聚芳酯纤维	52
第6章 有机杂环类纤维	53
1 聚苯并二噁唑(PBO)纤维	53
2 聚苯并噻唑(PBT)纤维	54
3 聚苯并咪唑(PBI)纤维	55
第7章 超高分子量聚乙烯纤维	56
第8章 纤维增强体的测试表征方法	58
1 力学性能的测试表征方法	58
2 物理性能的测试表征方法	59
第9章 晶须	60
1 陶瓷晶须	60
2 碳晶须	63
2.1 碳(石墨)晶须	63
2.2 碳纳米管	63
参考文献	66
第3篇 聚合物基体材料	69
第1章 概述	71
1 复合材料树脂基体性能	71
1.1 耐热性	71
1.2 线胀系数(CTE)	71
1.3 力学性能	71
1.4 电性能	72
2 复合材料树脂基体性能表征	72
2.1 复合材料树脂基体固化反应特性表征	72
2.2 复合材料树脂基体物理性能表征	72
2.3 树脂基体的耐热性能及热稳定性表征	73
2.4 复合材料树脂基体电性能表征	74
2.5 复合材料树脂基体力学性能表征	74
第2章 高性能酚醛树脂基体	76
1 酚醛树脂的合成	76
1.1 线型酚醛树脂	76
1.2 热固性酚醛树脂	76
1.3 酚醛树脂合成新进展	76
2 酚醛树脂的固化	77
2.1 热固性酚醛树脂的固化	77
2.2 线型酚醛树脂的固化及固化剂	77
3 酚醛树脂的改性	78
3.1 酚醛树脂的增韧	78
3.2 酚醛树脂结构改性及新品种	79
4 酚醛树脂复合材料及成形工艺进展	84
4.1 制造工艺对树脂的要求	84
4.2 复合材料成形工艺性能	85
4.3 酚醛树脂复合材料的应用	85
第3章 高性能环氧树脂基体	86
1 环氧树脂的合成	86
2 环氧树脂固化及固化剂	86
2.1 固化反应	86
2.2 新型固化剂	86
3 环氧树脂结构与性能	87
3.1 二缩水甘油醚树脂	87
3.2 多缩水甘油醚树脂	88
3.3 缩水甘油胺树脂	91
4 环氧树脂增韧	92
4.1 橡胶弹性体增韧	92
4.2 热塑性树脂增韧	93
4.3 热致液晶增韧	93
5 高性能环氧基复合材料	94
5.1 高性能环氧基复合材料性能	94
5.2 高性能环氧基复合材料应用	96
第4章 双马来酰亚胺树脂基体	97

1 BMI 的物理性能	97	2 二维纺织预成形件的制备技术	171
1.1 BMI 单体	97	2.1 机织技术	171
1.2 BMI 固化物	97	2.2 针织技术	171
2 BMI 树脂的改性	98	2.3 编织技术	171
2.1 与链烯基化合物的共聚改性	98	2.4 非织造技术	173
2.2 二元胺改性 BMI	101	3 三维纺织预成形件的制备技术	173
2.3 热塑性树脂改性 BMI	102	3.1 机织技术	173
2.4 环氧改性 BMI	104	3.2 针织技术	176
2.5 氰酸酯改性 BMI	104	3.3 缝合技术	178
2.6 新型 BMI 单体合成	105	3.4 编织技术	178
2.7 工艺改性	110	3.5 正交非织造技术	180
3 BMI 树脂的应用	111	3.6 联合织造技术	181
3.1 主要已商品化的 BMI 树脂	111	4 纺织复合材料的复合成形技术	182
3.2 常用 BMI 复合材料性能	112	4.1 热固性树脂基复合材料成形工艺	182
3.3 BMI 树脂及其复合材料的应用	114	4.2 热塑性树脂基复合材料成形工艺	183
第 5 章 氰酸酯树脂基体	115	5 纺织复合材料的计算机辅助设计与集成制造系统	184
1 氰酸酯树脂单体的合成	115	5.1 纺织复合材料的计算机辅助设计系统	185
2 氰酸酯树脂的固化反应	117	5.2 纺织复合材料的集成制造系统	186
2.1 氰酸酯固化反应机理	117	6 小结	186
2.2 氰酸酯固化反应动力学	117	第 4 章 纺织复合材料力学性能分析	188
2.3 催化剂对固化反应的影响	118	1 纺织复合材料热弹性性能分析	188
3 氰酸酯树脂改性环氧及双马树脂	120	1.1 复合材料力学基础知识	188
3.1 氰酸酯改性环氧树脂	120	1.2 二维纺织复合材料刚度	190
3.2 氰酸酯改性双马来酰亚胺树脂	122	1.3 三维纺织复合材料刚度	195
4 氰酸酯树脂及其复合材料的性能与应用	123	2 层合板结构纺织复合材料的强度	200
4.1 氰酸酯树脂的结构与性能	123	2.1 一般原理	200
4.2 氰酸酯树脂基复合材料的性能与应用	127	2.2 层合板结构针织复合材料的强度计算	203
第 6 章 热固性聚酰亚胺树脂基体	131	2.3 层合板结构机织/编织复合材料	203
1 PMR 聚酰亚胺	131	3 小结	205
1.1 PMR 聚酰亚胺合成	131	第 5 章 纺织复合材料的应用	206
1.2 PMR 聚酰亚胺性能	133	1 纺织复合材料在民用航空领域中的应用	206
1.3 PMR 聚酰亚胺改性	135	2 纺织复合材料在导弹上的应用	207
2 乙炔封端聚酰亚胺	139	3 纺织复合材料在自行车工业中的应用	208
2.1 乙炔封端聚酰亚胺的合成	139	4 纺织复合材料在建筑膜结构领域中的应用	208
2.2 乙炔封端聚酰亚胺固化	141	5 纺织复合材料在生物医学中的应用	209
2.3 乙炔封端聚酰亚胺性能	142	5.1 人工气管及人造血管	209
3 聚酰亚胺复合材料应用	143	5.2 人工牙齿	210
参考文献	145	5.3 人工骨及韧带	210
第 4 篇 纺织复合材料	147	6 纺织复合材料的应用前景	212
第 1 章 概述	149	参考文献	213
1 纺织复合材料的概念	149	第 5 篇 复合材料界面	217
2 纺织预成形件	149	第 1 章 复合材料界面理论	219
3 纺织复合材料的性能特征	149	1 浸润理论	219
第 2 章 纺织结构及其性能	152	2 化学键理论	220
1 纱线结构及性能	152	3 界面应力理论	221
1.1 纱线的细度	152	3.1 消除界面残余应力	221
1.2 纱线的捻度	152	3.2 减缓界面区域的应力集中	222
1.3 纱线的拉伸性能	153	3.3 界面化学反应及界面稳定性控制	222
2 纺织结构及性能	154	4 界面作用的其他理论	223
2.1 机织结构	154	第 2 章 聚合物基复合材料界面及其改性	224
2.2 针织结构	161	1 化学偶联剂改性技术	224
2.3 编织结构	165	2 界面增容改性	227
2.4 非织结构	168	2.1 增容剂的分类	227
3 小结	169	2.2 增容剂的作用机理	228
第 3 章 纺织复合材料的制备技术	170	3 电化学改性技术	228
1 纺织复合材料的基本构成	170	4 等离子体处理	229
1.1 增强纤维	170	4.1 等离子体处理	229
