


普通高等教育“十三五”规划教材

金属基复合材料

METAL MATRIX COMPOSITES

赵玉涛 陈刚 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

金属基复合材料

主编 赵玉涛 陈刚

主审 范同祥



机械工业出版社

航空航天、节能汽车、轨道交通、国防军事等高新技术领域快速发展，对材料性能的要求不断提高。金属基复合材料不仅具有高的比强度和比刚度，而且具有耐热、耐磨、热膨胀系数小、抗疲劳性能好等优点，已成为21世纪发展潜力巨大的高性能新材料之一，应用前景十分广阔。本书具有完整的金属基复合材料内容体系，系统介绍了金属基复合材料的增强体材料、设计、制造技术、成形加工、界面及其表征、性能、损伤与失效、应用等，内容新颖，具有鲜明的科研反哺教学和产教融合特色。

本书可作为材料类本科生、研究生的专业课程教材，也可以作为从事材料研发与应用工作的技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

金属基复合材料/赵玉涛, 陈刚主编. —北京: 机械工业出版社, 2019. 3

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-62038-9

I. ①金… II. ①赵… ②陈… III. ①金属基复合材料-高等学校-教材
IV. ①TB333. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 029984 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 冯春生 责任编辑: 冯春生 张丹丹

责任校对: 张薇 封面设计: 张静

责任印制: 李昂

河北鹏盛贤印刷有限公司印刷

2019年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.5印张·457千字

标准书号: ISBN 978-7-111-62038-9

定价: 44.80元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-68326294

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

前 言

新材料的研究、开发与应用一直是当代高新技术的重要内容之一。复合材料，特别是金属基复合材料，在新材料技术领域占有重要的地位，对促进军事和民用领域的高科技现代化起着至关重要的作用，因此备受学术界和工业界重视。

金属基复合材料是以金属或其合金为基体、与一种或几种金属或无机非金属增强体人工结合而成的新型材料，在航空、航天、汽车、电子、军工等领域得到越来越多的应用，系统了解和学习金属基复合材料已经成为全国很多材料类专业人才培养的迫切需要。本书为满足这一需求，在结合编者团队多年的研究成果、教学经验，并在参考现有相关专著、教材和学术文献的基础上，设计了全新的金属基复合材料教材的体系和内容，力求系统反映金属基复合材料的最新学术与开发应用成果。

本书编者长期从事金属基复合材料的科学研究、技术开发和人才培养，先后承担了国家“863”计划、国家自然科学基金面上和重点项目、教育部重点科技项目、高等学校博士学科点专项科研基金项目以及江苏省自然基金、工业支撑和重大科技成果转化专项资金项目等30余项，在原位合成颗粒增强铝基复合材料方面的研究成果已经实现了产业化，获得了显著的社会效益和经济效益。同时，编者在金属基复合材料的课程教学方面也积累了丰富的经验，通过不断凝练思路和完善内容，形成了科教、产教协同育人的特色。本书以金属基复合材料的增强体材料—设计—制造技术—成形加工—界面及其表征—性能—损伤与失效—应用为主线，内容新颖，系统实用。

本书结合近十年来金属基复合材料领域的最新学术和开发应用成果，已被列入江苏省重点教材建设项目。本书由江苏大学赵玉涛教授、陈刚教授任主编，焦雷副教授、怯喜周副教授、张振亚博士、陈飞博士等人参与了本书的编写工作，吴继礼博士、汪存龙博士、梁向锋博士参与了本书修改与校对工作。本书由上海交通大学范同祥教授主审。在编写过程中参考了许多文献资料，主要文献已列于书末的参考文献，在此谨向所有参考文献的作者致以诚挚的谢意。

