

普通高等教育“十三五”规划教材

先进金属基复合材料

Advanced Metal Matrix Composites

薛云飞 等 编著

非
外
借

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

先进金属基复合材料

Advanced Metal Matrix Composites

薛云飞 等 © 编著

内 容 简 介

近年来,随着新技术、新方法和新理论的出现,涌现出了一批新型高性能金属基复合材料,现有教材已无法反映现有金属基复合材料的发展水平。本教材以金属基复合材料的设计-界面控制-力学性能为主线,注重结合理论和实际,分3个层次介绍先进金属基复合材料:第一个层次围绕金属基复合材料的发展、设计、增强体的选择、界面控制及制备技术展开讨论;第二个层次突出传统高性能金属基复合材料的发展、制备和性能评价,主要包括镁基复合材料、铝基复合材料及钛基复合材料等;第三个层次主要介绍新近发展起来的新型高性能金属基复合材料,如非晶复合材料和高熵复合材料,并进一步探讨了复合材料结构设计的新理念,如构型复合化的研究进展。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

先进金属基复合材料 / 薛云飞等编著. —北京:北京理工大学出版社, 2019.4
ISBN 978-7-5682-6482-2

I. ①先… II. ①薛… III. ①金属基复合材料 IV. ①TB333.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第280697号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司
社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号
邮 编 / 100081
电 话 / (010) 68914775 (总编室)
(010) 82562903 (教材售后服务热线)
(010) 68948351 (其他图书服务热线)
网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>
经 销 / 全国各地新华书店
印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司
开 本 / 787毫米×1092毫米 1/16
印 张 / 21.25
字 数 / 499千字
版 次 / 2019年4月第1版 2019年4月第1次印刷
定 价 / 58.00元

责任编辑 / 王玲玲
文案编辑 / 王玲玲
责任校对 / 周瑞红
责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前言

金属基复合材料 (Metal Matrix Composites, MMCs) 已存在很久, 但一直到 20 世纪中后期才开始作为工程材料展开应用研究。金属基复合材料从最早的“小众”材料逐渐成长为在航空航天、电子包装、汽车、娱乐领域广泛应用的先进材料。尤其是进入 21 世纪以来, 随着各种新材料、新技术的井喷式涌现, 金属基复合材料得到了前所未有的快速发展。人们重新定义和认识了金属基复合材料, 其中尤以多尺度强化、纳米碳材料增强及非均质构型设计等为特点的先进金属基复合材料发展迅猛, 但主要通过期刊、会议报告等方式进行报道, 没有形成知识体系, 针对先进金属基复合材料的教材则非常匮乏。基于此, 我们想编著一本能够在一定程度上反映当前金属基复合材料发展趋势、水平的教材, 以推动先进金属基复合材料的进一步发展。

我们在编著这本教材时有以下几点期望: ① 为准备从事金属基复合材料的学生或者已经开展这方面工作但尚未跟上所有令人兴奋的新发展的学者/工程师等提供一本能体现最新发展水平的入门级教材; ② 进一步总结和凝练金属基复合材料近 50 年来的发展成果, 完善先进金属基复合材料的理论结构体系; ③ 进一步促进和推动未来先进金属基复合材料的创新和发展, 以实现其在更广阔领域的应用。

在内容安排上, 本书以金属基复合材料的设计-界面控制-力学性能为主线, 注重结合理论和实际, 分 3 个层次介绍先进金属基复合材料: 第一个层次围绕金属基复合材料的发展、设计、增强体的选择、界面控制及制备技术展开讨论; 第二个层次突出传统高性能金属基复合材料的发展、制备和性能评价, 主要包括镁基复合材料、铝基复合材料及钛基复合材料等; 第三个层次主要介绍新近发展起来的新型高性能金属基复合材料, 如非晶复合材料和高熵复合材料, 并进一步探讨了复合材料结构设计的新理念, 如构型复合化的研究进展。

本书第 1、2、10、11 章由北京理工大学薛云飞执笔, 第 3 章由青海大学马丽莉执笔, 第 4 章由中国科学院金属研究所姚佳昊执笔, 第 5 章由北京理工大学王本鹏执笔, 第 6 章由哈尔滨工业大学王晓军执笔, 第 7 章由北京理工大学王扬卫执笔, 第 8 章由北京理工大学张洪梅执笔, 第 9 章由北京理工大学薛云飞和中国科学院金属研究所张海峰共同执笔。全书由北京理工大学薛云飞统稿。

