



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

功能复合材料

尹洪峰 贺格平 孙可为 张强 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

TB3/273

2013



普通高等教育“十二五”规划教材

功能复合材料

尹洪峰 贺格平 孙可为 张 强 编著

- [20] 卢斌, 孙威. 功能复合材料的研究进展[J]. 复合材料科学与工程, 2006, 19 (1): 1-4.
- [21] 水永安. 功能复合材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [22] 赵寿根. 功能复合材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [23] 孙进喜. 功能复合材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [24] Zhang Q M, Wang H, Zhao J. 功能复合材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [25] 李莉. 1-3 压电效应[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [26] 魏平, 胡明敏. 疲劳寿命计的电阻变化特性研究[J]. 理化检验—物理分册, 2004, 40 (10): 511-513.
- [27] 胡明敏, 周克印. 疲劳寿命计电阻变化机理的研究[J]. 航空学报, 1999, 20 (01): 73-74.
- [28] 魏平. 疲劳寿命计电阻变化机理的研究[J]. 航空学报, 1999, 20 (01): 73-74.
- [29] 史永基, 曹慧敏. 智能材料和智能结构——智能材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [30] 严密, 彭晓强. 磁学基础与磁性材料[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.
- [31] Murray S J. 6% magnetic-field-induced strain by twin boundary motion[J]. Applied Physics Letters, 2000, 77 (6): 886-888.
- [32] Wang B W, Cheng L Z, He K Y. Structure, curie temperature and magnetic properties of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ thin films[J]. Journal of Applied Physics, 1996, 80 (12): 6963-6965.
- [33] Clark A E. Magnetostrictive materials[M]. New York: Academic Press, 1967.
- [34] 尹洪峰, 贺格平, 孙可为, 张强. 功能复合材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
- [35] 尹洪峰, 贺格平, 孙可为, 张强. 功能复合材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
- [36] 尹洪峰, 贺格平, 孙可为, 张强. 功能复合材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
- [37] 尹洪峰, 贺格平, 孙可为, 张强. 功能复合材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
- [38] 尹洪峰, 贺格平, 孙可为, 张强. 功能复合材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
- [39] Tremblay F S. 1996, 2779, 475.
- [40] 兰鑫, 吕海宝, 吴雪梅, 等. 形状记忆合金材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- [41] 戚健龙. 变体机翼大变形智能蒙皮[J]. 航空学报, 2004, 25 (1): 1-4.
- [42] 马治国, 阎邦椿, 顾云岭. 智能结构[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.
- [43] 张鸣明. 基于 BP 神经网络的非线性回归分析[J]. 航空学报, 2004, 25 (1): 1-4.
- [44] 罗建容. 多元统计分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.

北方工业大学图书馆



C00339177

RFID

北京

冶金工业出版社

2013

内 容 简 介

本书较为系统地介绍了功能复合材料的基本概念、基本原理以及不同类型的功能复合材料的材料体系、制备方法、性能和应用,是材料类专业的专业教材。全书共分7章,包括绪论、磁功能复合材料、导电复合材料、光功能复合材料、热功能复合材料、梯度功能复合材料和智能复合材料。

本书可作为高等院校材料科学与工程、高分子材料、金属材料、无机非金属材料、材料物理、材料化学以及功能材料的专业本科教材,也可作为相关专业的研究生、教师和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

功能复合材料/尹洪峰等编著. —北京:冶金工业出版社, 2013. 8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-6348-9

I. ①功… II. ①尹… III. ①功能材料—复合材料—高等学校—教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 195630 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 李 臻 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6348-9

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京印刷一厂印刷

2013 年 8 月第 1 版, 2013 年 8 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 18.75 印张; 453 千字; 289 页

36.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿信箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

复合材料被认为是除金属材料、无机非金属材料和高分子材料之外的第四大类材料，它是金属材料、无机非金属材料和高分子材料等单一材料发展和应用的必然结果。复合材料是指由两种或两种以上具有不同的物理或化学性质的材料，以微观、细观或宏观等不同的结构尺度与层次，经过一定的空间组合而形成的一个材料系统。复合材料根据性能可以分为：结构复合材料和功能复合材料。结构复合材料以承载为目的，强调其力学性能；而功能复合材料是指除力学性能以外还提供其他物理性能，并包括部分化学和生物性能的复合材料，如有导电、磁性、光学、压电、阻尼、吸声、摩擦、吸波、屏蔽、阻燃、防热等功能。功能复合材料由基体、功能体以及两者之间的界面相组成。复合材料因具有可设计的特点，为人类社会的发展开辟了无限的想象和实现空间。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需的功能复合材料。对于功能复合材料，不仅要考虑基体与功能体在复合材料中的体积分数，还要考虑基体与功能体的空间排布和连接方式、周期性以及相对尺度大小等。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。

