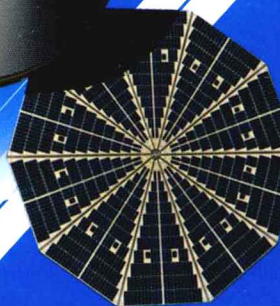
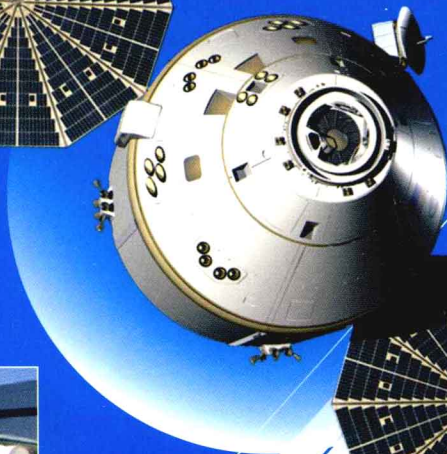
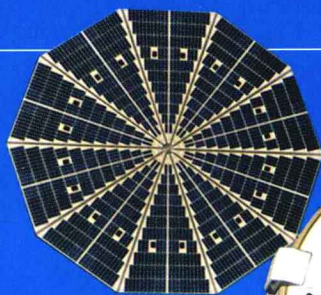


MRS 中国材料研究学会 组织编写

新材料丛书

高性能纤维 及复合材料

唐见茂 编著



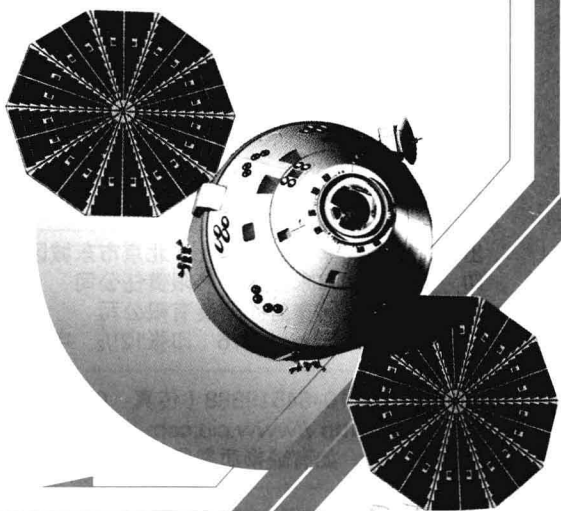
化学工业出版社

MRS 中国材料研究学会 组织编写

新材料丛书

高性能纤维 及复合材料

唐见茂 编著



化学工业出版社

·北京·

本书从航空航天应用背景出发,以碳纤维增强的树脂基结构复合材料为主线,着重介绍了复合材料的基本原理、性能特点、制造技术、应用领域及发展前景,主要内容包括高性能纤维增强体,树脂基复合材料及其制造技术,金属基、陶瓷基和碳基复合材料,功能和智能复合材料等。本书基本反映了当代高性能复合材料的整体概况、发展现状及趋势,适合于不同层面的读者,也可供从事复合材料科研生产的专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高性能纤维及复合材料/唐见茂编著. —北京:
化学工业出版社, 2012. 12
(新材料丛书)
ISBN 978-7-122-15506-1

I. ①高… II. ①唐… III. ①纤维增强复合材料—
普及读物 IV. ①TB33

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第237708号

责任编辑: 刘丽宏
责任校对: 顾淑云

文字编辑: 李锦侠
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: 北京永鑫印刷有限责任公司
装订: 三河市万龙印装有限公司
710mm×1000mm 1/16 印张12¹/₂ 字数195千字 2013年3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: 49.00元

版权所有 违者必究

《新材料丛书》编委会

顾 问：师昌绪 李恒德 周 廉

主 任：黄伯云

委 员（按姓氏拼音排序）：

高瑞平 韩高荣 韩雅芳 李光宪 李元元

罗宏杰 邱 勇 屠海令 魏炳波 谢建新

徐 坚 杨 锐 姚 燕 周少雄 周 玉

新材料丛书

序

走进新材料世界

由中国材料研究学会与化学工业出版社联合编辑出版的《新材料丛书》与广大读者见面了。这是一套以介绍新材料的门类和品种、基础知识以及功能和应用为主要内容的普及性系列丛书。

材料是人类物质文明进步的阶梯。新材料是现代高新技术的基础和先导，任何一种高新技术的突破都必须以该领域的新材料技术突破为前提，而新材料的突破往往会引发人类划时代的变革，如20世纪60年代高纯硅半导体材料技术的突破，使人类进入信息化时代。