感谢哈尔滨工业大学黄陆军、上海交通大学郭强、北京工业大学谈震给予的建议和支持，感谢梁耀健、曹堂清、周上程、肖遥、肖乾、简瑞枝、张昕嫿、钟鑫、刘超超、于本钦、许洁等同学的付出。

由于编著者的学识有限，书中难免有不妥之处，如读者发现并能通过邮件（xueyunfei@bit.edu.cn）告知，将非常感谢，作者会在后续工作中予以更正。

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	001
1.1 复合材料的定义、命名和分类	002
1.1.1 复合材料的定义	002
1.1.2 复合材料的命名	003
1.1.3 复合材料的分类	003
1.2 金属基复合材料概述	004
1.3 金属基复合材料的性能特点	006
1.4 金属基复合材料的应用方向	010
1.5 金属基复合材料的发展趋势	018
参考文献	021
第 2 章 金属基复合材料的设计基础	026
2.1 复合材料的可设计性	026
2.2 复合材料结构设计方法	028
2.2.1 设计步骤	028
2.2.2 设计条件	029
2.2.3 设计类型	030
2.2.4 材料设计	030
2.2.5 结构设计	034
2.3 复合效应	036
2.3.1 线性复合效应	037
2.3.2 非线性复合效应	037
2.4 复合准则	038
2.4.1 力学性能复合准则	038
2.4.2 物理性能复合准则	043
2.4.3 组合复合	044
2.5 复合材料设计的新途径	044
2.5.1 复合材料的一体化设计	044
2.5.2 复合材料及其结构的软设计	045
2.5.3 复合材料的宏观、细观(介观)及微观设计	045
2.5.4 复合材料及其结构的虚拟设计	046
参考文献	048

第3章 金属基复合材料的增强体材料	051
3.1 增强体材料的特点	051
3.2 连续增强体.....	052
3.2.1 纤维类	052
3.2.2 骨架类	060
3.3 非连续增强体.....	062
3.3.1 晶须类	062
3.3.2 颗粒类	064
3.3.3 微珠	067
3.3.4 石墨烯	069
3.3.5 碳纳米管	074
参考文献	077
第4章 金属基复合材料的界面控制	080
4.1 复合材料界面的基本概念	080
4.1.1 界面的定义	080
4.1.2 界面的结合类型	080
4.1.3 界面的作用(界面效应)	082
4.1.4 界面的润湿性	082
4.2 金属基复合材料的界面特点	083
4.2.1 界面的类型	084
4.2.2 界面的典型结构	085
4.2.3 界面稳定性的影响因素	086
4.2.4 残余应力	087
4.3 金属基复合材料的界面反应	088
4.3.1 界面的相容性	088
4.3.2 界面反应的种类	088
4.4 金属基复合材料的界面控制	090
4.4.1 增强体材料的表面处理	090
4.4.2 向基体添加特定元素	091
4.4.3 优化制备工艺方法和参数	091
4.5 金属基复合材料的界面表征方法	092
4.5.1 界面润湿性的表征	092
4.5.2 界面微观组织结构和成分的表征	093
4.5.3 界面结合强度的表征	093
4.5.4 界面残余应力的表征	095
4.6 金属基复合材料的界面优化设计	097
参考文献	098
第5章 金属基复合材料的制备技术	103
5.1 金属基复合材料的制备技术的要求、关键和分类	103

