

物理功能复合材料 及其性能

赵浩峰 刘燕萍 张艳梅 编著
卫爱丽 郭胜利 王 玲



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

物理功能复合材料及其性能

赵浩峰 刘燕萍 张艳梅 编著
卫爱丽 郭胜利 王 玲

北 京

冶金工业出版社

2010

内 容 提 要

本书结合近年来关于功能复合材料研究和实践,总结了功能复合材料及制备测试中的理论和实践问题,着重选取了功能复合材料的主要内容以及相关的理论基础和实践示例进行介绍和讨论。

全书共有5章:第1章物理功能复合材料基础,介绍了功能复合材料的概念、功能复合材料的结构基础、物理功能复合材料的复合效应和功能设计等。第2章电学复合材料,介绍了导电类复合材料和半导体复合材料。第3章磁学复合材料,介绍了软磁功能复合材料、永磁复合材料及电磁和磁电效应复合材料。第4章光学和声学复合材料,介绍了物质的光学功能概述、非线性光学和激光复合材料、发光复合材料、光波导复合材料、光存储复合材料、光电复合材料、光催化复合材料、透光和不透光材料、磁光效应及相应复合材料、液晶材料、着色复合材料和声学功能复合材料。第5章热学功能复合材料,介绍了导热、隔热和保温复合材料、相变储热复合材料、膨胀功能复合材料、热电和电热复合材料以及磁热效应的概念。

本书可以作为材料专业本科生或硕士研究生的参考学习用书。

图书在版编目(CIP)数据

物理功能复合材料及其性能/赵浩峰等编著. —北京:
冶金工业出版社, 2010. 10

ISBN 978-7-5024-5113-4

I. ①物… II. ①赵… III. ①物理性质—功能材料:
复合材料—高等学校—教学参考资料 IV. ①TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第019974号

出 版 人 曹胜利

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 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨盈园 美术编辑 张媛媛 版式设计 葛新霞

责任校对 侯 璐 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5113-4

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2010年10月第1版, 2010年10月第1次印刷

169mm×239mm; 28印张; 544千字; 436页

68.00元

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

功能材料是指具有优良的电学、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。在全球新材料研究领域中，功能材料约占85%。功能复合材料是指除力学性能以外而提供其他物理性能的复合材料。如导电、超导、半导、磁性、压电、阻尼、吸波、透波、摩擦、屏蔽、阻燃、防热、吸声、隔热等凸显某一功能，统称为功能复合材料。功能复合材料主要由功能体和增强体及基体组成。功能体可由一种或一种以上功能材料组成。多元功能体的复合材料可以具有多种功能。同时，还有可能由于复合效应而产生新的功能。多功能复合材料是功能复合材料的发展方向。

功能复合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、实现跨越式发展起着重要的促进作用。

功能复合材料种类繁多，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。我国从中央到地方的许多项目中均安排了多功能复合材料技术项目，并取得了大量研究成果。

本书作者以物理学、固体物理学、材料物理学、材料学、复合材料学为理论基础，根据近年来国内外关于功能复合材料研究和实践资

料,总结了功能复合材料及制备测试中的一些理论和实践问题。由于功能复合材料所涉及的内容很多,难以在本书中讲述全部内容,因此本书仅选取了功能复合材料的主要内容以及相关的理论基础和实践示例进行介绍。全书共分为5章。第1章物理功能复合材料基础,介绍了功能复合材料的概念、功能复合材料的结构基础、物理功能复合材料的复合效应和功能设计等。第2章电学复合材料,介绍了导电类复合材料和半导体复合材料。第3章磁学复合材料,介绍了软磁功能复合材料、永磁复合材料和电磁和磁电效应复合材料。第4章光学和声学复合材料,介绍了物质的光学功能概述、非线性光学和激光复合材料、发光复合材料、光波导复合材料、光存储复合材料、光电复合材料、光催化复合材料、透光和不透光材料、磁光效应及相应复合材料、液晶材料、着色复合材料和声学功能复合材料。第5章热学功能复合材料,涉及导热、隔热和保温复合材料、相变储热复合材料、膨胀功能复合材料、热电和电热复合材料和磁热效应的概念。

