

ENCYCLOPEDIA OF COMPOSITES

复合材料大全

- 主 编 沃丁柱
- 副主编 李顺林 (常务)
王兴业
刘雄亚
汪宗荣
张国定

化学工业出版社



复 合 材 料 大 全

主 编 沃丁柱

副主编 李顺林 (常务)

王兴业

刘雄亚

汪宗荣

张国定

化 学 工 业 出 版 社

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

复合材料大全/沃丁柱主编. —北京: 化学工业出版社, 2000. 1
(2002. 1 重印) ISBN 7-5025-2476-2

I. 复… II. 沃… III. 复合材料-手册 IV. TB33-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 03018 号

复合材料大全

沃丁柱 主编

责任编辑: 张玉昆

责任校对: 马燕珠

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64918013

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 81 $\frac{3}{4}$ 字数 2746 千字

2000 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 2 次印刷

印 数: 4001—6000

ISBN 7-5025-2476-2/TQ · 1120

定 价: 168.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

《复合材料大全》编委会

顾问：吴人洁 于 翹 曾汉民

主 编：沃丁柱

副主编：李顺林（常务） 王兴业 刘雄亚 汪宗荣 张国定

编 委：（按姓氏笔划为序）

丁亦平	卞福保	王玉梅	王兴业	王 均	王秉权
王荣国	方 芳	丘哲明	冯春祥	吉法祥	孙 伟
孙可伟	江大志	许陆文	刘雄亚	刘晓春	朱崇真
汤国栋	沃丁柱	李顺林	李学闵	李彦春	李思简
张耀明	张呈林	张全纯	张国定	张长瑞	张 恒
张 垣	张东兴	张大厚	张懋炯	张佐光	张崇杰
沈曾民	沈 真	沈 为	沈松年	邹惟前	宋焕成
肖 军	陈程林	陈 尚	陈 辉	陈 博	杨乃宾
杨 桂	杨学忠	吴代华	吴守楨	吴申庆	汪宗荣
周 铸	周本濂	林德春	林微微	苗 冰	冼杏娟
姚希曾	姚安佑	赵昌正	胡幼奕	胡振哲	顾星若
郝元恺	施忠良	秦怀德	徐荣葆	徐 旋	徐祖根
敖大新	袁慎芳	贾丽霞	晏石林	高树理	高建枢
陶 杰	陶 恒	黄龙男	黄志雄	曾黎明	蒋建清
蒋咏秋	蒋汉生	蔡金钢	曹明法	董辅隆	谢怀勤
甄华生	黎观生	薛克兴			

依靠高新技术
发展复合材料

宋健

一九九八年九月

(中国工程院院长宋健为本书出版题词)

序

材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是人类进步的里程碑，是多数发明创造的先导。因此，世界各工业发达国家莫不把新材料的研究与开发放在十分重要的地位。

当今是多种材料并存的时代，也是新材料迅速发展时期，而复合材料是新材料发展的重点。这主要是因为复合材料可以取各类材料之长，补各类材料之短，从而通过不同材料的复合可以达到提高材料综合性能、节约资源的目的。事实上，天然材料，包括各种生体构成，莫不以复合的形式存在，因而不同材料的复合是顺乎自然、结构合理的一种形式。复合材料是多学科交叉、相互渗透的产物，特别是不同材料复合后的界面，是当前研究的重点。

复合材料的设计自由度大，可以成为高性能的结构材料，可以成为性能优越的功能材料，也可以成为结构-功能一体化的构件。复合材料是材料科学与材料工程相结合的产物，把材料组成、结构、制造工艺、性能及在使用过程中的表现诸因素进行优化，按需要进行设计，采用新工艺或新技术，制造出性能优异的复合材料。

当前不同复合材料处于不同发展阶段，有的已经非常成熟，得到广泛应用，如玻璃钢和树脂基复合材料；有的正处于开发阶段，由于其工艺性能与价格等因素，只有在某些结构件的关键部位，得到一定程度的应用，如金属基复合材料；而更多的复合材料品种尚处于研究阶段，有不少科学技术问题有待解决，如陶瓷基复合材料及功能复合材料等。因此，复合材料的研究与开发目前仍是一个开闢的领域。为了促进复合材料的发展，除了解决所涉及的原材料、制造技术、连接与加工技术及检测与质量控制技术以外，最重要的是开拓市场，就是拓宽各种复合材料的应用范围。为此目的，对复合材料的力学性能、物理化学性质，要有深入而系统的了解。本《大全》第一篇（基础篇）对上述各点都作了详细而深入的介绍。第二篇重点在于复合材料的构件与产品设计，包括计算机辅助设计。第三篇则介绍了复合材料在各领域的应用现实情况及前景，包括建筑业，化工，交通运输与能源，机械与电器，电子工业，医疗、体育与娱乐，航空航天，农、林、牧、渔及食品工业以及国防与军工等。在应用篇的最后还对特种复合材料及其应用，植物纤维复合材料和金属基复合材料的应用，以及复合材料与环境作了介绍。最后一篇（第四篇）是信息篇，主要包括复合材料各种标准，并录入征集的复合材料原辅材料、制品及设备生产厂商，复合材料教育与研究机构，复合材料学术（或行业）团体，还录入重要复合材料会议与出版物等。

