

21

世纪复合材料应用技术丛书

丛书主编 刘雄亚

功能 复合材料 及其应用

曾黎明 编著



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

21

世纪复合材料应用技术丛书

丛书主编 刘雄亚

功能 复合材料 及其应用

曾黎明 编著



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

本书对功能复合材料作了全面系统的介绍。全书共分 18 章, 主要内容有: 电磁波吸收功能复合材料、聚合物基摩擦功能复合材料、光功能复合材料、生体功能复合材料、多功能复合材料、梯度功能复合材料、机敏复合材料与智能复合材料结构等功能复合材料的基本原理、功能特性、组分材料和制备技术, 以及相关应用等方面的知识。该书既有国内外成果的总结, 又有丰富实践经验的提炼, 叙述简洁, 切合实际。

本书可用作高等学校复合材料相关专业的教学参考书, 也可供从事复合材料科研、生产、应用领域的技术人员和管理者阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

功能复合材料及其应用/曾黎明编著. —北京: 化学工业出版社, 2006. 7

(21 世纪复合材料应用技术丛书)

ISBN 978-7-5025-9058-1

I. 功… II. 曾… III. 功能材料: 复合材料-基本知识 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 072750 号

21 世纪复合材料应用技术丛书

丛书主编 刘雄亚

功能复合材料及其应用

曾黎明 编著

责任编辑: 张玉崑

文字编辑: 李 玥

责任校对: 边 涛

封面设计: 郑小红

*

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)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

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

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 18¼ 字数 340 千字

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-5025-9058-1

定 价: 38.00 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

丛书前言

材料是人类赖以生产、生活所必需的物质基础，也是社会文明进步的标志。在人类历史发展过程中，每一种新材料的出现和制造技术的进步，都不同程度地促进了社会生产力的发展。

复合材料是指由两种以上的异质、异形、异性的材料，经过复合而形成的新材料，它除保留原组分材料的主要特点外，还能通过复合效应获得原有组分材料所不具备的新的优异性能。按其基体材料的不同，复合材料可分为聚合物（树脂）基复合材料、金属基复合材料和无机非金属材料基复合材料三大类。

在 2200 年前，我们的祖先就已开始利用复合材料。如在西安半坡村原始人遗址中发现，用草（天然纤维）拌泥作墙和地面，防止黏土干裂和剥落，提高墙体与地面的强度和耐风雨侵蚀能力，这可以看作是纤维增强无机复合材料的始祖。1972~1974 年在我国湖南马王堆古墓中出土的漆器是西汉时代的文物，它是用丝和麻作增强材料，用大漆作胶黏剂制成的鼎、酒壶、盆具、茶几等物品，在地下埋藏了两千多年，仍然熠熠生辉。湖北隋县出土的曾侯乙墓中，有许多用于战车的戈戟和殳，它们的柄是用 3~4m 长的木杆芯，外面包以纵向竹丝，再用大漆和蚕丝进行环向缠绕，然后再浸渍大漆经干燥后形成复合材料，产品坚硬光滑，耐水耐热，耐化学腐蚀。这和现今的树脂基纤维缠绕增强复合材料的成型是相似的。魏晋南北朝时期，在改革底胎和面漆的基础上，先塑造出泥胎，再在泥胎上粘贴麻布、涂漆和彩绘，当油漆干固后挖出并用水冲去泥胎，形成中空漆麻复合材料佛像。这种佛像轻巧美观、坚固耐久，几米高的佛像，一个人就可以举着行走（称为“行像”）。这种技术流传到日本后，至今还保留着当年唐代高僧鉴真和尚东渡日本，在该国圆寂时塑制的漆麻复合材料座像，作为日本的国宝文物，每年只对外开放几天，供人瞻仰。这种制造佛像技术与当今的手糊玻璃钢成型工艺几乎没有多大区别。

现代复合材料的历史只有 60 多年，它始于 20 世纪 40 年代，是由美国人发明的，用玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂复合材料，并在第二次世界大战中用于制造军用飞机雷达罩和远航副油箱。1942 年用手糊工艺制成第一艘复合材料（玻璃钢）渔船。到了 20 世纪 60~70 年代，树脂基复合材料制品已广泛应用于航空、机械、建筑、化工及体育用品等领域。现代复合材料的发展一直是围绕着解决传统材料不能适应的工程技术难题和尖端科学技术提出的新材料需求而发展的。由于复合材料的最大特点是性能的可设计性，因而使它能广泛地应用于国民经济各个领域，顺利