本书可作为材料类本科生、研究生的专业课程教材，参考教学学时数为32。

限于编者水平，书中难免有误，恳请同行和读者批评指正，以便补充和完善。

编 者

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 金属基复合材料概述	2
1.2 金属基复合材料特性	4
1.3 金属基复合材料发展前沿及趋势	6
1.3.1 金属基复合材料结构理论的发展 ...	7
1.3.2 新型金属基复合材料	8
1.3.3 金属基复合材料制造新技术	9
本章思考题	11
第 2 章 增强体材料	12
2.1 增强体的分类	13
2.1.1 纤维	13
2.1.2 晶须	13
2.1.3 颗粒	13
2.1.4 其他	14
2.2 纤维增强体	14
2.2.1 碳纤维	14
2.2.2 硼纤维	16
2.2.3 碳化硅纤维	17
2.2.4 氧化铝纤维	20
2.3 晶须增强体	23
2.3.1 晶须的分类	23
2.3.2 晶须的物理性质	24
2.3.3 晶须的分散	25
2.4 颗粒增强体	25
2.5 其他增强体	26
2.5.1 金属丝	26
2.5.2 碳纳米管	27
2.5.3 石墨烯	29
本章思考题	30
第 3 章 金属基复合材料的设计	32
3.1 金属基复合材料设计基础	32
3.1.1 复合效应	32
3.1.2 复合材料的可设计性	34
3.1.3 复合材料设计的研究方法	35
3.1.4 复合材料的虚拟设计	38
3.1.5 原材料的选择原则	38
3.2 金属基结构复合材料的设计	41
3.2.1 基体的选择	41
3.2.2 增强体的选择	43
3.2.3 单向连续纤维增强金属基复合 材料力学性能设计	44
3.2.4 短纤维增强金属复合材料力学 性能设计	49
3.2.5 颗粒增强金属基复合材料力学 性能设计	52
3.3 金属基功能复合材料的设计	55
3.3.1 基体的选择	55
3.3.2 功能体的选择	56
3.3.3 功能复合材料调整优值的途径	56
3.3.4 利用复合效应创造新型功能 复合材料	58
3.3.5 物理性能设计	58
3.3.6 热防护梯度功能材料设计	63
本章思考题	65
第 4 章 金属基复合材料的制造技术 ...	67
4.1 金属基复合材料制造技术概述	67
4.1.1 金属基复合材料制造方法的 分类	67
4.1.2 制造技术应具备的条件	67
4.1.3 金属基复合材料制造的关键性 技术	68
4.2 固态制造技术	68
4.2.1 粉末冶金技术	68
4.2.2 热压和热等静压技术	69
4.2.3 热轧、热挤压和热拉技术	71
4.2.4 爆炸焊接技术	72
4.3 液态制造技术	72
4.3.1 真空压力浸渗技术	72
4.3.2 挤压铸造技术	74
4.3.3 液态金属搅拌铸造技术	74
4.3.4 液态金属浸渍技术	79
4.3.5 共喷沉积技术	81
4.4 原位自生成技术	83

4.4.1 定向凝固法	83	应用	173
4.4.2 反应自生成法	83	6.4 金属基复合材料的界面表征	177
4.5 表面复合技术	92	6.4.1 界面组成及成分变化	177
4.5.1 物理气相沉积技术	92	6.4.2 界面区的位错分布	178
4.5.2 化学气相沉积技术	93	6.4.3 界面强度的表征	178
4.5.3 热喷涂技术	93	6.4.4 界面残余应力的测定	181
4.5.4 电镀、化学镀和复合镀技术	94	6.4.5 界面残余应变的原位测定	182
本章思考题	95	6.4.6 界面断裂的原位观察分析	184
第5章 金属基复合材料的成形加工 ...	96	6.4.7 界面结构的高分辨观察及其 计算机模拟	184
5.1 金属基复合材料液态成形	96	本章思考题	187
5.1.1 常规铸造成形	96	第7章 金属基复合材料的性能	188
5.1.2 特种铸造成形	100	7.1 金属基复合材料的性能简介	188
5.1.3 3D 打印	102	7.2 长纤维增强金属基复合材料	192
5.2 金属基复合材料塑性成形	105	7.2.1 碳纤维增强铝基复合材料	193
5.2.1 塑性成形的力学基础	105	7.2.2 碳纤维增强镁基复合材料	195
5.2.2 轧制成形	106	7.2.3 碳纤维增强铝基复合材料	195
5.2.3 挤压成形	108	7.2.4 碳纤维增强银基复合材料	196
5.2.4 拉拔成形	110	7.2.5 碳纤维增强铜基复合材料	197
5.2.5 超塑性成形	111	7.2.6 碳纤维增强铅基复合材料	198
5.3 金属基复合材料连接技术	113	7.2.7 碳化硅纤维增强铝基复合材料 ...	198
5.3.1 连接方法及其特点	113	7.2.8 碳化硅纤维增强钛基复合材料 ...	199
5.3.2 不同连接技术的比较	118	7.2.9 纤维增强金属间化合物	200
5.3.3 新型连接技术	119	7.3 短纤维增强金属基复合材料	202
5.4 金属基复合材料机械加工	122	7.3.1 短纤维增强铝基复合材料	202
5.4.1 切削加工	123	7.3.2 短纤维增强锌基复合材料	204
5.4.2 磨削加工	136	7.3.3 短纤维增强镁基复合材料	205
本章思考题	142	7.4 晶须增强金属基复合材料	205
第6章 金属基复合材料的界面及其 表征	143	7.4.1 晶须增强铝基复合材料	205
6.1 界面的定义	143	7.4.2 晶须增强镁基复合材料	210
6.2 界面的特征	143	7.5 颗粒增强金属基复合材料	212
6.2.1 界面的结合机制	144	7.5.1 颗粒增强铝基复合材料	212
6.2.2 界面分类及界面模型	145	7.5.2 颗粒增强镁基复合材料	216
6.2.3 界面的物理化学特性	147	7.5.3 颗粒增强锌基复合材料	216
6.2.4 界面的稳定性	161	7.5.4 颗粒增强铜基复合材料	217
6.2.5 界面结构及界面反应	163	7.5.5 颗粒增强钛基复合材料	219
6.2.6 界面对性能的影响	166	7.6 混杂增强金属基复合材料性能	220
6.2.7 界面优化与界面反应控制	169	7.6.1 室温力学性能	220
6.3 金属基复合材料的界面设计	170	7.6.2 耐磨性能	221
6.3.1 界面结合特性设计	170	7.6.3 热物理性能	221
6.3.2 界面设计优化的系统工程	171	7.6.4 高温性能	222
6.3.3 计算机模拟在界面设计中的		7.7 内生增强金属基复合材料	222
		7.7.1 内生增强铝基复合材料	222