1.2 基体材料	170	4.2 等离子体表面接枝	230

5 高能辐照处理改性技术	230	4.2 氧化物复合材料界面层制造方法	257
5.1 中子辐照改性	230	5 界面层与环境	257
5.2 紫外光辐照接枝处理	231	5.1 非氧化物复合材料界面层与环境	257
5.3 γ 射线辐照处理	231	5.2 氧化物复合材料界面层与环境	258
6 其他处理技术	232	5.3 界面层的发展与展望	258
6.1 气相氧化	232	第5章 复合材料界面结构表征及界面结合力测定	260
6.2 聚合物涂层	232	1 增强纤维表面状态的表征	260
6.3 化学气相沉积	232	1.1 扫描探针显微镜技术	260
6.4 电聚合与电沉积	232	1.2 浸润性测量	260
6.5 表面化学接枝	233	1.3 X射线光电子能谱	261
6.6 超声波改性	233	1.4 动态力学谱图分析	261
第3章 金属基复合材料的界面	235	2 界面黏合强度的表征	262
1 金属基复合材料界面的分类	235	2.1 宏观实验方法	262
1.1 界面的分类	235	2.2 微复合材料实验方法	262
1.2 界面的结合机制	235	3 界面残余应力的表征	264
2 金属基复合材料界面反应热力学与动力学	236	3.1 光弹性法	264
2.1 界面反应的热力学相容性	236	3.2 电阻应变片法	264
2.2 界面反应的动力学相容性	237	3.3 X射线衍射方法	265
3 金属基复合材料界面对基体结晶形核的影响	238	3.4 其他方法	265
3.1 金属基复合材料界面对基体形核的影响	238	参考文献	266
3.2 金属基复合材料界面对基体结晶组织特征的影响	239	第6篇 工业聚合物基复合材料与玻璃钢	269
4 金属基复合材料的残余应力	240	第1章 芯材	271
4.1 热残余应力的产生	240	1 芯材的类型	271
4.2 金属基复合材料界面热错配应力的计算	240	1.1 泡沫芯材	271
4.3 热残余应力影响因素	241	1.2 蜂窝	272
4.4 残余应力松弛行为	241	1.3 木材	273
4.5 残余应力的分析与测量	242	1.4 其他芯材	273
5 金属基复合材料界面性能测试	243	2 芯材的力学性能比较	273
5.1 界面强度的测试方法	244	第2章 成形工艺	275
5.2 金属基复合材料增强相的临界长径比	244	1 手糊成形工艺	275
5.3 金属基复合材料界面硬度的测试	244	1.1 原材料	275
5.4 金属基复合材料界面导热性能的测试	245	1.2 模具及脱膜剂	276
6 界面结合状态对金属基复合材料性能的影响	247	1.3 成形工艺	277
6.1 界面反应对金属基复合材料性能的影响	247	2 喷射成形技术	278
6.2 增强体表面涂覆对金属基复合材料性能的影响	248	2.1 原材料	278
7 金属基复合材料界面微观结构	249	2.2 喷射成形设备	279
7.1 铝基复合材料界面微观结构	250	2.3 喷射工艺	279
7.2 镁基复合材料界面显微结构	251	3 模压成形工艺	280
7.3 钛基复合材料界面显微结构	252	3.1 模压成形工艺定义	280
7.4 铁和铁合金基复合材料界面显微结构	252	3.2 模压成形工艺的特点和分类	280
7.5 其他体系	252	3.3 模压成形工艺的发展状况	280
第4章 陶瓷基复合材料界面设计	253	3.4 模压料制造技术	281
1 陶瓷基复合材料界面问题	253	3.5 压制工艺	286
1.1 界面结合强度	253	3.6 压机和模具	287
1.2 界面热物理相容性	253	3.7 模压制品应用	289
1.3 界面热化学相容性	253	4 缠绕成形工艺	291
2 陶瓷基复合材料的界面层	254	4.1 原材料	291
2.1 界面层的作用	254	4.2 芯模	296
2.2 界面层与界面破坏	254	4.3 缠绕机	298
2.3 影响界面结合强度的因素	254	4.4 成形工艺	301
2.4 界面层与增强体	254	4.5 应用	305
2.5 界面层与强韧化	255	5 拉挤成形工艺	306
3 复合材料体系与界面层材料	255	5.1 原材料	306
3.1 非氧化物复合材料界面层	255	5.2 成形设备	307
3.2 氧化物复合材料界面层	255	5.3 成形工艺	308
4 界面层制造方法	256	5.4 拉挤制品的性能	309
4.1 非氧化物复合材料界面层制造方法	256	5.5 应用	311
		6 树脂传递模塑	311

6.1 工艺	311	3.4 玻璃钢产业发展趋势	358
6.2 RTM 用材料与工艺装备	312	4 工业聚合物基复合材料的发展潜力	358
6.3 新的发展趋势和应用	313	4.1 在基础设施领域的发展潜力	358
6.4 成本	313	4.2 在交通运输领域的发展潜力	359
7 真空袋压成形	313	4.3 在海洋石油工业领域的发展潜力	359
7.1 工艺方法	314	4.4 在电能领域的发展潜力	360
7.2 注意事项	314	参考文献	361
7.3 应用及发展	314	第7篇 先进树脂基复合材料	363
8 卷绕成形	314	第1章 航空航天复合材料概论	365
8.1 材料	314	1 先进树脂基复合材料的开发研究	365
8.2 工艺与工装	314	2 先进树脂基复合材料成形工艺与制造技术特点和低成本化	366
8.3 应用发展	315	3 先进树脂基复合材料特有性能的表征	367
9 管道连续成形	315	3.1 结构复合材料性能表征与数据表达准则	367
9.1 材料	315	3.2 复合材料力学性能特点	367
9.2 工艺与工装	316	3.3 层合板物理性能表征	368
9.3 应用发展	318	第2章 先进树脂基复合材料的成形工艺与制造技术	369
10 板材连续成形	318	1 先进复合材料成形工艺与制造技术的特征与分类	369
10.1 原材料	318	2 预浸料制备工艺	369
10.2 板材连续成形工艺	318	3 成形模具	377
10.3 应用及发展	319	4 预浸料/真空袋-热压罐成形工艺	384
11 连接及胶接	320	5 预浸料/模压成形工艺	387
11.1 复合材料机械连接技术	320	6 缠绕成形工艺	387
11.2 复合材料胶接连接技术	321	7 拉挤成形工艺	388
12 夹层结构制备工艺	323	8 复合材料液体成形 (LCM 工艺)	389
12.1 材料	324	8.1 RTM 成形工艺	390
12.2 夹层结构制造工艺	325	8.2 RFI 成形工艺	393
12.3 应用及发展	326	8.3 VARI 成形工艺	395