《复合材料大全》是当前我国在复合材料方面内容最为丰富、条目十分齐全的一本工具书。它不但对从事复合材料研究与开发的科技人员有重要参考价值，对应用复合材料的工程技术人员也有很强的指导作用。本书的出版必将对我国复合材料的应用起到促进作用，进而推动我国各类复合材料的发展。

师昌绪

中国工程院院士

中国科学院院士

第三世界科学院院士

国家自然科学基金委员会特邀顾问

两院主席团成员

1998. 3. 14

撰 稿 人 名 单

章序 节序	编 者	章序 节序	编 者
1 1.1~1.3	王兴业	8 8.3~8.5	陈辉、王秉权
1.4~1.5	吉法祥、杜杨	8.6	陶杰
1.6	王兴业	9 9.1~9.3	李顺林
2 2.1.1~2.1.7	姚希曾	9.4	王兴业
2.1.8	赵渠森	9.5~9.6	李顺林
2.2	张国定、赵昌正	9.7	杨乃宾
2.3	冯春祥、郝元恺	9.8	江大志、沈为
2.4.1,2.4.4	高建枢	9.9	沈真
2.4.2	朱崇真	9.10~9.11	李顺林
2.4.3	陈程林	10 10.1~10.3	王兴业
2.5	沈增民	10.4~10.5	李思简
2.6	林德春、顾星若	10.6	王兴业
2.7	丁亦平	10.7 (除 10.7.4, 10.7.5 外)	李思简
2.8~2.11(除2.9.2 外)	冯春祥	10.7.4~10.7.5	李顺林
2.9.2	丁亦平	11	李顺林
2.12	秦怀德、周铸	12 12.1(除12.1.4 外)	杨乃宾
3 3.1~3.3	吉法祥	12.1.4	赵渠森
3.4	吉法祥、杜杨	12.2	吴申庆
3.5	蒋咏秋	12.3	郝元恺、张长瑞
3.6	吉法祥	12.4	孙伟
3.7	张国定、赵昌正	12.5	张佐光
4 4.1~4.3	刘雄亚	12.6	冼杏娟
4.4~4.5	张大厚	13 13.1~13.2	薛克兴
4.6~4.9	刘雄亚	13.3~13.6	张懋炯
4.10	杨桂	14	许陆文
4.11	李学闵、周春华、刘威	15	薛克兴
4.12	董辅隆、秦怀德	16 16.1.1 ~ 16.1.2,	
5	张国定、赵昌正	16.1.4	陈辉
6 6.1	孙伟	16.1.3	李学闵、苏衍良
6.2	郝元恺、张长瑞	16.2	张崇杰、胡振哲
7 7.1	张全纯	16.3	陈辉
7.2	蒋建清、马爱斌	16.4	徐祖根
7.3	徐荣葆、陈友良	16.5	蒋汉生、陶恒、 佟丽莉、陈辉
8 8.1(除 8.1.3 外)	陈尚、王玉梅	16.6	陈辉
8.1.3	丁亦平	16.7	徐旋
8.2	姚希曾	17 17.1	宋晔

章序 节序	编 者	章序 节序	编 者
17 17.2~17.3	吴代华、晏石林	24 24.2.1	蒋汉生
18 18.1	刘雄亚、刘宁	24.2.2	高树理、刘晓春
18.2	蒋汉生、刘宁、刘雄亚	24.3	丘哲明
18.3	王钧、刘雄亚	24.4	沈松年、甄华生
18.4	梅启林	25 25.1~25.2	刘雄亚
18.5	王荣国	25.3 (除25.3.5 外)	曾黎明
18.6	刘雄亚、刘宁	25.3.5	卞福保
18.7.1	张垣	26 26	吴守楨
18.7.2	翁睿	27 27.1	张佐光
18.8.1	林微微	27.2	袁慎芳
18.8.2~18.8.4	刘雄亚	27.3	周本濂
19 19.1	蔡朝阳、张东兴	28 28.1	张国定、赵昌正
19.2~19.3	蔡金钢	28.2	刘雄亚、刘宁
19.4	黄龙男	28.3	邹惟前
20 20.1.1	汤国栋	29 29.1	吴人洁
20.1.2~20.1.3	刘雄亚	29.2	吴人洁、杨安乐
20.2	汤国栋	29.3	吴人洁、肖泳
20.3	孙伟	29.4	施忠良
20.4	周铸、刘宁	29.5	孙可伟、李如燕
20.5	敖大新	29.6	吴人洁、赵斌元
20.6(除20.6.3 外)	曹明法	30	胡中永、余景春
20.6.3	张崇杰	31	李顺林、周铸、骆心怡
20.7	姚安佑	32	李顺林、周铸、骆心怡
20.8(除20.8.4 外)	徐旋	33 33.1	李顺林、周铸、骆心怡
20.8.4	贾丽霞、徐旋	33.2.1	宋焕成
20.9	贾丽霞	33.2.2	胡幼奕、张林文
21	张恒	33.2.3	陈博
22 22.1	方芳	33.2.4.1~	
22.2	秦怀德、董辅隆	33.2.4.2	吴人洁
23 23.1~23.2	黄志雄	33.2.4.3	沃丁柱
23.3~23.4	王钧	33.3.1	杨学忠
24 24.1.1	苗冰、张茂庆、黎观生	33.3.2	李彦春
24.1.2	张呈林		