7.7.2 内生增强钛基复合材料	225	8.4 金属基复合材料疲劳损伤与失效	250
本章思考题	226	8.4.1 金属基复合材料疲劳损伤演化 ..	250
第8章 金属基复合材料的损伤与失效	228	8.4.2 疲劳寿命预测	256
8.1 金属基复合材料损伤与失效的		本章思考题	258
基本理论	228	第9章 金属基复合材料的应用	259
8.1.1 基体损伤模型	228	9.1 金属基复合材料的应用范围	259
8.1.2 增强体的失效准则	229	9.1.1 航天领域的应用	259
8.1.3 界面损伤模型	229	9.1.2 航空领域的应用	260
8.2 金属基复合材料的拉伸损伤及失效 ..	229	9.1.3 军工领域的应用	263
8.2.1 典型金属基复合材料的损伤		9.1.4 陆上交通领域的应用	265
分析	229	9.1.5 电子封装领域的应用	268
8.2.2 复合材料拉伸失效过程的发展		9.1.6 其他领域的应用	272
阶段	236	9.2 金属基复合材料的再生与回收利用 ..	274
8.2.3 组元物理化学相互作用的影响 ..	242	9.2.1 金属基复合材料的再生	274
8.3 金属基复合材料摩擦损伤与失效	246	9.2.2 金属基复合材料的回收	277
8.3.1 纤维增强金属基复合材料的		9.2.3 金属基复合材料应用的制约	
磨损	247	因素	277
8.3.2 颗粒增强金属基复合材料的		本章思考题	280
磨损	248	参考文献	281

第 1 章 绪 论

材料是社会进步的物质基础和先导，是人类进步的里程碑标志之一。近 40 年来，科学技术迅速发展，特别是尖端科学技术的突飞猛进，对材料性能提出越来越高、越来越严和越来越多的要求。在许多方面，传统的单一材料已越来越不能满足实际需要。复合材料 (Composites) 的出现是金属、陶瓷、高分子等单质材料发展和应用的必然结果，是各种单质材料研制和使用经验的综合，也是这些单质材料技术的升华。复合材料的兴起与发展极大地丰富了现代材料的家族，为人类社会的发展开辟了无限的想象和实现空间，也为材料科学与工程学的持续发展注入了强大的生机与活力。

先进复合材料 (Advanced Composites) 指的是在性能和功能上远远超出其单质组分性能和功能的一大类新材料，它们通常是在不同尺度、不同层次上结构设计和优化的结果，融会贯通了各种单质材料发展的最新成果，甚至产生了原单质材料根本不具备的全新的高性能与新功能。这种高性能与新功能的出现主要源于复杂的复合效应、界面效应、不同层次的尺度效应等，它们构成了现代复合材料科学的基础、研究热点与发展方向。

先进结构复合材料源于 20 世纪 50—60 年代航空、航天和国防等尖端技术领域的需求，今天它仍然是这些领域最富有研究潜力的战略性结构材料，并带动了整个工业技术的进步。图 1-1 所示为复合材料与单质材料的比强度与比模量的对比。复合材料因具有可设计性和性能优异等特点受到各发达国家的重视，因而发展很快，目前已开发出许多性能优良的先进复合材料，并在航空、航天、汽车、电子、建筑、医药、体育器材等领域获得重要应用，且应用前景极为广阔。因此，当今复合材料正处于快速发展、应用和更新的时代。