第3章 复合材料性能及检测	327	9 自动化与新兴低成本成形工艺	398
1 力学性能、物理性能及检测	327	10 典型结构成形工艺方案的选择与实施	401
1.1 力学性能、物理性能及检测	327	第3章 先进树脂基复合材料性能	406
1.2 复合材料的力学、物理性能	334	1 环氧树脂基复合材料性能	406
2 热学性能及检测	338	1.1 高温固化环氧复合材料性能	406
2.1 热学性能检测	338	1.2 中温固化环氧复合材料性能	411
2.2 热学性能	340	1.3 低温固化环氧复合材料性能	411
3 电学性能及检测	341	1.4 环氧树脂基复合材料工艺性	413
3.1 电学性能检测	341	1.5 国内环氧树脂复合材料性能综合评估	414
3.2 电学性能	343	2 双马来酰亚胺树脂基复合材料性能	415
4 耐腐蚀性能及检测	344	2.1 国内双马树脂复合材料体系简介	415
4.1 耐腐蚀性能检测	344	2.2 国内双马树脂复合材料力学性能	416
4.2 耐腐蚀性能	344	2.3 国内双马树脂复合材料工艺性	418
5 老化性能及检测	346	2.4 国内双马树脂复合材料性能综合评估	418
5.1 老化性能检测	346	3 聚酰亚胺树脂基复合材料性能	419
5.2 复合材料的老化性能	347	3.1 国内聚酰亚胺树脂复合材料体系简介	419
6 其他性能及检测	349	3.2 国内聚酰亚胺树脂复合材料力学性能	419
6.1 其他性能检测	350	4 国外先进树脂基复合材料性能	420
6.2 复合材料的燃烧性、透光性和摩擦因数	351	第4章 先进复合材料的新进展与发展方向	422
第4章 工业聚合物基复合材料的最新发展与发展方向	352	1 总趋势——降低成形工艺成本	422
1 工业聚合物基复合材料的发展现状	352	2 先进复合材料成形工艺过程控制	422
2 工业聚合物基复合材料技术的最新进展	353	3 复合材料成形工艺模拟与优化 (虚拟制造技术)	423
2.1 增强材料的新进展	353	第5章 先进复合材料的应用	424
2.2 辐射固化技术	355	1 在飞机结构上的应用	424
2.3 开模工艺技术的最新进展	355	2 在航空动力装置上的应用	427
2.4 闭模工艺技术的最新进展	356	3 在固体火箭发动机上的应用	428
2.5 纤维铺放技术	357	3.1 复合材料在固体火箭发动机壳体上的应用	428
3 工业聚合物基复合材料的发展方向	357	3.2 复合材料在固体火箭发动机喷管上的应用	429
3.1 大力发展低成本制造技术	357	3.3 固体火箭发动机的全复合材料化	429
3.2 全面改善与环境的协调性	358	4 在人造卫星和太空站上的应用	429
3.3 材料和制品向高性能、多功能、智能化方向发展	358		

4.1 人造卫星上的应用	429	4.1 连续纤维增强镁基复合材料	490
4.2 太空站上的应用	430	4.2 非连续增强镁基复合材料	490
参考文献	432	4.3 原位反应自生增强镁基复合材料	490
第8篇 热塑性聚合物基复合材料	433	5 其他金属基复合材料	491
第1章 概述	435	5.1 锌基复合材料	491
1 热塑性与热固性树脂基体材料的对比	435	5.2 铁基复合材料	491
2 典型基体材料	435	5.3 钢基复合材料	491
3 典型纤维材料	438	5.4 镍基复合材料	491
4 其他添加剂	439	5.5 难熔金属基复合材料	491
5 热塑性聚合物基复合材料的特点	441	第2章 金属基复合材料的性能	492
6 热塑性和热固性聚合物基复合材料的特点比较	441	1 基体与增强体的物理性能	492
7 热塑性复合材料的关键因素	442	1.1 金属基复合材料的增强体	492
8 热塑性聚合物基复合材料的发展和应用	443	1.2 金属基复合材料的基体材料	494
第2章 热塑性树脂基复合材料的制造技术	444	2 颗粒增强金属基复合材料	495
1 热塑性聚合物基复合材料预浸料制造技术	444	2.1 颗粒增强铝基复合材料	495
2 非连续纤维复合材料制造技术	446	2.2 SiCp/Mg 复合材料的性能	497
3 连续纤维复合材料制造技术	449	2.3 SiCp/Zn 复合材料的性能	498
第3章 热塑性聚合物基复合材料基本性能	451	2.4 SiC 颗粒增强其他金属基复合材料	498
1 热塑性树脂基体材料的基本性能	451	3 晶须增强金属基复合材料	498
2 增强纤维的基本性能	454	3.1 晶须增强铝基复合材料	498
3 非连续纤维增强复合材料的基本性能	455	3.2 晶须增强镁基复合材料的性能	501
4 连续纤维增强复合材料的基本性能	459	4 短纤维增强金属基复合材料	502
第4章 复合材料基本性能理论预测	465	4.1 常温拉伸强度	502
1 纤维体积分数和复合材料密度	465	4.2 压缩强度	502
2 非连续纤维复合材料的弹性模量	465	4.3 硬度	502
3 连续纤维复合材料的弹性模量	467	4.4 线胀系数	502
4 复合材料的强度	467	4.5 镁基复合材料高温性能	502
5 复合材料的断裂韧性	468	5 长纤维增强金属基复合材料	502
6 复合材料的热性能	468	5.1 碳纤维增强铝基复合材料	502
第5章 热塑性聚合物基复合材料的蠕变和疲劳性能	470	5.2 碳纤维增强银基复合材料	503
1 黏弹性能的定义	470	5.3 碳纤维增强铜基复合材料	503
2 热塑性基体材料的物理老化	470	5.4 碳纤维增强铅基复合材料	504
3 热塑性基体材料的黏弹响应	471	5.5 钛基复合材料	504
4 热塑性复合材料的蠕变性能	471	5.6 金属间化合物	504
5 热塑性复合材料疲劳实验	473	6 自生增强金属基复合材料	505
6 非连续增强复合材料的疲劳性能	474	6.1 自生增强铝基复合材料	505
7 连续纤维增强复合材料的疲劳性能	475	6.2 TiB ₂ /Ti-Al 复合材料的性能	506
第6章 热塑性聚合物基复合材料的新进展与发展方向	477	6.3 TiC _p /Ni ₃ Al 复合材料	506
1 滚压成形技术	477	7 其他增强金属基复合材料	506
2 高压釜成形技术	477	7.1 室温力学性能	506
3 水辅助注射成形技术	478	7.2 耐磨性能	507
4 长纤维增强热塑性复合材料在汽车工业	478	7.3 热物理性能	507
应用的新发展	478	7.4 高温性能	507
5 热塑性纳米复合材料的发展	479	第3章 金属基复合材料制备工艺	509
参考文献	481	1 连续增强金属基复合材料	509
第9篇 金属基复合材料	485	1.1 热压法	509
