

“十五”国家重点图书

新材料与应用技术丛书

# 功能复合材料

张佐光摇主编



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

该书如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责退换

## 前摇摇言

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防热、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阻复合材料，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

阎国良

## 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

2004年 9月

# 目 录

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| 第 1 章 绪 论 .....             | 1 |
| 1.1 功能复合材料概述 .....          | 1 |
| 1.2 功能复合材料种类 .....          | 2 |
| 1.3 功能复合效应 .....            | 3 |
| 1.4 功能复合材料设计 .....          | 3 |
| 1.5 设计原则 .....              | 3 |
| 1.6 设计方法 .....              | 4 |
| 1.7 制造方法 .....              | 4 |
| 1.8 功能特性的可靠性控制 .....        | 4 |
| 1.9 功能复合材料发展方向 .....        | 5 |
| 参考文献 .....                  | 5 |
| 第 2 章 磁功能复合材料 .....         | 6 |
| 2.1 磁性复合材料 .....            | 6 |
| 2.2 概述 .....                | 6 |
| 2.3 聚合物基磁性复合材料 .....        | 6 |
| 2.4 纳米磁性复合材料 .....          | 7 |
| 2.5 磁性复合材料的应用 .....         | 7 |
| 2.6 电磁波屏蔽复合材料 .....         | 7 |
| 2.7 屏蔽效果的理论估算与评价 .....      | 7 |
| 2.8 屏蔽性能的相关性因素 .....        | 8 |
| 2.9 屏蔽材料的发展 .....           | 8 |
| 2.10 吸波复合材料 .....           | 8 |
| 2.11 吸波基本原理 .....           | 8 |
| 2.12 吸波性能的特征与影响因素 .....     | 9 |
| 2.13 常用吸波复合材料的结构形式与特点 ..... | 9 |
| 2.14 混杂纤维吸波复合材料 .....       | 9 |
| 2.15 发展方向与新思路 .....         | 9 |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 透波复合材料 .....           | 1  |
| 1.1 透波复合材料的组成及性能 .....       | 2  |
| 1.2 影响透波复合材料电磁性能的因素 .....    | 3  |
| 1.3 透波复合材料的发展趋势 .....        | 4  |
| 第 2 章 其他磁功能复合材料 .....        | 5  |
| 参考文献 .....                   | 6  |
| 第 3 章 导电复合材料 .....           | 7  |
| 3.1 概述 .....                 | 8  |
| 3.2 聚合物基导电复合材料 .....         | 9  |
| 3.2.1 复合型聚合物基导电复合材料 .....    | 10 |
| 3.2.2 本征聚合物基导电复合材料 .....     | 11 |
| 3.3 聚合物基导电复合材料的制备方法 .....    | 12 |
| 3.4 影响导电性能的主要因素 .....        | 13 |
| 3.5 聚合物基导电复合材料的应用 .....      | 14 |
| 3.6 无机非金属基导电复合材料 .....       | 15 |
| 3.7 陶瓷基导电复合材料 .....          | 16 |
| 3.8 水泥基导电复合材料 .....          | 17 |
| 3.9 金属基导电复合材料 .....          | 18 |
| 3.10 其他类型导电复合材料 .....        | 19 |
| 3.11 无机物/聚合物插层导电纳米复合材料 ..... | 20 |
| 3.12 超导复合材料 .....            | 21 |
| 参考文献 .....                   | 22 |
| 第 4 章 光功能复合材料 .....          | 23 |
| 4.1 概述 .....                 | 24 |
| 4.2 透光功能复合材料 .....           | 25 |
| 4.2.1 透光原理 .....             | 26 |
| 4.2.2 复合材料透光性设计分析 .....      | 27 |
| 4.3 透明玻璃钢性能特点 .....          | 28 |
| 4.4 透光复合材料的应用与发展 .....       | 29 |
| 4.5 光传导复合材料 .....            | 30 |
| 4.6 光导纤维 .....               | 31 |
| 4.7 石英光纤 .....               | 32 |
| 4.8 聚合物光纤 .....              | 33 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 摇摇源摇摇功能光纤 .....           | 员源 |
| 摇摇源摇摇发光复合材料 .....         | 员圆 |
| 摇摇源摇摇无机发光复合材料 .....       | 员猿 |
| 摇摇源摇摇有机发光复合材料 .....       | 员猿 |
| 摇摇源摇摇有机无机复合发光材料 .....     | 员源 |
| 摇摇源摇摇稀土发光复合材料的研究及应用 ..... | 员缘 |
| 摇摇源摇摇光致变色复合材料 .....       | 员愿 |
| 摇摇源摇摇原理 .....             | 员愿 |
| 摇摇源摇摇光色玻璃 .....           | 员怨 |
| 摇摇源摇摇感光复合材料 .....         | 员圆 |
| 摇摇源摇摇感光树脂与印刷技术的革命 .....   | 员圆 |
| 摇摇源摇摇光刻胶 .....            | 员辰 |
| 摇摇源摇摇其他光功能复合材料 .....      | 员源 |
| 摇摇源摇摇选择滤光功能复合材料 .....     | 员源 |
| 摇摇源摇摇光电转换功能复合材料 .....     | 员源 |
| 摇摇源摇摇光记录复合材料 .....        | 员源 |
| 摇摇源摇摇非线性光学复合材料 .....      | 员远 |
| 摇摇参考文献 .....              | 员愿 |
| 第 缘章摇摇热功能复合材料 .....       | 员辰 |
| 摇摇缘摇摇烧蚀耐热复合材料 .....       | 员辰 |
| 摇摇缘摇摇耐热复合材料的分类与基本特性 ..... | 员辰 |
| 摇摇缘摇摇树脂基耐热复合材料 .....      | 员猿 |
| 摇摇缘摇摇碳纤维耐热复合材料 .....      | 员圆 |
| 摇摇缘摇摇陶瓷基耐热复合材料 .....      | 员缘 |
| 摇摇缘摇摇耐热复合材料的发展 .....      | 员愿 |
| 摇摇缘摇摇热适应复合材料 .....        | 员圆 |
| 摇摇缘摇摇复合材料的导热特性 .....      | 员圆 |
| 摇摇缘摇摇可控热膨胀系数复合材料 .....    | 员圆 |
| 摇摇缘摇摇阻燃复合材料 .....         | 员源 |
| 摇摇缘摇摇材料阻燃性能评价 .....       | 员缘 |
| 摇摇缘摇摇阻燃方法与阻燃机理 .....      | 员苑 |
| 摇摇缘摇摇阻燃复合材料技术的发展 .....    | 圆猿 |
| 摇摇参考文献 .....              | 圆远 |