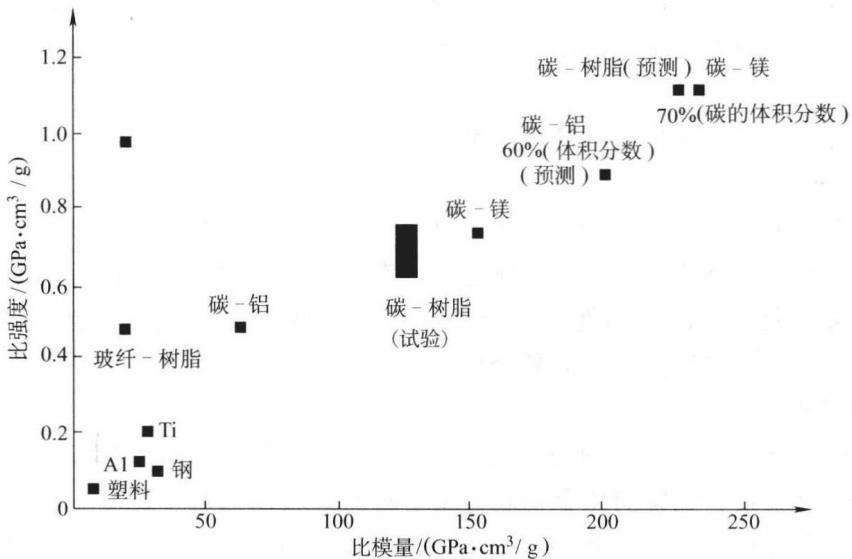


图 1-1 复合材料与单质材料的比强度与比模量的对比

1.1 金属基复合材料概述

为了提高金属材料的性能，人们通常采用调控材料微观组织结构和内部缺陷的合金化方法，即利用固溶强化、细晶强化、弥散强化和形变强化等强化机制，围绕如何提高金属材料的强韧性等力学性能开展研究，以满足不同场合的应用需求。虽然上述方法有效地提高了金属材料的性能，但是，这些方法实际上并不改变材料的本征特性（如材料的刚度和密度等），导致其提高金属材料综合性能的效果受到局限。为进一步满足高科技领域和新兴产业对高性能金属材料的迫切需求，金属复合化成为提高金属综合性能的重要方法，其主要思路是在金属基体中有目的地引入纤维、晶须、颗粒等具有结构或功能特性的“增强体/功能体”，在利用组分材料本征性能的基础上，通过组分分布调控、界面控制等方式调节不同组分之间的协同耦合效应、界面效应，从而提高材料的综合性能。基于此，金属基复合材料（Metal Matrix Composites, MMCs）在航天、航空、电子、能源、交通等重大工程领域的应用日益广泛。

金属基复合材料是以连续长纤维、短纤维、晶须及颗粒等为增强材料，以金属（如铝、镁、钛、镍、铁、铜、钴等）或其合金为基体材料，通过合适的工艺制备而得。金属基复合材料的起源要追溯到1963年，美国国家航空航天局（NASA）成功制备了钨丝增强铜基复合材料，以此为标志，人类开辟了金属基复合材料的时代。由于具有高比强度、高比模量、耐高温、耐磨损以及热膨胀系数小、尺寸稳定性好等优异的力学性能和物理性能，并克服了高分子复合材料常见的老化现象以及在高真空条件下释放小分子的缺点，解决了树脂基复合材料在宇航领域使用时存在的问题，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。自20世纪80年代初，日本丰田汽车将陶瓷纤维增强铝基复合材料用于制造发动机活塞以来，金属基复合材料在工业界获得了飞速发展，且在20世纪80年代末期出现了一系列新的复合材料制备技术。迄今为止，金属基复合材料已在航空航天、军事领域及汽车、电子仪表等行业中显示出了巨大的应用潜力。但是，金属基复合材料由于强化理论、材料设计、制备加工等不够完善，还没有形成大规模工业化应用，因此仍是当前研究和开发的热点。

金属基复合材料种类繁多，有各种分类方式，可归纳为以下四种：

1. 按用途分类

(1) 结构复合材料 比强度高、比模量高、尺寸稳定性好、耐高温等是其主要性能特点。结构复合材料用于制造各种航天、航空、汽车、先进武器系统等高性能结构件。

(2) 功能复合材料 高导热性、高导电性、低膨胀系数、高阻尼、高耐磨性等物理性能的优化组合是其主要特性。功能复合材料用于电子、仪器、汽车等工业。

2. 按基体分类

按基体不同，金属基复合材料分为铝基、镁基、锌基、铜基、钛基、铅基、镍基、铁基、钴基、耐热金属基、金属间化合物基等复合材料。目前铝基、镍基、钛基复合材料的发展比较成熟，已在航空、航天、电子、汽车等工业中应用。下面将对铝基、镍基、钛基复合材料进行简要介绍。

(1) 铝基复合材料 铝基复合材料是在金属基复合材料中应用最广泛的一种。由于铝

合金基体为面心立方结构，因此具有良好的塑性和韧性，再加上它所具有的加工性好、工程可靠性高及价格低廉等优点，为其在工程应用中创造了有利的条件。

在制造铝基复合材料时通常并不是使用纯铝，而是用各种铝合金。这主要是由于与纯铝相比，铝合金具有更好的综合性能，至于选择何种铝合金做基体，则往往根据实际中对复合材料的性能需要来决定。

(2) 镍基复合材料 镍基复合材料是以镍或镍合金为基体制造的。由于镍的高温性能优良，因此这种复合材料主要是用于制造高温下工作的零部件。人们研制镍基复合材料的一个重要目的，即希望用它来制造燃气轮机的叶片，从而进一步提高燃气轮机的工作温度。但目前由于制造工艺及可靠性等问题尚未解决，因此还未能取得满意的结果。

(3) 钛基复合材料 钛比任何其他结构材料都具有更高的比强度。此外，钛在中温时比铝合金能更好地保持强度。因此，对飞机结构来说，当速度从亚音速提高到超音速时，钛显示出了比铝合金更大的优越性。随着速度的进一步加快，还需要改变飞机的结构设计（如采用更细长的机翼和其他翼型），为此需要高刚度的材料，而纤维增强钛合金可满足这种对材料刚度的要求。