第1章 金属基复合材料的主要种类	487	1.2 液态金属浸渍法	509
1 铝基复合材料	487	1.3 几种典型的长纤维增强金属基复合材料	510
1.1 连续纤维增强的铝基复合材料	487	2 非连续增强金属基复合材料的成形工艺	511
1.2 非连续增强体增强的铝基复合材料	488	2.1 铸造成形工艺	511
2 铜基复合材料	488	2.2 原位自生法	515
2.1 连续纤维增强铜基复合材料	488	2.3 共喷沉积法	516
2.2 非连续增强体增强的铜基复合材料	488	2.4 粉末冶金法	517
3 钛基复合材料	489	第4章 金属基复合材料的热处理与成形加工	518
3.1 连续纤维增强钛基复合材料	489	1 金属基复合材料的强化热处理	518
3.2 非连续颗粒增强钛基复合材料	489	1.1 铝基复合材料的强化热处理	518
4 镁基复合材料	490	1.2 镁合金基复合材料的强化热处理	522
		1.3 钛合金基复合材料的强化热处理	523
		2 金属基复合材料尺寸稳定化热处理	526

2.1 铝合金基复合材料的冷热循环尺寸稳定化处理	527	3.2 缺陷与裂纹对强韧化的影响	564
2.2 铝合金基复合材料的深冷尺寸稳定化处理	528	3.3 增强体损伤对强韧化的影响	564
3 非连续增强金属基复合材料的塑性成形工艺	528	3.4 多尺度强韧化	564
3.1 铝基复合材料的拉伸塑性	528	第3章 连续纤维增韧陶瓷(玻璃)基复合材料	565
3.2 金属基复合材料的高温压缩变形	529	1 常见几种增韧方法的比较	565
3.3 铝基复合材料的轧制塑性	529	2 纤维	565
3.4 铝基复合材料的挤压塑性	530	3 基体材料	566
3.5 金属基复合材料的蠕变性能	531	4 纤维与基体之间的界面	566
4 非连续增强金属基复合材料的超塑性	531	5 纤维预制体	567
4.1 金属基复合材料半固态超塑性	533	6 常见的连续纤维增韧陶瓷基复合材料体系	569
4.2 金属基复合材料的高速超塑性	534	6.1 纤维/玻璃基复合材料	569
4.3 金属基复合材料超塑性变形机理	534	6.2 纤维/玻璃陶瓷基复合材料	569
5 SiCw/Al 复合材料的机械加工	536	6.3 纤维/氮化硅复合材料	572
5.1 SiCw/Al 复合材料的切削加工	536	6.4 纤维/碳化硅陶瓷基复合材料	573
5.2 SiCw/Al 复合材料的铣削加工	539	6.5 CVI-CMC-SiC 的性能特征	575
第5章 金属基复合材料的应用	542	6.6 自生复合材料	578
1 金属基复合材料在航天领域的应用	542	第4章 晶须补强增韧陶瓷(玻璃)基复合材料	587
1.1 高性能连续纤维增强金属基复合材料在航天器上的应用	542	1 陶瓷晶须	587
1.2 铝基复合材料在导弹中的应用	543	2 晶须的增韧机理及其影响因素	588
1.3 铝基复合材料在航天领域的其他应用	543	2.1 晶须的增韧机理	588
2 金属基复合材料在航天领域的应用	544	2.2 晶须增韧机理及其影响因素	588
3 金属基复合材料在交通运输工具中的应用	546	3 晶须方位角与增韧机理的关系模型	589
第6章 金属基复合材料的新进展及发展趋势	548	3.1 晶须的受力行为	589
1 金属基复合材料的国内外研究现状	548	3.2 晶须方位角与破坏模式	589
2 我国对金属基复合材料的需求背景	549	4 晶须定向排布及其复合材料的性能	590
3 进一步开展金属基复合材料研究的主要研究内容	549	4.1 晶须定向排布技术	590
3.1 完善非连续增强金属基复合材料体系	549	4.2 晶须定向度的表征方法	590
3.2 重点发展高性能低成本非连续增强金属基复合材料	549	4.3 晶须定向排布对 SiC (w) /Si ₃ N ₄ 复合材料的影响	590
3.3 开展非连续增强金属基复合材料制备科学基础和制备工艺方法研究	550	5 常见的晶须补强增韧陶瓷基复合材料	595
3.4 开展非连续增强金属基复合材料热处理技术的研究	550	5.1 晶须补强增韧 Al ₂ O ₃ 陶瓷基复合材料	595
3.5 开展非连续增强金属基复合材料高温塑性变形和高速超塑性研究	550	5.2 晶须补强 Si ₃ N ₄ 陶瓷基复合材料	595
3.6 开展非连续增强金属基复合材料的机械加工研究	550	5.3 晶须补强 ZrO ₂ 陶瓷基复合材料	596
3.7 开展非连续增强金属基复合材料在不同环境下的行为研究	550	5.4 晶须补强 mullite 陶瓷基复合材料	596
3.8 开展非连续增强金属基复合材料的连接技术研究	550	5.5 晶须补强增强石英玻璃基复合材料	597
参考文献	551	5.6 晶须增强玻璃基复合材料	597
第10篇 陶瓷(玻璃)基复合材料	553	第5章 超高韧性仿生结构陶瓷基复合材料	598
第1章 陶瓷(玻璃)基复合材料的分类	555	1 仿生结构陶瓷材料的设计要点	598
第2章 陶瓷基复合材料的强韧化机理	557	2 仿生结构陶瓷材料的制备工艺	599
1 不同增强体的强韧化机理	557	2.1 材料体系的选择和优化	599
1.1 纳米颗粒强韧化机理	557	2.2 仿竹木纤维结构的纤维独石结构陶瓷复合材料的制备工艺	599
1.2 微米颗粒强韧化机理	558	2.3 仿贝壳珍珠层结构的层状结构陶瓷复合材料的制备工艺	599
1.3 晶须强韧化机理	560	3 纤维独石结构陶瓷复合材料的结构和性能	600
1.4 纤维强韧化机理	561	3.1 Si ₃ N ₄ /BN 纤维独石结构陶瓷复合材料的结构	600
1.5 强韧化机理对比	562	3.2 Si ₃ N ₄ /BN 纤维独石结构陶瓷复合材料的特殊性能	600
2 强韧化影响因素	563	3.3 纤维独石结构陶瓷复合材料性能的主要影响因素	601
2.1 模量匹配关系	563	4 层状结构陶瓷复合材料的结构和性能	604
2.2 强韧化匹配关系	563	4.1 特殊的结构特征与开裂方式	604
3 强韧化机理的发展与展望	564	4.2 非脆性破坏行为	604
3.1 强韧化机理的探索	564	4.3 层状结构陶瓷复合材料的力学性能	605
		5 不同尺度多级增韧机制的协同增韧作用	606
		6 仿生结构陶瓷复合材料的应用	607
		7 未来的发展方向	608
		第6章 陶瓷基复合材料的制备技术	609

1 料浆浸渗-热压烧结法	609	2 化学气相沉积法 (CVI)	643
2 直接氧化沉积法	609	2.1 CVI 工艺方法	644
3 化学气相浸渗法	610	2.2 CVI 工艺的计算机模拟研究	646
3.1 化学气相浸渗过程的实现	610	第 2 章 C/C 复合材料的结构与性能	649
