



金属基复合材料 及其制备技术

于化顺 主编



化学工业出版社

金属基复合材料及其制备技术

于化顺 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

金属基复合材料及其制备技术/于化顺主编. —北京:
化学工业出版社, 2006. 8
ISBN 7-5025-9257-1

I. 金… II. 于… III. ①金属复合材料②金属复合
材料-制备 IV. TB331

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 103376 号

金属基复合材料及其制备技术

于化顺 主编

责任编辑: 张兴辉 刘丽宏

责任校对: 郑捷

封面设计: 福瑞莱视觉设计中心

*

化学工业出版社出版发行

(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

化学工业出版社印刷厂印装

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 10 字数 269 千字

2006 年 10 月第 1 版 2006 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-9257-1

定 价: 29.00 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

前 言

现代科学技术的迅速发展对材料性能的要求日益提高，除了优异的力学性能外，常希望材料具有某些特殊性能和良好的综合性能。单一的金属、陶瓷、高分子等工程材料已难以满足这些性能要求，复合材料的发展为获得各种性能、满足各种要求提供了有效途径。金属基复合材料作为近年来迅速发展起来的高性能材料之一，已引起国内外的高度重视。研究人员经过几十年的努力，已经成功开发了多种复合材料的制备技术，研制了很多品种的金属基复合材料，并基本建立起了自己的理论体系，形成了一门新型的材料学科。

许多高校为研究生、本科生开设了复合材料课程。由于金属基复合材料研究进展迅速，已出现许多新的制备工艺及理论，但目前所用的教材多为 20 世纪 90 年代编写的，已难以满足目前教学需要。为此，作者根据多年的教学体会和经验，在参考原有教材的基础上，收集补充有关最新研究资料并结合从事金属基复合材料的研究成果，编写了供本科生有关专业使用的教材，它也可供研究生及从事金属基复合材料研究的科技人员参考。

本书重点介绍金属基复合材料的有关理论基础知识、复合技术的原理及方法以及二次加工技术、复合材料组织性能表征方法等，以使读者掌握金属基复合材料的设计原理及方法、制造技术及二次加工技术、特性及应用等有关知识。

本书由山东大学的于化顺教授主编，闵光辉教授、陈洪美博士参加了部分内容的编写工作。全书由王执福教授主审。

编写过程中参考了一些国内外发表的文献资料，特向有关作

者致谢。同时，对本书编写、出版过程中有关单位和同志深表谢意。

由于编者水平有限，书中的不妥之处恳请读者批评指正。

编者
2006年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 复合材料的定义、分类及命名	2
1.1.1 复合材料的定义	2
1.1.2 复合材料的分类	3
1.1.3 金属基复合材料的分类	4
1.2 复合材料的研究历史及现状	6
1.2.1 历史悠久的复合材料	6
1.2.2 近代复合材料	7
1.2.3 现代复合材料	7
1.2.4 金属基复合材料	9
1.3 金属基复合材料的性能特点及应用	11
1.4 金属基复合材料的研究趋势与展望	14
1.4.1 存在的主要问题	14
1.4.2 最新研究进展及发展趋势	16
第 2 章 金属基复合材料设计基础	21
2.1 基体与增强物的相容性和润湿性	21
2.1.1 基体与增强体的润湿性	21
2.1.2 基体与增强物的相容性	24
2.2 复合效应	28
2.2.1 线性效应	28
2.2.2 非线性效应	29
2.3 复合材料的增强原理与增强系数	32
2.3.1 增强原理	32
2.3.2 增强系数(率)	34
2.4 复合材料的力学性能复合准则	35

2.4.1	复合材料的刚度	36
2.4.2	复合材料的强度	37
2.5	复合材料的物理性能复合准则	39
2.6	组合复合效应	41
2.7	复合材料设计原理及方法	42
2.7.1	复合材料设计的条件	43
2.7.2	设计目标和设计类型	44
2.7.3	复合材料设计的步骤	45
2.7.4	复合材料设计的内容	46
第3章 金属基复合材料的基体		49
3.1	金属基体的选择原则	49
3.1.1	金属基复合材料的使用要求	50
3.1.2	金属基复合材料的组成特点	50
3.1.3	基体与增强体的相容性	51
3.2	结构复合材料的金属基体	52
3.2.1	用于450℃以下的金属基体——铝、镁合金	52
3.2.2	用于450~650℃的复合材料的金属基体	55
3.2.3	用于1000℃以上的高温复合材料的金属基体	56
3.3	功能复合材料的金属基体	60
第4章 复合材料增强体		65
4.1	纤维类增强材料	65
4.1.1	碳纤维	65
4.1.2	硼纤维	73
4.1.3	碳化硅质纤维	75
4.1.4	氧化铝系列纤维	80
4.1.5	金属纤维	84
4.2	晶须类增强材料	86
4.2.1	晶须的生长机制	86
4.2.2	晶须的制备方法	88
4.2.3	晶须的性能及应用	92
4.3	颗粒类增强材料	93
4.3.1	颗粒类增强材料的制备方法	93