本书较为系统地介绍了功能复合材料的基本概念、基本原理以及不同类型的功能复合材料的材料体系、制备方法、性能和应用。第1章介绍了功能复合材料的基本概念、分类、复合效应和设计原则等。第2章介绍了磁性复合材料、电磁波屏蔽复合材料、吸波复合材料、磁致伸缩复合材料以及磁光复合材料的基本原理、制备方法、性能影响因素以及应用。第3章介绍了高分子导电复合材料、无机非金属导电复合材料、无机物-聚合物插层复合材料以及超导复合材料的材料体系、制备方法、性能影响因素等。第4章介绍了透光复合材料、光传导复合材料、发光复合材料、光致变色和电致变色复合材料的基本原理、材料体系、性能以及应用。第5章介绍了烧蚀防热复合材料、热管理复合材料

以及阻燃复合材料的性能要求、材料组成、制备工艺、性能和应用。第6章简要介绍了梯度功能复合材料的产生、设计、制备技术、性能评价以及应用。第7章介绍了智能复合材料结构的基本概念、系统组成、设计、制备工艺、评价以及应用。

本书第1章、第4~6章由西安建筑科技大学尹洪峰编写,第2章由西安建筑科技大学孙可为编写,第3章由西安建筑科技大学张强编写,第7章由西安建筑科技大学贺格平编写,全书最后由尹洪峰统稿,编写过程中参考了一些他人的著作、文章,在此一并向其作者和出版者表示感谢。

由于编者水平有限,加之功能复合材料品种繁多、发展迅速,书中不妥之处恳请读者和专家批评指正。

编者

2013年5月于西安

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
复合材料	尹洪峰	32.00
多晶材料 X 射线衍射	黄继武	38.00
无机材料专业实验	宋晓岚	45.00
材料结构与力学性质	刘伟东	32.00
金属材料学	齐锦刚	36.00
环境材料	张震斌	30.00
金属学原理	余永宁	56.00
材料的结构	余永宁	49.00
无机非金属材料研究方法	张 颖	35.00
高炉生产知识问答 (第 3 版)	王筱留	46.00
物理化学 (第 4 版)	王淑兰	45.00
高炉开炉与停炉操作知识问答	刘全兴	60.00
材料现代测试技术	廖晓玲	45.00
有色金属系列丛书——中国铝业	中国有色金属工业协会	29.00
相变诱发塑性钢的组织性能	景财年	23.00
常用金属材料的耐腐蚀性能	蔡元兴	29.00
金属材料与成型工艺基础	李庆峰	30.00
工业分析化学	张锦柱	36.00
热镀锌使用数据手册	李九岭	108.00
带钢连续热镀锌 (第 3 版)	李九岭	86.00
带钢连续热镀锌生产问答	李九岭	48.00
分析化学简明教程	张锦柱	23.00
气相防锈材料及技术	黄红军	29.00
金属表面处理与防护技术	黄红军	36.00
有色金属特种功能粉体材料制备技术及应用	朱晓云	45.00
合金相与相变 (第 2 版)	肖纪美	37.00
冶金物理化学	张家芸	39.00
冶金与材料热力学	李文超	65.00
冶金工程实验技术	陈伟庆	39.00
钢铁冶金原理 (第 4 版)	黄希祐	82.00
现代物理测试技术	梁志德	29.00
金相实验技术 (第 2 版)	王 岚	32.00
金属学与热处理	陈惠芬	39.00
相图分析及应用	陈树江	20.00