3.2 CVI 的工艺原理与方法	611	1 C/C 复合材料的室温性能	649
4 先驱体转化法	613	1.1 C/C 复合材料的强度	649
4.1 PIP 法的主要特点	613	1.2 C/C 复合材料的模量	649
4.2 对先驱体的基本要求	613	1.3 C/C 复合材料的断裂韧度	649
4.3 聚碳硅烷的热解转化过程	613	1.4 C/C 复合材料的疲劳和蠕变性能	650
5 反应性熔体浸渗法	614	1.5 C/C 复合材料的摩擦磨损性能	650
5.1 浸渗过程中液体的受力情况分析	614	2 C/C 复合材料的高温性能	651
5.2 RMI 过程的动力学分析	614	3 C/C 复合材料的热性能	653
6 定向凝固法	614	3.1 C/C 复合材料的热导率	653
6.1 悬浮区熔法	615	3.2 C/C 复合材料的热膨胀	653
6.2 改进的 Bridgman 法	615	3.3 C/C 复合材料的比热容	654
6.3 边界外延生产法(Edge-Defined Film-Fed Growth, EFG)	615	4 C/C 复合材料的组织	654
第 7 章 陶瓷(玻璃)基复合材料的结构与性能	616	4.1 沥青基 C/C 复合材料偏光组织结构类型	654
1 陶瓷(玻璃)基复合材料的界面和结构特点	616	4.2 CVD C/C 复合材料偏光组织结构类型	655
2 纤维的强度和就位强度	616	5 C/C 复合材料的界面	656
3 连续纤维增强陶瓷(玻璃)基复合材料的常规力学性能	617	第 3 章 C/C 复合材料的防氧化技术	658
4 连续纤维增强陶瓷(玻璃)基复合材料的拉伸性能	619	1 C/C 复合材料的氧化过程及特点	658
5 连续纤维增强陶瓷(玻璃)基复合材料的断裂韧性	621	2 改性技术	658
6 连续纤维增强陶瓷(玻璃)基复合材料的疲劳性能	622	2.1 纤维改性技术	658
7 连续纤维增强陶瓷(玻璃)基复合材料的蠕变性能	623	2.2 基体改性技术	658
8 连续纤维增强陶瓷(玻璃)基复合材料的热震(热冲击)性能	624	3 涂层技术	660
9 连续纤维增强陶瓷(玻璃)基复合材料的抗环境介质侵蚀性能	625	3.1 碳材料防氧化的发展过程	660
10 我国连续纤维增韧 SiC 陶瓷基复合材料的研究进展	626	3.2 防氧化涂层的基本要求	660
第 8 章 陶瓷(玻璃)基复合材料的应用	628	3.3 涂层 C/C 的一般氧化特征	660
1 在液体火箭发动机上的应用	628	3.4 涂层的结构	661
2 在刹车材料上的应用	628	3.5 C/C 复合材料抗氧化涂层的制备方法	662
3 在航空发动机上的应用	629	3.6 抗氧化涂层体系	663
4 在航天飞行器热防护系统上的应用	630	4 展望	666
5 在核聚变第一壁上的应用	631	第 4 章 C/C 复合材料的应用与展望	667
6 在导弹端头帽和卫星天线窗框上的应用	632	1 C/C 复合材料作为高速制动材料的应用	667
第 9 章 陶瓷(玻璃)基复合材料的展望	633	2 C/C 复合材料作为航空发动机高温结构件的应用	670
1 拓宽应用领域, 解决应用中的瓶颈问题	633	3 C/C 复合材料作为固体火箭发动机抗烧蚀材料的应用	671
2 发展材料的特种环境模拟理论与技术	633	4 C/C 复合材料作为返回式航天飞行器热结构材料的应用	673
3 发展陶瓷基复合材料优化设计理论与方法	633	5 C/C 复合材料作为生物材料的应用	674
4 发展新型陶瓷纤维、基体和相应界面层材料以及高性能价格比的陶瓷基复合材料制备技术	633	6 C/C 复合材料作的应用展望	675
5 纤维预制体设计、制备与检测技术	633	参考文献	677
参考文献	634	第 12 篇 水泥基复合材料	681
第 11 篇 碳基复合材料	637	第 1 章 聚合物-水泥基复合材料	683
第 1 章 C/C 复合材料的制备技术	639	1 聚合物水泥混凝土 (PCC)	683
1 液相浸渍炭化法	639	2 聚合物浸渍混凝土 (PIC)	685
1.1 树脂浸渍炭化法	639	3 无宏观缺陷水泥 (Macro-Defect-Free cement, MDF)	686
1.2 沥青浸渍炭化法	639	第 2 章 纤维增强水泥基复合材料	688
1.3 常用的浸渍炭化法	641	1 玻璃纤维增强水泥基复合材料 (GRC)	688
1.4 压力对炭化的影响	643	1.1 玻璃纤维增强水泥基复合材料的生产工艺	688
		1.2 玻璃纤维增强水泥基复合材料的性能	688
		1.3 玻璃纤维增强水泥基复合材料的应用	689
		2 钢纤维增强水泥基复合材料	689
		2.1 钢纤维的特性和种类	689
		2.2 钢纤维增强水泥基复合材料的生产工艺	690
		2.3 钢纤维增强水泥基复合材料的性能	690
		2.4 钢纤维增强水泥基复合材料的应用	691

3 高性能纤维增强水泥基复合材料	691	5.1 Voigt 和 Reuss 的上、下限	736
3.1 密实增强混凝土 (Compact Reinforced Concrete, CRC)	691	5.2 Hashin 和 Shtrikman 的上、下限	737
3.2 活性细粒混凝土 (Reactive Powder Concrete, RPC)	692	6 复合材料强度的微观力学分析	738
3.3 注浆纤维混凝土 (SIFCON)	694	6.1 单向连续纤维增强复合材料的拉伸	738
3.4 经设计的水泥基复合材料 (Engineered Cementitious Composites, ECC)	696	6.2 单向连续纤维增强复合材料的压缩	738
第3章 机敏水泥基复合材料	698	6.3 单向短纤维复合材料的强度	739
1 机敏混凝土材料的发展	698	第5章 复合材料界面力学	740
2 机敏混凝土材料与结构的最新研究进展	699	1 界面上力的传递	740
2.1 自感知混凝土	699	1.1 黏结理论	740
2.2 自修复/愈合混凝土	701	1.2 界面上的载荷传递	741
2.3 自增强阻尼混凝土	704	1.3 界面性能表征	743
2.4 其他功能的水泥基复合材料	707	2 与界面相关的断裂韧度理论	745
3 机敏混凝土的应用与发展前景	708	2.1 纤维-基体脱黏	746
参考文献	709	2.2 脱黏后的摩擦	746
第13篇 复合材料力学问题与设计	711	2.3 应力再分配	746
第1章 各向异性材料的本构关系	713	2.4 纤维拔出	746
1 三维线弹性体的应变能函数	713	2.5 总体断裂韧性理论	747
2 三维线弹性体的本构关系	714	2.6 断裂韧度图	747
3 工程弹性常数表示的本构关系	715	3 控制界面的增韧方法	747