本书可作为材料专业本科生或硕士研究生的参考教学用书。

本书由南京信息工程大学主编,由南京信息工程大学、广东工业大学和太原理工大学的老师共同撰写完成。其中第2章的2.1.3节至2.1.6节及2.2节由赵浩峰教授撰写,第5章以及第4章的4.7节和4.8节由张艳梅副教授撰写,第1章以及第4章的4.1节至4.6节由刘燕萍教授撰写,第3章以及第2章的2.1.1节和2.1.2节由卫爱丽副教授撰写。前言和参考文献由郭胜利教授及王玲教授撰写、整理。全书由南京信息工程大学的王玲教授、郭胜利教授统稿。

在本书撰写中采集了许多作者的工作。本书的出版得到江苏省教育厅和南京信息工程大学的支持。本书由南京师范大学刘荣博士及南京信息工程大学吴红艳博士做了最终详细的审阅,并提出了许多宝贵的建议。在此一并表示感谢。

作 者

2008年12月

目 录

1 物理功能复合材料基础	1
1.1 功能复合材料的概念	1
1.1.1 复合材料的定义	1
1.1.2 复合材料的界面	3
1.2 复合材料的类型	6
1.2.1 金属做基体的材料	7
1.2.2 无机物质作基体的材料	9
1.2.3 有机高分子做基体材料	12
1.3 功能复合材料的组织结构基础	19
1.3.1 原子结构	19
1.3.2 晶体结构	19
1.4 功能复合材料的性能基础	22
1.4.1 材料性能的概念	22
1.4.2 电学性能	24
1.4.3 磁学性能	43
1.4.4 光学性能	49
1.4.5 声学性能	65
1.4.6 热学性能	68
1.5 复合材料的功能设计	76
1.5.1 复合效应的概念	76
1.5.2 复合方式	77
1.5.3 功能设计	81
2 电学复合材料	83
2.1 导电类复合材料	83
2.1.1 固体电子和电子流动的基本理论	83
2.1.2 金属基导电复合材料	94
2.1.3 高分子基导电复合材料	111

2.1.4 陶瓷基导电复合材料	139
2.1.5 电阻复合材料	151
2.1.6 超导复合材料	155
2.2 半导体复合材料	156
2.2.1 复合材料的半导体基础	156
2.2.2 半导体微粒聚合物纳米复合材料	165
2.2.3 纳米复合半导体	166
2.2.4 金属和半导体接触时形成复合材料	169
2.2.5 有机/无机复合半导体材料的研究发展	170
2.2.6 高频光电导衰减法测量 Si 中少数载流子寿命	171
3 磁学复合材料	173
3.1 软磁功能复合材料	173
3.1.1 软磁复合材料的磁学基础	174
3.1.2 铁氧体/无机材料构成的复合材料	201
3.1.3 金属/无机非金属软磁复合材料	208
3.1.4 金属/塑料复合软磁材料	211
3.1.5 合金/金属复合材料	213
3.1.6 其他复合材料	217
3.2 永磁复合材料	224
3.2.1 永磁复合材料基础	224
3.2.2 纳米相永磁复合材料	239
3.2.3 黏结钕铁硼永磁复合材料	247
3.3 电磁和磁电效应复合材料	251
3.3.1 磁电效应复合材料	251
3.3.2 电磁屏蔽复合材料	257
4 光学和声学复合材料	271
4.1 光波与材料的作用	271
4.1.1 光波和波谱学	271
4.1.2 光波与材料的作用的微观分析	273
4.2 非线性光学和激光复合材料	274
4.2.1 光非线性复合材料	274
4.2.2 可调谐染料激光器复合材料	279
4.3 发光复合材料	281