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| 第 1 章 摩擦复合材料 .....          | 1 |
| 1.1 摩擦概述 .....              | 1 |
| 1.2 摩擦与磨损现象 .....           | 1 |
| 1.3 摩擦材料性能参数及其表征 .....      | 1 |
| 1.4 摩擦学原理 .....             | 1 |
| 1.5 黏着理论 .....              | 1 |
| 1.6 分子机械理论 .....            | 1 |
| 1.7 摩擦阻复合材料 .....           | 1 |
| 1.8 摩擦组分材料 .....            | 1 |
| 1.9 几种常用摩擦阻复合材料 .....       | 1 |
| 1.10 摩擦阻复合材料的应用技术 .....     | 1 |
| 1.11 减摩复合材料 .....           | 1 |
| 1.12 减摩功能体 .....            | 1 |
| 1.13 常用减摩复合材料 .....         | 1 |
| 1.14 应用特点 .....             | 1 |
| 参考文献 .....                  | 1 |
| 第 2 章 摩擦阻尼复合材料 .....        | 2 |
| 2.1 摩擦阻尼概述 .....            | 2 |
| 2.2 摩擦阻尼原理与阻尼特性表征 .....     | 2 |
| 2.3 摩擦阻尼原理 .....            | 2 |
| 2.4 摩擦阻尼特性表征 .....          | 2 |
| 2.5 几种阻尼复合材料 .....          | 2 |
| 2.6 树脂基阻尼复合材料 .....         | 2 |
| 2.7 金属基阻尼复合材料 .....         | 2 |
| 2.8 金属树脂复合材料 .....          | 2 |
| 2.9 其他阻尼复合材料 .....          | 2 |
| 2.10 摩擦阻尼复合材料的应用与发展趋势 ..... | 2 |
| 2.11 摩擦阻尼复合材料的应用 .....      | 2 |
| 2.12 摩擦阻尼复合材料的发展趋势 .....    | 2 |
| 参考文献 .....                  | 2 |
| 第 3 章 摩擦弹复合材料 .....         | 3 |
| 3.1 摩擦弹概述 .....             | 3 |
| 3.2 摩擦弹的含义与特点 .....         | 3 |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 摇摇摇摇摇摇防弹复合材料装甲结构类型与用途 .....  | 圆怨 |
| 摇摇摇摇摇摇防弹复合材料组分及其动态力学特性 ..... | 圆员 |
| 摇摇摇摇摇摇防弹纤维 .....             | 圆员 |
| 摇摇摇摇摇摇防弹陶瓷 .....             | 圆圆 |
| 摇摇摇摇摇摇材料的动态力学性能 .....        | 圆源 |
| 摇摇摇摇摇摇弹道性能表征与评价 .....        | 圆圆 |
| 摇摇摇摇摇摇防弹性能影响因素 .....         | 圆缘 |
| 摇摇摇摇摇摇纤维类型的影响 .....          | 圆缘 |
| 摇摇摇摇摇摇树脂基体及含胶量的影响 .....      | 圆远 |
| 摇摇摇摇摇摇织物结构的影响 .....          | 圆苑 |
| 摇摇摇摇摇摇面密度的影响 .....           | 猿园 |
| 摇摇摇摇摇摇弹速的影响 .....            | 猿园 |
| 摇摇摇摇摇摇弹道性能理论分析模型 .....       | 猿园 |
| 摇摇摇摇摇摇物理模型 .....             | 猿猿 |
| 摇摇摇摇摇摇面密度统计模型 .....          | 猿缘 |
| 摇摇摇摇摇摇能量分配模型 .....           | 猿远 |
| 摇摇摇摇摇摇复合装甲防弹原理及其结构设计 .....   | 猿苑 |
| 摇摇摇摇摇摇弹靶作用原理 .....           | 猿苑 |
| 摇摇摇摇摇摇复合装甲的设计 .....          | 猿园 |
| 摇摇摇摇摇摇防弹复合材料的应用与发展 .....     | 猿源 |
| 摇摇摇摇摇摇应用技术 .....             | 猿源 |
| 摇摇摇摇摇摇发展趋势 .....             | 猿苑 |
| 摇摇参考文献 .....                 | 猿愿 |
| 第 怨章摇摇抗辐射复合材料 .....          | 猿员 |
| 摇摇摇摇摇摇概述 .....               | 猿员 |
| 摇摇摇摇摇摇抗辐射复合材料的分类与特点 .....    | 猿员 |
| 摇摇摇摇摇摇抗辐射性能表征参数 .....        | 猿猿 |
| 摇摇摇摇摇摇防紫外线复合材料 .....         | 猿远 |
| 摇摇摇摇摇摇防紫外线纤维 .....           | 猿远 |
| 摇摇摇摇摇摇防紫外线织物 .....           | 猿怨 |
| 摇摇摇摇摇摇其他防紫外线复合材料 .....       | 猿员 |
| 摇摇摇摇摇摇防 载射线复合材料 .....        | 猿圆 |
| 摇摇摇摇摇摇防 载射线纤维 .....          | 猿猿 |