4 弹性常数的限制	715	3.1 纤维涂层和间歇结合概念	748
5 简单层板在材料主方向上的本构关系	716	3.2 脱层促进剂	749
6 简单层板弹性常数的实验确定	717	3.3 脱层抑制剂	749
7 简单层板在任意方向上的本构关系	717	第6章 复合材料设计	751
8 正交各向异性简单层板的不变量性质	719	1 复合材料的可设计性	751
第2章 复合材料力学问题基本解法	721	1.1 复合材料的宏微观结构特征	751
1 基本方程和边界条件	721	1.2 复合材料的可设计性	751
2 Green 函数法	721	1.3 复合材料结构设计中面临的问题	752
3 Eshelby 等效夹杂法	722	2 复合材料设计的基本思想	752
3.1 夹杂内的 Eshelby 张量和弹性场	722	2.1 复合材料的设计条件	752
3.2 夹杂外的 Eshelby 张量和弹性场	723	2.2 复合材料的选材及成形工艺	753
4 微分算子法	723	2.3 复合材料的材料/工艺/设计一体化设计	753
5 Stroh 法	723	2.4 复合材料及其结构的软设计	754
6 数值方法	724	3 复合材料结构设计	754
6.1 有限元法	724	4 复合材料及其结构的虚拟设计	755
6.2 边界元法	725	4.1 虚拟技术的基本概念及特点	755
6.3 无单元法	725	4.2 复合材料分析(数学)模型的建立	755
第3章 复合材料层合板理论	726	4.3 复合材料的虚拟设计	756
1 层合板的宏观力学性能	726	第14篇 复合材料结构设计与分析	759
1.1 层合板的应变和应力变化	726	第1章 概述	761
1.2 层合板的合力和合力矩	726	1 复合材料在结构中的应用	761
1.3 层合板刚度的特殊情况	727	2 复合材料结构的特点	761
2 层合板的热应力分析	729	2.1 结构性能方面	761
3 层间应力	730	2.2 结构设计和制造工艺方面	763
4 层合板刚度不变量	731	3 复合材料飞机结构设计用规范概述	763
4.1 层合板刚度不变量的概念	731	4 复合材料结构设计和验证概述	763
4.2 层合板刚度不变量的特殊结果	732	4.1 设计方法概述	763
第4章 复合材料细观力学分析	733	4.2 设计流程	764
1 复合材料的有效弹性模量	733	4.3 发展趋势	764
1.1 微观力学的发展概况	733	第2章 结构设计要求	765
1.2 微观力学的研究内容及方法	733	1 适用的规范和标准	765
1.3 复合材料等效弹性模量	733	1.1 军用飞机	765
2 自治理论	734	1.2 民用飞机	765
3 微分法	735	1.3 其他	765
4 Mori-Tanaka 方法	736	2 一般设计要求	765
5 复合材料有效弹性模量的上、下限	736	3 军用飞机结构设计要求	765
		3.1 静强度	765
		3.2 耐久性	765
		3.3 损伤容限	766

4 民用飞机结构设计要求	767	2.4 层压结构设计实例	795
4.1 咨询通报 AC20-107A “复合材料结构”的 有关内容	767	3 层压面板夹层结构的设计与分析	797
4.2 与军机要求的差别	767	3.1 夹层结构基本设计原理	797
4.3 AC20-107A 的符合性要求	768	3.2 夹层结构的应力分析及强度校核	798
第3章 结构设计选材和结构工艺性考虑	769	4 复合材料抗坠吸能结构设计	799
1 结构选材原则	769	4.1 机体结构耐坠毁设计特点	799
1.1 一般原则	769	4.2 复合材料耐坠吸能元件设计	799
1.2 性能数据来源	769	4.3 复合材料耐坠吸能地板结构设计	800
1.3 对替换材料和已用材料所作变化的评定	769	5 厚断面复合材料(厚层压板)分析概述	801
2 环境对材料性能影响的考虑	769	5.1 厚断面复合材料的特点	801
3 基体和纤维材料的选用	769	5.2 厚断面复合材料的三维应力分析	801
4 结构工艺性考虑	770	5.3 厚断面复合材料的性能确定	801
4.1 成形工艺方法选择原则	770	第7章 结构稳定性分析	804
4.2 典型结构成形工艺	770	1 层压板的稳定性分析	804
第4章 设计许用值的确定	772	1.1 矩形层压板的屈曲分析	804
1 许用值与设计许用值	772	1.2 加筋条的屈曲和压损分析	806
2 确定设计许用值的一般原则	772	1.3 加筋板的稳定性分析	809
3 确定材料许用值和结构设计许用值的 具体作法	772	1.4 铺层顺序对稳定性的影响	809
4 国内外设计现状	772	2 后屈曲概述及后屈曲强度分析	811
5 提高设计许用值的途径	773	2.1 后屈曲分析的内容和特点	811
第5章 复合材料结构设计验证积木式方法	774	2.2 层压板和加筋层压板的后屈曲特性	811
1 积木式方法概论	774	2.3 后屈曲强度的工程处理方法简介	812
2 复合材料积木式结构设计验证方法的意义	774	3 夹层结构的屈曲分析	814
3 实施积木式的一般方法	774	第8章 连接设计与分析	816
4 军用飞机结构实施积木式的具体考虑	775	1 复合材料连接特点	816
4.1 结构分类	775	1.1 胶接连接特点	816
4.2 积木式方法的流程和各阶段的目标	775	1.2 机械连接特点	816
4.3 建立材料许用值的具体考虑	775	1.3 混合连接特点	816
4.4 不同结构类别的最低物理缺陷要求	776	1.4 复合材料连接方法的选取原则	816
4.5 复合材料积木式结构研制	776	2 胶接连接	816
4.6 不同结构类别的质量保证要求	778	2.1 胶接连接设计	816
5 民用飞机结构实施积木式的具体考虑	779	2.2 胶接连接强度分析概述	822
5.1 A组, 材料性能的确定	779	3 机械连接	822
5.2 B组, 确定设计许用值	780	3.1 机械连接设计	822
5.3 C组, 分析验证	781	3.2 主承力连接区设计	825
6 全尺寸结构验证试验的特殊要求	781	3.3 机械连接静力分析	826
6.1 结构静强度验证	781	3.4 机械连接强度校核	828
6.2 结构耐久性验证	781	第9章 损伤阻抗、耐久性和损伤容限	831
6.3 结构损伤容限验证	782	1 概述	831
6.4 结构动力学验证	782	1.1 一般原理	831
7 积木式设计验证方法的实例	782	1.2 与复合材料有关的内容	831
7.1 Boeing777 飞机复合材料主结构的 积木式方法	782	2 缺陷/损伤对强度的影响	831