4.3.1	电致发光材料	281
4.3.2	光致发光材料	287
4.4	光波导复合材料	290
4.4.1	光波导基础	290
4.4.2	光波导复合材料	294
4.5	光存储复合材料	295
4.5.1	光存储原理及一般光存储介质	295
4.5.2	光致变色复合材料	300
4.6	光电复合材料	302
4.6.1	光电材料基础	302
4.6.2	聚合物基光电复合材料	303
4.6.3	陶瓷基光电复合材料	305
4.6.4	电光效应及电光材料	309
4.7	其他光学复合材料	312
4.7.1	光催化复合材料	312
4.7.2	透光和不透光材料	313
4.7.3	磁光效应及相应复合材料	325
4.7.4	液晶材料	329
4.7.5	着色复合材料	331
4.8	声学功能复合材料	334
4.8.1	隔声复合材料	334
4.8.2	光声效应和声光效应复合材料	345
4.8.3	声隐蔽复合材料	350
5	热学功能复合材料	352
5.1	相变储热复合材料	352
5.1.1	储热材料基础	352
5.1.2	相变储热复合材料基础	353
5.1.3	相变储热复合材料	360
5.2	导热、隔热和保温复合材料	366
5.2.1	隔热保温材料基础	366
5.2.2	隔热保温块体复合材料	382
5.2.3	隔热保温涂层材料	388
5.3	膨胀功能复合材料	393
5.3.1	常用膨胀材料	393

5.3.2 热膨胀复合材料	400
5.4 热电和电热复合材料	407
5.4.1 热电复合材料	407
5.4.2 电热材料	427
5.5 磁热效应的概念	432
参考文献	436

1 物理功能复合材料基础

1.1 功能复合材料的概念

1.1.1 复合材料的定义

材料是指人类社会所能接受的、可经济地制造有用器件（或物品）的物质，是组成生产工具的物质基础。在人类的生产和生活中，材料是必需的物质基础。材料具有十分鲜明的应用目的，是人类进行生产的最根本的物质基础，也是人类衣、食、住、行及日常生活用品的原料。随着科技的发展，对材料的性能不断提出了更高的要求。材料科学是一门以材料为研究对象的科学，材料科学与工程是发展国民经济和实现国防现代化的具有全局性的重要科学技术领域之一。

材料的种类很多。按材料的物理性质分有导电材料、超导材料、半导体材料、绝缘材料、压电铁电材料、磁性材料、光电材料和敏感材料等。按照使用领域的不同，材料又可分为建筑材料、电子材料、医用材料、仪表材料、能源材料等。其中的电子材料按应用功能可分为微电子材料、电器材料、电容器材料、磁性材料、光电子材料、压电材料、电声材料等。按材料的化学键可分为金属、无机非金属和有机高分子材料三大类。

材料按发展时间划分，可分为新材料和传统材料。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功能的材料。新材料与传统材料之间并没有截然的分界，新材料在传统材料基础上发展而成；传统材料经过组成、结构、设计和工艺上的改进从而提高了材料性能，即出现新的性能都可发展成为新材料。人类过去的历史按传统材料划分，可分为石器时代、铜器时代、铁器时代。新材料的使用对人类历史的发展起了重要的作用。20 世纪 70 年代以来人们把材料、信息、能源、生物称为现代文明的四大支柱，把信息技术、生物技术、能源技术和新型材料作为新技术革命的重要标志。

在人类文明的进程中，材料大致经历了以下 5 个发展阶段：

（1）使用纯天然材料的初级阶段。这一阶段，人类所能利用的材料都是纯天然的。在这一阶段的后期，虽然人类文明的程度有了很大进步，在制造物件方面有多种技巧，但都只是纯天然材料的简单加工和形成。

（2）材料的火取阶段。这一阶段主要是人类利用火来对天然材料进行煅烧、

冶炼和加工的时代。该阶段横跨人们通常所说的新石器时代、铜器时代和铁器时代。它们分别以人类的三大人造材料即陶、铜和铁为象征。人类用天然的矿土烧制陶器、砖瓦和陶瓷,以后又制出玻璃和水泥,并且从各种天然矿石中提炼铜、铁等金属材料。

(3) 材料的合成阶段。随着物理学和化学等科学的发展以及相应检测技术的出现,人类开始从化学角度出发,研究材料的化学组成、化学键、结构及合成方法,并从物理学角度出发开始研究材料的物理性质。该阶段使用的原料有可能是天然原料,也有可能是合成原料。