目 录

1	绪论	1
1.1	功能复合材料及其特点	1
1.2	功能复合材料分类	1
1.3	功能复合效应	2
1.4	功能复合材料设计	4
1.5	功能复合材料的发展趋势	4
	参考文献	5
2	磁功能复合材料	6
2.1	磁性复合材料	6
2.1.1	磁性复合材料简介	6
2.1.2	聚合物基磁性复合材料	6
2.1.3	磁流体	12
2.1.4	纳米磁性复合材料	16
2.2	电磁波功能复合材料	20
2.2.1	电磁波屏蔽复合材料	20
2.2.2	吸波复合材料	26
2.3	其他磁功能复合材料	37
2.3.1	聚合物基磁致伸缩复合材料	37
2.3.2	磁光复合材料	39
	参考文献	43
3	导电复合材料	47
3.1	前言	47
3.2	高分子导电复合材料	48
3.2.1	结构型高分子导电复合材料	49
3.2.2	复合型高分子导电复合材料	59
3.2.3	高分子导电复合材料的应用	71
3.3	无机非金属导电复合材料	76
3.3.1	陶瓷基导电复合材料	76
3.3.2	水泥基导电复合材料	76
3.4	金属基导电复合材料	77

3.5 其他类型导电复合材料	78
3.5.1 无机物-聚合物插层导电纳米复合材料	78
3.5.2 超导复合材料	78
3.6 导电复合材料性能的影响因素	79
3.6.1 组分材料的影响	79
3.6.2 复合状态的影响	81
3.6.3 使用环境条件的影响	81
3.6.4 加工条件的影响	82
参考文献	83
4 光功能复合材料	85
4.1 概述	85
4.2 透光功能复合材料	85
4.2.1 透光材料概述	85
4.2.2 透光原理	87
4.2.3 复合材料透光性设计分析	88
4.2.4 透明玻璃钢的制备	89
4.2.5 透明玻璃钢的性能特点	93
4.2.6 纳米复合透光复合材料	95
4.2.7 透光复合材料的应用与发展	96
4.3 光传导复合材料	97
4.3.1 光导纤维	97
4.3.2 石英光纤	99
4.3.3 聚合物光纤	105
4.3.4 功能光纤	109
4.4 发光复合材料	110
4.4.1 发光材料及其分类	110
4.4.2 发光材料的基本性能指标	111
4.4.3 光致发光材料	112
4.4.4 电致发光材料	121
4.5 光致变色复合材料	139
4.5.1 光致变色原理	139
4.5.2 无极光致变色材料	139
4.5.3 光致变色有机材料	141
4.6 电致变色复合材料	143
4.6.1 无机电致变色材料	144
4.6.2 有机小分子电致变色材料	144
4.6.3 高分子电致变色材料	145
4.6.4 电致变色器件的结构和制备工艺	147
4.6.5 电致变色材料的研究成果及应用	148

参考文献	150
5 热功能复合材料	152
5.1 烧蚀耐热复合材料	152
5.1.1 烧蚀耐热复合材料的分类和性能要求	152
5.1.2 树脂基烧蚀耐热复合材料	154
5.1.3 碳/碳耐热复合材料	160
5.1.4 陶瓷基耐热复合材料	164
5.1.5 耐热复合材料的发展	167
5.2 热管理复合材料	169
5.2.1 热管理复合材料的性能要求	169
5.2.2 热管理复合材料的发展	170
5.2.3 热导率的计算模型	172
5.2.4 纤维增强复合材料可控线膨胀系数设计	173
5.2.5 树脂基热管理复合材料	173
5.2.6 金属基热管理复合材料	174
5.2.7 C/C 热管理复合材料	175
5.2.8 热管理复合材料的应用	176
5.3 阻燃复合材料	178
5.3.1 材料阻燃性能评价	179
5.3.2 阻燃剂与阻燃机理	180
5.3.3 树脂基复合材料的易燃性及阻燃	182
5.3.4 阻燃复合材料技术的发展	183
参考文献	185
6 梯度功能复合材料	188
6.1 梯度功能材料的产生与研究动态	188
6.1.1 梯度功能材料的产生	188
6.1.2 国内外研究动态和进展	189
6.2 FGM 设计	189
6.2.1 材料设计	190
6.2.2 组成分布函数的确定	191
6.2.3 FGM 材料物性值的理论预测	191
6.2.4 FGM 的热应力解析	192
6.3 FGM 制备技术	197
6.3.1 粉末冶金法	197
6.3.2 等离子喷涂法	198
6.3.3 激光熔覆法	199