7.2 某军用运输机机翼盒段	784	2.1 制造缺陷	831
7.3 某歼击机复合材料机翼的验证	785	2.2 使用损伤	831
8 静强度验证试验提前破坏的实例	785	2.3 缺陷/损伤影响的强度评定	831
8.1 L-1011 垂直安定面的验证	785	3 损伤阻抗	836
8.2 机翼扭力盒破坏分析	785	4 耐久性与损伤容限设计	836
第6章 结构与强度、刚度分析	786	4.1 一般原则	836
1 复合材料结构设计概念	786	4.2 细节设计方法	836
1.1 “纤维取向”设计概念	786	5 耐久性与损伤容限分析方法	837
1.2 “整体化”设计概念	787	5.1 损伤容限分析方法	837
1.3 其他新型结构设计概念	789	5.2 耐久性分析方法	840
2 层压板结构设计与分析	790	6 提高耐久性与损伤容限的措施	840
2.1 铺层设计要点	790	6.1 提高耐久性与损伤容限的设计措施	840
2.2 层压板刚度特性分析	791	6.2 材料性能与结构耐久性 & 损伤容限的关系	841
2.3 层压板的强度和失效分析	794	第10章 环境影响及防护	842
		1 环境设计准则	842
		1.1 湿热环境	842
		1.2 冲击环境	842

1.3 老化环境	842	6 小结	868
2 湿热环境效应	842	参考文献	869
2.1 我国飞机使用环境	843	第15篇 复合材料性能试验、表征与质量控制	871
2.2 吸湿扩散特性预估	843	第1章 复合材料性能试验指南	873
2.3 加速吸湿的原理及方法	844	1 复合材料性能表征的特点	873
2.4 湿热环境对复合材料性能的影响	844	2 试验设计与分类	874
2.5 湿热循环对复合材料性能的影响	846	3 试验计划编制	875
3 湿热老化效应	847	3.1 评定性能选择	875
3.1 湿热老化对复合材料物理性能的影响	847	3.2 试验方法选取	875
3.2 湿热老化对复合材料层压板力学性能的影响	847	3.3 母体采样	876
3.3 老化效应预估方法	848	3.4 材料与工艺差异	877
3.4 波音公司老化试验结果	850	3.5 试样制备与检测	878
4 歼击机加速湿热老化谱及试验结果	853	3.6 吸湿和浸润处理因素	878
4.1 编制依据	853	3.7 非大气条件下的试验	880
4.2 编制要求和原则	853	4 数据处理方法	881
4.3 飞行温度、湿度剖面及模拟	853	4.1 异常数据筛选及处理	881
4.4 地面停留加速	853	4.2 数据归一化	882
4.5 湿热加速老化谱的编制	853	4.3 数据等价性与汇集	882
4.6 加速湿热老化谱试验及结果	853	5 实验报告要求	883
5 运输机加速湿热老化谱及试验结果	854	第2章 推荐的试验矩阵与试验要求	884
6 自然老化、加速自然老化和湿热谱老化的关系 及推荐建议	854	1 筛选材料的试验矩阵	884
7 复合材料结构腐蚀环境及其防护	854	1.1 力学性能筛选	884
7.1 复合材料的腐蚀	854	1.2 对高温材料体系的力学性能筛选	884
7.2 复合材料与金属的电化学腐蚀	855	1.3 液体敏感性的筛选	885
7.3 复合材料的防护涂层	855	2 材料取证试验矩阵	885
第11章 使用保障	857	2.1 预浸料试验矩阵	885
1 使用保障性定义与设计基本原理	857	2.2 单层试验矩阵	886
1.1 使用保障性定义	857	2.3 纤维缠绕材料试验矩阵	886
1.2 使用保障性设计基本原理	857	3 材料验收试验矩阵	886
2 机体结构使用保障性设计	857	4 替代材料等效性试验矩阵	888
2.1 机体结构维修性和可靠性设计要素	857	4.1 替代的复合材料供应商的取证	888
2.2 机体结构使用保障性设计特点	858	4.2 对已获认证材料所作变化的评定	890
2.3 机体结构使用保障性设计实例	858	第3章 预浸料性能表征	893
3 机体结构修理设计	858	1 预浸料的现代表征技术	893
3.1 复合材料结构损伤与修理方法	858	1.1 热分析表征法	893
3.2 复合材料结构修理设计原则和可修理损伤	859	1.2 红外光谱表征法	895
3.3 结构常见损伤修理	860	1.3 凝胶渗透色谱表征法	896
第12章 结构可靠性设计与分析	862	1.4 高效液相色谱表征法	896
1 概述	862	1.5 流变分析表征法	897
1.1 可靠性的定义	862	1.6 动态介电表征法	897
1.2 可靠性术语	862	2 预浸料物理性能表征	897
1.3 结构可靠性设计	862	2.1 增强材料的物理描述	898
1.4 复合材料结构可靠性问题的提出	862	2.2 树脂含量	898
2 影响复合材料结构可靠性的因素	862	2.3 纤维含量	898
2.1 静强度	862	2.4 可溶性树脂含量	898
2.2 环境影响	863	2.5 挥发分含量	899
2.3 疲劳	863	2.6 无机填料和添加剂含量	899
2.4 损伤容限	863	2.7 单位面积纤维质量	899
3 可靠性设计时需要考虑的问题	863	3 预浸料工艺性能表征	899
4 可靠性评估和设计	863	3.1 黏性	899
4.1 背景	863	3.2 树脂流动度	899
4.2 概率设计方法	864	3.3 凝胶时间	899
4.3 概率设计方法数据要求	864	3.4 固化单层厚度	899
5 复合材料结构累积冲击损伤容限可靠性 设计方法	864	3.5 使用期	899
5.1 方法的原理	865	3.6 储存期	899
5.2 主要随机变量及其数据分布	865	第4章 层压板性能试验	900
5.3 计算情况和求解步骤	867	1 基本物理性能	900
		1.1 密度	900

1.2 纤维体积含量	900	5.3 层的剪切失效	937
1.3 固化后单层厚度	900	5.4 分层	937
1.4 孔隙率	900	6 静态与循环载荷下的异同点	938
1.5 玻璃化转变温度	900	6.1 宏观失效特征的相似性	938
1.6 吸湿性	901	6.2 微观失效特征的异同点	938
1.7 尺寸稳定性(热和吸湿)	901	7 失效分析要点	938
1.8 热传导性	902	7.1 分析思路与方法	939
1.9 比热容	902	7.2 表面保护与清洗	939
1.10 热扩散	902	7.3 材料性能验证	939
1.11 出气	902	7.4 损伤特征分析	939
1.12 阻燃和烟雾生成	902	7.5 失效模式判断	940
2 基本力学性能	902	7.6 应力分析计算	940
2.1 拉伸性能试验	902	7.7 失效原因分析	940
2.2 压缩性能试验	904	8 结束语	940