5.1.1	制备技术的要求	103
5.1.2	制备技术的关键	103
5.1.3	制备技术的分类	104
5.2	固态法	105
5.2.1	粉末冶金法	105
5.2.2	变形压力加工	107
5.2.3	扩散粘接法	108
5.2.4	爆炸焊接法	110
5.3	液态法	111
5.3.1	液态浸渍法	111
5.3.2	搅拌铸造法	114
5.3.3	共喷沉积法	116
5.3.4	3D 打印技术	117
5.4	原位合成法	118
5.4.1	定向凝固法	118
5.4.2	反应自生成法	119
5.5	梯度复合技术	124
5.5.1	物理气相沉积技术	124
5.5.2	化学气相沉积技术	124
5.5.3	电镀、化学镀和复合镀技术	125
5.5.4	喷涂和激光熔覆技术	126
	参考文献	127
第 6 章	镁基复合材料	129
6.1	长纤维增强镁基复合材料	129
6.1.1	碳纤维增强镁基复合材料显微组织	129
6.1.2	碳纤维增强镁基复合材料界面	129
6.1.3	碳纤维增强镁基复合材料力学性能	131
6.2	短纤维增强镁基复合材料	132
6.2.1	晶须增强镁基复合材料	132
6.2.2	短碳纤维增强镁基复合材料	134
6.3	颗粒增强镁基复合材料	136
6.3.1	微米颗粒增强镁基复合材料	136
6.3.2	亚微米颗粒增强镁基复合材料	140
6.3.3	纳米颗粒镁基复合材料	145
6.4	碳纳米材料增强镁基复合材料	150
6.4.1	碳纳米管增强镁基复合材料	150
6.4.2	石墨烯增强镁基复合材料	154
	参考文献	154

第 7 章 铝基复合材料	158
7.1 概述.....	158
7.2 铝基复合材料的设计和分类.....	158
7.2.1 铝基复合材料的设计思路.....	158
7.2.2 铝基复合材料的分类.....	158
7.3 颗粒增强铝基复合材料.....	159
7.3.1 颗粒增强铝基复合材料强化机制.....	159
7.3.2 颗粒增强铝基复合材料失效机制.....	159
7.3.3 颗粒增强铝基复合材料的应用.....	160
7.4 三维连续相增强铝基复合材料.....	160
7.4.1 双连续 Al/陶瓷复合材料的特点.....	160
7.4.2 Al/SiC 双连续相复合材料.....	162
参考文献.....	168
第 8 章 钛基复合材料	176
8.1 概述.....	176
8.2 钛基复合材料的分类.....	176
8.3 钛合金基体的选择.....	177
8.4 增强体的选择.....	178
8.5 钛基复合材料的制备方法.....	178
8.5.1 熔铸法.....	179
8.5.2 粉末冶金法.....	179
8.5.3 机械合金化法.....	179
8.5.4 自蔓延高温合成法.....	180
8.6 热加工对钛基复合材料的影响.....	180
8.6.1 挤压对钛基复合材料的影响.....	180
8.6.2 锻造对钛基复合材料的影响.....	181
8.6.3 轧制对钛基复合材料的影响.....	181
8.7 石墨烯增强钛基复合材料.....	182
8.7.1 石墨烯增强钛基复合材料的制备工艺.....	182
8.7.2 石墨烯增强钛基复合材料微观组织.....	187
8.7.3 石墨烯增强钛基复合材料力学性能.....	190
8.7.4 石墨烯增强钛基复合材料界面结构.....	193
8.7.5 石墨烯增强钛基复合材料强化机理.....	195
参考文献.....	198
第 9 章 非晶合金复合材料	202
9.1 概述.....	202
9.1.1 非晶合金的定义、性能和应用.....	202
9.1.2 非晶合金复合材料的设计和分类.....	205
9.2 原位内生晶体相增强非晶合金复合材料.....	206