解决了尖端科学技术中宇航材料、隐形技术、复合装甲、信息技术材料、新能源材料、生物医用材料及智能材料等一系列高精尖技术难题。在一般民用经济建设中，复合材料又能起到改善性能、降低成本的作用。复合材料在国民经济各个领域的开发和应用，可以说是无所不能、无所不在。因此，学术界和工程界的专家都一致认为 21 世纪将是复合材料时代。

我国现代复合材料的发展始于 20 世纪 50 年代，是由当时的建材部赖际发部长首先倡导的，他根据 1956 年访问苏联时对“Стеклопластика”的认识，认为这种新材料内含有玻璃，强度又比钢高，遂起名玻璃钢，这种叫法虽然不尽科学，但国内已然约定俗成，在国际交往中也被认可。自此以后，我国复合材料得以持续不断发展、壮大，研究、生产、教育以及行业建设、媒体传播、标准化工作等相继提到日程并付诸实施。

几年前，笔者曾参与化学工业出版社出版的《复合材料大全》主编工作，该书受到各界读者的好评和鼓励，出版社和笔者都收到了大量读者来信、来电咨询，反响较为强烈。由于该书篇幅所限，很多内容不能深入阐述，为了满足广大读者的要求，化学工业出版社经过广泛调查研究并征求专家意见后，特邀请本人组织编写这套《21 世纪复合材料应用技术丛书》，本丛书共分八册：

《无机非金属材料及其应用》（刘雄亚 郝元恺 刘宁 编著）

《透光复合材料、碳纤维复合材料及其应用》（刘雄亚 欧阳国恩 张华新 刘宁 编著）

《夹层结构复合材料设计原理及其应用》（王兴业 杨孚标 曾竟成 肖加余 编著）

《复合材料建筑结构及其应用》（晏石林 杨学忠 刘雄亚 庄英 编著）

《热固性树脂复合材料及其应用》（黄志雄 彭永利 秦岩 梅启林 编著）

《防腐蚀复合材料及其应用》（张大厚 编著）

《功能复合材料及其应用》（曾黎明 编著）

《纤维增强热塑性复合材料及其应用》（张晓明 刘雄亚 编著）

参加编著的作者都是复合材料界的专家，具有丰富的科研、生产和教学实践经验，在编写过程中，作者们除收集最新资料外，还写入了自己多年的研究成果和实践经验，相信会对读者有所裨益。希望这套丛书能为我国复合材料工业的发展起到积极的推动作用。书中倘有不足，敬请赐教。

《21 世纪复合材料应用技术丛书》主编

刘雄亚 于武汉理工大学

2006 年 5 月

前 言

功能复合材料用于非承载目的,具有优良的物理、化学、生物或其相互转化功能,属于功能材料的范畴。随着材料科学的迅速发展,材料的复合化是材料发展的必然趋势之一。由于功能复合材料具有设计自由度大的优势,又具有极其广泛的应用领域,发展前景非常广阔。现已成为航空航天、交通运输、建筑工程、电器设备、化学工程、体育、医学、国防军工等领域不可或缺的先进材料。而功能复合材料本身也由单一功能复合材料向多功能复合材料、结构功能一体化复合材料、机敏和智能复合材料的方向发展,并已取得长足进步。

本书为 21 世纪复合材料应用技术丛书之一,较系统地介绍了各种功能复合材料的设计原则、组分材料、制备方法、性能及应用。内容上力求做到深入浅出、简明扼要、切合实际,使具有一般专业水平的读者及管理人员等能够参考,对相关专业的研究开发人员有所启发。

