

XINXING
GONGNENG FUHE CAILIAO
ZHIBEI XINJISHU

新型功能复合材料 制备新技术

童忠良 主编



化学工业出版社

XINXING
GONGNENG FUHE CAILIAO
ZHIBEI XINJISHU

新型功能复合材料 制备新技术

童忠良 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书共分八章，分别介绍了功能复合材料与新产品的制备方法、功能复合新材料的界面和优化设计、功能复合材料的表面处理技术、电学和电子功能复合材料、光学功能复合材料、热学功能复合材料、磁功能复合材料新产品与新工艺等内容，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与新产品科研、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

新型功能复合材料制备新技术/童忠良主编. —北京:
化学工业出版社, 2010.8
ISBN 978-7-122-09108-6

I. 新… II. 童… III. 功能材料: 复合材料-制备
IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 132622 号

责任编辑: 夏叶清
责任校对: 洪雅姝

文字编辑: 颜克俭
装帧设计: 周 遥

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
787mm×1092mm 1/16 印张 29 3/4 字数 799 千字 2010 年 10 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: 89.00 元

版权所有 违者必究

前 言

功能复合材料是一大类具有特殊电学、磁学、光学、声学、热学、力学、化学以及生物医学功能的新型材料与产品，是信息技术、生物技术、能源技术等高技术领域和国防建设的重要基础材料，同时也对改造某些传统产业，如农业、化工、建材等起着重要作用。功能材料与产品种类繁多，用途广泛，正在形成一个规模宏大的高技术产业群与高技术产品产业链，有着十分广阔的产品市场前景和极为重要的战略意义。

功能复合材料是新材料领域的核心，对高新技术的发展起着重要的推动和支撑作用，在全球新材料研究领域中，功能材料约占 85%。随着信息社会的到来，特种功能材料对高新技术的发展起着重要的推动和支撑作用，是 21 世纪信息、生物、能源、环保、空间等高技术领域的关键材料，成为世界各国新材料领域研究发展的重点，也是世界各国高技术发展中战略竞争的热点。

鉴于功能复合材料的重要地位，世界各国均十分重视对其的研究。1989 年美国 200 多位科学家撰写了《90 年代的材料科学与材料工程》报告，建议政府支持的 6 类材料中有 5 类属于功能材料。1995~2001 年每两年更新一次的《美国国家关键技术》报告中，特种功能材料和制品技术占了很大的比例。2001 年日本文部省科学技术政策研究所发布的第七次技术预测研究报告中列出了影响未来的 100 项重要课题，一半以上的课题为新材料或依赖于新材料发展的课题，而其中绝大部分均为功能材料。欧盟的第六框架计划和韩国的国家计划等在他们的最新科技发展计划中，都把功能材料技术列为关键技术之一而加以重点支持。我国化工新材料国家“十一五规划”发展的重点是通用塑料的改性技术、工程塑料的产业化技术、工程塑料的高性能化技术、高性能子午线轮胎工业化技术、大型合成橡胶工业化技术、橡胶复合材料及橡胶新型加工助剂产业化技术、功能高分子材料、氟硅新材料、新型无机功能材料等。各国都非常强调功能材料对发展本国国民经济、保卫国家安全、增进人民健康和提高生活质量等方面的突出作用。

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。本书共分八章，分别介绍了功能复合材料与新产品的制备方法、功能复合新材料的界面和优化设计、功能复合材料的表面处理技术、电学和电子功能复合材料、光学功能复合材料、热学功能复合材料、磁功能复合材料新产品与新工艺等内容，并对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。全书在编写过程中，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。本书汇集了功能复合材料制备技术及最新研究成果，内容广泛，实用性强，不仅可用作高校从事复合材料的教学参考书，而且对于高年级本科生进行毕业论文与设计、研究生进行论文研究、从事新材料研究人员、工程技术人员，无疑是一本有实用价值的参考书。

在本书编写过程中，编者参考了有关国内外专著、期刊和会议论文集，得到了师昌绪、石力开、闵恩泽、吴人洁、左铁镛、熊家炯、石南林、张佐光、张玉龙、张立德、李凤生、贡长生、吴培熙、王正品、翟海潮、高濂等以及许多材料界前辈和同仁的支持与帮助。在此谨向给