4.3.2	颗粒类增强材料的特点及应用	95
4.4	增强体的表面处理方法	96
4.4.1	CVD法和PVD法	97
4.4.2	电镀和非电镀	100
4.4.3	喷涂	103
第5章	复合材料的界面、界面理论和界面控制	107
5.1	界面的基本概念	107
5.1.1	界面的定义	107
5.1.2	界面效应	108
5.1.3	界面结合类型	109
5.2	金属基复合材料的界面	112
5.2.1	金属基复合材料界面特点	113
5.2.2	界面模型	115
5.2.3	界面微观结构	117
5.2.4	界面稳定性	121
5.3	纤维复合材料受力时界面的力学环境	123
5.3.1	基本假设	123
5.3.2	连续纤维复合材料在纵向载荷下的界面应力状态	123
5.3.3	连续纤维复合材料在横向载荷下的界面应力状态	125
5.3.4	非连续纤维复合材料的界面力学性质	126
5.3.5	界面残余应力	129
5.4	金属基复合材料界面对性能的影响	130
5.4.1	连续纤维增强金属基复合材料的低应力破坏	131
5.4.2	界面对金属基复合材料力学性能的影响	132
5.4.3	界面对金属基复合材料内微区域性能的影响	133
5.5	对复合材料界面的要求	134
5.5.1	对界面的力学要求	134
5.5.2	对界面的物理化学要求	136
5.6	金属基复合材料的界面反应与控制	137
5.6.1	界面反应与界面结合强度	138
5.6.2	金属基复合材料界面反应控制	139
5.7	金属基复合材料的界面设计	144

第 6 章 金属基复合材料的制备技术	148
6.1 概述	148
6.1.1 对制造技术的要求	148
6.1.2 金属基复合材料制造的难点及解决途径	149
6.1.3 制造技术分类	151
6.2 固态制造技术	151
6.2.1 粉末冶金法	151
6.2.2 扩散粘接法(热压和热等静压技术)	153
6.2.3 变形压力加工法	156
6.2.4 爆炸焊接法	158
6.3 液态制造技术	159
6.3.1 液态金属浸渗法	159
6.3.2 液态金属搅拌铸造法	169
6.3.3 共喷沉积技术	174
6.3.4 热喷涂法	177
6.4 自生复合技术	178
6.4.1 定向凝固法	179
6.4.2 超大塑性变形法	183
6.4.3 反应合成法	184
6.5 典型复合材料的制备工艺概述	196
6.5.1 长纤维连续增强金属基复合材料制备工艺	196
6.5.2 短纤维、颗粒、晶须增强金属基复合材料的制备工艺	203
6.5.3 双金属层状复合材料制备技术	205
6.5.4 金属基纳米复合材料制备技术	210
第 7 章 复合材料的二次加工技术	213
7.1 压力加工方法和工艺	213
7.1.1 挤压与拉拔	214
7.1.2 轧制、模锻、旋压及热等静压	215
7.1.3 超塑性及薄板成型工艺	217
7.1.4 室温锥形金属包层法	218
7.1.5 滚压成型法	218
7.2 机械加工	219
7.2.1 机切削	219

7.2.2	电切割	220
7.2.3	高能光束(激光刀)及液体喷流切割(喷水刀)	220
7.2.4	加工方法及设备选择	221
7.3	复合材料的连接	222
7.3.1	机械连接	222
7.3.2	焊接连接	224
7.4	热处理技术	225
7.4.1	时效析出硬化处理	225
7.4.2	淬火强化处理	226
7.4.3	反应强化处理	226
7.4.4	均匀化处理	227
7.4.5	尺寸稳定化处理	227
7.5	表面处理	227
7.6	复合材料的修复	228
第8章 金属基复合材料的性能及应用		229
8.1	金属基复合材料的性能特点	229
8.1.1	碳纤维增强金属基复合材料的性能	234
8.1.2	碳纤维增强金属基复合材料的性能	236
8.1.3	SiC 纤维增强金属基复合材料的性能	240
8.1.4	其他纤维增强金属基复合材料的性能	243
8.1.5	短纤维及晶须增强金属基复合材料的性能	245
8.1.6	颗粒增强金属基复合材料的性能	249
8.2	金属基复合材料的主要应用	252
8.2.1	航天与空间应用	252
8.2.2	航空及导弹等应用	254
8.2.3	在微电子系统中的应用	256
8.2.4	在其他领域的应用	256
第9章 金属基复合材料组织及性能表征与测试技术		259
9.1	金属基复合材料的组织表征	259
9.1.1	试样制备	260
9.1.2	复合材料中增强体参数表征	261
9.1.3	增强体/基体界面组织结构表征	264

