

“十五”国家重点图书

新材料与应用技术丛书
NEW MATERIALS AND APPLIED TECHNOLOGY

功能复合材料

张佐光 主编



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

“十五”国家重点图书

新材料与应用技术丛书

功能复合材料

张佐光 主编



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

功能复合材料/张佐光主编. —北京: 化学工业出版社,
2004. 7

(新材料与应用技术丛书)

ISBN 7-5025-5823-3

I. 功… II. 张… III. 功能材料; 复合材料 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 074131 号

“十五”国家重点图书

新材料与应用技术丛书

功能复合材料

张佐光 主编

责任编辑: 王苏平

责任校对: 陈 静 战河红

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行

材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

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

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 11¼ 字数 301 千字

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5823-3/TB·53

定 价: 28.00 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

前 言

随着社会的发展,人们越来越清楚地认识到,先进复合材料在国家安全和国民经济中具有极为重要的作用。功能复合材料是先进复合材料的一大类别。人们对功能复合材料并不陌生,具有划时代意义的神舟五号载人飞船返回舱用的耐热、隔热材料便是一种典型的功能复合材料,没有它,返回舱不可能安全返回地面。另外,人们所熟悉的隐身飞机上用的吸波复合材料,车用高性能刹车片用的摩擦复合材料,轻质高防护水平防弹背心用的防弹复合材料等,都是新型功能复合材料。毫不夸张地说,在当今世界,无论是国防领域还是国民经济领域,功能复合材料无处不在,其用途之广、作用之大,已成为人们提高生活质量和科学技术发展的基石。

功能复合材料与结构复合材料相比,具有应用面宽、附加值高、研制周期短、品种多、可适于特殊用途等特点,有很好的应用与发展前景,潜在重要的经济与社会效益。

功能复合材料所含内容十分丰富,本书分为九章,分别介绍了磁功能、光功能、热功能、导电、摩擦、阻尼、防弹、抗辐射等功能复合材料的基本概念、相关理论、应用领域、制备方法与发展趋势。

本书是笔者在研究生课程《功能复合材料》备课笔记的基础上,经过两年多时间完成的。书中部分内容是笔者近些年来的研究成果,更多的是介绍了国内外同行的最新研究成果。在编纂过程中,考虑到不同的读者对象,注重基本理论与应用技术相结合,注重知识的系统性与新颖性相结合,注重内容的广度与深度相结合,力求为高等学校本科生、研究生和企业科研技术人员及管理者等提供参考与指导。

在本书的整个编写过程中,博士生李玉彬、李敏、阿茹娜、赵

卫娟、贺成红、罗靓、谢旻、顾轶卓等在资料查阅、收集、文字整理、校对与打印等方面做了大量的工作。同时，孙志杰副教授、张大兴高级工程师在本书编写中也付出了不少劳动。

笔者家人张伟研究生、孙秀芹高级经济师也参加了书稿整理与校对工作，并对笔者完成本书给予了大力支持。

本书出版得到了化学工业出版社与北京航空航天大学的支持。全书引用了很多同行的文献资料，并得到了不少相关专家具体指导。对以上给予本书支持与帮助的方方面面一并致以谢意。

由于功能复合材料涉及知识面太广，加之笔者水平所限，书中难免有误，敬请读者批评指正。

笔者

于北京航空航天大学

2004. 6

出版者的话

材料是社会技术进步的物质基础与先导。现代高技术的发展，更是紧密依赖于材料的发展。一种新材料的突破，无不孕育着一项新技术的诞生，甚至导致一个领域的技术革命。

新材料是指那些新出现或已在发展中的、具有传统材料所不具备的优异性能和特殊性能的材料。其范围主要是：电子信息、光电、超导材料；生物功能材料；能源材料和生态环境材料；高性能陶瓷材料及新型工程塑料；粉体、纳米、微孔材料和高纯金属及高纯材料；表面技术与涂层和薄膜材料；复合材料；智能材料；新结构功能助剂材料、优异性能的新型结构材料等。

新材料的应用范围非常广泛，发展前景十分广阔。当前，新材料产业已渗透到国民经济、国防建设和人民生活的各个领域，对电子信息、生物技术、航空航天等一大批高新技术产业的发展起着支撑和先导的作用，同时也推动着诸如机械、能源、化工、轻纺等传统产业的制造和产品结构的调整。因此，世界各国对新材料的研究、开发和产业化都给予了高度重视。我国也将新材料列为各重大科技开发和产业化计划重点支持的技术领域，这些计划的实施，已有力地推动了中国新材料产业的发展。