2.3 面内剪切性能试验	905	参考文献	941
2.4 层间剪切性能试验	907	第 16 篇 功能复合材料与新型复合材料	943
2.5 弯曲性能试验	908	第 1 章 黏土纳米复合材料	945
3 与结构特性有关的性能试验	909	1 黏土的结构特征和化学修饰	945
3.1 开孔拉伸及压缩试验	909	2 PCN 纳米复合材料的制备	947
3.2 填充孔拉伸与压缩试验	909	2.1 PCN 纳米复合材料制备的理论基础	947
3.3 单钉挤压强度试验	909	2.2 PCN 纳米复合材料制备方法	947
3.4 I 型层间断裂韧度试验	909	3 PCN 纳米复合材料的理论模型和 结构分类	952
3.5 层间混合型断裂韧性 G_c 试验	909	3.1 PCN 纳米复合材料的理论模型	952
3.6 准静态压痕试验	909	3.2 PCN 纳米复合材料的结构分类	953
3.7 冲击后压缩强度试验	910	4 PCN 纳米复合材料的结构表征	953
3.8 II 型层间断裂韧性试验	911	5 PCN 纳米复合材料的性能	954
4 织物增强纺织复合材料力学性能试验	912	5.1 力学性能	954
5 力学性能试验方法小结	912	5.2 热变形温度	956
6 电性能试验	918	5.3 耐热性能	956
7 复合材料耐环境、耐介质性能评价	918	5.4 燃烧性能	956
第 5 章 复合材料质量评价与控制	920	5.5 气液阻隔性能	957
1 复合材料质量评价	920	5.6 离子导电性能	957
1.1 质量评价的复杂性	920	5.7 光学性能	958
1.2 质量评价存在的问题	920	5.8 PCN 纳米复合材料生物降解性	958
1.3 复合材料质量评价方法	921	5.9 流变学性能	958
2 复合材料质量控制	922	5.10 其他性能	959
3 成形工艺质量控制	922	6 PCN 纳米复合材料应用情况、前景与展望	959
3.1 成形工艺质量控制的必要性	922	第 2 章 导电功能复合材料	961
3.2 固化理论模型与计算机模拟	923	1 导电粒子填充高分子材料的一般性质	961
3.3 成形工艺实时监控	926	2 复合导电行为的一般性描述	962
3.4 统计成形工艺控制	930	3 正、负温度系数电阻现象	962
3.5 经验控制法	931	4 PTC 效应的数理模型与验证	963
3.6 工艺质量检验	931	5 基于 PTC 效应的限流保护元件及产品	965
第 6 章 纤维增强复合材料失效分析	932	5.1 表面封装 PTC 元件	966
1 复合材料的缺陷与损伤	932	5.2 插脚式 PTC 元件	967
2 缺陷与损伤的检查技术	933	5.3 轴向装配 PTC 元件	967
2.1 无损检测	933	5.4 垫片式 PTC 元件	968
2.2 材质检验	933	6 无源自限温的 PTC 材料应用技术	969
2.3 断口观察分析	934	6.1 启动态电热特性	970
3 宏观断裂失效的基本模式	934	6.2 平衡态电热特性	971
4 单向层压板的失效	935	7 基于 PTC 效应的自限温(温控)伴热电缆	973
4.1 纵向拉伸	935	7.1 温控伴热电缆的性能参数	973
4.2 纵向压缩	936	7.2 电热带的安装施工	974
4.3 横向拉伸	936	7.3 温控伴热电缆的简易测试方法	974
4.4 横向压缩	937	7.4 选用温控伴热电缆电热带常见问题	974
4.5 面内剪切	937	第 3 章 梯度功能复合材料	978
5 多向层压板的失效	937	1 梯度功能材料诞生的社会背景及意义	978
5.1 单层的拉伸失效	937		
5.2 单层的压缩失效	937		

2 国内外研究动态和进展	978	2.1 智能复合材料结构的基本组成	1013
3 FGM 研究方法	978	2.2 智能复合材料结构的工作原理	1013
3.1 材料设计	979	2.3 典型智能元件	1013
3.2 组成分布函数的确定	979	2.4 智能复合材料结构的设计	1014
3.3 FGM 材料物性值的理论预测	979	2.5 智能复合材料结构的制备	1015
3.4 FGM 的热应力解析	980	2.6 智能复合材料结构的评价	1016
3.5 FGM 制备技术	982	3 智能复合材料结构的主要应用领域	1016
3.6 FGM 性能评价技术	985	3.1 结构健康监测	1016
4 FGM 的发展趋势与展望	986	3.2 结构的形状自适应	1017
第 4 章 光功能复合材料	988	3.3 结构的减振降噪	1017
1 透光材料	988	3.4 智能表层结构	1018
1.1 透光材料的特征值	988	4 智能复合材料与结构的展望	1018
1.2 无机透光材料	989	4.1 智能复合材料与结构研究的热点问题	1018
1.3 高分子透光材料	989	4.2 智能复合材料与结构未来发展的方向	1018
1.4 透明玻璃钢材料	993	第 6 章 电磁波吸收与屏蔽复合材料	1020
1.5 纳米复合透光材料	995	1 电磁波吸收复合材料	1020
2 滤色材料	995	1.1 微波分类及其吸收原理	1020
2.1 滤色玻璃	996	1.2 涂覆型吸波复合材料	1020
2.2 稀土有色光学玻璃	996	1.3 结构型吸波复合材料	1021
2.3 红外光学玻璃	997	1.4 吸波复合材料的基体材料	1022
3 光致发光材料	997	1.5 吸波复合材料的方向和展望	1022
3.1 光致发光基础	997	2 电磁屏蔽复合材料	1022
3.2 光致发光材料	1000	2.1 概述	1022
3.3 纳米复合发光材料	1004	2.2 电磁波屏蔽的基本原理	1023
3.4 光致发光材料的应用	1005	2.3 电磁波屏蔽复合材料的研究现状	1027
4 光致变色材料	1006	2.4 电磁屏蔽复合材料	1028
4.1 光色玻璃	1006	2.5 电磁屏蔽材料发展重点及其发展方向	1031
4.2 光致变色有机材料	1007	第 7 章 机械功能复合材料	1032
第 5 章 智能复合材料	1012	1 滑动摩擦实验装置和表征参数	1032
1 智能复合材料结构的基本概念	1012	2 短纤维和固体润滑剂	1032
1.1 智能复合材料结构的定义	1012	3 颗粒尺寸和含量对复合材料摩擦	
1.2 智能复合材料结构的特点	1012	性能的影响	1033
1.3 智能复合材料结构产生和发展的原因	1012	4 无机颗粒和其他填充材料的结合	1034
1.4 智能复合材料结构的关键共性技术	1013	5 纳米颗粒和短碳纤维的组合效用	1034
2 智能复合材料及其结构的设计、制备与		6 总结	1037
分析方法	1013	参考文献	1039