予支持、帮助的专家、学者和本书参考文献的作者表示衷心的感谢。王瑜、王月春、沈光欣、王辰、王书乐、韩文彬、俞俊、周国栋、高巍、谢义林、周雯、耿鑫、陈羽、朱美玲、方芳、高洋、高新等同志参加了本书的部分编写和编排工作。

在编撰此书时，时间仓促，再加之编者水平有限，难免会有不当之处，请读者指正并敬请有关人士提出以便于编者在再版时修正。

童忠良
2010年2月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
一、复合材料的发展	1
二、功能复合材料种类特征	3
三、功能复合效应	4
四、功能复合材料结构与性能的关系	5
第二节 复合材料的复合理论	7
一、复合材料增强机制	7
二、复合材料的复合法则——混合定律	9
第三节 功能复合材料制造方法	11
一、制造方法	11
二、新的制备工艺	11
三、新的制备技术	11
第四节 功能特性的评价	12
第五节 功能复合材料应用与创新	12
参考文献	14
第二章 功能复合材料的界面和优化设计	15
第一节 概述	15
一、表面与界面概述	15
二、表面与界面的理论研究	16
三、复合材料界面强度原位测试技术	16
第二节 功能复合材料的界面	17
一、聚合物基复合材料的界面	17
二、金属基复合材料的界面	26
三、陶瓷基复合材料的界面	28
第三节 复合材料界面的改善	30
一、功能复合材料的界面改善方法	30
二、材料设计的发展	31
三、树脂基复合材料的界面设计	32
四、树脂基复合材料的界面工程	33
第四节 复合材料表面、界面性质的表征	34
一、宏观表征方法	34
二、界面形态的表征	34
三、界面层结构的表征	35
四、界面残余应力的表征	35
五、树脂基复合材料的界面表征	35
第五节 复合材料力学和结构设计基础	38
一、复合材料力学	38

二、复合材料的单层设计	38
第六节 复合材料基体 (matrix) 材料	48
一、聚合物	48
二、金属	50
三、陶瓷	53
四、碳 (石墨)	54
第七节 功能复合材料基础理论设计	55
一、基础理论设计	55
二、设计原则	56
三、结构与表征技术	56
四、设计方法	58
第八节 功能复合材料的低成本技术与设计	59
一、概述	59
二、功能复合材料低成本分析	60
三、功能复合材料低成本的技术	66
四、降低成本的策略	68
五、功能复合材料的性能设计及制造一体化	79
六、功能复合材料的设计与计算	83
七、CATIA V5 复合材料设计举例	89
八、功能陶瓷复合材料制备工艺设计举例	92
第九节 功能复合材料的 CAE 虚拟技术设计	94
一、概述	94
二、功能复合材料关键技术设计	94
三、功能复合材料数据技术与体系	95
四、功能复合材料 CAE 技术设计应用案例	98
参考文献	99

第三章 功能复合材料的制备方法 101

第一节 概述	101
一、功能复合材料制备基础	101
二、碳纤维复合材料	102
三、聚丙烯腈基碳纤维	105
四、PP/CaCO ₃ 复合材料制备技术	106
第二节 功能复合材料的制备工艺与方法	107
一、聚合物基复合材料成型加工技术	107
二、金属基复合材料成型加工技术	112
三、陶瓷基复合材料加工技术	112
四、水泥基复合材料加工技术	113
五、碳-碳复合材料的成型加工技术	114
第三节 碳纤维增强碳复合材料制备工艺	114
一、概述	114
二、碳-碳复合材料分类、工艺	114
三、碳-碳复合材料力学性能	115
第四节 聚丙烯腈 (PAN) 基活性碳纤维生产工艺	118
一、概述	118