9.2.1	非相变增强非晶合金复合材料	206
9.2.2	相变增强非晶合金复合材料	209
9.3	颗粒增强非晶合金复合材料	212
9.3.1	陶瓷颗粒/非晶合金复合材料	212
9.3.2	金属颗粒/非晶合金复合材料	213
9.4	丝束增强非晶合金复合材料	215
9.4.1	钨丝/锆基非晶合金复合材料	215
9.4.2	碳纤维/非晶合金复合材料	230
9.5	骨架增强非晶合金复合材料	231
9.5.1	多孔钨/锆基非晶合金复合材料	231
9.5.2	多孔钛/镁基非晶合金复合材料	241
9.5.3	多孔 SiC/Zr 基非晶合金复合材料	246
	参考文献	252
第 10 章	高熵合金复合材料	260
10.1	高熵合金的特点和性能	260
10.1.1	高熵合金的特点	260
10.1.2	高熵合金的性能	263
10.2	双相结构高熵合金	266
10.2.1	合金成分优化	267
10.2.2	冷却速率对高熵合金显微组织的影响	271
10.2.3	双相高熵合金的组织调控	273
10.2.4	双相高熵合金的应变率相关力学行为	284
10.3	非晶-高熵合金复合材料	286
10.3.1	Al 基非晶-高熵合金复合材料的制备	287
10.3.2	烧结过程	290
10.3.3	力学行为	292
10.4	钨-高熵复合材料	295
10.4.1	钨-高熵合金的润湿性能	296
10.4.2	钨-高熵合金的组织 and 力学性能	296
	参考文献	299
第 11 章	金属材料的构型复合化	303
11.1	分级复合构型	303
11.1.1	分级复合	303
11.1.2	多芯复合	304
11.2	叠层复合结构	305
11.2.1	铺层结构	305
11.2.2	环形结构	306
11.2.3	层合板结构	307
11.3	网状结构金属基复合材料	308

11.3.1 设计与制备	308
11.3.2 变形与成型	309
11.3.3 热处理改性	310
11.4 仿生构型金属基复合材料	312
11.4.1 梯度构型金属基复合材料	313
11.4.2 贝壳珍珠层构型金属基复合材料	316
参考文献	322

第1章

绪论

人类文明发展开始于对材料的发现和探索。可以说，人类的文明史也就是材料的发展史。图 1-1 展示了一万年以来人类社会发展和使用材料的概况，生动地再现了材料发现、发展和设计的一系列过程。如图 1-1 所示，进入到 20 世纪 60 年代以来，科学技术的迅猛发展，特别是随着宇航、导弹、原子能、船舶等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，传统单相材料的性能已不能满足实际需求，因而，复合化成为当代新材料发展的一个重要趋势，这促进了现代复合材料的发展。图 1-2 给出了复合材料与其他单质材料力学性能的比较。复合的目的是改善材料的性能，或满足某种物理性能上的特殊功能要求。