作者在多年从事功能复合材料教学和科研工作的基础上,收集整理了国内外有关文献编著了此书,希望本书的出版对推动功能复合材料的发展及行业进步能产生有益的影响。

由于作者的知识范围及专业水平有限,疏漏和不妥之处在所难免,真诚欢迎同行和读者指正。

作 者

2006 年 9 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 功能复合材料概述	1
1.2 功能复合材料的设计	1
1.2.1 功能复合材料的设计原则	1
1.2.2 功能复合材料调整优值的途径	2
1.2.3 利用复合效应制造新型功能复合材料	3
1.3 功能复合材料的应用与发展	4
1.3.1 功能复合材料的类别及应用情况	4
1.3.2 功能复合材料的发展趋势	5
第 2 章 聚合物基导电功能复合材料	6
2.1 概述	6
2.2 聚合物基导电功能复合材料的组成	6
2.3 聚合物基导电功能复合材料的导电机理	8
2.3.1 导电通路的形成	8
2.3.2 形成导电通路后的导电行为	10
2.4 聚合物基导电功能复合材料的制备技术	13
2.4.1 共混法	13
2.4.2 化学法	14
2.4.3 电化学法	14
2.5 影响聚合物基导电功能复合材料导电性能的因素	14
2.6 几种典型的聚合物基导电功能复合材料	16
2.6.1 炭黑系导电功能复合材料	16
2.6.2 金属纤维填充型导电功能复合材料	17
2.6.3 纤维增强导电功能复合材料	18
2.7 聚合物基导电功能复合材料的应用	20
第 3 章 压电功能复合材料	23
3.1 概述	23
3.2 压电功能复合材料的性能及制备方法	23
3.2.1 0-3 型压电功能复合材料	23
3.2.2 1-3 型压电功能复合材料	24
3.2.3 其他类型的压电功能复合材料	25
3.3 压电功能复合材料的研究进展	26
3.3.1 常规压电功能复合材料的研究进展	26

3.3.2 压电功能复合材料的理论研究	27
3.3.3 利用横向压电效应的新型压电功能复合材料	27
3.4 压电功能复合材料的应用	27
第4章 磁性复合材料	29
4.1 磁性复合材料简介	29
4.2 聚合物基磁性复合材料的组成	29
4.2.1 无机磁粉功能体	30
4.2.2 聚合物基体	31
4.2.3 加工助剂	33
4.3 聚合物基磁性复合材料的制备工艺	33
4.4 磁流变体简介	35
4.5 磁性复合材料的性能及应用	35
4.5.1 磁性复合材料性能与填充磁体含量的关系	35
4.5.2 磁性复合材料的应用	36
4.6 磁性复合材料的老化机理及其防护	37
第5章 电磁波吸收功能复合材料	40
5.1 概述	40
5.2 吸波功能复合材料的吸波机理	41
5.2.1 关于电匹配特性	41
5.2.2 关于衰减特性	41
5.2.3 磁化吸波	42
5.3 吸波功能复合材料的分类及组成	43
5.3.1 根据损耗机理分类	43
5.3.2 根据结构承载分类	43
5.4 吸波功能复合材料的性能与制备技术	44
5.4.1 吸波功能复合材料的吸波特性	44
5.4.2 涂覆型吸波功能复合材料	45
5.4.3 结构型吸波功能复合材料	50
5.5 结构吸波功能复合材料在飞机上的应用	54
第6章 聚合物基减磨功能复合材料	56
6.1 聚合物基减磨功能复合材料的类别及特点	56
6.1.1 按树脂基体分类	56
6.1.2 按减磨自润滑机理分类	56
6.2 聚合物基减磨功能复合材料的摩擦磨损分析	58
6.2.1 概述	58
6.2.2 摩擦磨损性能的影响因素分析	59
6.3 几种典型聚合物基减磨功能复合材料	65