前 言

我国的“高技术研究发展计划”(即“863”计划)中,已把新材料领域列为七个重点研究发展领域之一,命名为“关键新材料和现代材料科学技术”,其目的是为国家高新技术各相关领域提供关键新材料,并促进我国材料科技事业的发展。

新材料领域当今应首推复合材料,这是因为复合材料可以具有单一材料不可能兼具的综合性能,业已成为世人所关注的一个前沿学科热点。追根溯源,复合材料的故乡应该在中国,敦煌壁画里的泥胎、宫殿建筑里圆木表面的披麻覆漆、享誉海内外的福建脱胎漆器,乃至民间建筑里的稻草掺入泥中做成的泥坯,按现在的看法都属复合材料。在近代,复合材料的发展始于20世纪40年代,于50年代开始得到了迅速发展。在20世纪后期的大半个世纪,复合材料作为一种新材料,无论在品种开发上还是在广泛应用上,其发展都是非常迅速的。我国从1958年开始发展复合材料,40多年来我国复合材料的发展也是非常迅速的。在愈益深化的实践中,复合材料自身也已形成完整的科学体系,但就我国目前实际情况来看,与国外相比最明显的差距是在国民经济各部门中的广泛应用还远远不够。因此,化学工业出版社在经过广泛调查并征得一些专家意见后,立意要出版一部富有实用性的复合材料著作,以有助于我国开发复合材料及其新产品。《复合材料大全》是这一立意的理想选题。经过协商,江苏省复合材料学会愿意承担组织编写工作,并于1996年6月在南京召开了《复合材料大全》编写研讨会。参加会议并参加编写的有南京航空航天大学,国防科技大学,武汉工业大学,上海交通大学,东南大学,南京理工大学,华东理工大学,浙江大学,宁波大学,国家建材局南京玻璃纤维研究设计院,北京玻璃钢研究设计院,哈尔滨玻璃钢研究所,中国航空工业总公司第六三七研究所,中国航天工业总公司第八一〇研究所,中国石油化工总公司扬子石油化工公司,电子工业部第十四研究所,中国纺织科学院,南京玻璃钢研究所等单位的40多名专家、教授。未参加会议但参加编写的还有北京航空航天大学,北京化工大学,郑州大学,山东建筑材料工业学院,华中理工大学,四川大学,昆明理工大学,西安交通大学,哈尔滨建筑大学,国家建材局上海玻璃钢研究所,国家建材局情报所,中国航空工业总公司第六二五研究所、第六一一研究所、第六二三研究所,中国航天工业总公司第四研究院、第七〇三研究所、第四十三研究所,中国船舶工业总公司第七〇八研究所,冶金工业部建筑研究总院,兵器工业部第五十三研究所,中国科学院金属研究所、力学研究所,深圳中华自行车复合材料公司,江苏海鸥冷却塔股份有限公司,台湾上纬企业股份有限公司,中国玻璃钢工业协会,中国硅酸盐学会玻璃钢学会等单位的专家、教授。与会专家一致表示支持《复合材料大全》的编写工作,认为这是历史赋予的责任,愿为编好《复合材料大全》作出贡献,南京市科委给予了大力支持,立项资助了部分经费,使《复合材料大全》的编写工作能顺利起步。

《复合材料大全》编写旨在全面、系统、完整地荟萃复合材料领域的基本知识;反映复合材料当代最新科技水平与前沿学科;密切结合国情,从实际出发,为国民经济服务;理论叙述简明概括,着重对实践有指导意义的结论性介绍,不铺开过多;注重实用性,技术内容、信息内容的收集和介绍均立足于读者的实际需要。

《复合材料大全》共分基础篇、设计篇、应用篇和信息篇。基础篇主要介绍复合材料及其原材料,以及复合材料界面、制造技术、连接技术、实验技术、力学、结构分析等复合材料各有关领域的基本知识、基本原理与基本方法。设计篇主要介绍复合材料及其产品的材料设计、结构设计与产品设计。应用篇主要介绍复合材料及其产品在各工业部门与民用方面的应用情况、应用效果与应用前景,以及材料或产品的特点。信息篇主要介绍复合材料各种标准、生产厂商、教育与研究机构、学术团体、会

议与出版物等信息内容。

当前正值世纪之交,因此本书是总结我国复合材料事业在 20 世纪中 40 多年的发展成果,对推动我国复合材料事业在 21 世纪的更快发展有着极为重要的现实意义和深远的历史意义。

《复合材料大全》由在国内外享有很高声望的我国复合材料著名专家吴人洁教授、于翹教授、曾汉民教授担任顾问;沃丁柱教授担任主编,李顺林教授任常务副主编,王兴业教授、刘雄亚教授、汪宗荣研究员、张国定教授任副主编;王兴业教授、张国定教授兼任基础篇主编,李顺林教授兼任设计篇主编,刘雄亚教授兼任应用篇主编,汪宗荣研究员兼任信息篇主编,李顺林教授还具体负责全书统编。

编委会由 93 名专家组成,其中有中国科学院院士周本濂研究员,教授级高级技术职称的专家占 60% 以上。全部编写作者为 111 名,其中高级技术职称以上的专家占 80% 以上。