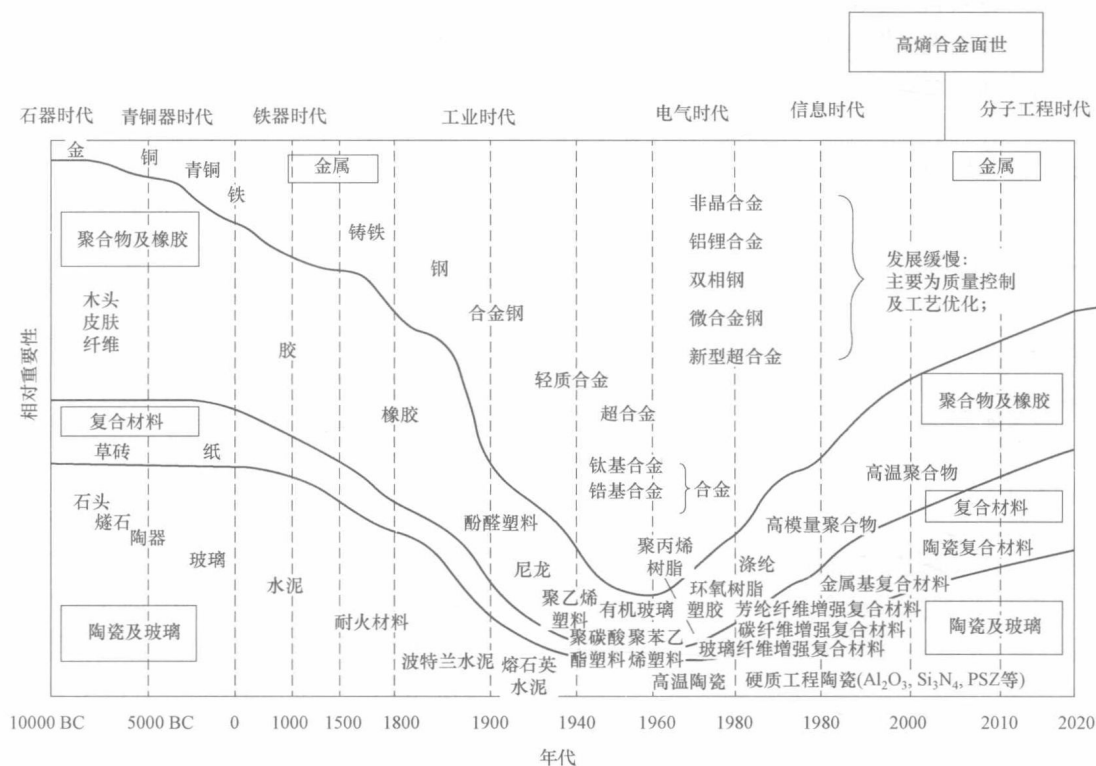


图 1-1 工程材料的历史演变

相比于人类早期以各种天然材料制成的如工艺品漆器、篱笆墙、城墙砖等常规复合材料，1942 年第二次世界大战中，玻璃纤维增强聚酯树脂复合材料成功应用于美国空军飞机的事件，标志着现代复合材料新纪元的开启。金属基复合材料的发展开始于 1980—1990 年间，其

中以纤维增强铝基复合材料的应用最为广泛。

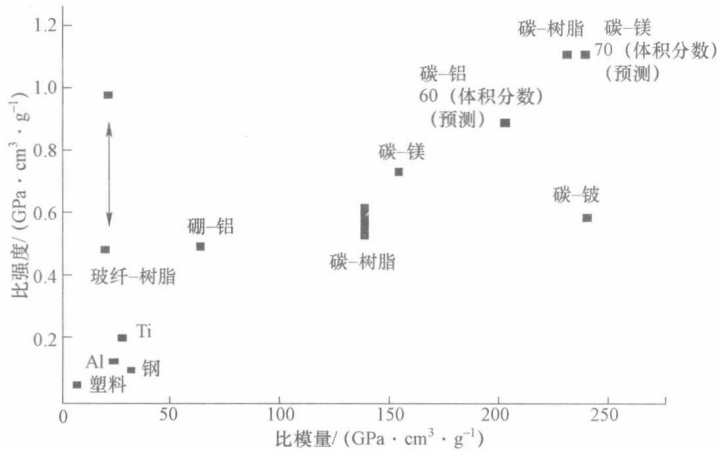


图 1-2 复合材料与传统材料的性能对比

复合材料各组分之间可取长补短、协同作用，这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备的新性能。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、复合成综合性能优异的新材料。博采众长的复合材料代表了材料的发展方向，目前已得到世界各发达国家的高度重视，是各国优先发展的新材料领域之一。

1.1 复合材料的定义、命名和分类

1.1.1 复合材料的定义

根据国际标准化组织（International Organization for Standardization, ISO）为复合材料所下的定义，复合材料是指由两种或两种以上物理和化学性质不同的物质组合而成的一种多相固体材料。

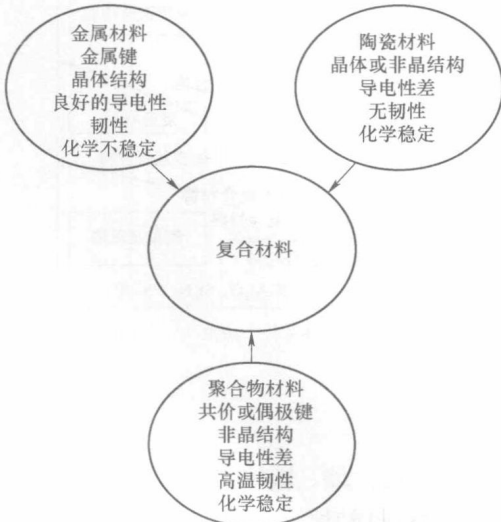


图 1-3 不同体系材料的特点

《材料科学技术百科全书》给出了相对更加具体的定义：复合材料是由有机高分子、无机非金属或金属等几类不同材料通过复合工艺组合而成的新型材料。它既能保留原组分材料的主要特色，又能通过复合效应获得原组分所不具备的性能。可以通过材料设计使各组分的性能互相补充并彼此关联，从而获得新的优越性能，这与一般材料的简单混合有本质区别。图 1-3 列出了不同体系材料的主要性能特点，通过彼此的复合，可实现性能设计。