9.2 增强体组织及性能表征	266
9.2.1 增强体表面组织表征	266
9.2.2 纤维增强体力学性能表征	267
9.2.3 颗粒增强体参数的表征	270
9.3 界面结合强度表征	272
9.3.1 微观法	272
9.3.2 宏观法	274
9.3.3 模型法	274
9.4 复合材料力学性能测试技术	276
9.4.1 拉伸强度	277
9.4.2 弹性模量	280
9.4.3 弯曲性能	281
9.4.4 压缩性能	284
9.4.5 剪切性能	286
9.4.6 冲击性能	288
9.4.7 断裂韧性	290
9.4.8 疲劳裂纹扩展速率及疲劳强度	291
9.4.9 残余应力	293
9.5 复合材料物理性能测试	296
9.5.1 线胀系数	296
9.5.2 热导率的测定	299
9.5.3 内耗的测定	303

参考文献	307
-------------------	-----

第 1 章 绪 论

金属基复合材料学科是一门相对较新的材料科学，涉及材料表面、界面、相变、凝固、塑性形变、断裂力学等，仅有约 40 年的发展历史。金属基复合材料的发展与现代科学技术和高技术产业的发展密切相关，特别是航天、航空、电子、汽车以及先进武器系统的迅速发展对材料提出了更高的性能要求，除了要求材料具有一些特殊的性能外，还要具有优良的综合性能，有力地促进了先进复合材料的迅速发展。如航天技术和先进武器系统的迅速发展，对轻质高强结构材料的需求十分强烈。由于航天装置越来越大，结构材料的结构效率变得更为重要。宇航构件的结构强度、刚度随构件线性尺寸的平方增加，而构件的重量随线性尺寸的立方增加。为了保持构件的强度和刚度就必须采用高比强度、高比刚度和轻质高性能结构材料。又如电子技术的迅速发展，大规模集成电路器件的发展，集成度越来越高，功率也越来越大，器件的散热成为阻碍集成电路迅速发展的关键，需要线胀系数小、热导率高的电子封装材料。

单一的金属、陶瓷、高分子等工程材料均难以满足这些迅速增长的性能要求。为了克服单一材料性能上的局限性，充分发挥各种材料特性，弥补其不足，人们已越来越多地根据零、构件的功能要求和工况条件，设计和选择两种或两种以上化学、物理性能不同的材料按一定的方式、比例、分布结合成复合材料，充分发挥各组成材料的优良特性，使复合材料具有单一材料无法达到的特殊性能和综合性能，以满足各种特殊和综合性能需求，也可以更经济地使用材料。如用高强度、高模量的硼纤维、碳（石墨）纤维增强铝基、

镁基复合材料，既保持了铝、镁合金的轻质、导热、导电性，又充分发挥增强纤维的高强度、高模量，获得比强度、比模量高，导热、导电性好，线胀系数小的金属基复合材料。已在航天飞机和人造卫星构件上应用，取得了巨大成功。B/Al 复合材料管材用于航天飞机主仓框架，节省重量 44%。Cf/Mg 复合材料用于人造卫星抛物面天线骨架，使天线效率显著提高。

航空、航天、先进武器系统等军事技术的发展对早期金属基复合材料的研究发展起了巨大的推动作用。电子、汽车等民用工业的迅速发展又为金属基复合材料的应用提供了广泛的前景，预计在 21 世纪金属基复合材料将会得到更大规模的生产和应用。