6.3.1	聚四氟乙烯基减磨复合材料	65
6.3.2	聚酰胺(尼龙)基减磨复合材料	69
6.3.3	聚甲醛基减磨复合材料	70
6.3.4	酚醛聚合物基减磨复合材料	71
6.3.5	高性能聚合物基减磨复合材料	73
6.3.6	碳纤维作为减磨剂的减磨复合材料	73
6.3.7	水润滑减磨复合材料	74
6.3.8	钢背-青铜粉-改性树脂三层减磨复合材料	75
第7章	聚合物基摩阻功能复合材料	79
7.1	概述	79
7.2	聚合物基摩阻复合材料的摩擦与磨损分析	80
7.2.1	聚合物的摩擦与磨损性能	81
7.2.2	树脂基复合材料的摩擦与磨损性能	83
7.3	聚合物基摩阻复合材料的性能及影响因素	84
7.3.1	具有符合要求的摩擦系数	84
7.3.2	具有符合要求的较低的磨损率	85
7.3.3	摩擦系数及磨损率的抗热衰退性	86
7.3.4	摩擦系数的正常恢复性	87
7.3.5	具有适当的硬度	87
7.3.6	具有足够的力学强度	89
7.3.7	无摩擦噪声	89
7.3.8	有限的热膨胀性	90
7.4	树脂基摩阻复合材料的组成	92
7.4.1	黏结剂	92
7.4.2	增强剂	97
7.4.3	摩擦性能调节剂	103
7.5	典型树脂基摩阻复合材料产品生产工艺	107
7.5.1	制动器衬片的生产	107
7.5.2	离合器瓦片的生产	109
第8章	阻尼功能复合材料	115
8.1	概述	115
8.2	复合材料的阻尼性能	115
8.2.1	金属基阻尼功能复合材料的阻尼性能	116
8.2.2	聚合物基阻尼功能复合材料的阻尼性能	117
8.2.3	金属与聚合物叠层阻尼功能复合材料	118
8.2.4	聚合物基阻尼功能复合材料的阻尼机理	119
8.2.5	提高复合材料阻尼性能的措施	119

8.3 阻尼功能复合材料的应用实例	120
8.3.1 复合材料板弹簧	120
8.3.2 层压复合钢板	121
第9章 装甲防护功能复合材料	124
9.1 高性能玻璃纤维复合装甲材料	124
9.1.1 组分材料	124
9.1.2 性能与防弹效果	124
9.2 芳纶纤维复合装甲材料	125
9.2.1 组分材料	125
9.2.2 性能与防弹效果	125
9.3 高强度聚乙烯纤维复合装甲材料	126
9.3.1 组分材料	126
9.3.2 性能与防弹效果	126
9.4 陶瓷复合装甲材料	126
9.4.1 组分材料	126
9.4.2 性能与防弹效果	127
9.5 复合材料内衬	127
9.5.1 组分材料	127
9.5.2 性能与防弹效果	128
9.6 人体防护	128
9.6.1 组分材料	128
9.6.2 防弹性能及其影响因素	130
9.7 复合材料在装甲防护中的应用趋势	133
第10章 耐化学腐蚀功能复合材料	136
10.1 概述	136
10.1.1 材料腐蚀的类型	137
10.1.2 材料腐蚀原理	137
10.2 耐化学腐蚀功能复合材料的组分材料	143
10.2.1 增强材料	143
10.2.2 聚合物基体	148
10.3 耐腐蚀功能复合材料的成型工艺	150
10.3.1 拉挤玻璃钢型材	150
10.3.2 聚合物/层状硅酸盐纳米复合材料	151
10.3.3 树脂基 PEMG 超混杂复合材料	151
10.4 耐腐蚀功能复合材料的性能及应用	154
10.4.1 在高纯水和食品工业中的应用	154
10.4.2 在氯碱工业中的应用	154

10.4.3	在环境保护领域中的应用	155
10.4.4	在金属表面处理工业中的应用	158
10.4.5	在火力发电中的应用	159
10.4.6	在海水淡化中的应用	159
10.4.7	在医药工业中的应用	160
第 11 章	光功能复合材料	161
11.1	透光复合材料概述	161
11.1.1	透光复合材料的定义及分类	161
11.1.2	透光复合材料的优缺点	161
11.1.3	透光复合材料的发展概况	163
11.2	透光复合材料用原材料及制备工艺	164
11.2.1	玻璃纤维增强材料	165
11.2.2	透明树脂	166
11.3	透明玻璃钢的耐久性	171
11.3.1	透明玻璃钢的老化和防老化	171
11.3.2	防光老化的措施	172
11.4	透明玻璃钢的应用	175
11.4.1	透明玻璃钢制品的常用结构形式和用途	176
11.4.2	透明玻璃钢在工业及民用建筑中的应用	176
11.4.3	透明玻璃钢在农业温室中的应用	178
11.4.4	透明玻璃钢在其他方面的应用	179
第 12 章	生体功能复合材料	180
12.1	概述	180
12.1.1	生体功能材料的生物相容性	181
12.1.2	生物相容性评价实验	182
12.1.3	生体功能复合材料组分材料的选择要求	182
12.2	复合材料假肢	183
12.3	颅骨修补用生体功能复合材料	184
12.4	牙科用生体功能复合材料	185
12.4.1	龋齿填补材料	186
12.4.2	假牙与人工牙根	187
12.4.3	新型牙科复合材料	188
12.5	人工气管用生体功能复合材料	189
12.6	人工皮肤	190
第 13 章	多功能复合材料	192
13.1	功能-结构一体化复合材料	192
13.1.1	功能-结构一体化高阻尼复合材料	192