从复合材料的定义中可以看出，复合材料主

要具有以下特点:

① 复合材料不仅可以保留原组成材料固有的物理和化学特性(区别于化合物和合金),而且通过各组分的相互补充和关联,可实现性能的叠加效应。

② 复合材料具有极强的可设计性。复合材料一般由基体组元与增强体或功能组元所组成。根据使用中的受力条件或者功能需要,通过对组元选材、分布和工艺条件优选等,设计出满足使用要求的复合材料。

③ 复合材料可获得原组分所不具备的新性能。即复合材料在设计合理的前提下,不仅可以保持各组分的固有特性,还可通过组分间的复合效应,赋予原组分所不具备的优良特殊新性能。

④ 复合材料各组分间存在着明显的界面,是各组分之间被明显界面区分的多相材料。

⑤ 复合材料是由人设计、制备,并具有复合结构的人工材料,其不同于具有某些复合材料形态特征天然物质。

1.1.2 复合材料的命名

复合材料可根据增强材料和基体材料的名称来命名,一般有以下3种情况:

① 强调基体时,以基体材料的名称为主。如聚合物基复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料等。

② 强调增强体时,以增强体材料的名称为主。如晶须增强复合材料、纤维增强复合材料、颗粒增强复合材料等。

③ 基体材料名称与增强体材料名称并用。这种命名方法常用于表示某一种具体的复合材料,习惯上把增强体材料的名称放在前面,基体材料的名称放在后面。如石墨烯/钛复合材料、玻璃纤维/环氧树脂复合材料、钨丝/非晶复合材料等。

1.1.3 复合材料的分类

复合材料一般由基体与增强体或功能组元组成,依据金属材料、无机非金属材料 and 有机高分子材料等的不同组合,可构成各种不同的复合材料体系,因此分类方法也较多。按照不同的标准和要求,复合材料通常有以下3种分类方法。

(1) 按使用性能分类

按使用性能不同,复合材料可分为结构复合材料和功能复合材料。

结构复合材料是作为承力结构使用的材料,基本上由能承受载荷的增强体组元与能连接增强体成为整体材料同时又起传递力作用的基体组元构成。结构复合材料的特点是可根据材料在使用中的受力要求进行组元选材设计,更重要的是,还可进行复合结构设计,即增强体排布设计,能合理地满足需要并节约用材。

功能复合材料一般由功能体组元和基体组元组成,基体不仅起到构成整体的作用,而且能产生协同或加强功能的作用。功能复合材料是指除机械性能以外,还提供其他物理性能的复合材料。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。

(2) 按基体材料类型分类

复合材料所用基体主要有聚合物(如热固/塑性树脂和橡胶)基复合材料、金属(如铝、

镁、钛及其合金)基复合材料及无机非金属(如玻璃、水泥及碳)基复合材料。图 1-4 是结构复合材料按不同基体分类的简单示意图。



图 1-4 结构复合材料按不同基体类型分类

(3) 按增强体几何形态分类

颗粒(如弥散颗粒(间距 $0.01\sim 0.3\ \mu\text{m}$)、粒子(间距 $1\sim 25\ \mu\text{m}$))增强型、纤维(连续纤维、短纤维)增强型、片状增强型、混合增强型、层叠式复合及多孔复合等。图 1-5 是结构复合材料按不同增强体形态分类的简单示意图。