钛基复合材料中最常用的增强体是硼纤维，这是由于钛与硼的线胀系数比较接近，见表 1-1。

表 1-1 基体和增强体的线胀系数

基体	线胀系数/ 10^{-6}K^{-1}	增强体	线胀系数/ 10^{-6}K^{-1}
铝	23.9	硼	6.3
钛	8.4	涂 SiC 的硼	6.3
铁	11.7	碳化硅	4.0
镍	13.3	氧化铝	8.3

3. 按增强体形态分类

(1) 连续纤维增强金属基复合材料 连续纤维增强金属基复合材料是指利用高强度、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而形成的高性能复合材料。通过对基体、纤维类型、纤维排布、含量、界面结构的优化设计组合，可获得各种高性能。在连续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，增强基体金属的效果明显。基体金属主要起固定纤维、传递载荷、部分承载的作用。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。沿纤维轴向（纵向）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、含量、分布等，制造过程难度大，制造成本高。

(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。增强体在基体中随机分布，其性能是各向同性。非连续增强体的加入，明显提高了金属的耐磨性、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。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、真空压力浸渗等方法制造，并可用铸造、挤压、锻造、轧制、旋压等加工方法成形，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。

(3) 层状复合材料 层状复合材料是指在韧性和成形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的和均匀的。这类复合材料是结构复合材料，因此不包括各种包覆材料。

由于薄片增强的强度不如纤维增强相高，因此层状复合材料的强度受到了限制。然而，在增强平面的各个方向上，薄片增强体对强度和模量都有增强效果，它与纤维单向增强的复合材料相比具有明显的优越性。

由于层状复合材料已有相关专业书籍论述，本书不进行详细论述。

4. 按增强体来源分类

(1) 外加增强金属基复合材料 外加增强金属基复合材料是指借助于一定的工艺手段（粉末冶金、挤压铸造、搅拌铸造等）将事先准备好的增强体引入金属基体而制备的复合材料。

(2) 自生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）是指在金属基体内通过反应、定向凝固等途径生长出颗粒、晶须、纤维状增强体，从而形成的金属基复合材料。下面简单介绍原位反应自生增强金属基复合材料。

金属基复合材料原位反应自生技术的基本原理是在一定条件下，通过元素之间或元素与化合物之间的化学反应，在金属基体内原位生成一种或几种高硬度、高弹性模量的增强体，从而达到强化金属基体的目的。与其他类型的金属基复合材料相比，原位反应自生增强金属基复合材料具有以下特点：

1) 增强体是从金属基体中原位形核、长大的热力学稳定相，因此，增强体表面无污染，避免了与基体相容性不良的问题，且界面结合强度高。

2) 通过合理选择反应元素（或化合物）的类型、成分及其反应性，可有效地控制原位生成增强体的种类、大小、分布和数量。

3) 省去了增强体单独合成、处理和加入等工序，因此，其工艺简单，成本较低。

4) 从液态金属基体中原位形成增强体的工艺，可用铸造方法制备形状复杂、尺寸较大的近净成形构件。

5) 在保证材料具有较好的韧性和高温性能的同时，可较大幅度地提高材料的强度和弹性模量。

1.2 金属基复合材料特性

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

1. 比强度和比模量高

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，特别是高性能连续纤维——硼纤维、碳（石墨）纤维、碳化硅纤维等增强体，具有很高的强度和模量。密度只有 1.85g/cm^3 的碳纤维的

最高强度可达到 7000MPa，比铝合金的强度高出 10 倍以上，石墨纤维的最高模量可达 91GPa；硼纤维、碳化硅纤维的密度为 $2.5 \sim 3.4\text{g/cm}^3$ ，强度为 3000 ~ 4500MPa，模量为 350 ~ 450GPa。加入 30% ~ 50%（体积分数）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的比强度和比模量。图 1-2 所示为典型的金属基复合材料与基体金属性能的比较。

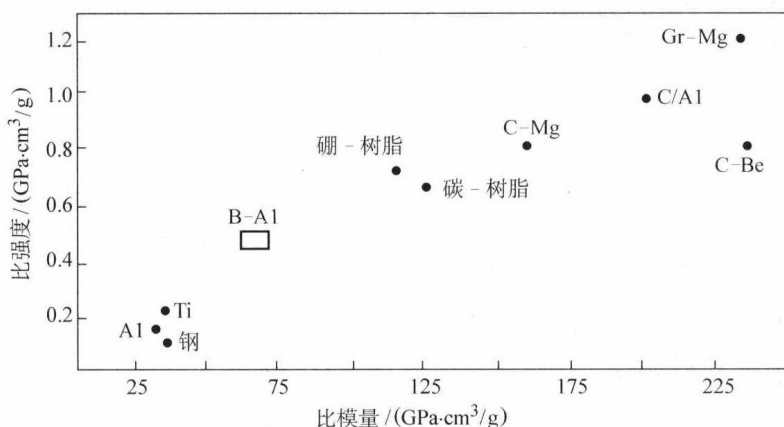


图 1-2 典型的金属基复合材料与基体金属性能的比较

用高比强度、比模量复合材料制成的构件自重轻，刚性好，强度高，是航天、航空技术领域理想的结构材料。

2. 导热性和导电性良好

金属基复合材料中金属基体占有很大的体积分数，一般在 60% 以上，因此仍保持金属所特有的良好导热性和导电性。良好的导热性可以有效地传热、散热，减小构件受热后产生的温度梯度，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。良好的导电性可以防止飞行器构件产生静电聚集的问题。