6.3.4	气相沉积法	200
6.3.5	自蔓延高温燃烧合成法(SHS 法)	201
6.3.6	燃烧合成理论	201
6.3.7	燃烧合成技术	203
6.3.8	电泳沉积法	204
6.4	FGM 性能评价技术	205
6.4.1	梯度功能材料的力学性能与物理性能的测定与评价	205
6.4.2	梯度功能材料的隔热性能评价	206
6.4.3	梯度功能材料的热疲劳特性评价	207
6.4.4	梯度功能材料热冲击特性及热应力缓和性能评价	207
6.5	FGM 的应用	208
6.6	FGM 的发展趋势与展望	210
	参考文献	211
7	智能复合材料	213
7.1	智能复合材料结构概述	213
7.1.1	智能复合材料结构的定义	214
7.1.2	智能复合材料结构的特点	214
7.1.3	智能复合材料结构的研究现状	215
7.1.4	智能复合材料结构产生和发展的原因	217
7.1.5	智能复合材料结构的关键共性技术	218
7.2	智能复合材料结构及其工作原理	222
7.2.1	智能复合材料结构的基本组成	222
7.2.2	智能复合材料的主要种类和应用	223
7.2.3	智能复合材料结构的工作原理	226
7.3	典型智能元件	226
7.3.1	光纤传感器	226
7.3.2	压电元件	228
7.3.3	电阻应变材料	245
7.3.4	形状记忆材料	253
7.3.5	磁致伸缩材料	262
7.3.6	电/磁流变材料	262
7.4	智能复合材料结构的设计	267
7.4.1	智能复合材料结构的设计方法	267
7.4.2	智能复合材料结构的设计内容	267
7.5	智能复合材料结构的制备	269
7.5.1	智能复合材料的合成方法	269
7.5.2	基于 SMM 的智能复合材料的设计、生产和性质	270

7.5.3 智能复合材料结构的制备	276
7.6 智能复合材料结构的评价	278
7.7 智能复合材料结构的主要应用领域	279
7.7.1 健康监测与损伤自适应	279
7.7.2 结构的形状自适应	281
7.7.3 结构的减震降噪	282
7.7.4 智能表层结构	283
7.8 智能复合材料结构展望	285
7.8.1 智能复合材料结构研究的热点问题	285
7.8.2 智能复合材料结构未来发展方向	287
参考文献	288

1 绪 论

1.1 功能复合材料及其特点

复合材料是指由两种或两种以上具有不同物理或化学性质的材料，以微观、细观或宏观等不同的结构尺度与层次，经过一定的空间组合而形成的一个材料系统。

复合材料根据性能可以分为：结构复合材料和功能复合材料。结构复合材料以承载为目的，强调其力学性能；而功能复合材料是指除力学性能以外还提供其他物理性能，并包括部分化学和生物性能的复合材料，如有导电、超导、半导、磁性、压电、阻尼、吸声、摩擦、吸波、屏蔽、阻燃、防热等功能。

功能复合材料是由基体、功能体以及两者之间的界面相组成的。基体主要起黏结作用，赋予复合材料的整体性，并保持某种形状，某些情况下也具有功能特性。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性能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。界面相在基体和功能体之间起着信息传递作用。

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需求，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 功能复合材料分类

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。按基体可分为树脂基（或聚合物基）功能复合材料、金属基功能复合材料、陶瓷基功能复合材料与碳基功能复合材料。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、抗辐射功能复合材料等，详见表 1-1。

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
电功能复合材料	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	烧蚀防热复合材料 热管理复合材料 阻燃复合材料	固体火箭发动机喷管 半导体支撑板 车、船、飞机等内饰材料
摩擦功能复合材料	摩阻复合材料 减摩复合材料	汽车刹车片 轴承
阻尼功能复合材料	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 桥梁减震 智能声控
防弹功能复合材料	软质防弹装甲 层状复合防弹装甲	防弹衣、防弹头盔 航空复合装甲
抗辐射功能复合材料	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

除了根据功能复合材料的性能分为表 1-1 所列各类功能复合材料外,通常将多功能复合材料、功能梯度复合材料以及智能复合材料也包含在功能复合材料范畴内。

1.3 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组成的,复合材料可以借助于组元之间的协同效应呈现出原有组分所没有的优异性能。这些优异性能的出现是由于组元之间的协同效应——复合效应,复合效应是复合材料特有的效应,对于功能复合材料叫做功能复合