由于新材料是近几十年才快速发展起来的领域，国内这方面的图书较少，为了配合新材料的发展，满足我国广大读者的需要，我社组织国内有关专家编写了《新材料与应用技术丛书》。这套丛书包括以下几个分册：《新型电子薄膜材料》、《环境材料》、《现代功能材料及其应用》、《功能陶瓷材料》、《新型碳材料》、《新型高分子材料》、《功能复合材料》、《储氢材料》、《光电子材料》和《稀土功能材料》等。

丛书力求充分体现“新材料”的特点，选择了一些科技含量

高、未来发展空间大、实现产业化基础较好的且对我国国民经济有重要支撑作用的新材料。内容上以材料性能和应用技术作为重点，具有一定的先进性、技术性和实用性，适当体现前瞻性。我们希望这套丛书的出版对于我国新材料领域的科研生产、应用推广和技术进步起到一些推动作用，从而提高新材料行业的整体发展水平。

化学工业出版社

2002 年 4 月

内 容 提 要

功能复合材料作为一种新材料，有广阔的应用领域与诱人的发展前景。本书分为九章，分别对磁功能、电功能、光功能、热功能、摩擦功能、阻尼功能、防弹功能、抗辐射功能复合材料的基本概念、相关理论、应用技术与发展趋势进行了介绍。以功能特性分类介绍为主线，体现内容的广度，以基体特性分类介绍为支线，反映内容的深度。

全书在编纂过程中，考虑到不同的读者对象，注重基本理论与应用技术相结合，注重知识的系统性与新颖性相结合，注重内容的广度与深度相结合，力求为高等学校本科生、研究生和企业科研、技术人员及管理者等提供参考与指导。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 功能复合材料种类	2
1.3 功能复合效应	4
1.4 功能复合材料设计	4
1.4.1 设计原则	4
1.4.2 设计方法	5
1.5 制造方法	6
1.6 功能特性的可靠性控制	6
1.7 功能复合材料发展方向	7
参考文献	8
第 2 章 磁功能复合材料	9
2.1 磁性复合材料	9
2.1.1 概述	9
2.1.2 聚合物基磁性复合材料	9
2.1.3 纳米磁性复合材料	17
2.1.4 磁性复合材料的应用	19
2.2 电磁波屏蔽复合材料	21
2.2.1 屏蔽效果的理论估算与评价	21
2.2.2 屏蔽性能的相关性因素	26
2.2.3 屏蔽材料的发展	32
2.3 吸波复合材料	32
2.3.1 吸波基本原理	34
2.3.2 吸波性能的表征与影响因素	36
2.3.3 常用吸波复合材料的结构形式与特点	45
2.3.4 混杂纤维吸波复合材料	47
2.3.5 发展方向与新思路	57

2.4 透波复合材料	62
2.4.1 透波复合材料的组成及性能	63
2.4.2 影响透波复合材料电磁性能的因素	70
2.4.3 透波复合材料的发展趋势	73
2.5 其他磁功能复合材料	74
参考文献	75
第3章 导电复合材料	79
3.1 概述	79
3.2 聚合物基导电复合材料	79
3.2.1 复合型聚合物基导电复合材料	80
3.2.2 本征聚合物基导电复合材料	96
3.2.3 聚合物基导电复合材料的制备方法	99
3.2.4 影响导电性能的主要因素	102
3.2.5 聚合物基导电复合材料的应用	107
3.3 无机非金属基导电复合材料	108
3.3.1 陶瓷基导电复合材料	108
3.3.2 水泥基导电复合材料	109
3.4 金属基导电复合材料	111
3.5 其他类型导电复合材料	111
3.5.1 无机物-聚合物插层导电纳米复合材料	111
3.5.2 超导复合材料	113
参考文献	114
第4章 光功能复合材料	117
4.1 概述	117
4.2 透光功能复合材料	118
4.2.1 透光原理	118
4.2.2 复合材料透光性设计分析	121
4.2.3 透明玻璃钢性能特点	121
4.2.4 透光复合材料的应用与发展	122
4.3 光传导复合材料	123
4.3.1 光导纤维	123
4.3.2 石英光纤	127
4.3.3 聚合物光纤	128

4.3.4 功能光纤	130
4.4 发光复合材料	132
4.4.1 无机发光复合材料	133
4.4.2 有机发光复合材料	133
4.4.3 有机-无机复合发光材料	134
4.4.4 稀土发光复合材料的研究及应用	135
4.5 光致变色复合材料	138
4.5.1 原理	138
4.5.2 光色玻璃	139
4.6 感光复合材料	140
4.6.1 感光树脂与印刷技术的革命	140
4.6.2 光刻胶	141
4.7 其他光功能复合材料	144
4.7.1 选择滤光功能复合材料	144
4.7.2 光电转换功能复合材料	144
4.7.3 光记录复合材料	144
4.7.4 非线性光学复合材料	146
参考文献	148
第5章 热功能复合材料	151
5.1 烧蚀耐热复合材料	151
5.1.1 耐热复合材料的分类与基本特性	151
5.1.2 树脂基耐热复合材料	153
5.1.3 碳/碳耐热复合材料	162
5.1.4 陶瓷基耐热复合材料	165
5.1.5 耐热复合材料的发展	168
5.2 热适应复合材料	172
5.2.1 复合材料的导热特性	172
5.2.2 可控热膨胀系数复合材料	180
5.3 阻燃复合材料	194
5.3.1 材料阻燃性能评价	195
5.3.2 阻燃方法与阻燃机理	197
5.3.3 阻燃复合材料技术的发展	203
参考文献	206