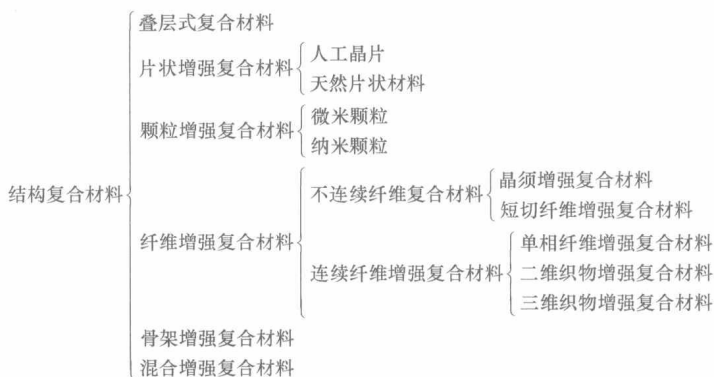


图 1-5 结构复合材料按不同增强体形态分类

1.2 金属基复合材料概述

金属基复合材料(Metal matrix composites, MMCs), 与其他复合材料类似, 由至少两种化学与物理不同的相组成, 可获得任何单相所不具备的优异性能。一般来说, 是以陶瓷(长纤维、短纤维、晶须、颗粒)或金属(丝、析出物)为增强体, 金属/合金(如铝、镁、钛、镍、铁、铜及新型合金)为基体材料复合而成的。金属基复合材料其实已在日常生活中的诸多领域得到应用, 如最为常见的含石墨碳的铸铁、含碳化物的钢及硬质合金等, 均由碳化物和金属基体构成, 是典型的金属基复合材料。但实际上, 一般所指的金属基复合材料, 主要指的是以铝、镁、钛等轻金属/合金为基体的一类先进金属基复合材料。

为什么要发展金属基复合材料? 随着现代科学技术的飞速发展, 人们对材料的要求越来

越高。在结构材料方面,不但要求高强度,还要求质量小,在航空航天领域尤其如此,而传统的金属或合金已无法满足未来科技的发展,亟须发展金属基复合材料。相比金属或合金,金属基复合材料具有比强度和比刚度更高、尺寸更加稳定、高温性能和疲劳性能更好等特点;相比聚合物基复合材料,金属基复合材料具有高强度/刚度、更高的服役温度、良好的导电性和热导率、更好的连接性能、优异的抗辐照性能及低的环境污染性能(无脱气或者水分吸收)等性能优势;相比陶瓷材料,金属基复合材料又具有高的韧性和抗冲击性能。因此,金属基复合材料得到了令人瞩目的发展,成为各国高新技术研究开发的重要领域。

金属基复合材料经历了从最早的“小众”材料逐渐成长为在航空航天、电子包装、汽车、娱乐领域广泛应用的先进材料。尤其进入21世纪以来,随着各种新材料、新技术的井喷式涌现,金属基复合材料得到了前所未有的快速发展。

金属基复合材料品种繁多,有各种分类方式,归纳为以下3种。

(1) 按使用性能分类

① 结构复合材料。主要用作承力结构,具有高比强度、高比模量、尺寸稳定、耐热等特点,用于制造各种航天、航空、电子、汽车、先进武器系统等高性能构件。

② 功能复合材料。指除力学性能外,还有其他物理性能的复合材料,如电、磁、热、声、阻尼、摩擦等特性,主要用于电子、仪器、汽车、航空、航天、武器装备等领域的功能件。

(2) 按基体类型分类

主要有铝基、镁基、锌基、铜基、钛基、镍基、耐热金属基、金属间化合物基等复合材料。目前以铝基、镁基、钛基复合材料发展较为成熟,已在航天、航空、电子、汽车等工业中应用。

① 铝基复合材料。铝合金质量小、密度小、可塑性好。铝基复合材料不仅性能优异(如比强度和比刚度高、耐高温、抗疲劳、耐磨、阻尼性能好、热膨胀系数低),而且制备技术相对简单,易于加工。因此,铝基复合材料已成为金属基复合材料中最常用的、最重要的材料之一。

② 镁基复合材料。镁合金是密度最小的工程结构材料。镁基复合材料不仅结构性能(低密度、高比强度/比刚度、抗震耐磨、抗冲击、尺寸稳定性和铸造性能)优异,而且还有良好的阻尼和电磁屏蔽等功能特性,是极具竞争力的结构功能一体化轻金属基复合材料。

③ 钛基复合材料。钛拥有比其他任何结构材料更高的比强度。钛基复合材料以其高的比强度、比刚度和优异的抗高温特性而成为超高速宇航飞行器构件和先进航空发动机的候选材料,比铝合金显示出了更大的优越性,前景广阔。

(3) 按增强体类型分类

① 连续增强金属基复合材料。典型的连续增强方式有连续纤维增强和骨架增强两种。

连续纤维增强金属基复合材料是利用高强度、高模量、低密度的纤维增强体(如碳/石墨、硼、碳化硅、氧化铝等)与金属基体复合而成的高性能复合材料,纤维可以以单向、二维和三维编织的形式存在。单向纤维增强复合材料各向异性明显,二维编织复合材料在织物平面方向和垂直方向的力学性能不同,三维编织复合材料则基本是各向同性的。