新材料量大面广，发展日新月异，不仅体现一个国家的综合国力和科技水平，还与人们的工作和生活息息相关。新材料创造美好生活。特别是在人类面临的资源、能源和环境问题日益紧迫的今天，可持续发展已成为全球共性的理念，新材料首当其冲，其地位和作用日益突出，而且是大有作为。

为了及时普及新材料技术知识，使广大读者了解新材料、走进新材料、参与新材料，特组织编撰这套《新材料丛书》。

参加撰写这套科普丛书的作者都是我国新材料领域的知名专家和学者，他们在新材料的各自领域耕耘数十春秋，有着一份和新材料难以割舍的感情，特别是出于对我国新材料发展的关心，出于对培养年轻一代的热情，欣然接受了各自的编写任务。对他们献身新材料科普事业的精神和积极贡献深表感谢。

《新材料丛书》编辑委员会

●●●●●● 前言

作为一个在复合材料圈子里摸、爬、滚、打近40年的普通科技工作者，欣然接受了由中国材料研究学会和化学工业出版社联合发起的《新材料丛书》中的《高性能纤维及复合材料》一书的编写任务，这除了本人与复合材料结下了难以割舍的情结之外，主要还是由于复合材料的非常突出的优异性能和极其诱人的光辉前景，正如人们常说的，好的东西就应该拿出来分享。

当今人类正处在“科技一日跨千里”的非凡时代，而新材料作为现代高新技术的基础和先导，在人类面临的日益紧迫的可持续发展的理念中，其地位和作用日益突出，而且是大有作为。就拿高性能碳纤维复合材料而言，最突出的优点是轻质高强，自20世纪60年代起，首先被开发用于飞机结构材料，业内专家指出，与传统的轻质铝合金相比，碳纤维复合材料的飞机结构，减重效果可达20%~40%，在节能减排上体现出巨大的经济效益和社会效益，要知道，飞机结构每减重1kg，经济效益都以百万甚至千万美元计算。

材料复合化是新材料重要的发展趋势之一，半个多世纪以来，以碳纤维复合材料为代表的复合材料技术走过了一段快速发展的历程，由航空航天迅速扩大到其他工业部门，包括新能源、生物、信息、汽车、火车、海洋、医疗、机械、电器等都在越来越多地用到复合材料。有人认为，人类已进入了复合材料时代，可以说，现在就材料而言，什么都要复合，什么都可复合，什么都在复合。

新材料量大面广，发展日新月异，不仅关系到经济和国防建设，还与人们的工作生活息息相关，新材料带来美好生活，因此大力宣传和普及新材料知识，积极开展新材料各种活动，这对提高全民的科学素质，培养年轻一代，吸引更多的优秀人才加入到新材料的阵营中来，为又快又好地发展我国新材料做出贡献，这就是我奉献这本书的初衷。

书稿虽然交付，但心内总有不妥，笔者受专业知识及学识水平所限，书中难免“挂一漏万”，言及不当之处，敬请广大读者及同行不吝赐教。

唐见茂



目录

序言

1

第1章

概述

5

- 1.1 新材料和复合材料 6
- 1.2 为什么要用复合材料 8

第2章

高性能纤维

11

- 2.1 纤维和高性能纤维 12
 - 2.1.1 纤维的性能指标 12
 - 2.1.2 纤维分类 13
 - 2.1.3 高性能纤维 14
- 2.2 纤维材料的先驱——玻璃纤维 15
 - 2.2.1 按玻璃原料成分分类 15
 - 2.2.2 按品种用途分类 16
- 2.3 独占鳌头的碳纤维 18
 - 2.3.1 聚丙烯腈基碳纤维 (PAN-base CF) 20
 - 2.3.2 沥青基碳纤维 (pitch-base carbon fiber) ... 22
- 2.4 带有神秘色彩的芳纶 25
- 2.5 纤维家族的新宠——超高分子量聚乙烯纤维 26
- 2.6 纳米增强材料 28

2.6.1	黏土纳米复合材料	29
2.6.2	刚性纳米粒子复合材料	29
2.6.3	碳纳米管复合材料	29

第3章

复合材料原理

31

3.1	复合原理与复合效应	32
3.1.1	复合原理	32
3.1.2	复合效应	34
3.2	复合材料的分类及性能优点	35
3.2.1	复合材料按基体分类	36
3.2.2	复合材料按增强体分类	36
3.2.3	复合材料的性能特点	38
3.3	复合材料的应用及发展前景	40
3.3.1	航空航天	41
3.3.2	汽车交通	42
3.3.3	新能源	44
3.3.4	船舶及海洋工程	47
3.3.5	建筑及其他	48