(4) 材料的复合化阶段。20 世纪 50 年代金属陶瓷的出现标志着复合材料时代的到来。从有意识的应用方面看,在飞机上采用复合材料较早,第一代航空复合材料是玻璃纤维增强塑料(玻璃钢),其弹性模量低,刚度不足。但在第二代,即高强度、高模量的硼纤维、碳纤维复合材料,其强度、疲劳特性与破损安全性等都比金属材料优越,能使飞机重量减轻,费用减少,且便于复杂型面的加工与组装。

(5) 材料的智能化阶段。近年来,智能材料的研究取得了进展,但是离理想的目标还相距较远。该阶段的研究领域实际十分广泛,如涉及电子陶瓷薄膜、超晶格材料、纳米陶瓷材料及机敏材料等。

可见,复合材料和智能材料都属于新材料。材料的复合化是现代材料科学发展的趋势之一。通过不同结构、不同组成、不同功能的材料复合,可以使材料的基本特性得到互补、优化以及协同增强,产生新性能,形成新材料。

复合材料是由两种以上具有不同物理及化学性质、不同形态的物质经人工复合工艺制成的一种新的多相材料。复合材料包含 6 个方面的内容:

- (1) 复合材料的组元是人们有意选择和设计的;
- (2) 复合材料本身是人工制造的,而不是天然形成的;
- (3) 复合材料至少包括两种独立的不相同的化学相;
- (4) 复合材料的性能取决于每种具有相当含量的组元相(体积分数不小于 5%);
- (5) 复合材料的组元应具有重复的几何形状,这样可在相当大的范围内可以把材料看成是均匀的;
- (6) 复合材料应具有单个组元没有的优良性能。

复合材料是一种不均匀的多相材料,它由增强相、基体相和它们的中间相即界面组成。三者都有自己独特的结构、性能与作用。而添加增强物可以根据其外观形态不同分成纤维(长纤维、短纤维)或晶须状(细小单晶)、片状及球状或颗粒状。这些添加增强物可以由各种材料如石墨、陶瓷及金属或半导体材料构成。图 1-1 为长纤维增强金属复合材料的断面组织。

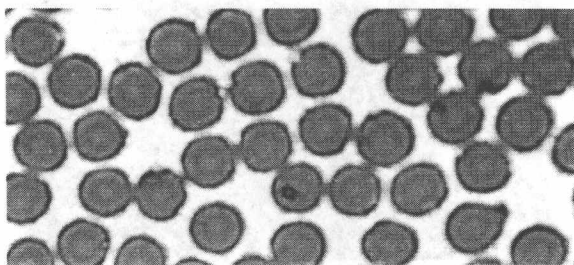


图 1-1 长纤维增强金属复合材料的断面组织

1.1.2 复合材料的界面

复合材料一般由基体和添加物两部分组成，连续的一相为基体，为基体所包围的相为添加物。起增强作用的添加粉也叫增强物，或叫增强体。实际上，基体和增强物的界面往往具有不同于基体和增强物的相结构，因此在复合材料中还应第三个组元即界面相。界面是增强物和基体连接的桥梁，同时是应力及其他信息的传递者。复合材料中的增强体不论是晶须、颗粒还是纤维，与基体在成形过程中将会发生程度不同的相互作用和界面反应，形成各种结构的界面。因此，对界面进行深入研究，从而进行有效的控制，是获得高性能复合材料的关键。

复合材料中增强体材料与基体材料所接触构成的界面，是一层具有厚度（纳米以上）、结构随基体和增强体而异的、与基体有明显差别的新相，因此也称之为界面相或界面层。它是增强体相和基体相连接的“纽带”。界面是复合材料极为重要的微结构，其结构与性能直接影响复合材料的性能。这是因为复合材料中界面层的总面积在复合材料中很大，且复合材料的界面特征对复合材料的性能、破坏行为及应用效能有很大影响。所以，人们以极大的注意力开展对复合材料界面的研究。图 1-2 是复合材料中纤维和金属基体的界面。