13.1.2	吸能-结构一体化复合材料	193
13.2	阻燃-抗静电复合材料	194
13.2.1	阻燃-抗静电复合材料制备方法	195
13.2.2	阻燃-抗静电机理与复合材料性能	195
13.3	阻燃-透光复合材料	198
13.3.1	阻燃-透光复合材料的制备方法	199
13.3.2	阻燃-透光复合材料的性能研究	199
第 14 章	机敏复合材料与智能复合材料结构	201
14.1	机敏复合材料	201
14.1.1	机敏复合材料简介	201
14.1.2	机敏复合材料的组成	202
14.1.3	机敏复合材料的研究现状及应用	203
14.2	智能复合材料结构	208
14.2.1	概述	208
14.2.2	智能复合材料结构的设计方法	211
14.3	智能复合材料结构的应用	217
14.3.1	智能复合材料结构在航空工业中的应用	217
14.3.2	智能复合材料结构系统在土木工程中的应用	220
第 15 章	仿生功能复合材料	224
15.1	概述	224
15.2	复合材料的仿生设计	226
15.2.1	复合材料的结构仿生	226
15.2.2	复合材料的功能仿生	226
15.2.3	复合材料的过程仿生	226
15.2.4	仿生复合材料的设计与实验研究	227
15.3	复合材料的仿生制备	228
15.3.1	仿骨哑铃型碳化硅晶须的制备和增塑效应	228
15.3.2	用气相生长法制备树根状仿生碳纤维	229
15.3.3	碳素材料的抗氧化自愈合研究	229
15.3.4	仿珍珠层氮化硅陶瓷的设计与制备	230
15.3.5	“结构仿生”硬组织替代材料研究	231
第 16 章	纳米复合材料	232
16.1	概述	232
16.2	纳米粉体的制备方法	232
16.2.1	纳米粉体的物理制备方法	232
16.2.2	纳米粉体的化学制备方法	233
16.2.3	化学气相法	234

16.3	纳米粉体的表征方法	235
16.4	纳米粉体的分散方法	235
16.4.1	超声波分散	236
16.4.2	机械搅拌分散	236
16.4.3	分散剂分散	236
16.4.4	化学改性分散	237
16.5	树脂基纳米复合材料的制备方法	237
16.5.1	插层法	237
16.5.2	共混法	238
16.5.3	溶胶-凝胶法	238
16.5.4	原位聚合法	239
16.6	几种典型纳米复合材料	239
16.6.1	环氧树脂基纳米复合材料	239
16.6.2	原位 SiO_2 /橡胶纳米复合材料	240
16.6.3	橡胶/纤维纳米复合材料	241
16.7	纳米复合材料的性能及应用	241
16.7.1	树脂基纳米复合材料	242
16.7.2	仿生纳米复合材料	242
16.7.3	纳米隐身材料	242
16.7.4	光学纳米复合材料	242
16.7.5	用于化妆品工业的纳米复合材料	242
16.7.6	用于医药工业的纳米复合材料	243
16.7.7	纳米复合材料水箱	243
第 17 章	梯度功能复合材料	244
17.1	概述	244
17.1.1	梯度功能复合材料的产生与发展	244
17.1.2	梯度功能复合材料的研究内容	245
17.2	梯度复合技术与结构控制方法	246
17.2.1	化学气相沉积技术	246
17.2.2	物理气相沉积技术	248
17.2.3	自蔓延快速加压梯度复合技术	249
17.2.4	等离子熔射复合技术	250
17.3	梯度功能复合材料的应用	252
17.3.1	在机械工程中的应用	252
17.3.2	在光电工程中的应用	252
17.3.3	在电磁工程中的应用	253
17.3.4	在生物工程中的应用	253