第6章 摩擦复合材料	210
6.1 概述	210
6.1.1 摩擦与磨损现象	210
6.1.2 摩擦材料性能参数及其表征	212
6.2 摩擦学原理	214
6.2.1 黏着理论	215
6.2.2 分子机械理论	216
6.3 摩阻复合材料	217
6.3.1 组分材料	217
6.3.2 几种常用摩阻复合材料	230
6.3.3 摩阻复合材料的应用技术	236
6.4 减摩复合材料	239
6.4.1 减摩功能体	239
6.4.2 常用减摩复合材料	241
6.4.3 应用特点	245
参考文献	245
第7章 阻尼复合材料	250
7.1 概述	250
7.2 阻尼原理与阻尼特性表征	250
7.2.1 阻尼原理	250
7.2.2 阻尼特性表征	252
7.3 几种阻尼复合材料	252
7.3.1 树脂基阻尼复合材料	252
7.3.2 金属基阻尼复合材料	262
7.3.3 金属-树脂复合材料	265
7.3.4 其他阻尼复合材料	270
7.4 阻尼复合材料的应用与发展趋势	273
7.4.1 阻尼复合材料的应用	273
7.4.2 阻尼复合材料的发展趋势	276
参考文献	276
第8章 防弹复合材料	279
8.1 概述	279
8.1.1 防弹复合材料的含义与特点	279

8.1.2 防弹复合材料装甲结构类型与用途	279
8.2 防弹复合材料组分及其动态力学特性	281
8.2.1 防弹纤维	281
8.2.2 防弹陶瓷	282
8.2.3 材料的动态力学性能	284
8.3 弹道性能表征与评价	292
8.4 防弹性能影响因素	295
8.4.1 纤维类型的影响	295
8.4.2 树脂基体及含胶量的影响	296
8.4.3 织物结构的影响	297
8.4.4 面密度的影响	300
8.4.5 弹速的影响	302
8.5 弹道性能理论分析模型	302
8.5.1 物理模型	303
8.5.2 面密度统计模型	305
8.5.3 能量分配模型	306
8.6 复合装甲防弹原理及其结构设计	307
8.6.1 弹-靶作用原理	307
8.6.2 复合装甲的设计	310
8.7 防弹复合材料的应用与发展	314
8.7.1 应用技术	314
8.7.2 发展趋势	317
参考文献	318
第9章 抗辐射复合材料	321
9.1 概述	321
9.1.1 抗辐射复合材料的分类与特点	321
9.1.2 抗辐射性能表征参数	323
9.2 防紫外线复合材料	326
9.2.1 防紫外线纤维	326
9.2.2 防紫外线织物	329
9.2.3 其他防紫外线复合材料	331
9.3 防X射线复合材料	332
9.3.1 防X射线纤维	333

9.3.2 防热-抗辐射复合材料	334
9.3.3 稀土对防 X 射线的作用	335
9.3.4 其他防 X 射线复合材料	335
9.4 防中子辐射复合材料	336
9.4.1 防中子辐射纤维	336
9.4.2 聚合物基防中子辐射复合材料	338
9.5 防核辐射复合材料应用研究动态	340
9.6 太空开发对防辐射复合材料的要求	344
参考文献	345

第 1 章 绪 论

1.1 概述

材料的发展与人类文明社会的进步息息相关。人类最早使用的材料是天然材料，如木棍、竹片、石器等。随着社会的进步，人类可以制造与使用冶金材料，如铁、铜、锡等。人类从只会使用天然材料到能制造与使用冶金材料，经历了一个漫长的过程。为了生活与生产的需要，人类又经过了数百年的努力才开发出合成材料。于是各种高分子材料，如塑料、橡胶、纤维等，使人们的生活变得丰富多彩。随着科学技术的发展，人们清楚地意识到单一材料的性能难以满足高技术与现代化生产的需要，人们又经过近百年的努力，才懂得采用两种或两种以上的材料复合在一起，可获得性能更优的新材料，这种新材料便是通常所说的复合材料。复合材料的出现，有力地推动着高尖端技术的快速发展。目前，复合材料已成为航空航天等高新技术领域与国民经济建设中必不可少的重要材料。进而，有些发达国家把先进复合材料视为国家安全与国民经济具有竞争优势的源泉。如果说材料的每一次革命性发展是标志着人类文明社会大进步的一个里程碑，从天然材料发展到冶金材料，又发展到合成材料直到复合材料，那么 20 世纪中叶发展起来的复合材料已成为人类文明社会进步最近的一个里程碑。众所周知，一类新材料的兴起，并不意味着传统材料的淘汰，相反更有利于传统材料的改进。新材料与传统材料一起共同为人类的生活和生产构筑了更加坚实的基础。