《复合材料大全》的编写除全体编写人员与有关工作人员的大力协作和奋发工作以外,编写组织工作经费由江苏省复合材料学会负责筹措,南京市科委给与了部分资助,另外,上海玻璃钢研究所、哈尔滨玻璃钢研究所、北京玻璃钢研究设计院、南京玻璃纤维研究设计院、中国航天工业总公司第七〇三研究所、第四十三研究所、南京玻璃钢研究所等单位还协助了编写的组织工作,编委会谨向有关单位和个人表示衷心的感谢。

中国工程院院长宋健院士专门为《复合材料大全》一书的出版题词:“依靠高新技术,发展复合材料”,中国科学院院士、中国工程院院士、我国著名材料科学家师昌绪先生亲自为《复合材料大全》作序,《复合材料大全》顾问吴人洁教授、于翹教授、曾汉民教授为本书的编写与出版给予了很大支持并提出了许多宝贵意见,编委会对他们表示深深的谢意。

由于编者水平有限,编写时间较短,编写人员多协调困难,因此本书的缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

《复合材料大全》编委会

1999 年 2 月

内 容 提 要

本书是一本全面荟萃复合材料领域的基本知识,并兼具理论性、实用性、系统性以及产学研信息于一体的大全类图书。全书共分4篇33章。基础篇内容包括各种复合材料及其原材料,以及复合材料界面、制造技术、连接技术、实验技术、力学、结构分析等复合材料各有关领域的基本知识、基本原理与基本方法;设计篇内容包括复合材料及其产品的材料设计、结构设计与产品设计;应用篇内容包括复合材料及其产品在各工业部门与民用方面的应用情况、应用效果与应用前景,以及材料或产品的特点;信息篇内容包括介绍复合材料各种标准,复合材料原辅材料、制品及设备生产厂商,复合材料教育与研究机构,复合材料学术(或行业)团体、会议与出版物。书后有主要名词与术语,主要英文缩略语,主要符号说明,层合板表示法,复合材料原辅材料、制品及设备索引,常见物理量单位换算表,便于读者阅读和使用。

本书可供航空、航天、建筑、建材、石油、化工、能源、交通、机电、信息、医疗、体育、文化、轻工、食品、农业、兵器等部门从事复合材料及其制品科研、设计、生产、应用、管理等方面人员使用,也可供高等院校有关专业师生参考。

目 录

第一篇 基 础 篇

第一章 总论.....	1	2.1.5 聚氨酯树脂.....	44
1.1 复合材料概论.....	1	2.1.6 热塑性树脂.....	46
1.1.1 复合材料的定义.....	1	2.1.7 高性能树脂.....	51
1.1.2 复合材料的特点.....	2	2.1.8 QY8911 双马来酰亚胺系列树脂.....	55
1.2 复合材料发展历史.....	3	2.2 金属基体.....	64
1.2.1 树脂基复合材料的发展史.....	3	2.2.1 选择金属基体的原则.....	64
1.2.2 金属基与陶瓷基复合材料的发展史.....	4	2.2.2 结构复合材料的金属基体.....	65
1.2.3 碳/碳复合材料与无机胶凝材料基 复合材料的发展史.....	6	2.2.3 功能复合材料的金属基体.....	68
1.2.4 复合材料的当代水平和发展前景.....	7	2.3 陶瓷基体.....	70
1.2.5 复合材料在中国的发展.....	10	2.3.1 陶瓷基体的种类、组成、结构及 特性.....	70
1.3 复合材料的命名及分类.....	10	2.3.2 陶瓷基体粉末原料.....	72
1.3.1 复合材料的命名.....	10	2.3.3 有机先驱体转化的陶瓷基体.....	76
1.3.2 复合材料的分类.....	12	2.4 玻璃纤维.....	77
1.4 复合效应.....	12	2.4.1 玻璃纤维的成分与性能.....	77
1.4.1 复合材料的力学性能.....	12	2.4.2 连续玻璃纤维制造方法.....	79
1.4.2 复合材料的物理性能.....	14	2.4.3 玻璃纤维浸润剂与织物的表面处理.....	85
1.4.3 复合材料的化学性能.....	15	2.4.4 玻璃纤维制品品种与用途.....	89
1.4.4 复合材料的工艺特点.....	15	2.5 碳纤维.....	98
1.4.5 组合复合效应.....	16	2.5.1 概述.....	98
1.5 复合材料性能复合原理.....	16	2.5.2 碳纤维制造方法.....	99
1.5.1 基体与增强材料间的相互作用及相 容性.....	16	2.5.3 中间产品.....	101
1.5.2 力学性能复合.....	17	2.5.4 碳纤维的性能与用途.....	101
1.5.3 物理性能复合.....	18	2.6 芳纶纤维.....	102
1.6 复合材料在社会发展中的地位和作用.....	19	2.6.1 聚对苯二甲酰对苯二胺 (PPTA) 纤维.....	102
1.6.1 复合材料在科技进步中的地位和 作用.....	19	2.6.2 聚对苯甲酰胺 (PBA) 纤维.....	104
1.6.2 复合材料在国民经济建设中的地位 和作用.....	21	2.6.3 芳纶共聚纤维.....	104
1.6.3 复合材料在国防建设中的地位和 作用.....	22	2.6.4 芳纶纤维的新发展.....	105
参考文献.....	24	2.6.5 芳纶纤维的应用.....	105
第二章 原材料.....	26	2.7 超高分子量聚乙烯纤维.....	106
2.1 聚合物基体.....	26	2.7.1 超高分子量聚乙烯原料的结构和 性能.....	106
2.1.1 不饱和聚酯树脂.....	26	2.7.2 超高分子量聚乙烯纤维的制造.....	107
2.1.2 环氧树脂.....	32	2.7.3 超高分子量聚乙烯纤维的性能.....	111
2.1.3 酚醛树脂.....	38	2.7.4 超高分子量聚乙烯纤维的应用与 发展前景.....	114
2.1.4 其它热固性树脂.....	42	2.8 陶瓷纤维.....	117
		2.8.1 碳化硅纤维.....	117