二、开发生生产工艺现状	118
三、工艺制备方法	118
四、碳纤维的结构和性能	120
五、聚丙烯腈基碳纤维应用	123
第五节 低成本制造增强复合材料的 LCM 工艺技术及 SCRIMP 工艺	123
一、LCM 工艺技术	123
二、SCRIMP TM 成型工艺	124
第六节 纤维增强热塑性片材 (GMT) 的工艺技术与应用	126
一、概述	126
二、GMT 片材的性能和特点	126
三、GMT 的生产工艺技术	127
第七节 透明导电薄膜的制备方法现状及应用	128
一、概述	128
二、透明导电膜的性能	129
三、透明导电膜的种类	130
四、TCO 薄膜制备工艺	130
五、透明导电薄膜及应用	131
第八节 炭黑-环氧树脂导电复合材料制备方法	132
一、概述	132
二、制备方法	132
三、制备分析	132
第九节 颗粒增强金属基原位复合材料的制备技术	135
一、概述	135
二、原位合成方法	136
三、非平衡态工艺在原位合成中的应用	138
四、原位合成工艺	139
五、颗粒增强金属基复合材料	140
第十节 SiC/G 与 Cf/SiC 复合材料喷嘴成型工艺	141
一、概述	141
二、SiC 和 Cf/SiC 复合材料基体的选择	141
三、SiC 和 Cf/SiC 成型工艺	145
四、制备结果与测试	147
第十一节 多功能性聚苯胺/聚合物纳米复合材料的制备及应用	150
一、概述	150
二、聚苯胺/聚合物纳米复合材料制备方法	150
三、聚苯胺/聚合物纳米复合材料的应用	152
第十二节 聚合物/石墨导电纳米复合材料制备方法	154
一、概述	154
二、碱金属插层聚合法	155
三、膨胀石墨原位聚合法	156
四、膨胀石墨共混复合法	157
参考文献	159

第四章 功能复合材料的表面处理技术

第一节 复合材料的表面处理技术概述	161
-------------------------	-----

一、复合材料表面处理技术	161
二、复合材料表面技术	163
第二节 表面处理的意义及一般原则	163
一、极性相似原则	164
二、界面酸碱匹配原则	165
三、为界面形成化学键力提供可能与条件原则	165
四、引入可塑界面层原则	165
第三节 表面处理方法、原理及评价	165
一、碳纤维表面处理改性	166
二、有机纤维表面处理改性	174
三、玻璃纤维表面改性	175
四、粉粒增强材料(填料)的表面改性	185
第四节 表面改性 with 界面粘接强度	186
一、粘接界面的作用力与粘接强度	186
二、影响界面粘接强度的因素	187
三、表面改性效果的表征	188
第五节 纳米聚合物表面包覆处理改性	194
一、基本概念	194
二、溶胶-凝胶法反应进行表面包覆	194
三、异质絮凝法表面包覆	195
第六节 纳米聚合物包裹法 (polymer coatings) 表面包覆	198
一、表面包覆改性方法	199
二、聚合物表面包覆设计 and 应用	199
第七节 机械-化学反应表面改性	200
一、概述	200
二、表面改性基本原理	201
三、表面改性方法的应用	201
四、铝合金表面改性技术	203
第八节 纳米复合胶囊化改性	205
参考文献	205
第五章 电学和电子功能复合材料	207
第一节 概述	207
第二节 电接触复合材料	207
一、概述	207
二、滑动电接触复合材料	208
三、开关电接触复合材料	208
四、国内外电接触复合材料及产品	208
五、环保型电接触材料及其复合应用	212
第三节 聚合物基导电复合材料	214
一、概述	214
二、复合型聚合物基导电复合材料	215
三、本征聚合物基导电复合材料	232
四、聚合物基导电复合材料形态、结构与性能	239
五、聚合物基导电复合材料的制备方法	241

六、影响导电性能的主要因素	243
七、导电高分子复合材料的特殊效应	246
八、聚合物基导电复合材料的应用	248
第四节 无机非金属基导电复合材料	253
一、陶瓷基导电复合材料及其应用	253
二、水泥基导电复合材料	264
第五节 金属基导电复合材料	267
一、金属基导电复合材料	268
二、镁合金原料及其制备技术与应用	272
三、层状金属复合功能材料	273
第六节 压电复合材料	274
一、聚合物压电功能复合材料	274
二、水泥基压电复合材料	279
三、压电复合材料力学量传感器的传感机理及其应用	280
四、压电复合材料及其应用	282
第七节 超导复合材料	284
一、概述	284
二、金属和铜复合超导体	284
三、导电复合材料重要的特点	284
四、其他类型导电复合材料	285
五、超导复合材料应用	286
第八节 新型导电材料及其应用	286
一、绝缘体导电	286
二、用塑料元件代替集成电路	286
三、金属性导电塑料	287
四、导电性能良好的新型塑料	287
五、塑料能导电太阳能	288
六、纳米级金属粒子的导电性纤维	288
七、导电性高分子和试制的导电托盘	289
八、KANEKA 开发出新的绝缘导热性树脂	291
九、防辐射导电材料 KC-888	292
十、共轭导电聚合物的特性及应用	292
参考文献	296