第4章

先进树脂基复合材料

51

4.1	环氧树脂基复合材料	54
4.1.1	环氧树脂	55
4.1.2	环氧树脂基复合材料改性	59
4.1.3	环氧树脂基复合材料的应用	60
4.2	双马来酰亚胺树脂基复合材料	61
4.2.1	双马来酰亚胺树脂基体	62
4.2.2	双马来酰亚胺树脂的改性	63

4.2.3	双马来酰亚胺树脂基复合材料的应用	64
4.3	聚酰亚胺树脂基复合材料	65
4.3.1	PMR 聚酰亚胺树脂基体	65
4.3.2	PMR 树脂及其复合材料增韧改性	67
4.3.3	PMR 树脂基复合材料在航天航空领域的应用	70
4.4	氰酸脂树脂基复合材料	71
4.4.1	氰酸酯树脂改性	72
4.4.2	氰酸酯树脂基复合材料的应用	74
4.5	高性能热塑性树脂基复合材料	77
4.5.1	高性能热塑性树脂基体	77
4.5.2	热塑性复合材料预浸料制备技术	79
4.5.3	高性能热塑性复合材料成型技术	81
4.5.4	高性能热塑性复合材料的应用	82

5.1	手糊成型	91
5.2	热压罐成型	93
5.3	模压成型	97
5.4	纤维缠绕成型	98
5.4.1	缠绕工艺材料	101
5.4.2	纤维缠绕工艺技术要点	102
5.4.3	纤维缠绕成型的应用	103
5.5	树脂传递成型及派生技术	105
5.5.1	RTM 的工作原理及特点	106
5.5.2	RTM 成型使用的材料	107
5.5.3	RTM 工艺过程	114
5.5.4	RTM 派生技术	114

5.6 拉挤成型	119
5.7 成型工艺与制造技术的最新发展	121

第 6 章

金属基、陶瓷基及碳基复合材料

125

6.1 金属基复合材料	126
6.1.1 金属基复合材料分类	127
6.1.2 连续纤维增强金属基复合材料	130
6.1.3 非连续增强金属基复合材料	133
6.1.4 其他金属基复合材料	136
6.1.5 新型的增强形式及其复合材料	137
6.1.6 金属基复合材料的性能特点与应用	138
6.2 陶瓷基复合材料	142
6.2.1 陶瓷基体和增强体	143
6.2.2 相变增韧陶瓷	146
6.2.3 颗粒增强陶瓷基复合材料	147
6.2.4 晶须补强陶瓷基复合材料	149
6.2.5 连续纤维增强陶瓷基复合材料	151
6.2.6 仿生层状陶瓷基复合材料	151
6.2.7 陶瓷基复合材料的应用	153
6.3 碳基复合材料	154
6.3.1 碳-碳复合材料制备技术	155
6.3.2 碳-碳复合材料性能特点	157
6.3.3 碳-碳复合材料的应用	158

第 7 章

功能复合材料与智能复合材料

161

7.1 电学功能复合材料	162
7.1.1 导电复合材料	162

7.1.2	压电复合材料	165
7.1.3	透波复合材料	167
7.1.4	吸波隐身复合材料	170
7.2	磁性功能复合材料	176
7.3	光学功能复合材料	177
7.4	热功能复合材料	178
7.4.1	热适应复合材料	178
7.4.2	耐热耐烧蚀复合材料	179
7.4.3	阻燃复合材料	181
7.5	装甲防护功能复合材料	183
7.6	梯度功能复合材料	185
7.7	智能复合材料	186

序言





用碳纤维编织梦想——从波音B-787飞机谈起

人类从几千年前开始，望着天空那自由翱翔的飞鸟，就一直在向往，有那么一天，插上双翅，也能像鸟儿一样在天空中自由自在地飞翔。

进入20世纪，人类科技取得空前发展，其中最重大的发明之一，就是飞机的诞生，它使人们实现了飞向天空的梦想。这不能不提到美国的一对兄弟——莱特兄弟。他们是世界航空发展史上的开拓者，在当时大多数人认为飞机依靠自身动力的飞行完全不可能时，莱特兄弟却不相信这种结论，从1900～1902年他们兄弟进行了1000多次滑翔试飞，终于在1903年制造出了第一架依靠自身动力进行载人飞行的飞机——“飞行者1号”，并且试飞成功。因此他们于1909年获得美国国会荣誉奖。同年，他们创办了“莱特飞机公司”。这是在航空发展史上开拓性的巨大成功。