2.8.2 氮化硅纤维	120	3.4 材料界面的物理、化学作用及表面改性技术	204
2.8.3 氧化铝纤维	121	3.4.1 界面电现象及其应用	205
2.8.4 氮化硼纤维	122	3.4.2 固体表面的吸附作用	210
2.9 其它纤维	123	3.4.3 材料表面改性技术	213
2.9.1 硼纤维	123	3.5 界面力学与界面设计	218
2.9.2 高强聚乙烯纤维	124	3.5.1 界面残余应力对材料宏观力学性能的影响	219
2.9.3 矿物纤维	128	3.5.2 界面残余应力的估算	220
2.9.4 植物纤维	128	3.5.3 界面层的弹性模量与泊松比的确定	222
2.10 晶须	128	3.5.4 复合材料界面剪切强度的测定	224
2.10.1 碳化硅晶须	129	3.5.5 复合材料的界面粘结的优化设计	225
2.10.2 碳晶须	129	3.6 界面性能的测试与表征	226
2.10.3 其它	130	3.6.1 表面和界面张力的测定方法	227
2.11 颗粒	131	3.6.2 固体表面分析技术	232
2.11.1 碳化硅颗粒	131	3.7 金属基复合材料界面	234
2.11.2 氮化硅颗粒	132	3.7.1 概述	234
2.11.3 硼化钛颗粒	132	3.7.2 润湿现象	235
2.11.4 其它	133	3.7.3 界面反应及其控制	237
2.12 添加剂	133	3.7.4 界面特性对金属基复合材料性能的影响	238
2.12.1 添加剂的作用、现状及发展趋势	133	3.7.5 界面表征	240
2.12.2 偶联剂	134	参考文献	242
2.12.3 不饱和聚酯树脂的引发剂和促进剂	137	第四章 聚合物基复合材料成型工艺	244
2.12.4 阻聚剂与缓聚剂	144	4.1 概述	244
2.12.5 增韧剂与稀释剂	145	4.1.1 聚合物基复合材料成型工艺的发展概况	244
2.12.6 环氧树脂固化剂	149	4.1.2 复合材料成型工艺的选择原则及方法	245
2.12.7 抗氧化剂	152	4.2 接触低压成型工艺	248
2.12.8 光稳定剂	156	4.2.1 原材料	248
2.12.9 热稳定剂	159	4.2.2 模具及脱模剂	251
2.12.10 填料	161	4.2.3 手糊成型工艺	253
2.12.11 脱模剂	163	4.2.4 喷射成型技术	256
2.12.12 着色剂与触变剂	166	4.2.5 树脂传递模塑成型	258
2.12.13 阻燃剂	167	4.2.6 袋压法、热压罐法、液压釜法和热膨胀模塑法成型	259
参考文献	170	4.2.7 劳动保护	261
第三章 复合材料界面	174	4.3 夹层结构制造技术	262
3.1 概述	174	4.3.1 玻璃钢夹层结构的种类和特点	262
3.1.1 界面的意义及其主要研究内容	174	4.3.2 蜂窝夹层结构制造技术	263
3.1.2 复合材料界面研究展望	176	4.3.3 泡沫塑料夹层结构制造技术	265
3.2 表面和界面热力学	177	4.4 模压成型工艺	270
3.2.1 界面热力学量表征	178	4.4.1 概述	270
3.2.2 粘合功和内聚功	179	4.4.2 模压料生产技术	270
3.2.3 表面和界面张力	180	4.4.3 SMC、BMC、HMC、XMC、TMC及ZMC生产技术	272
3.3 界面的润湿和粘合作用	189		
3.3.1 润湿过程的热力学处理	190		
3.3.2 杨氏方程和接触角	191		
3.3.3 铺展压和铺展系数	195		
3.3.4 固体表面能与表面润湿性的关系	196		
3.3.5 润湿作用对界面粘合的影响	198		