第六章 光学功能复合材料

第一节 概述	297
第二节 红外隐身复合材料	297
一、红外隐身技术	297
二、多功能隐身材料用途	298
三、新型隐身材料	298
四、几种复合隐身材料	300
第三节 导光和透光复合材料	301
一、概述	301
二、透光原理	302
三、复合材料透光性设计分析	304

四、透明玻璃钢性能特点	305
五、透光复合材料的应用	306
第四节 塑料光纤传光原理	307
一、概述	307
二、子午线在阶跃型 POF 中的传输	307
三、子午线在阶跃型光纤中的几何行程和反射次数	308
四、斜光线在阶跃型折射率 POF 中的传输	308
五、光在渐变型折射率分布 POF 中的传输	308
六、侧面发光 POF 的传光原理	309
七、荧光 POF 的传光原理	309
第五节 光传导复合材料	310
一、光导纤维	310
二、石英光纤	314
三、聚合物光纤	315
四、功能光纤	317
第六节 发光复合材料	319
一、无机发光复合材料	320
二、有机发光复合材料	320
三、有机-无机复合发光材料	321
四、稀土发光复合材料及应用	323
第七节 光致变色复合材料	324
一、光致变色机理	324
二、光色玻璃	326
三、光致变色材料的应用	327
第八节 感光复合材料	327
一、感光性树脂	328
二、光致抗蚀剂的作用及分类	328
三、光致抗蚀剂的性能	329
四、光增感	331
五、光交联型光致抗蚀剂（不溶）	331
六、光分解型光致抗蚀剂	333
七、光刻技术应用与发展	334
第九节 其他光功能复合材料	335
一、选择滤光功能复合材料	335
二、光电转换功能复合材料	335
三、光记录复合材料	335
四、非线性光学复合材料	336
五、光降解高分子复合材料	337
参考文献	342
第七章 热学功能复合材料	344
第一节 概述	344
第二节 绝热复合材料	344
一、概述	344
二、复合绝热材料制备工艺	347

三、交联聚乙烯绝热复合材料	349
四、常用的制品复合绝热材料	350
第三节 热强性和耐磨性复合材料	351
第四节 热适应复合材料	353
一、概述	353
二、复合材料的导热特性	353
三、可控热膨胀系数复合材料	357
四、特殊热膨胀性能复合材料	365
第五节 烧蚀防热复合材料	365
一、概述	365
二、树脂基防热复合材料	369
三、碳/碳防热复合材料	373
四、陶瓷基防热复合材料	376
五、碳/碳复合材料 (C/C) 制备技术与应用	377
第六节 阻燃复合材料	389
一、概述	389
二、材料阻燃性能评价	389
三、阻燃方法与阻燃机理	390
四、阻燃复合材料技术的发展	394
五、耐高温阻燃耐烧蚀增强纤维/布预浸料、梯度功能胶及其预浸料	395
六、高温、阻燃复合材料基体树脂	396
七、阻燃剂与阻燃橡胶	397
八、有机高分子难燃化及难燃性高分子复合材料	400
参考文献	410
第八章 磁功能复合材料	411
第一节 概述	411
第二节 磁性复合材料分类方法与性能	412
一、磁性复合材料组分的属性分类	412
二、磁性复合材料成分组合分类	414
三、无机磁与聚合物基组成的复合材料性能	415
四、铁氧体-微晶玻璃纳米复合材料的结构与性能	416
第三节 聚合物基磁性复合材料	419
一、聚合物基磁性复合材料与其组成、作用	419
二、导电聚合物与磁性粒子复合吸波材料	421
三、磁性复合材料制备技术	424
第四节 电磁波屏蔽复合材料	426
一、概述	426
二、电磁屏蔽导电复合涂料	426
三、金属纤维填充材料的导电、电磁屏蔽性能	429
第五节 吸波材料复合材料	432
一、概述	432
二、吸波材料的合成	436
三、吸波材料制备方法	437
四、吸波材料的发展及应用	438