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 摇摇摇防热抗辐射复合材料 .....       | 猿源 |
| 摇摇摇稀土对防 载射线的作用 .....     | 猿缘 |
| 摇摇摇其他防 载射线复合材料 .....     | 猿缘 |
| 摇摇摇防中子辐射复合材料 .....       | 猿远 |
| 摇摇摇防中子辐射纤维 .....         | 猿远 |
| 摇摇摇聚合物基防中子辐射复合材料 .....   | 猿愿 |
| 摇摇摇防核辐射复合材料应用研究动态 .....  | 猿园 |
| 摇摇摇太空开发对防辐射复合材料的要求 ..... | 猿源 |
| 摇参考文献 .....              | 猿缘 |

# 第 员章摇绪摇摇论

## 摇摇概述

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。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。

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

（圆）研制周期短摇一种结构材料从研究到应用，一般需要员~ 缘年左右，甚至更长，而功能复合材料的研制周期要短得多。

（猿）附加值高摇单位质量的价格与利润远远高于结构复合材料。

（源）小批量，多品种摇功能复合材料很少有大批量，但品种需求多。

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

## 员圆摇功能复合材料种类

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 10-1 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<br>吸波复合材料<br>透波复合材料                                                                     | 柔韧磁体、磁记录<br>隐身材料<br>雷达罩、天线罩                                            |
| 导电复合材料  | 聚合物基导电复合材料<br>本征导电聚合物材料<br>压电复合材料<br>陶瓷基导电复合材料<br>水泥基导电复合材料<br>金属基导电复合材料<br>导电纳米复合材料<br>超导复合材料 | 屏蔽<br>防静电、开关<br>压电传感器<br>高压绝缘<br>建筑物绝缘<br>高强、耐热导电材料<br>锂电池<br>医用核磁成像技术 |
| 光功能复合材料 | 透光复合材料<br>光传导复合材料<br>发光复合材料<br>光致变色复合材料<br>感光复合材料<br>光电转换复合材料<br>光记录复合材料                       | 农用温室顶板<br>光纤传感器<br>荧光显示板<br>变色眼镜<br>光刻胶<br>光电导摄像管<br>光学存储器             |
| 热功能复合材料 | 烧蚀防热复合材料<br>热适应复合材料<br>阻燃复合材料                                                                  | 固体火箭发动机喷管<br>半导体支撑板<br>车、船、飞行器等内装饰材料                                   |
| 摩擦复合材料  | 摩阻复合材料<br>减摩复合材料                                                                               | 汽车刹车片<br>轴承                                                            |
| 阻尼复合材料  | 热损耗阻尼复合材料<br>磁损耗阻尼复合材料<br>电损耗阻尼复合材料                                                            | 洗衣机外壳、网球拍<br>桥梁减振<br>智能声控                                              |
| 防弹复合材料  | 软质防弹装甲<br>复合材料层合板防弹装甲<br>陶瓷基复合材料防弹装甲<br>防紫外线复合材料                                               | 防弹衣<br>防弹头盔<br>防弹复合装甲<br>遮阳伞                                           |
| 抗辐射复合材料 | 防载射线复合材料<br>防 $\gamma$ 射线复合材料<br>防中子复合材料<br>防核辐射复合材料                                           | 载射线摄影纱<br>$\gamma$ 射线防护服<br>中子辐射防护服<br>核废料容器                           |