4.4.4 制品压制工艺	281	4.12.1 品种及分类	349
4.4.5 压机及模具	285	4.12.2 主要原料及配合剂	349
4.4.6 模压制品设计	289	4.12.3 制备技术	350
4.5 层压及卷管成型工艺	290	参考文献	357
4.5.1 概述	290	第五章 金属基复合材料制造技术	360
4.5.2 预浸胶布制备工艺及设备	291	5.1 概述	360
4.5.3 层合板生产技术	294	5.1.1 对制造技术的要求	360
4.5.4 卷管生产技术	296	5.1.2 金属基复合材料制造的难点及解决途径	360
4.6 缠绕成型工艺	299	5.1.3 金属基复合材料制造方法的分类	361
4.6.1 概述	299	5.2 固态法	361
4.6.2 原材料及芯模	300	5.2.1 粉末冶金法	361
4.6.3 纤维缠绕规律	301	5.2.2 热压法	362
4.6.4 缠绕成型工艺及参数选择	304	5.2.3 热等静压法	362
4.6.5 缠绕机	305	5.2.4 热轧法、热挤压法和热拉法	363
4.7 连续成型工艺	309	5.2.5 爆炸焊接法	364
4.7.1 概述	309	5.3 液态法	364
4.7.2 拉挤成型工艺	309	5.3.1 真空压力浸渍法	364
4.7.3 连续缠管工艺	313	5.3.2 挤压铸造法	366
4.7.4 连续制板工艺	316	5.3.3 液态金属搅拌铸造法	368
4.8 热塑性复合材料成型工艺	318	5.3.4 液态金属浸渍法	370
4.8.1 概述	318	5.3.5 共喷沉积法	371
4.8.2 增强粒料、预浸料及片状模塑料制备	321	5.3.6 热喷涂法	373
4.8.3 注射成型工艺	323	5.4 其它制造方法	374
4.8.4 挤出成型工艺	326	5.4.1 原位自生成法	374
4.8.5 缠绕成型工艺	327	5.4.2 物理气相沉积法	374
4.8.6 热塑性复合材料拉挤成型	328	5.4.3 化学气相沉积法	376
4.8.7 焊接层合法	329	5.4.4 电镀、化学镀和复合镀法	376
4.8.8 热塑性片状模塑料制品冲压成型工艺及设备	329	5.5 金属基复合材料制造方法的比较与发展前景	376
4.8.9 热塑性复合材料的连接技术	330	参考文献	377
4.9 其它成型工艺	331	第六章 无机非金属复合材料的制备技术	378
4.9.1 离心成型工艺	331	6.1 纤维增强水泥基复合材料的制备工艺	378
4.9.2 浇铸成型工艺	333	6.1.1 纤维增强水泥基复合材料的原材料选择和配合比设计	378
4.9.3 弹性体贮树脂模塑成型技术	334	6.1.2 水泥基复合材料中纤维的均匀分散工艺	380
4.9.4 增强反应注射模塑技术	335	6.1.3 水泥基复合材料的搅拌工艺原理与方法	382
4.10 编织结构复合材料制造技术	337	6.1.4 水泥基复合材料的成型工艺原理与方法	382
4.10.1 概述	337	6.1.5 水泥基复合材料的养护工艺原理与方法	386
4.10.2 编织机简介	340	6.2 陶瓷基复合材料的制备工艺	387
4.10.3 编织结构复合材料的特点	340	6.2.1 概述	387
4.10.4 编织结构复合材料的应用	343	6.2.2 连续纤维增韧陶瓷基复合材料的制备工艺	388
4.11 超混杂复合材料工艺	344		
4.11.1 概述	344		
4.11.2 功能型超混杂复合材料设计	344		
4.11.3 功能-结构型超混杂复合材料成型工艺	347		
4.12 橡胶基复合材料的制造技术	349		