第六节 纳米磁性复合材料 442

一、概述 442

二、纳米巨磁阻抗复合材料 443

三、纳米磁致冷工质复合材料 444

四、新型的磁性液体和磁记录复合材料 445

五、纳米微晶软磁复合材料 447

六、纳米复合永磁材料 447

七、纳米微晶稀土永磁复合材料 448

八、纳米磁性复合材料的应用 449

第七节 磁性复合材料的应用 449

一、概述 449

二、磁性功能复合材料的应用 450

三、磁性流体中纳米 Fe_3O_4 复合材料制备工艺 451

第八节 吸波型电磁屏蔽材料 453

一、电磁屏蔽基本原理及屏蔽材料 454

二、吸波型屏蔽材料 454

第九节 纳米磁性液体工业化生产应用 457

一、概述 457

二、纳米磁性液体开发 458

三、纳米磁性液体生产与终端技术产品的开发 459

四、纳米磁性液体工业化研究 461

参考文献 463

第一章 绪 论

第一节 概 述

功能材料是指那些具有优良的电学、磁学、光学、热学、声学、力学、化学、生物医学功能，特殊的物理、化学、生物学效应，能完成功能相互转化，主要用来制造各种功能元器件而被广泛应用于各类高科技领域的高新技术材料。

功能材料是新材料领域的核心，是国民经济、社会发展及国防建设的基础和先导。它涉及信息技术、生物工程技术、能源技术、纳米技术、环保技术、空间技术、计算机技术、海洋工程技术等现代高新技术及其产业。功能材料不仅对高新技术的发展起着重要的推动和支撑作用，还对我国相关传统产业的改造和升级以实现跨越式发展起着重要的促进作用。

功能材料种类繁多，用途广泛，正在形成一个规模宏大的高技术产业群，有着十分广阔的市场前景和极为重要的战略意义。世界各国均十分重视功能材料的研发与应用，它已成为世界各国新材料研究发展的热点和重点，也是世界各国高技术发展中战略竞争的热点。在全球新材料研究领域中，功能材料约占 85%。我国高技术（863）计划、国家重大基础研究（973）计划、国家自然科学基金项目中均安排了许多功能材料技术项目（约占新材料领域 70% 的比例），并取得了大量研究成果。

复合材料可分为两大类，一类是结构复合材料，一类是功能复合材料。而作为结构复合材料，特别是纤维增强复合材料从军用产品向民用产品的过渡，加速了新型复合材料的开发和应用；另外，导弹、航天飞机以及其他军用产品的小型化和轻便化，也加剧了单一的结构复合材料向多功能复合材料方向的转变。所以，结构复合材料和功能复合材料之间的界线也变得越来越模糊不清了。功能复合材料在抗激光、抗核爆、隐身及其他光、电、磁等性能方面具有突出的特点，并在高新技术的发展中占有重要地位。本章着重论述功能复合材料种类和特性、复合效应、复合理论、研究前景、制造方法、功能评价、应用创新、发展趋势。

一、复合材料的发展

材料被人类利用已有几千年的历史。材料的发展与人类文明社会的进步息息相关。人类研究和制造材料的历史实际上就是人类文明的发展史。人类最早使用的材料是天然材料，如木棍、竹片、石器等。最早可追溯到石器时代，那时人们就开始制造一些石器，如石刀、石制武器等与大自然搏斗。中国在春秋战国时期就开始制备砖瓦，到汉代时已开始使用陶器，如陶碗、盆、罐等。据考证古罗马人用陶器作下水管道。可见人类制备材料的历史很悠久。

随着社会的进步、文明的发展，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，并有了陶瓷材料、金属材料的出现。到了近代，材料领域中已包括了三大体系，即金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料。各种