效应,包括表 1-2 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,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 1-2 复合材料的复合效应

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

(1) 乘积效应的作用。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,其效果是:

$$\frac{X}{Y} \cdot \frac{Y}{Z} = \frac{X}{Z} \quad (1-1)$$

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复合成各种各样的功能复合材料。表 1-3 列出了部分实例。这种耦合的协同作用之间存在一个耦合函数 F , 即:

$$f_A \cdot F \cdot f_B = f_C \quad (1-2)$$

式中, f_A 为 X/Y 换能效率; f_B 为 Y/Z 换能效率; f_C 为 X/Z 换能效率。 $F \rightarrow 1$ 表示完全耦合,这是理想情况,实际上达不到。因为耦合还与相界面的传递效率等因素密切相关,故还需要深入研究。

表 1-3 部分单质换能功能材料以乘积效应取得的结果

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

(2) 其他非线性效应。除了乘积效应外,还有系统效应、诱导效应和共振效应等,但机理尚不很清楚。人们从实际现象中已经发现这些效应,但还未应用到功能复合材料中。例如,彩色胶片以红、蓝、黄三色感光材料膜组成一个系统,能显示出各种色彩,单独存在即无此作用,这是系统效应的例子。又如,相间可以通过诱导作用使一相的结构影响另一相。复合材料中存在结晶的无机增强体诱导部分结晶聚合物在界面附近产生横晶的现象,但人们尚未利用这种效应主动设计复合材料。共振效应是熟知的物理现象,也应该能发生作用。目前虽未对这些效应进行研究,但可以预言在不久的将来会发挥它们的作用。

1.4 功能复合材料设计

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需的功能复合材料。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，材料的功能特性设计不如力学性质简单，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，对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、烧蚀耐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。对于功能复合材料不仅要考虑基体与功能体在复合材料中的体积分数，还要考虑基体与功能体的空间排布和连接方式、周期性以及相对尺度大小等。图 1-1 给出了陶瓷/树脂压电复合材料可能的组合连接方式。

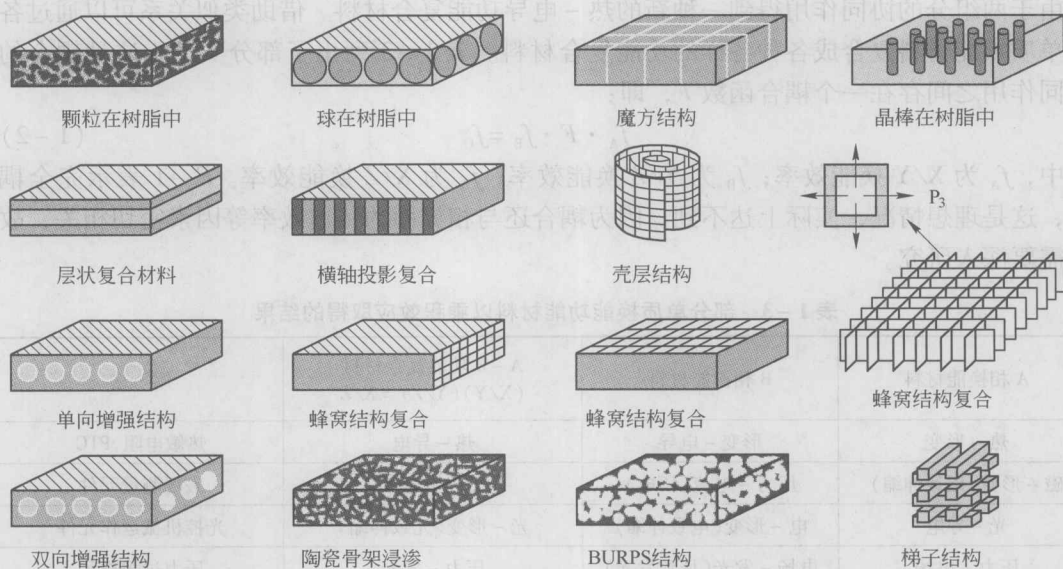


图 1-1 陶瓷/树脂压电复合材料单元之间可能的连接方式

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的。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。