界面的功能特性主要表现为三种：第一种是传递功能。界面是基体与增强体之间传递外力的桥梁。第二种是阻断功能。适当的黏接强度有阻断裂纹扩展的功能。第三种是吸收和散射效应。此效应主要是针对振动阻尼复合材料来说的。

复合材料通过界面使增强体与基体结合，其界面结合基本上分为 4 类：

- (1) 化学结合。界面依靠金属基体与增强体两相之间发生反应而结合；
- (2) 物理结合。以范德华力和氢键来结合；
- (3) 扩散结合。增强体和基体之间发生原子的相互扩散作用；

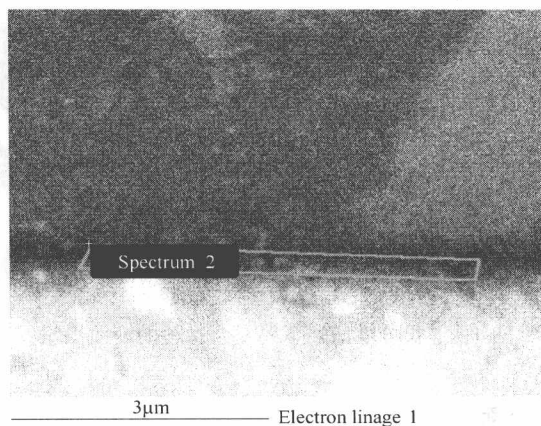


图 1-2 纤维作增强铝基复合材料中纤维和金属基体界面

(4) 机械结合。增强体与基体靠表面粗糙度和摩擦力结合。

多数复合材料在制备过程中发生不同程度的界面反应。轻微的界面反应能有效地改善金属基体与增强体的浸润和结合，是有利的；严重的界面反应将造成增强体的侵蚀，易形成脆性界面相，十分有害。界面反应通常在一些局部区域发生，生成棒状或片状的反应物，只有存在严重的界面反应时，才可能形成界面反应层。在纤维增强金属基复合材料界面研究方面，有关碳纤维和铝的研究较多。碳（石墨）/铝复合材料是研究发展最早的性能优异的复合材料之一。但是使用碳纤维来增强铝合金，两者在 500°C 以上会发生界面反应，生成条状 Al_4C_3 碳化物，并且温度越高，两者之间反应程度就越激烈，碳化物的生成量也愈多。因此，有效地控制界面反应十分重要。

复合材料制备过程中会发生不同程度的界面反应，形成复杂的界面结构。这也是目前制约复合材料研制、应用和发展的主要障碍之一，也是复合材料所特有的问题。复合材料的制备由于大多在高温下进行，所以基体和增强体不可避免地发生不同程度的界面反应及元素扩散作用，因而界面反应和反应程度就决定了界面结构和特性。文献对界面反应行为进行了总结，大致如下：（1）界面反应增强了金属基体与增强体界面结合强度。界面结合强度受面反应程度的控制，强界面反应将造成强界面结合。（2）界面反应产生脆性的界面反应产物。金属基复合材料的界面反应通常形成脆性金属化合物（如 Al_4C_3 ），界面反应物在增强体表面上微观形貌呈棒状、针状、片状，严重时以反应层的形式存在。（3）界面反应造成增强体损伤和改变基体成分。如在制造纤维增强金属基复合材料时，严重的界面反应将侵蚀纤维表面，造成纤维的损伤，同时反应还可能改变基体的成分。