1.1 复合材料的定义、分类及命名

1.1.1 复合材料的定义

复合材料是由两种或两种以上的材料通过先进的材料制备技术组合而成的性能优异的新材料。复合材料一词中包含下列含义。

① 复合材料的组分是人们有意选择和设计的，是一类性能可以设计的新型材料。

② 复合材料必须是人工制造的，是人们根据需要设计制造的材料，不是天然形成的。像竹子、骨骼等虽具有复合结构，但不是复合材料。

③ 复合材料必须由两种或两种以上化学、物理性质不同的材料组分，以所设计的形式、比例、分布组合而成，各组分之间有明显的界面存在。

④ 复合材料既保持各组分材料性能的优点，又具有单一组元不具备的优良性能。

满足以上条件的材料称为复合材料。因此，复合材料的性能就取决于所选用的组成材料的性能、相互的比例、分布的方式和界面结构性能。通过优化设计、选择和控制复合材料的组成、分布、比例、界面结构，以及合理的复合制备技术，可制备出具有优异综合

性能、性能范围广的新材料，满足各种特殊的需要，更合理、经济地使用材料。

在复合材料中又将其组分称为基体和增强体，通常将其中连续分布的组分称为基体，如聚合物（树脂）基体、金属基体、陶瓷基体。将纤维、颗粒、晶须等称为增强物。

1.1.2 复合材料的分类

不同的基体材料和增强物可组合成品种繁多的复合材料。由于基体材料和增强材料不同，增强材料形态不同，复合方式及复合效果不同，可以有很多分类方法，这里介绍常用的几种分类方法。

(1) 按基体材料类型分类 分为有机材料基复合材料、无机非金属基复合材料和金属基复合材料。各类中又可以细分。如有机材料基复合材料又可分为木质基复合材料和聚合物基复合材料（包括树脂基和橡胶基）；无机非金属基复合材料又可分为陶瓷基复合材料和混凝土基复合材料。

(2) 按增强材料类型分类 分为无机非金属增强复合材料，如碳纤维增强复合材料、硼纤维增强复合材料等；金属增强材料，如钨丝增强高温合金复合材料、铁丝增强树脂复合材料等；有机纤维增强复合材料，如涤纶纤维增强环氧树脂复合材料、尼龙丝增强树脂复合材料等。

(3) 按增强材料形态及分布方式分类 分为颗粒增强复合材料，纤维连续增强复合材料（包括单向纤维、二向织物层合、三向或多向编制纤维增强等）、短纤维增强复合材料、晶须增强复合材料、薄片增强复合材料等。

(4) 按用途分类 分为结构复合材料和功能复合材料。

不同类型的复合材料其性能特点有很大差别，以下简要讨论按基体分类的各种类型复合材料的特点。

① 树脂基复合材料：是由玻璃纤维、碳纤维、硼纤维、涤纶纤维、碳化硅纤维、晶须、颗粒等与热固性、热塑性树脂组成的复合材料。是研究发展最早，技术上比较成熟，并具有比强度、比模量高、线胀系数小、耐磨性、阻尼性好等特点。目前已广泛应用于

航空、航天、建筑、化工、机械、电子通讯、体育等领域。特别是航天领域已广泛地选用碳纤维增强树脂基复合材料制作运载火箭、导弹、人造卫星构件，如卫星天线、仪器仓构件、太阳能电池帆板等重要构件，能大大减轻构件的重量，提高构件的结构效率、承载能力，有力地促进了航天技术的发展，产生了巨大的能效，现已成为复合材料中最主要的品种。

② 陶瓷基复合材料：是由碳纤维、碳化硅纤维、晶须、金属丝与陶瓷基体组成的复合材料。陶瓷材料具有耐高温、抗氧化、耐腐蚀、耐磨等特点，但存在严重的脆性。用纤维、晶须、金属丝与陶瓷基体复合的目的在于改善陶瓷材料的韧性，希望用于发动机的耐热构件提高热机效率。目前技术上尚不成熟，处于研究阶段。晶须增韧陶瓷在刀具应用上取得了重要进展。陶瓷基复合材料的主要应用方向是制作高性能燃气轮机构件。

③ 金属基复合材料以金属及合金为基体的复合材料。主要有以高性能增强纤维、晶须、颗粒等增强的金属基复合材料；金属基体中原位自生增强复合材料、层板金属基复合材料等品种。这些金属基复合材料既保持了金属本身的特性，又具有复合材料的综合特性。通过不同基体和增强物的优化组合，可获得各种高性能的复合材料，具有各种特殊性能和优异的综合性能。

1.1.3 金属基复合材料的分类

(1) 按基体材料类型分类 有铝基、镁基、锌基、铜基、铅基、镍基、耐热金属基、金属间化合物基等复合材料。

(2) 按增强材料类型分类 分为连续纤维增强金属基复合材料；非连续增强金属基复合材料（包括颗粒、短纤维、晶须增强金属基复合材料）；自生增强金属基复合材料（包括反应自生和定向自生、大变形）；层板金属基复合材料。