6.2.3 晶须(短切纤维)补强陶瓷基复合材料制备工艺	391	8.3.5 复合材料物理性能测试方法	453
6.2.4 颗粒弥散型陶瓷基复合材料的制备工艺	394	8.4 复合材料制品检验	455
6.2.5 纳米陶瓷(基)复合材料的制备工艺	397	8.4.1 玻璃纤维复合材料浴缸性能测试	455
6.2.6 碳/碳复合材料的制备工艺	398	8.4.2 玻璃纤维复合材料波形瓦试验方法	456
参考文献	403	8.4.3 玻璃纤维增强复合材料管性能测试	457
第七章 复合材料连接与加工技术	404	8.4.4 纤维缠绕压力容器内压试验方法	460
7.1 聚合物基复合材料的连接与加工技术	404	8.5 复合材料无损检测	461
7.1.1 复合材料结构机械的连接	404	8.5.1 光学无损检测	461
7.1.2 复合材料结构特种紧固件	404	8.5.2 超声无损检测	462
7.1.3 复合材料制孔工艺	405	8.5.3 声振检测	464
7.1.4 复合材料切割加工	409	8.5.4 X射线检测	465
7.1.5 机械连接工艺	411	8.5.5 声发射检测	466
7.1.6 胶接连接工艺	413	8.5.6 电性能检测	467
7.2 金属基复合材料	414	8.5.7 微波检测	467
7.2.1 金属基复合材料的冷加工技术	414	8.6 复合材料失效分析	467
7.2.2 金属基复合材料的热加工技术	415	8.6.1 零维复合材料失效分析	467
7.2.3 金属基复合材料的超塑性成型加工技术	416	8.6.2 一维单向纤维增强复合材料失效分析	469
7.3 陶瓷基复合材料的加工技术	418	8.6.3 二维层合板断裂失效分析	471
7.3.1 陶瓷基复合材料的可加工性	418	8.6.4 层合板疲劳断裂及失效分析	472
7.3.2 陶瓷基复合材料的磨削加工	419	参考文献	473
7.3.3 激光、高压水、等离子等高能束加工	422	第九章 复合材料力学	474
7.3.4 陶瓷基复合材料的放电加工	424	9.1 各向异性体弹性力学基础	474
7.3.5 工程陶瓷材料的复合加工	424	9.1.1 各向异性体的应力-应变关系	474
7.3.6 陶瓷基复合材料的型面加工方法与连接技术	426	9.1.2 各向异性体的工程弹性常数	477
参考文献	426	9.1.3 各向异性体弹性系数的转换公式	478
第八章 复合材料测试技术	429	9.2 复合材料的刚度	479
8.1 增强材料测试技术	429	9.2.1 铺层的刚度	479
8.1.1 玻璃纤维测试技术	429	9.2.2 层合板的刚度	483
8.1.2 碳纤维测试技术	433	9.3 复合材料的强度	486
8.1.3 超高分子量聚乙烯纤维性能的测试方法	434	9.3.1 铺层的强度	486
8.2 基体材料测试技术	438	9.3.2 层合板的强度	488
8.2.1 热固性树脂性能测试技术	439	9.4 复合材料失效准则	490
8.2.2 热塑性树脂性能测试技术	443	9.4.1 最大应力失效准则和最大应变失效准则	491
8.3 复合材料性能测试技术	444	9.4.2 二次型失效准则	491
8.3.1 单向复合材料力学性能测试	445	9.4.3 蔡-胡(Tsai-Wu)张量多项式失效准则	492
8.3.2 NOL 环性能测试	449	9.4.4 高次型失效准则	494
8.3.3 玻璃纤维织物增强复合材料及短切玻璃纤维增强复合材料性能试验方法	450	9.4.5 复合材料失效准则的实验研究	495
8.3.4 复合材料夹层结构试验方法	452	9.5 复合材料细观力学	496
		9.5.1 简单模型法	496
		9.5.2 预测复合材料单层的宏观性能	497
		9.5.3 精确分析法	498
		9.6 复合材料粘弹性力学	500
		9.6.1 塑料基体的粘弹性	500
		9.6.2 复合材料的粘弹性	503

9.7 复合材料疲劳	504	10.3.2 叠板层合梁	531
9.7.1 疲劳损伤机理	504	10.3.3 复合材料矩形截面梁分析	532
9.7.2 疲劳特性	505	10.3.4 梁平面弯曲问题的 Hashin 解法	536
9.7.3 寿命预测	507	10.3.5 复合材料薄壁梁	537
9.7.4 疲劳设计	508	10.4 复合材料层合板的分析	539
9.8 复合材料的冲击响应	508	10.4.1 对称层合板	539
9.8.1 复合材料中的弹性波	508	10.4.2 非对称层合板	553
9.8.2 复合材料性能的应变率相关性	508	10.4.3 层合板的稳定性	558
9.8.3 复合材料的冲击损伤破坏特性	510	10.5 复合材料层合壳的分析	562
9.8.4 复合材料的冲击实验方法	510	10.5.1 勒夫 (A. E. H. Love) 一次近似 壳体理论	562
9.8.5 复合材料冲击损伤的数值分析方法	511	10.5.2 正交各向异性旋转层合壳体的轴 对称问题	563
9.9 复合材料损伤	513	10.5.3 圆柱形层合壳的唐乃尔-穆什塔利 近似理论	566
9.9.1 损伤类型和特点	513	10.5.4 层合扁壳的工程近似理论	568
9.9.2 含缺陷/损伤层合板的剩余强度 估算	514	10.5.5 层合壳体的赖斯纳型修正理论	569
9.9.3 含缺陷/损伤层合板的疲劳特性	517	10.6 夹层结构分析	569
9.9.4 复合材料损伤力学	518	10.6.1 夹层结构分析基础	570
9.9.5 复合材料结构的耐久性/损伤容限 设计	519	10.6.2 波纹夹芯板与栅格夹芯板的刚度	572
9.10 短纤维增强复合材料的力学特性	519	10.6.3 蜂窝夹层结构的工程计算	573
9.10.1 短纤维增强复合材料的宏观力学 分析	519	10.7 自由边界效应与分层破坏问题	577
9.10.2 短纤维增强复合材料的细观力学 分析	520	10.7.1 层合板壳层间应力分析的模型与 解法	577
9.10.3 短纤维增强复合材料的力学特性	521	10.7.2 层合板的层间应力分析	578
9.11 颗粒增强复合材料的力学特性	522	10.7.3 层合圆柱形壳体的层间应力分析	582
9.11.1 预测颗粒增强复合材料的弹性 模量	522	10.7.4 层合板层间强度测定问题	584
9.11.2 预测颗粒增强复合材料的强度	523	10.7.5 层合板分层破坏效应问题	585
参考文献	523	参考文献	586
第十章 复合材料结构力学	527	第十一章 复合材料结构数值的分析方法	588
10.1 各向异性体弹性力学基本方程	527	11.1 复合材料结构有限元位移法	588
10.2 复合材料杆分析	528	11.2 复合材料结构应力杂交元法	594
10.2.1 一端固定受拉复合材料杆	529	11.3 复合材料结构有限元混合法	594
10.2.2 自重作用下的复合材料直杆变形	529	11.4 复合材料结构边界元法	595
10.3 复合材料梁	529	11.5 复合材料结构数值分析方法的发展 趋势	595
10.3.1 最简单的受载情况	529	参考文献	596