有人对界面表征做了很好的归纳。界面表征可分为两大类：一类是微观静态表征，另一类是宏观静态表征。用 X 射线衍射、电子衍射、正电子湮没、扫描电镜、透射电镜确定界面的反应物是微观静态表征的基本方法。可以用透射电镜对界面产物的形貌和数量进行观察，通过选区衍射和 X 射线能谱进行微区结构分析和成分分析。但是，用选区衍射确定微小界面相结构是困难的。采用高分辨电子显微技术可以在分子或原子尺度上对复合材料界面进行直接观察，并配合成分分析可得到界面原子种类及其排列分布情况。界面排列并不能直接反映界面结合状态。俄歇电子谱的微区分析能力高，它有高的横向及深度方向的分辨能力，可以确定界面元素及含量，但是难以获取化学信息。而 X 射线光电子能谱可以获取化学信息。电子能量损伤谱可以从原子内层电子结构和跃迁变化来确定界面元素状态以及与临近原子间距和原子配位数等结构信息。常用的宏观动态表征法可采用差热分析及示差扫描量热法。它们可以确定界面反应的温度范围。差热分析可以反映试样与参比物之间温差随温度及时间的变化关系，示差扫描量热法可以反映试样与参比物之间功率差随温度及时间的变化关系。在测量方面有直接法及间接法两大类。直接法有界面层厚度测量法、化学分析法及 XRD 法。厚度测量法可采用扫描电镜和透射电镜对界面层厚度进行测定。化学分析法的具体做法是：将复合材料的基体合金溶解，滤去增强相后，对基体合金滤液进行化学分析即可确定出反应产物的含量，通过与基体合金材料中该成分的对比如判断出界面反应的程度。XRD 法用测得的反应产物峰值强度计算反应物的含量，用以确定界面反应的程度。间接法包括相对强化法和液相线法两种。相对强化法是利用界面反应产物在界面与基体中所占比例不同来确定界面反应的程度。液相线法是采用示差扫描量热法或得到冷却曲线来测量液相线温度，并参比合金相图来确定基体中某些元素含量，从而确定反应速度。有人运用电镜对纤维进行 SiC 涂层的 C/Al 复合材料界面观察结果表明了碳纤维与铝基体界面上有较密集的反应相 Al_4C_3 ， Al_4C_3 相多呈棒状，且常以反应层的形式存在，SiC 涂层纤维与基体的界面反应则明显减弱。复合材料的界面结合与该处的残余应力密切相关。目前对金属基复合材料来说，测定残余应力主要还是采用单一波长的特征 X 射线的 $\sin^2\psi$ 法。近年来又发展了用同步辐射连续 X 射线测定残余应力的新方法。Todd A 等就采用高强度的同步辐射连续 X 射线，测定了金属基复合材料内部连续增强体附近的残余应变梯度，其精度可达 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ ，取得了满意的效果，但这种方法的缺点是成本太高。界面结构的研究主要是采用高分辨观察，在分子和原子尺度上分析和揭示材料界面的原子种类及排布规律。有人用高分辨电镜和微衍射技术研究了压铸 SiC_w/Al 复合材料中晶须与铝界面晶体位向关系，分析了这种晶体位向关系的形成原因，建立了半共格界面结构模型，对材料界面结合良好的原因给出了很好的解释。

1.2 复合材料的类型

复合材料的种类有很多,可以从不同的角度进行分类。复合材料按功能包括结构复合材料和功能复合材料。结构复合材料主要是指具有高强、高韧、耐高温、耐腐蚀、耐磨损或结构功能一体化的新材料。它不仅对冶金、石化、能源动力、机械制造、交通运输等支柱产业的发展和航空航天等国防尖端起着关键性的作用,而且还影响和带动一大批基础材料和传统产业的升级改造。功能复合材料是指在电、磁、光、声、热等方面具有特殊性质、表现出特殊功能的新型材料,是信息、生物、能源等高新技术领域和国防建设的重要基础材料。特种功能材料种类繁多,用途广泛,有着十分广阔的市场前景,对我国高技术产业获得突破性和跨越性的发展具有重要的推动作用。材料利用其性能所发挥出来的功效称为材料的功能。材料的功能显示过程是指向材料输入某种能量,经过材料的传输或转换等过程,再作为输出而提供给外部的一种作用。物理功能材料按其功能的显示过程又可分为一次功能材料和二次功能材料。当向材料输入的能量和从材料输出的能量属于同一种形式时,材料起到能量传输部件的作用,材料的这种功能称为一次功能。以一次功能为使用目的的材料又称为载体材料。当向材料输入的能量和从材料输出的能量属于不同形式时,材料起到能量的转换部件作用,材料的这种功能称为二次功能或高次功能。一次功能主要有:(1)力学功能,如强度、塑性、刚度、韧性、疲劳寿命、惯性、黏性、流动性、润滑性、成形性、耐磨性、超塑性、恒弹性、高弹性、振动性和防震性;(2)电功能,如导电性、超导电性、绝缘性和电阻等;(3)磁功能,如硬磁性、软磁性、半硬磁性等;(4)光功能,如遮光性、透光性、折射光性、反射光性、吸光性、偏振光性、分光性、聚光性等;(5)声功能,如隔音性、吸音性;(6)热功能,如传热性、隔热性、吸热性和蓄热性等;(7)化学功能,如吸附作用、气体吸收性、催化作用、生物化学反应、酶反应等。