17.3.5 在核能及电气工程中的应用	253
第 18 章 其他功能复合材料	254
18.1 耐烧蚀复合材料	254
18.1.1 概述	254
18.1.2 耐烧蚀复合材料的分类	254
18.1.3 树脂基耐烧蚀复合材料	255
18.1.4 弹性体基耐烧蚀复合材料	257
18.1.5 耐烧蚀复合材料的应用概况	258
18.2 减震降噪功能复合材料	262
18.2.1 几种常用的减震降噪功能复合材料	263
18.2.2 减震降噪功能复合材料发展趋势	267
18.3 深潜用耐压浮力材料	267
18.3.1 概述	267
18.3.2 固体浮力材料分类	268
18.3.3 化学泡沫塑料	268
18.3.4 复合泡沫塑料	269
18.3.5 深潜用浮力材料的发展趋势	270
参考文献	271

第 1 章 绪 论

1.1 功能复合材料概述

具有除力学性能以外的其他化学物理性能的复合材料，统称为功能复合材料，属于功能材料的范畴。

功能复合材料的品种繁多，在电学性质方面有绝缘材料、导电材料、半导体材料、正温度系数导电材料、吸波、屏蔽、压电、电致伸缩材料（电流变体）等；在磁性能方面有复合永磁、软磁材料、磁致伸缩（磁流变体）等；光学功能方面有透光、变频、抗散光、选择吸收光波等；热性能方面包括导热、绝热、耐烧蚀、低热膨胀材料；声学方面有声呐发射和接收、吸音等；在化学性能方面，有抗氧化、耐腐蚀、阻燃、自熄复合材料等；此外，还有阻尼、摩擦、抗磨损、自润滑、吸能、生体、仿生、纳米、梯度等功能复合材料。

利用功能体及复合材料对声、光、电、热、磁、力及各种环境的敏感性，可以制得具有各种敏感特性的复合材料，如光敏、温敏、湿敏、压敏等机敏功能的复合材料，这类敏感材料对一些特种传感器提供了新的选择，它对工业生产过程自动控制与检测、自然灾害的预防、工业污染的监控、医疗卫生检查、自然资源的探测、各种遥感信息的传递及监测等许多方面发挥越来越重要的作用。

此外，除了利用功能体的作用，还可以利用基体材料的功能特性，来制备功能复合材料。例如，利用具有化学分离功能的聚合物基体与磁性微粒功能体制成带磁核的具有化学分离功能的磁性复合分离材料，它可以从溶液中选择性地分离出贵金属离子或有毒金属离子，并在磁场下形成磁滤网，提高分离效率。

功能复合材料是近二三十年发展起来的复合材料的一个重要分支。作为一种新材料，正得到迅速的发展及密切的注意，并且在工业中得到充分的应用。

1.2 功能复合材料的设计

1.2.1 功能复合材料的设计原则

功能复合材料主要由一种或多种功能体和基体组成。在单一功能体的复合材料

中, 功能性质由功能体提供; 基体既起到粘接和赋形的作用, 也会对复合材料整体的性能有所影响。多元功能体的复合材料具有多种功能, 还可能因复合效应而出现新的功能。综合性能优良的多功能复合材料将成为功能复合材料新的发展方向。可以预见, 未来的功能复合材料比例将超过结构复合材料, 成为复合材料发展的主流。

功能材料很难用一种物理量来衡量, 需要用材料的优值进行综合评价。材料的优值是由几个物理参数组合起来对材料使用性能进行评价的量。一般单质材料很难达到高优值, 但复合材料则有很多途径可以达到高优值。即按照要求调整特有的参数, 经设计来满足材料有关的物理量组元。此外, 还可应用复合材料的复合效应设计制造各种功能复合材料。其中, 运用乘积效应已经成功地设计出新型功能复合材料。由于功能复合材料是由两种 (或两种以上) 材料组分所组成的, 因此功能复合材料具有很大的设计自由度。