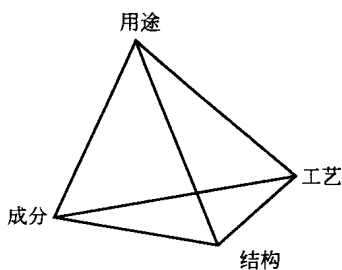


图 1-1 四面体模型

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。

20 世纪 40 年代，玻璃纤维和合成树脂大量商业化生产之后，纤维增强树脂复合材料逐渐发展成为工程材料，到 50 年代其技术更加成熟，在很多领域得到应用，并开始取代金属材料和高聚物等材料。

20 世纪 50 年代末期以来，随着科学技术的发展，特别是尖端科学技术的突飞猛进，对材料的性能要求越来越高，在许多方面，传统的单相材料的性能已不能满足实际的需求。这就

促进人们研究制备出由多相组成的复合材料，以提高材料的性能。

20 世纪 60 年代，美国学者首先提出材料科学与工程（materials science and engineering）这个学科全称，定义材料科学与工程是关于材料成分、结构、工艺与它们的性能和用途之间的有关知识的开发和应用的科学，并提出了四面体模型，如图 1-1 所示。

材料一般分成结构材料（structural materials）和功能材料（functional materials）两大类。结构材料是指能承受外加载荷而保持其形状和结构稳定的材料，它具有优良的力学性能，在物件中起着“力能”的作用。功能材料是指具有一种或几种特定功能的材料，它具有优良的物理、化学和生物功能，在物件中起着“功能”的作用。

功能材料的概念是由美国贝尔研究所 J. A. Morton 博士在 1965 年首先提出来的，但人类对功能材料的研究和应用远早于 1965 年，只是它的品种和产量很少，且在相当一段时间内发展缓慢。20 世纪 60 年代以来，各种现代技术如微电子、激光、红外、光电、空间、能源、计算机、机器人、信息、生物和医学等技术的兴起，强烈刺激了功能材料的发展。同时，由于固体物理、固体化学、量子理论、结构化学、生物物理和生物化学等学科的飞速发展以及各种制备功能材料的新技术和现代分析测试技术在功能材料研究和生产中的实际应用，许多新的功能材料不仅已在实验室中被研制出来，而且已被批量生产和投入使用。现代科学技术的迅猛发展，使得适应高技术的各种新型功能材料如雨后春笋不断涌现，它们赋予高技术以新的内涵，促进了高技术的发展和应用的实现。

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。由于复合材料各组分之间可取长补短、协同作用，弥补了单相材料的缺点，改进了单相材料的性能，甚至可产生单一材料所不具有的新性能。复合材料的诞生和发展，是现代科学技术不断进步的结果，也是材料设计方面的一个突破。它综合了各种材料如纤维（晶须）、树脂、橡胶、金属、陶瓷等的优点，按需要设计、复合成为综合性能优异的新材料。

纵观复合材料的发展过程，可以看到，早期出现的复合材料，由于其性能相对较低、使用面广，因而被称为常规复合材料。后来随着高技术的发展，出现了性能高的先进复合材料。

20 世纪 70 年代初期使用树脂基高性能复合材料已用于飞机的承力结构，后又逐步进入其他工业领域。增强体纤维有碳纤维、芳纶等是 70 年代末期发展出了用高强度、高模量的耐热碳纤维和陶瓷纤维与金属复合，特别是与轻金属复合，形成了金属基复合材料，克服了树脂基复合材料耐热性差、导热性低等缺点。该材料具有耐疲劳、耐磨损、高阻尼、不吸潮、热膨胀系数低等优点，已经被广泛应用于航空航天等高科技领域。

20 世纪 80 年代开始，逐渐研制出陶瓷复合材料。该材料是用陶瓷纤维补强陶瓷基体以提高韧性，克服了陶瓷材料脆性高的缺点。主要应用目标是用于制造燃气涡轮叶片和其他耐热部件。复合材料因其具有可设计的特点受到各国的重视，因而发展很快，已使其与金属、陶瓷、