基功能复合材料与碳基功能复合材料，但其使用温度与相应的结构复合材料不完全相同，同种基体的功能复合材料的使用温度要宽一些。在实际使用中往往习惯按功能特性分类，分为磁功能复合材料、电功能复合材料、光功能复合材料、热功能复合材料、摩擦功能复合材料、阻尼功能复合材料、防弹功能复合材料、辐射功能复合材料等。本书即以该种分类方法对主要的功能复合材料进行介绍，见表 1-1。

## 1.1 功能复合效应

由于复合材料是由两种或两种以上的组元材料构成的，组元材料之间的协同作用与交互作用使得复合材料往往会出现一种特殊的物理现象——复合效应。复合效应不是复合材料的一种特定性能，但是可通过复合材料的性能而反映。换言之，同种复合材料的不同性能表现出来的复合效应是不同的。复合效应表现为两大类特性，一类为线性效应，如加和效应、平均效应、相补效应及相抵效应。结构复合材料的复合效应主要是线性效应。另一类为非线性效应，主要包括乘积效应、系统效应、诱导效应及共振效应。功能复合材料既可表现出线性效应，也可表现出非线性效应。功能复合材料表现出的这种复合效应，又称为功能复合效应。掌握功能复合效应的特点与规律，对于合理使用功能复合材料与开发新型功能复合材料有十分重要的意义。

## 1.2 功能复合材料设计

复合材料的可设计性且设计自由度大是其主要特点之一。因此，如何设计才得到性能优异的功能复合材料是至关重要的。功能复合材料的设计思路与结构复合材料基本相同：即根据使用要求选用功能体、基体等原材料，并通过一定的复合工艺制成所要求的功能复合材料。

### 1.2.1 设计原则

从某种意义上说，功能复合材料的设计要比结构复合材料的设计复杂。这是因为结构复合材料设计主要考虑的是力学性能，而力

源

学性能的计算有相当成熟的理论与数学式。功能复合材料的设计则不同，由于功能特性广，材料的功能体现不如力学性质简单，没有统一的、成熟的设计理论，一般只有半经验性的计算公式，给设计带来很大难度，设计的精度也有影响。如透波与吸波复合材料的电磁参数设计与计算、烧蚀防热材料的梯度设计等难度很大。如果说结构复合材料的设计是以宏观为主、微观为辅，那么功能复合材料的设计则是宏观与微观并举，其协调性带来的复杂性是不言而喻的。尽管功能复合材料与结构复合材料设计的层面与难度不同，但其设计应遵循的原则还是基本相同。主要设计原则有：①首先考虑关键的、主要的性能；②兼顾其他性能；③选择性能分散性小的原材料（如功能体、基体等）；④采取的成型工艺尽可能简单、方便；⑤经济性合理。

### 功能复合材料设计方法

由于功能特性的不同，功能复合材料的设计方法各有所不同。本节仅介绍通过复合效应来设计预测新的功能复合材料的方法。主要利用乘积效应来预测新的功能。例如把两种性能可以互相转换的功能材料——热变形材料（以  $K_{\text{变}}$  表示）与另一种形变电导材料（ $K_{\text{电}}$ ）复合，其乘积效果是

$$\frac{K_{\text{变}}}{K_{\text{电}}} \rightarrow K_{\text{电}} \rightarrow K_{\text{变}} \quad (10.10)$$

即由于两组分的协同作用得到一种新的热电导功能复合材料。借助类似关系可以通过各种单质换能材料设计制造出各种各样的功能复合材料，见表 10.1 这种乘积效应产生于组分材料耦合的协同作用，而协同作用之间可用一个耦合函数  $\eta$  表示，即

$$K_{\text{电}} \rightarrow K_{\text{变}} \rightarrow K_{\text{电}} \quad (10.11)$$

式中  $\eta_{\text{电}}$ —— $K_{\text{电}}$  换能效率；

$\eta_{\text{变}}$ —— $K_{\text{变}}$  换能效率；

$\eta_{\text{电变}}$ —— $K_{\text{电变}}$  换能效率。

$\eta=1$  表示完全耦合，这是理想情况，实际上达不到。因为耦合还与界面的传递效率等因素密切相关。