按照制备方法可分为液态成形和固态成形复合材料。液态成形有铸造法包括原位反应复合材料法、原位生长复合材料法等。固态成形包括粉末冶金和塑性变形法等。为了克服合金化法制得的合金强度提高不大的不足,人们又广泛研究了人工加入第二相的颗粒、晶须、纤维对基体进行强化或依靠强化相本身强度来增加铜材料强度的人工复合材料法(粉末冶金和塑性变形法)和往金属中加入一定的合金元素,通过一定的工艺手段,使合金内部原位生成增强相,与基体铜一起构成复合材料,而在加工前就存在增强体与基体两种材料的自生复合材料法(塑性变形材料法、原位反应复合材料法、原位生长复合材料法)。原位复合材料法是指向合金中加入过量的合金元素,通过处理使过量的合金元素以单相形式存在于凝固态的合金中,此时单相合金元素一般以树枝状分布于基体

中, 然后对合金进行锻造、深拉, 使合金的树枝相结构转变为纤维状结构, 并与轧制方向平行排列, 有效地阻止位错的移动, 从而提高合金的强度。如 Cu-15% Nb 合金经处理后, 抗拉强度可达 1400MPa, 导电率为 75% IACS; Cu-20% Fe 合金, 加工后强度为 1090MPa, 电导率为 54.9% IACS (IACS——international annealing copper standard) 国际退火铜标准。

双层辉光离子渗金属技术也是复合材料的固态成形方法, 因为这种方法可以形成表面复合层。因此, 双层辉光离子渗金属技术也是形成广义复合材料的一种重要手段。刘燕萍和张艳梅在该领域做了大量的工作。双层辉光离子渗金属技术采用的工作气体介质为氩气。在辉光放电条件下, 氩原子在与粒子的碰撞中将发生激化和电离。激化是氩原子的内层电子被激发跳跃到具有高能位的外层, 成为不稳定的激发电子。当这种高能量电子由于不稳定而跳回低能位的内层时, 该电子所释放的能量便以光的形式出现, 这就是产生辉光的主要根源。电离是指氩原子和其他粒子碰撞而使其电子逸出氩原子, 形成一个带正电的氩离子和一个自由电子, 在电场的驱动下, 氩的正离子向具有负电位的工件和源极轰击。工件因被轰击而加热至高温, 源极因离子轰击而使合金元素被溅射出来。在辉光放电的空间里, 被溅射出来的合金元素原子和氩原子一样, 也同样会发生激化和电离。在直流电场中, 不断被加速的正离子经过碰撞, 还可以使其他中性粒子成为快速运动的粒子。在离子的轰击下, 也可能在工件和源极材料中溅射出一些由少量原子构成的原子团。因此, 在阳极/阴极 (工件) 和源极所构成的辉光放电空间, 存在有氩的正离子, 各种合金元素及基体元素的正离子/电子, 各种元素的中性粒子与快速粒子以及各种带电或不带电的原子团等。辉光放电空间中的粒子种类和形态十分繁多, 它们之间的相互作用也十分复杂。但在电场的作用下, 凡带负电的粒子都向阳极作定向运动, 而带正电的粒子都向工件和源极作定向运动, 中性粒子则作无规则的自由运动。然而, 高能量高速运动的带正电的离子和粒子, 在其作定向运动的过程中, 还会进行多次碰撞并带动其他粒子作快速运动。试验测定已证明, 辉光放电条件下的离化率 (正离子数与所有粒子数之比) 很低, 大部分都是中性粒子与粒子团。但在高速定向运动的正离子的带动下, 中性粒子和原子团的运动也会受其影响而改变速度与方向。氩的正离子轰击源极, 一方面加热源极, 另一方面使源极材料中的合金元素被溅射出来, 经过辉光放电空间, 向工件方向运动并吸附在工件表面。