100多年来，航空飞行技术多次实现了跨越式的发展，特别是从20世纪50年代末实现了从活塞式发动机到涡轮喷气发动机的历史性变革，使飞机的飞行速度和机动性大幅提高，现在，超高音速战斗机的飞行速度达每小时2000～3000km，是声速的2～3倍。而民用航空飞行技术也同样取得长足发展，最引人注目的是20世纪60年代开始服役的美国波音大型宽体客机B-747，这种乘客人数超过400人的大型客机，能连续飞行十多个小时，横越太平洋只是一件平常易行的事情。而新近推出的空中“巨无霸”——空客A-380飞机，乘客量达650名。现代民航技术的发展，使人们几乎可以到达任何想去的地方，所以人们常说，现在地球变小了。

航空技术的快速发展，一方面得益于涡轮喷气发动机技术的突破，另一方面也得益于航空材料技术的不断进步，试想，一架能以2～3倍音速飞行的飞机，一架能载客数百人的大型客机，如果没有高性能或超高性能的材料制作机身结构，那是不可能的。

随着人类面临的资源、能源和环境问题的日益突出，同其他工业部门一样，对飞机的节能、降耗、减排提出了更高要求，因此开发使用轻质、高强、高效和低成本的新型飞机结构材料，是当代航空技术的重要发展趋势。而20世纪60年代开发应用的高性能纤维增强的复合材料是其中的一个重要体现。

我们所说的飞机材料，是指用来制造飞机主体结构材料，飞机主体结构包括构成一架飞机的结构部件，如机身、机翼、头罩和尾翼等，尾翼

又包括水平尾翼、垂直尾翼和方向舵等，而这些结构部件是由成千上万的零件、元件和结构件组成的，它们对保障飞机的总体性能和服役安全非常重要，当然，其他一些非结构件材料，如飞机客舱的内装饰材料，包括内舱壁板、座椅、行李舱、地板等也非常重要。

100多年来，飞机的结构材料发展大致经历了三个阶段，最初的十几年，主要是木质材料，用作机翼、蒙皮等。木质材料很难达到高强度，而且易吸湿、易燃、易腐蚀。20世纪20年代，开始用轻质高强的铝合金制造飞机结构，从此开始了全金属飞机结构的时代，铝合金具有轻质、高强、耐腐蚀等优点，直至20世纪60年代，铝合金一直是飞机结构的主要材料，广泛地用于各种型号的军机和民机的机身、机翼、尾翼的蒙皮和其他零部件。随着飞机性能的不断提高，对更加高效的飞机结构材料的追求，成为现代航空技术发展的新目标，在这种背景下，20世纪60年代中期，一代新型的飞机结构材料问世，即高性能的先进结构复合材料。

下面，我们将以B-787飞机为例，来简短介绍发展航空复合材料的重要意义，通过介绍，我们将对什么是复合材料有所了解。

近几年来，航空业界最热门的话题莫过于美国波音飞机公司的B-787型商用飞机，波音公司把这款飞机命名为“梦想”（Dreamliner），其背后包含两层意思，其一是要挽回20世纪90年代波音B-767与空客A-330竞争中的失利，随着世界民航市场份额不断流向空客，波音公司寄希望于推出一种新的机型来实现重振昔日雄风的梦想，在经过几次抉择后，决定推出一款全新概念的飞机，这就是B-7E7，后来正式定名为B-787梦想飞机。其二是该机创新性地采用了许多设计新概念和新技术，其中最引人注目的是飞机结构采用了50%的复合材料制造，这是前所未有的。应用复合材料后，不但能够比它的上一代机型（金属材质的B-767）降低20%的油耗，而且具有更舒适的客舱环境。这种大胆的尝试（用复合材料制作机身）在当时的提出是极具挑战性的，而且在业界颇具争议。波音公司希望通过这种先进的复合材料技术，实现引领当代民用客机发展潮流的梦想。

毫无争议的是，这是一款全球最为先进的民用客机。波音“梦想飞机”凝聚了民用飞机制造业的全新技术，这款又大又宽敞的飞机主体结构的50%包括机身和机翼全部采用了一种新型的结构材料，也就是碳纤维增强的树脂基复合材料。

之所以使用复合材料，是因为它相对于已经使用长达半个世纪的铝合



金属材料更具有轻质高强的优点，用复合材料制造飞机结构，同铝合金相比，减重效果可达20%~40%，在节能减排上体现出巨大的经济效益和社会效益。要知道，飞机结构每减重1lb，产生的燃油节能效益，都要用“百万美元”来计算。