所谓复合材料是指由两种或两种以上的材料通过物理或化学的方法复合而成的一种新的固体材料。与传统材料相比，复合材料具有比强度、比模量高，设计自由度大，抗损伤、耐疲劳性优异，适合大构件整体成型等特点。复合材料根据基体的不同，通常分为树

脂基复合材料（亦称聚合物基复合材料）、金属基复合材料、陶瓷基复合材料与碳基复合材料。

复合材料早期的应用主要是针对它的结构特性，即利用它来制作结构承力件。因此半个世纪以来，人们对复合材料的研究与应用主要集中在结构复合材料。

然而，复合材料不仅具有优异的力学性能，设计得当的复合材料还具有其他材料不可比拟的优异功能特性。通常把除力学性能以外，具有良好的其他物理特性（如电、磁、光、阻尼、热、摩擦、声等）的复合材料称之为功能复合材料。近些年来，人们对功能复合材料备加重视。

功能复合材料是由基体与功能体构成的多相材料。基体主要起黏结作用，某些情况下也起功能作用，复合材料的功能特性主要由功能体贡献，加入不同特性的功能体可得到特性各异的功能复合材料。如加入导电功能体，可得到导电复合材料；加入电磁波吸收剂，可得到吸波复合材料。功能复合材料与结构复合材料都是相对而言的。

功能复合材料近几年发展很快，其原因与其特点有关。功能复合材料除具有复合材料的一般特性外，还具有如下特点。

（1）应用面宽 根据需要可设计与制备出不同功能的复合材料，以满足现代科学技术发展的需求。

（2）研制周期短 一种结构材料从研究到应用，一般需要10～15年左右，甚至更长，而功能复合材料的研制周期要短得多。

（3）附加值高 单位质量的价格与利润远远高于结构复合材料。

（4）小批量，多品种 功能复合材料很少有大批量，但品种需求多。

（5）适于特殊用途 在不少场合，功能复合材料有着其他材料无法比拟的使用特性。

1.2 功能复合材料种类

功能复合材料常用的分类方法有两种：一种是按基体分类，另

一种是按功能特性分类。按基体分类，相同于结构复合材料，分为树脂基（或聚合物基）功能复合材料、金属基功能复合材料、陶瓷

表 1.1 功能复合材料的主要类型

功能特征	主要类型	用途
磁功能复合材料	屏蔽复合材料 吸波复合材料 透波复合材料	柔韧磁体、磁记录 隐身材料 雷达罩、天线罩
导电复合材料	聚合物基导电复合材料 本征导电聚合物材料 压电复合材料 陶瓷基导电复合材料 水泥基导电复合材料 金属基导电复合材料 导电纳米复合材料 超导复合材料	屏蔽 防静电、开关 压电传感器 高压绝缘 建筑物绝缘 高强、耐热导电材料 锂电池 医用核磁共振成像技术
光功能复合材料	透光复合材料 光传导复合材料 发光复合材料 光致变色复合材料 感光复合材料 光电转换复合材料 光记录复合材料	农用温室顶板 光纤传感器 荧光显示板 变色眼镜 光刻胶 光电导摄像管 光学存储器
热功能复合材料	烧蚀隔热复合材料 热适应复合材料 阻燃复合材料	固体火箭发动机喷管 半导体支撑板 车、船、飞行器等内装饰材料
摩擦复合材料	摩阻复合材料 减摩复合材料	汽车刹车片 轴承
阻尼复合材料	热损耗阻尼复合材料 磁损耗阻尼复合材料 电损耗阻尼复合材料	洗衣机外壳、网球拍 桥梁减振 智能声控
防弹复合材料	软质防弹装甲 复合材料层合板防弹装甲 陶瓷/复合材料防弹装甲	防弹衣 防弹头盔 航空复合装甲
抗辐射复合材料	防紫外线复合材料 防X射线复合材料 防γ射线复合材料 防中子复合材料 防核辐射复合材料	遮阳伞 X射线摄影纱 γ射线防护服 中子辐射防护服 核废料容器