(3) 按用途分类 分为结构复合材料和功能复合材料。结构复合材料以高比强度、高比模量、尺寸稳定性、耐热性等为主要性能特点。用于制造各种航天、航空、汽车、先进武器系统等高性能结构件。功能复合材料以高导热、导电性、低膨胀、高阻尼、高耐磨

性等物理性能的优化组合为主要特性，用于电子、仪器、汽车等工业。

(4) 按制备工艺分类 可分为外加增强相复合材料和原位自生复合材料。自生复合材料的增强材料或其形态是在复合材料制备过程中形成的，如定向凝固自生复合材料、反应合成自生复合材料、大变形自生复合材料等。而外加增强相复合材料中增强材料及形态在制备过程中无明显变化，如铸造复合材料、粉末冶金复合材料等。

不同类型的复合材料其性能特点有很大差别，以下简要讨论按增强物分类的各种类型复合材料的特点。

连续纤维增强金属基复合材料利用高强度、高模量、低密度的碳（石墨）纤维、硼纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维、金属合金丝等增强金属基体组成高性能复合材料。通过基体、纤维类型、纤维排布方向、方式、体积分数的优化设计组合，可获得各种高性能复合材料。在纤维增强金属基复合材料中纤维具有很高的强度、模量，是复合材料的主要承载体，对基体金属的增强效果明显。基体金属主要起固定纤维、传递载荷、部分承载并赋予其特定形状的作用。连续纤维增强金属因纤维排布有方向性，其性能有明显的各向异性，可通过不同方向上纤维的排布来控制复合材料构件的性能。在沿纤维轴向上具有高强度、高模量等性能，而横向性能较差，在设计使用时应充分考虑。连续纤维增强金属基复合材料要考虑纤维的排布、体积分数等，制造工艺复杂、难度大、成本高。

非连续增强金属基复合材料由短纤维、晶须、颗粒为增强物与金属基体组成的复合材料。增强物在基体中随机分布时，其性能是各向同性。非连续增强物的加入，明显提高了金属的耐磨、耐热性，提高了高温力学性能、弹性模量，降低了线胀系数等。非连续增强金属基复合材料最大的特点是可以常规的粉末冶金、液态金属搅拌、液态金属挤压铸造、真空压力浸渍等方法制备并可用铸造、挤压、锻造、轧制、旋压等加工方法进行加工成型，制造方法简便，制造成本低，适合于大批量生产，在汽车、电子、航空、仪

表等工业中有广阔的应用前景。

层板复合材料是将两种或两种以上优化设计和选择的层板相互完全粘接在一起组成层板复合材料。它具有单一板材所难以达到的综合性能，如抗腐蚀、耐磨、抗冲击、高导热性、高导电性、高阻尼等性能特点。层板复合材料可由金属与金属板、金属与非金属板组合而成，品种繁多，可满足各种应用的需求。其中金属层板复合材料、金属/聚合物层板复合材料发展迅速，已有批量生产，逐渐发展成一类工程材料，在汽车、船舶、化工、仪表等工业中有广泛应用。

自生增强金属基复合材料是在金属基体内通过反应、定向凝固、大变形等途径生成颗粒、晶须、纤维状增强物。与传统的复合材料相比，自生复合材料主要有如下特点：自生增强相在基体中热力学上是稳定的，这样在高温使用时性能降低少；增强相与基体的界面清洁，界面结合力强；自生增强相尺寸、体积分数可以通过工艺参数进行有效控制，是目前复合材料领域研究的热点，但实际应用尚较少。

1.2 复合材料的研究历史及现状

将两种或两种以上的材料通过一定的工艺合成性能优异的复合材料的思想已有几千年的历史，但明确提出复合材料的概念的历史并不长。回顾复合材料的发展史，进一步了解复合材料的发展过程及研究现状，对于了解复合材料的发展规律、发展趋势，开发新型复合材料及制备技术，促进复合材料的研究及应用有很大的意义。

1.2.1 历史悠久的复合材料

(1) 草增强泥复合材料 现在有些农村还有使用草和泥砌墙打土坯的，这种草和泥材料的应用可以追溯到人类文明的前期。西安半坡村原始公社遗址距今已有七千多年，那时的房屋墙体已使用草和泥砌筑。其复合思想无疑是受了燕雀筑巢的启发，是仿生学早期的实例之一。