骨架增强金属基复合材料的增强体呈三维联通网络结构,增强体是高强度、高模量、低密度的陶瓷(如碳化硅)或者金属(如钛)等。通过调节增强体的孔径大小、均匀性等改善复合材料的性能。相比其他增强方式,骨架增强复合材料中的两相相互约束作用更加明显,

对裂纹扩展的阻碍作用更强，性能上呈完全各向同性。

② 非连续增强金属基复合材料。非连续增强金属基复合材料，是指由短纤维、晶须、颗粒为增强体与金属基体组成的复合材料，增强体随机均匀分散在金属基体中，因而其性能宏观上呈各向同性。特殊条件下，短纤维也可通过对复合材料进行二次加工（挤压）实现定向排列。在此类复合材料中，金属基体仍起着主导作用，增强体在基体中随机分布，其性能呈各向同性。非连续增强体的加入，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，降低了热膨胀系数等。

相比连续增强金属基复合材料，非连续增强金属基复合材料制造方法简便，制造成本低，适合大批量生产，在汽车、电子、航空、仪表等工业中有广阔的应用前景。

③ 片层状金属基复合材料。指在韧性和成型性较好的金属基体材料中含有重复排列的高强度、高模量片层状增强体的复合材料。片层的间距是微观的，所以，在正常的比例下，材料按其结构组元看，可以认为是各向异性和均匀的。

层状复合材料的强度和大尺寸增强物的性能比较接近，而与晶须或纤维类小尺寸增强物的性能差别较大。因为增强薄片在二维方向上的尺寸相当于结构件的大小，因此增强物中的缺陷可以成为长度和构件相同的裂纹的核心。

尽管薄片增强复合材料的增强效果不如纤维增强复合材料，但相比于纤维增强复合材料仅沿纤维方向增强效果显著，层片状复合材料在增强平面的各个方向上都有增强效果，这与纤维单向增强的复合材料相比，具有明显的优越性。

1.3 金属基复合材料的性能特点

金属基复合材料的性能取决于所选用金属或合金基体和增强体的特性、含量、分布等。通过优化组合可获得既具有金属特性，又具有高比强度、高比模量、耐热、耐磨等综合性能的复合材料。综合归纳金属基复合材料有以下性能特点：

(1) 高比强度、高比模量

由于在金属基体中加入了适量的高强度、高模量、低密度的纤维、晶须、颗粒等增强体，明显提高了复合材料的比强度和比模量，如图 1-6 所示，特别是高性能连续纤维，如硼纤维、碳（石墨）纤维、碳化硅纤维等，具有很高的强度和模量。密度只有 1.85 g/cm^3 的碳纤维的最高强度可达到 $7\,000 \text{ MPa}$ ，比铝合金强度高出 10 倍以上，石墨纤维的模量为 $230\sim 830 \text{ GPa}$ 。硼纤维密度为 $2.4\sim 2.6 \text{ g/cm}^3$ ，强度为 $2\,300\sim 8\,000 \text{ MPa}$ ，模量为 $350\sim 450 \text{ GPa}$ 。碳化硅纤维密度为 $2.5\sim 3.4 \text{ g/cm}^3$ ，强度为 $3\,000\sim 4\,500 \text{ MPa}$ ，模量为 $350\sim 450 \text{ GPa}$ 。加入 $30\%\sim 50\%$ 的高性能纤维作为复合材料的主要承载体，复合材料的比强度、比模量成倍地高于基体合金的比强度和比模量。图 1-7 所示为典型金属基复合材料与基体合金性能的比较。

用高比强度、高比模量复合材料制成的构件质量小、刚性好、强度高，是航天、航空技术领域中理想的结构材料。

(2) 导热、导电性能

金属基复合材料中金属基体占有很高的体积分数，一般在 60% 以上，因此仍保持金属所特有的良好导热和导电性。良好的导热性可以有效地传热，减小构件受热后产生的温度梯度和迅速散热，这对尺寸稳定性要求高的构件和高集成度的电子器件尤为重要。良好的导电性