在金属基复合材料中采用高导热性的增强体还可以进一步提高金属基复合材料的热导率，使复合材料的热导率比金属基体还高。为了解决高集成度电子器件的散热问题，现已研究成功的超高模量石墨纤维，金刚石纤维，金刚石颗粒增强铝基、铜基复合材料的热导率比纯铝、铜还高，用它们制成的集成电路底板和封装件可迅速地散热，提高了集成电路的可靠性。

3. 热膨胀系数小，尺寸稳定性好

金属基复合材料中所用的增强体（如碳纤维、碳化硅纤维、晶须、颗粒、硼纤维等）既具有很小的热膨胀系数，又具有很高的模量，特别是高模量、超高模量的石墨纤维具有负的热膨胀系数。加入相当含量的此类增强体不仅可大幅度提高材料的强度和模量，也可使其热膨胀系数明显下降，并可通过调整增强体的含量获得不同的热膨胀系数，以满足各种工况要求。例如，石墨纤维增强镁基复合材料，当石墨纤维体积分数达到 48% 时，复合材料的热膨胀系数为零，即在温度变化时使用这种复合材料做成的零件不会发生热变形，这对太空环境下使用的构件来说特别重要。

通过选择不同的基体金属和增强体，以一定的比例复合在一起，可得到热膨胀系数小、尺寸稳定性好的金属基复合材料。

4. 高温性能良好

由于金属基体的高温性能很高，纤维、晶须、颗粒等增强体在高温下又都具有很高的强

度和模量，因此金属基复合材料比金属基体具有更高的高温性能。特别是连续纤维增强金属基复合材料，其中的纤维起着主要承载作用，纤维强度在高温下基本不下降，复合材料的使用温度可接近金属熔点，并比金属基体的高温性能高许多。例如，钨丝增强耐热合金 1100℃、100h 高温持久强度为 207MPa，而基体合金的高温持久强度只有 48MPa；又如石墨纤维增强铝基复合材料在 500℃ 高温下仍具有 600MPa 的高温强度，而铝基体在 300℃ 时强度已下降到 100MPa 以下。因此金属基复合材料被选用在发动机等高温零部件上，可大幅度提高发动机的性能和效率。总之，金属基复合材料做成的构件比金属材料、聚合物基复合材料构件更能适应高温条件。

5. 耐磨性好

金属基复合材料，尤其是陶瓷纤维、晶须、颗粒增强金属基复合材料具有很好的耐磨性，这是因为在基体金属中加入了大量的高耐磨增强体，特别是细小的陶瓷颗粒。陶瓷材料硬度高，耐磨，化学性质稳定，用它们来增强金属不仅提高了材料的强度和刚度，也提高了复合材料的硬度和耐磨性。图 1-3 所示为碳化硅颗粒增强铝基 (SiC_p/Al) 复合材料与基体材料 (A356-T6) 和铸铁的耐磨性比较，可见 SiC_p/Al 复合材料的耐磨性比铸铁还好，比基体金属高出几倍。

SiC_p/Al 复合材料的高耐磨性在汽车、机械工业中有重要应用前景，可用于汽车发动机、制动盘、活塞等重要零件，能明显提高零件的性能和寿命。

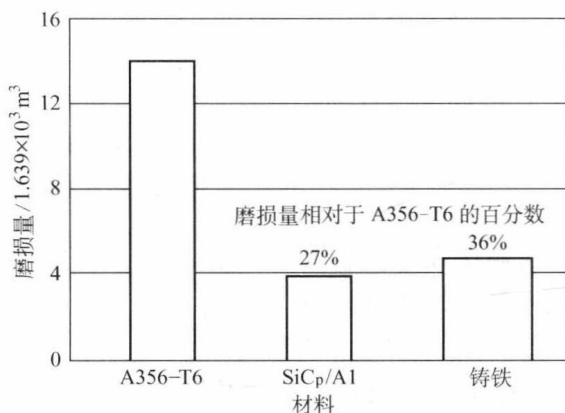


图 1-3 SiC_p/Al 复合材料与 A356-T6 和铸铁的耐磨性比较

6. 疲劳性能和断裂韧性良好

金属基复合材料的疲劳性能和断裂韧性取决于纤维等增强体与金属基体的界面结合状态，增强体在金属基体中的分布以及金属、增强体本身的特性，特别是界面结合状态，最佳的界面结合状态既可有效地传递载荷，又能阻止裂纹的扩展，提高材料的断裂韧性。据美国宇航公司报道，C/Al 复合材料的疲劳强度与抗拉强度比为 0.7 左右。