1.2.1 金属做基体的材料

金属基复合材料的基体一般是金属及其合金, 合金既含有不同化学性质的组成元素和不同的相, 同时又具有较高的熔化温度。这样就使得复合材料的制备需在接近或超过金属基体熔点的高温下进行。由于高温下物质的活性增强, 金属基

体就容易与增强体发生程度不同的界面反应；金属基体在冷却、凝固以及热处理过程中还会发生元素偏聚、扩散、相变等，这些变化导致了金属基复合材料界面区结构十分复杂，使界面区的组成、结构有别于基体和增强体，从而在金属基复合材料界面区表现出材料物理性质（如弹性模量、线膨胀系数、电阻率等）和化学性质的不连续性。因此，界面的结构和性能直接影响到金属基复合材料的应力和应变分布，导热、导电及热膨胀，有效载荷传递和断裂行为，并在一定程度上对材料性能起着决定性作用。

金属基复合材料的基体常选用金属合金，合金中的某些元素与基体金属生成金属间化合物析出相，如铝合金中加入 Cu、Mg 等元素会生成细小的 AlCuMg 等时效强化相。这些析出时效强化相往往会在增强体的表面富集，有时将相邻的增强体连接在一起。有关研究已表明在碳纤维增强铝或镁复合材料中均可发现界面上有 Al_2Cu 等化合物析出相存在。

由金属材料学表明，铝是一种低密度、较高强度和具有耐腐蚀性能的金属。铝合金应用十分广泛，分为形变铝合金和铸造铝合金。铝硅合金是广泛应用的一种铸造铝合金，含硅 11% ~ 13%，俗称硅铝明。在实际使用中，纯铝中常加入锌、铜、镁、锰等元素形成合金，由于加入的这些元素在铝中的溶解度极为有限，因此，这类合金被称为沉淀硬化合金，如 Al-Cu-Mg 和 Al-Zn-Mg-Cu 等沉淀硬化合金。近年来，开发出的 Al-Li 系列合金，进一步提高了铝的弹性模量，降低了材料的密度。连续纤维增强金属基复合材料一般选用纯铝或含合金元素少的单相铝合金；而颗粒、晶须增强金属基复合材料则选择具有高强度的铝合金。

镁是一种比铝更轻的金属，但镁的力学性能较差。因此，通常是在镁中加入铝、锌、锰、锆及稀土元素而形成镁合金。目前常用的镁合金主要包括 Mg-Mn，Mg-Al-Zn，Mg-Cr 等耐热合金，可作为连续或不连续纤维复合材料的基体。对于不同类型的复合材料应选用合适的铝、镁合金基体。锌只有合金化即加入强化元素，才能提高力学性能，达到应用的要求。常用的强化元素有铝、铜、镁、锆、硅和稀土元素等。铝是锌合金的主要强化元素。由 Al-Zn 二元相图可以看出，锌和铝在液态下无限互溶，而在固态下有限互溶。锌在铝中的最大溶解度为 1.14%（质量分数）。在共晶温度（382℃）时锌在铝中的最大固溶度可达 84%（质量分数），而在低温下固溶度却又急剧缩小，在室温时已降至 2%（质量分数）左右。因此在铸造条件下 Zn-Al 合金即能“自动淬火”，合金中大部分锌均过饱和固溶于 α 固溶体中。随后此合金又能在室温下自然时效，使合金强化。铝可以提高锌合金的流动性，细化晶粒，改善铸件的力学性能。锌铝合金中随着铝含量的增加，强度提高，韧性下降。

由金属材料学表明，钛有两种晶形， α -钛具有六方密堆积排列结构，低于 885℃ 时稳定； β -钛是体心立方结构，高于 885℃ 时稳定。钛合金具有密度小、耐