聚合物等材料并列为重要材料。

进入 21 世纪,随着航空航天技术的发展,对结构材料的比强度、比模量、耐热性和加工性能要求都越来越高。针对不同的需求,开发出了高性能树脂基先进复合材料,以后又出现了金属基和陶瓷基先进复合材料与纳米相材料。

近半个世纪以来,科学技术与工程领域的飞速发展,对各种材料的性能提出了更为广泛和更为严格的要求,以致人们一方面必须致力于不断开发新品种材料,另一方面又要着力于对已有材料品种的改性。

从人类发展的历史来看,材料是社会进步的物质基础。纵观人类使用材料的历史,可以清楚地看出,每一种重要材料的诞生和利用,都会把人类的生产力提高到一个新的水准,从而大大改善人类的生活水平。当前以电子信息、生命科学、新材料和新能源四大学科为基础的新的科技革命正带动人类的文明向前蓬勃发展。新材料的发展对整个科学技术的发展起到尤为重要的作用,如新近材料的飞跃发展对电子信息、能源、航空航天、交通等行业的发展起到推动性的作用。

现代材料的研究是在物理化学等科学和技术的基础上进行的。如化学元素的测定技术、矿物晶体结构的测定技术、物质的显微结构的测定技术等对材料科学的发展起到重要的作用。材料科技工作者的工作主要在:①发现新的物质,测试新物质的结构和性能;②由已知的物质,通过新的制备工艺,改善其显微结构,改善材料的性能;③由已知的物质进行复合,制备出具有优良性能的复合材料。

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,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。

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;基体既起到黏结和赋形的作用,也会对复合材料整体的物理性能有影响。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重将超过结构复合材料,成为复合材料发展的主流。

二、功能复合材料种类特征

功能材料是指具有优良的物理、化学和生物或其相互转化的功能,用于非承载目的的材料。功能材料的种类繁多,为了研究、生产和应用的方便,常对其进行分类。由于着眼点不

同，分类的方法也不同，目前主要有以下 6 种分类方法。

- ① 按用途分类 分为电子、航空、航天、兵工、建筑、医药、包装等材料。
- ② 按化学成分分类 分为金属、无机非金属、有机、高分子和复合功能材料。
- ③ 按聚集态分类 分为气态、液态、固态、液晶态和混合态功能材料。其中，固态又分为晶态、准晶态和非晶态。
- ④ 按功能分类 分为物理（如光、电、磁、声、热等）、化学（如感光、催化、含能、降解等）、生物（如生物医药、生物模拟、仿生等）和核功能材料。
- ⑤ 按材料形态分类 分为体积、膜、纤维和颗粒等功能材料。
- ⑥ 按维度分类 分为三维、二维、一维和零维功能材料。三维材料即固态体相材料。二维、一维和零维材料分别为其厚度、直径和粒度小到纳米量级的薄膜、纤维和微粒，统称为低维材料，其主要特征是具有量子化效应。

功能材料与结构材料相比，具有以下主要特征。

- ① 功能材料的功能对应于材料的微观结构和微观物体的运动，这是最本质的特征。
- ② 功能材料的聚集态和形态非常多样化，除了晶态外，还有气态、液态、液晶态、非晶态、准晶态、混合态和等离子态等。除了三维体相材料外，还有二维、一维和零维材料。除了平衡态外，还有非平衡态。
- ③ 结构材料常以材料形式为最终产品，而功能材料有相当一部分是以元件形式为最终产品，即材料元件一体化。
- ④ 功能材料是利用现代科学技术，多学科交叉的知识密集型产物。
- ⑤ 功能材料的制备技术不同于结构材料用的传统技术，而是采用许多先进的新工艺和新技术，如急冷、超净、超微、超纯、薄膜化、集成化、微型化、密集化、智能化以及精细控制和检测技术。

三、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。

1. 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，见表 1-1 所列。

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

线性效应包括加和效应、平均效应、相补效应和相抵效应。例如常用于估算功能体与基体在不同体积分数情况下性能的混合率，即：

$$P_c = V_R P_R + V_m P_m$$

式中， P_c 为某一功能性质； P_R ， P_m 分别为功能体和基体的这种性质； V_R ， V_m 则分别是两者的体积分数。复合材料的某些功能性质，例如电导率、热导率、密度和弹性模量等服从