7. 不吸潮，不老化，气密性好

与聚合物相比，金属的性质稳定，组织致密，不存在老化、分解、吸潮等问题，不会发生性能的自然退化，也不会在使用过程中分解出低分子物质污染仪器和环境，因此，金属基复合材料相对于聚合物基复合材料有明显的优越性。

总之，金属基复合材料所具有的比强度高、比模量高、耐磨损、耐高温、热膨胀系数小、尺寸稳定性好、导热性、导电性良好等优异的综合性能，使其在航天、航空、电子、汽车、先进武器系统中均具有广阔的应用前景，将对装备性能的提高发挥巨大作用。

1.3 金属基复合材料发展前沿及趋势

金属与碳纤维、陶瓷纤维、颗粒等增强体的复合集成了不同组元的模量、强度、导热、热膨胀以及耐磨性等方面的优势，因而，金属基复合材料已成为复合材料中重要的体系之

一。其研究前沿和发展总趋势是创新复合结构理论,设计新型复合材料,研发制备加工新技术,调控优化微观结构,提高综合性能,拓展应用领域。然而,金属基复合材料的发展也面临严峻的挑战:一方面,增强体的综合增强效率偏低,复合材料的某些单项指标尚不能与高性能单体材料抗衡;另一方面,大量增强体的添加导致复合材料塑韧性和工艺性变差。

近年来,航空、航天、国防装备、工业设备、汽车、轨道交通和体育休闲等产业的快速发展,对材料组织和性能提出了越来越高的要求,推动了金属基复合材料的发展,相关的新理论、新体系、新工艺不断涌现。

1.3.1 金属基复合材料结构理论的发展

金属基复合材料的性能不仅取决于基体和增强体的种类和配比,更取决于增强体在基体中的空间配置模式(形状、尺寸、连接形式和对称性)。传统的金属基复合材料的结构和功能都相对简单,而高科技发展日益要求复合材料能够满足高性能化和多功能化的挑战,因此新一代金属基复合材料必然朝着“结构复杂化”的方向发展。近年来理论分析和试验结果都表明,在微观或介观尺度上人为调控组分的空间配置模式,从而进一步发掘金属基复合材料的性能潜力,实现性能指标的最优化配置,是金属基复合材料研究发展的重要方向。

1. 复合材料结构的超细化

复合材料结构的超细化主要包括增强体超细化和基体超细化。纳米增强体(通常尺寸小于100nm)可与基体合金中的位错、亚结构产生较强的交互作用,因此其对基体的强化作用更加多样化。首先,纳米增强体可以与位错交互作用产生Orowan强化,这种机制在纳米颗粒增强复合材料中比较显著。其次,纳米增强体与基体之间的热膨胀系数差异,会导致产生热残余应力,从而诱发位错增殖。此外,增强体与基体之间的弹性模量差异在材料非线性变形时也会诱发位错,这些位错均导致屈服强度的增加。纳米颗粒可以产生表面效应、小尺寸效应、量子尺寸效应、量子隧道效应,从而赋予金属材料本身不具备的物理和功能特性。此外,相对传统的粗晶基体复合材料,超细晶基体复合材料强度优势明显,然而单纯基体超细化会导致伸长率极低($\approx 1\%$),添加少量纳米颗粒可以阻碍基体的应变软化,改善材料应变硬化能力和塑性。近年来国内外研究人员制备出许多金属基纳米复合材料,例如,1% (体积分数,下同) 15nm $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}$ 复合材料的抗拉强度具有15% $3.5\mu\text{m}$ SiC_p/Al 复合材料的强度,同时,屈服强度比后者显著提高,且蠕变强度高出后者两个数量级。经过T4热处理后,1% 400nm $\text{SiC}_p/\text{Al2024}$ 复合材料的强度和塑性明显优于15% $10\mu\text{m}$ $\text{SiC}_p/\text{Al2024}$ 复合材料,特别是前者的屈服强度为447MPa,是后者的1.6倍。

2. 多元/多尺度复合材料结构理论

将不同种类(如TiB和TiC混杂增强金属基复合材料)、不同形态(如晶须和颗粒混杂增强金属基复合材料)或不同尺度(例如双峰SiC颗粒增强金属基复合材料)的增强相引入基体,利用多元增强体本身物性参数的不同,通过相与相以及相界面与相界面之间的耦合作用呈现出比单一增强体复合条件下更好的性能,是一种新的金属基复合材料设计与制备的理念。近年来形成了纤维/颗粒混杂、颗粒/颗粒混杂、晶须/颗粒混杂、短纤维(晶须)/短纤维混杂、大尺寸/小尺寸颗粒混杂、碳纳米管与颗粒混杂等多种类型的金属基复合材料。例如借助搅拌摩擦加工的剧烈塑性变形和机械激活作用制备的纳米+微米级 Al_2O_3 、 Al_3Ti 原位颗粒增强铝基复合材料,增强相总体积分数可达20%~40%,得益于细晶强化、Orowan强