1.5 功能复合材料的发展趋势

如前所述，功能复合材料具有设计自由度大的优势，又有极广泛的应用领域，发展前

景不可限量。另外,功能复合材料自身又从低级形式向高级形式发展,即按功能→多功能→机敏→智能的形式逐步升级。由功能发展到多功能是复合材料独有的特点,这是因为首先容易实现既是功能材料又是结构材料。例如,隐身飞机蒙皮就是集隐身和结构于一体的复合材料;又如绝热、隔音、阻燃三功能墙板,甚至可与有自控发热功能的面层复合兼有取暖功能。类似的思路非常广阔,可以自由开发。人类一直期望着材料能具有自身感知并做出反应的能力,近来已经把传感功能材料与执行功能材料通过某种基体复合在一起,并与外部信息处理系统连接,使之具有自诊断、自适应和自修复的能力,成为机敏复合材料。这种材料的研制已有实质性进展,具有实用的可能。由于机敏复合材料还达不到自决策的水平,在机敏的基础上需设法提高信息处理的水平,使之对实际情况做出最优化的决策,达到智能的水平。当然也要改善传感功能和执行功能的基础材料的灵敏度和稳定性,才有可能利用反馈作用不断调整参数使之达到优化结果。

参考文献

- [1] 吴人洁. 复合材料 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2000.
- [2] 张佐光. 功能复合材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [3] 益小苏, 杜善义, 张立同. 复合材料工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [4] Tressler J F, Alkoy S, Dogan A, et al. Functional composites for sensors, actuators and transducers [J]. Composites: Part A, 1999, (30): 477 ~ 482.
- [5] 马如璋, 蒋民华, 徐祖雄. 功能材料学概论 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.

2 磁功能复合材料

磁功能复合材料根据其应用特性的不同,通常可分为两大类:一类是以磁功能为主要应用目的材料,通常称为磁性复合材料;另一类是兼有磁性功能与其他功能特性的复合材料,如电磁波特性复合材料、磁性分离复合材料、磁致伸缩复合材料及磁光复合材料等。

2.1 磁性复合材料

2.1.1 磁性复合材料简介

磁性复合材料是带有磁性的功能体与高分子材料基体经混合、成型、固化而得到的一类复合材料。由于其质量轻、易加工,并且可以根据应用需求自行设计等,已经越来越引起人们的关注。

磁性复合材料有几种组合:(1)无机磁性材料(包括金属和陶瓷)与聚合物基体构成的复合材料;(2)无机磁性材料与低熔点金属基体构成的复合材料;(3)有机聚合物磁性材料与聚合物基体构成的复合材料;(4)无机磁性材料与载液构成的复合材料,其中以无机磁性材料与聚合物基体构成的聚合物基磁性复合材料的应用较多。聚合物基磁性复合材料很容易加工成形状复杂的磁性器件,不仅具有韧性,甚至呈橡胶弹性状态。尽管这种复合磁性材料的磁性能低于烧结和铸造的单质磁体,但是从生产和实际应用的角度来衡量,仍具有极大的优势。

磁性复合材料按基体类型主要可分为聚合物基磁性复合材料和金属基磁性复合材料;按基体相态可分为固态磁性复合材料和液态磁性复合材料——磁流变体;按磁性功能体的粒径大小又可分为普通磁性复合材料和纳米磁性复合材料。本节将主要介绍普通聚合物基磁性复合材料、磁流变体和纳米磁性功能复合材料。

2.1.2 聚合物基磁性复合材料

20世纪70年代,日本首先研制出以聚合物为基体的磁性复合材料。这种聚合物基磁性复合材料一般由磁性组分材料和聚合物基体复合而成,其主要优点有:(1)密度小;(2)材料力学性能优良,具有很好的冲击强度和抗拉强度;(3)加工性能好,既可制备尺寸准确、收缩率低、壁薄的制品,也可以生产1kg以上的大型形状复杂的制品,并不需二次加工,但若需要也可以方便地进行二次加工。

2.1.2.1 组分材料及其作用

聚合物基磁性复合材料主要由磁粉(无机磁性功能体)、黏结剂(聚合物基体)和加工助剂三大部分组成。其中磁粉的性能对聚合物基磁性复合材料的磁性能影响最大;黏结