1.2.2 功能复合材料调整优值的途径

功能复合材料以通过改变复合结构的因素, 即复合度、连接方式、对称性、尺度和周期性等, 可大幅度定向化地调整物理张量组元的数值, 寻求最佳组合, 取得最高优值。

(1) 调整复合度 复合度是参与复合各组分的体积 (或质量) 分数, 由于把物理性能不同的物质复合在一起, 可以改变各组分的含量, 使复合材料的某物理参数在较大范围内任意调节。同时材料的布局结构 (如两种材料并联或串联) 也得到不同的变化。

(2) 调整连接方式 复合材料中各组分在三维空间中互相连接的形式可任意调整。各种材料组分具有不同的几何形状, 如颗粒状 (零维, 以 0 表示)、纤维状 (一维, 以 1 表示)、片膜状 (二维, 以 2 表示) 和网络状 (三维, 以 3 表示)。可以根据需要选择不同形状的组分进行复合。

(3) 调整对称性 对称性是功能复合材料组分在空间几何布局上的特征。对材料对称性描述的方法有结晶学点群、居里群和黑白群等, 不同功能复合材料的对称性须选用不同的描述方法。

(4) 调整尺度 当功能体尺寸从微米、亚微米减小到纳米时, 原有的宏观物理性能会发生变化, 这是由于物体尺寸减小时表面原子数增多引起的。当达到纳米尺度时, 材料的表面成为主要成分, 如直径为 2nm 时, 其表面的原子数将占总数的 80%, 出现量子尺寸效应。因此, 改变复合材料功能体的尺寸可以使复合材料物理性能发生巨大变化。由于功能体尺寸减小, 特别是降到纳米量级时, 它与基体之间的界面还能产生协同效应, 使复合材料的电学、光学、光化学、非线性光学等出现

异常行为。

(5) 调整周期性 一般随机分布的复合材料是不存在周期性的,不能因此而产生功能效应。然而,如果采用特殊工艺使功能体在基体内呈结构性的周期分布,并使外加作用场(光、声、电磁波等)的波长与此周期呈一定的匹配关系,便可产生功能作用。例如,将经极化的压电陶瓷纤维按一定的周期距离排布在聚合物基体中,如果施加一定波长的交变电压于此功能复合材料上,使之成为谐振器,则会发生比单纯用压电陶瓷时大得多的振动。这是因为复合材料中的聚合物基体的模量比陶瓷模量小得多,因此产生很大的增幅,从而出现机械放大行为。

由于工艺难度大等因素的限制,在上述五种调节方法中,一般仅用复合度和连接方式对功能复合材料的性质进行调节。尽管如此,这已为设计复合材料提供较大的自由度。

1.2.3 利用复合效应制造新型功能复合材料

复合效应是复合材料特有的效应,包括表 1-1 所示的内容。结构复合材料基本上通过其中的线性效应起作用,但功能复合材料不仅能通过线性效应起作用(如复合度调节作用利用加和效应和相补效应),更重要的是可利用非线性效应设计出许多新型的功能复合材料。

表 1-1 复合材料的复合效应

线性效应	非线性效应	线性效应	非线性效应
加和效应	乘积效应	相补效应	诱导效应
平均效应	系统效应	相抵效应	共振效应

(1) 乘积效应 乘积效应是在复合材料两组分之间产生可用乘积关系表达的协同作用。例如把两种性能可以互相转换的功能材料:热-形变材料(以 X/Y 表示)与另一种形变-电导材料(Y/Z)复合,其结果是由于各组分的协同作用得到一种新的热-电导(X/Z)功能复合材料。借助类似关系得以通过各种单质换能材料复合成各种各样的功能复合材料。表 1-2 列出部分实例。

表 1-2 乘积效应的应用实例

A 相换能材料(X/Y)	B 相换能材料(Y/Z)	A-B 功能复合材料 ($X/Y \times Y/Z = X/Z$)	用 途
热-形变	形变-电导	热-电导	热敏电阻, PTC
磁-形变(磁致伸缩)	压力-电流	磁力-电流	磁场测量元件
光-电导	电-形变(电致伸缩)	光-形变(光致伸缩)	光控机械
压力-电场	电场-磁场	压力-磁场	压磁换能器
压力-电场	电场-发光(场致发光)	压力-发光	压力过载指示
光-电流(短波长)	电流-发光(长波长)	光(短波长)-光(长波长)	光波转换器(紫外-红外)