也正是因为用了复合材料，使制造工艺大有改进，B-787在总装时不再像以前那么复杂，比如B-787采用了复合材料整体机身，就代替了原来需要的1500张铝板和(4~5)万个紧固件。尽管复合材料目前要比铝合金贵得多，但这一不足已经通过改进制造工艺和降低制造成本而得到了弥补。

此外，B-787飞机许多设计上的新概念，比如客舱更宽敞、更舒适，窗口开得更大，视野更好，起飞降落噪声更低，采用智能监控，飞行更安全等，前提都是因为使用了复合材料。

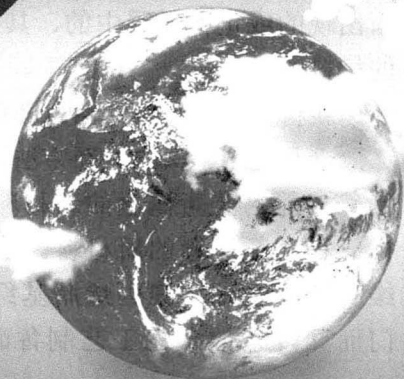
用作飞机结构的复合材料目前以碳纤维增强的树脂基复合材料为主，因此把B-787飞机看成是一种用碳纤维编织的梦想，一点也不过分。

半个世纪以来，随着复合材料的优点被越来越多地认识和接受，以及使用经验的不断积累，业内专家预言，今后20~30年碳纤维复合材料将迎来发展新时期，它的大规模采用将带来航空制造产业链革命性的变革，例如，创新的设计概念，将促使设计团队人员组成和知识结构的改变；而材料与结构件成型的同时完成，可以从生产纤维、树脂的原材料供应商或二级供应商直接向飞机制造商供货，传统的航空制造产业链是原材料供应商或二级供应商向制造飞机部件的一级供应商供货，再由一级供应商或向飞机制造商提供部件，但复合材料独特的材料和构件同时成型的特点，改变了这一传统的产业链格局；另外，碳纤维复合材料的独特性能无疑会对飞机维修业提出新的、未预见到的挑战。

通过上述介绍，使我们对复合材料的诸多优点有所了解，复合材料在航空航天业快速发展的同时，也在向其他工业部门扩展，如新能源领域的风电叶片、交通领域的车辆部件、海洋领域的船舶、石油化工领域的钻杆和管道、国防军事领域的装甲和防弹以及建筑领域的各种应用等。

第 1 章

概述





1.1 新材料和复合材料

谈到材料，人们并不陌生，因为我们周围到处都是材料的身影，我们的生活和工作以及其他一切活动都离不开材料，尽管如此，但目前还没有一个共同约定的关于材料的准确定义。一般而言，材料是指具有一定的化学成分与分子结构，以及能提供一定的物理和化学性能使得其可用来制造各种产品和工具的物质。应该说，这个定义是非常广泛的，它几乎涉及人类生活和工作的所有方方面面，以及所有现代高新技术领域和所有现代化产业体系。所以说材料是人类物质文明的基础，也是现代高新技术的基础和先导。

材料按照其化学组成和分子结构，可分成金属材料、无机非金属材料 and 有机非金属材料（以合成高分子材料为主）三大类，由于复合材料产量越来越大、品种越来越多、应用越来越广泛，所以现在也有的分类体系把复合材料列为第四大类材料，但从材料的属性来看，复合材料只不过是上述三大类材料以不同方式进行组合或复合而得到的一大类材料。

新材料是20世纪90年代开始使用的一个新概念。现在，谈到材料就不得不谈新材料。人类历史进入到20世纪90年代，现代科学技术发展突飞猛进，各种新材料、新产品、新技术不断突破，各个学科和各个领域涌现出大量的性能优异、功能特殊，甚至带有神奇色彩的新材料，为了更能突出材料在现代高新技术中的作用和地位，也为了有别于浩如烟海的传统材料品种，因此就采用了新材料这个概念。并且从20世纪90年代开始，新材料同生物、信息一道被列为当代重点发展的三大领域。

什么是新材料？目前还没有一个统一的说法，一般而言，新材料是指新出现的或正在发展中的、具有传统材料所不具备的优异性能和特殊功能的材料。

新材料的发展包括两方面的内容。

一是运用新概念、新方法、新技术，合成或制备出具有高性能或具有特殊功能的全新概念的新材料。如本书将要重点介绍的碳纤维，就是这样一种全新概念的新材料。聚丙烯腈基碳纤维“脱胎”于一种高分子纤维材料，它是用聚丙烯腈基纤维原丝，也叫前驱体（precursor）通过专门而又复杂的碳化工艺制备而得到的一种极细的纤维材料。由于碳化，