第二篇 设计篇

第十二章 复合材料的性能	597	12.2.1 金属基复合材料的力学性能	610
12.1 聚合物基复合材料的性能	597	12.2.2 金属基复合材料的物理性能	614
12.1.1 预浸料性能	597	12.2.3 金属基复合材料的摩擦磨损性能	616
12.1.2 层合板性能	598	12.3 陶瓷基复合材料的性能	619
12.1.3 夹层板性能	602	12.3.1 玻璃 (玻璃陶瓷) 基复合材料的 性能	619
12.1.4 QY8911 双马来酰亚胺系列树脂基 复合材料性能	604	12.3.2 氮化硅 (Si_3N_4) 基复合材料的 性能	620
12.2 金属基复合材料的性能	609		

12.3.3 氧化铝 (Al_2O_3) 基复合材料的性能	621	13.2.4 单面搭接设计	666
12.3.4 碳化硅 (SiC) 基复合材料的性能	621	13.2.5 阶梯形搭接设计	668
12.3.5 纳米陶瓷 (基) 复合材料的性能	622	13.2.6 楔形搭接设计	669
12.3.6 碳/碳复合材料的性能	623	13.2.7 承受压剪载荷的连接设计	670
12.4 水泥基复合材料的性能	623	13.2.8 连接接头承受面内 (边缘) 剪切载荷的连接设计	670
12.4.1 纤维增强水泥基复合材料的分类	623	13.2.9 胶接连接的损伤容限	671
12.4.2 纤维增强水泥基复合材料的应力-应变特征	624	13.3 螺栓连接设计	672
12.4.3 钢纤维增强水泥基复合材料的性能	624	13.3.1 螺栓连接设计的一般特性	672
12.4.4 玻璃纤维增强水泥基复合材料的性能	630	13.3.2 螺栓连接的载荷传递和破坏形式	673
12.4.5 碳纤维增强水泥基复合材料的性能	634	13.3.3 设计考虑的主要参数	674
12.4.6 凯美拉纤维增强水泥基复合材料的性能	636	13.3.4 单钉连接的设计方法	678
12.4.7 合成纤维增强水泥基复合材料的性能	638	13.3.5 多钉连接的设计	679
12.4.8 天然纤维增强水泥基复合材料的性能	639	13.4 铆钉连接设计	681
12.4.9 超高性能水泥基复合材料的性能	640	13.4.1 铆接的一般特性	681
12.5 混杂与超混杂复合材料的性能	641	13.4.2 铆接接头中孔的变形和残余应力	681
12.5.1 混杂复合材料的基本概念与特点	641	13.4.3 连接复合材料的新型铆钉	682
12.5.2 混杂复合材料的应用与发展	643	13.5 螺纹连接设计	684
12.5.3 混杂复合材料的混杂效应	643	13.5.1 复合材料螺纹连接的一般特性	684
12.5.4 混杂纤维复合材料的性能	644	13.5.2 螺纹连接的形式	684
12.5.5 超混杂复合材料的性能	646	13.5.3 复合材料与金属螺纹连接	685
12.6 天然纤维增强复合材料的性能	649	13.6 夹层结构的连接设计	685
12.6.1 概述	649	13.6.1 夹层板的边缘处理与局部增强	685
12.6.2 天然纤维增强复合材料的分类	649	13.6.2 夹层结构的连接形式	686
12.6.3 植物纤维和基体的复合原理及特点	649	参考文献	687
12.6.4 植物纤维增强有机基体复合材料的制造工艺及性能	650	第十四章 复合材料修补技术	689
12.6.5 植物纤维增强无机基体复合材料的制造工艺及性能	655	14.1 复合材料破损与可修补性的判断	689
参考文献	656	14.1.1 复合材料破损类型	689
第十三章 复合材料连接设计	660	14.1.2 无损检测技术及其在损伤评估中的应用	691
13.1 概述	660	14.1.3 损伤评估与修补流程图	692
13.1.1 复合材料的连接特点	660	14.2 复合材料的修补设计	693
13.1.2 连接效率	660	14.2.1 主要承力结构的修补设计	693
13.1.3 不同连接方法的比较	660	14.2.2 结构损伤的修补方法	694
13.2 胶接连接设计	661	14.3 复合材料的修补工艺	697
13.2.1 胶接连接设计需考虑的主要内容	661	14.3.1 复合材料的修理过程	697
13.2.2 胶接连接形式和特点	662	14.3.2 修补材料	700
13.2.3 双面搭接设计	663	14.3.3 修理设备	703
		14.3.4 复合材料的微波修复	703
		14.3.5 用复合材料修复含裂纹金属飞机结构	706
		参考文献	708
		第十五章 复合材料结构设计	709
		15.1 设计条件和设计原则	709
		15.1.1 复合材料结构设计的特点	709
		15.1.2 设计条件和需要考虑的主要因素	709
		15.1.3 设计原则	710