化、载荷传递等不同强化作用，复合材料弹性模量可达 95GPa，强度比基体合金提升 2 倍以上，综合性能更佳。向大长径比的短纤维或晶须增强复合材料中添加少量纳米颗粒，可充分发挥纳米增强复合材料优异的耐高温蠕变性能，复合材料整体蠕变性能可提高近一个数量级，这得益于载荷传递机制和纳米颗粒对位错的钉扎等共同强化作用。

3. 复合材料微结构的构型化理论

随着金属强韧化理论的发展，微观组织非均质构型为金属强韧化带来新思路，这种思想也推动了金属基复合材料的强韧化发展。传统的复合材料设计理念要求增强相在基体中均匀分布，以实现材料的强韧化，非均质构型则通过合理控制复合材料各组分的空间分布，调控材料结构在空间上的不均匀性，最终实现复合材料强韧化。近年来非均质构型设计获得丰富的研究成果，形成了包括岛状、双峰、多峰、层状、多芯、网络等多种复合构型。

将非连续增强金属基复合材料分为增强体颗粒富集区（脆性区）和一定数量、一定尺寸、不含增强体的基体区（韧性区），这些纯基体区域作为韧化相将会具有阻止裂纹扩展、吸收能量的作用，从而使金属基复合材料的损伤容限得到提高。与传统的均匀分散的金属基复合材料相比，这种新型的复合材料具有更好的塑性和韧性。例如，类似贝壳仿生叠层的 1.5% 碳纳米管增强纯铝复合材料，其伸长率比碳纳米管均匀随机排布的复合材料提高了近一倍，而强度也提高了 10%；原位自生反应形成的蜂窝状（或网状）分布的 TiB 晶须，使得复合材料的强度、塑性、韧性及高温性能全面超越了均匀分布结构。

1.3.2 新型金属基复合材料

随着科学技术的发展，对金属材料的使用要求不再局限于力学性能，而是要求在多场合服役条件下具有结构功能一体化和多功能响应的特性。随着科技进步，出现了许多新型金属基复合材料，如自润滑金属基复合材料、纳米碳增强金属基复合材料、泡沫金属基复合材料、高阻尼金属基复合材料、低膨胀金属基复合材料和高效热管理金属基复合材料等。

1. 自润滑金属基复合材料

自润滑金属基复合材料是指采用粉末冶金、铸造、半固态成形、浸渗等方法，将固体润滑剂加入到金属基体中形成的复合材料，该类材料既保留了基体金属的性质，也被赋予了固体润滑剂优良的性能。在摩擦、磨损过程中，表面发生物理、化学反应形成润滑膜，以降低摩擦表面间的摩擦力或其他形式的表面破坏作用。目前，研究和应用广泛的固体自润滑复合材料主要有铜基、铝基、镍基、银基和铁基复合材料等，而常用的固体润滑剂主要分为以下四类：①软金属润滑剂，如 Ag、Pb 等，通常对于这类润滑剂采用表面技术等方法在摩擦材料表面形成润滑膜，以提高材料的摩擦、磨损性能，该类润滑剂经济性较差，且对材料润滑性能提高有限；②陶瓷固体润滑剂，如 Al_2O_3 、TiC 等，该类材料具有较大的硬度、刚度和较好的化学稳定性，适用于制备高强度的金属基自润滑复合材料；③石墨润滑剂，石墨润滑剂具有优异的润滑性能，在各类润滑领域受到广泛的关注和大量深入的研究，由于石墨与各类金属基体之间的润湿性较差，制备石墨/金属自润滑材料通常需要将石墨进行金属化改性，以改善两者之间的润湿性；④金属陶瓷固体润滑剂，如 Ti_3AlC_2 、 Ti_3SiC_2 等，金属陶瓷材料兼具金属和非金属陶瓷的特性，既能与各类金属基体保持良好的润湿性，又具有类似石墨的优异的润滑性能，是近年来研究的热点。

2. 纳米碳增强金属基复合材料

纳米碳材料以优异的刚度、强度和功能特性为特征，相比陶瓷，其力学性能和物理性能具有革命性的超越，是制备金属基复合材料最为理想的增强体之一，少量添加有望使金属的力学、热学、电学等物理性能获得显著增强。目前，金属基复合材料领域常用的纳米碳增强体主要有碳纳米管（Carbon Nanotubes, CNTs）和石墨烯（Graphene, Gr）。将它们与金属基体复合，有望在宏观上发挥这些材料的优异性能，获得很高的增强效率和增强效果。仅仅 2%（质量分数）的结构完好、界面结合良好、均匀分散的碳纳米管就可以使铝基复合材料的强度提高 200MPa，模量约提高 20GPa，还能保持材料较好的断裂应变。二维形态的石墨烯在铝基复合材料中展现出很高的增强效率，仅 0.3%（质量分数）就能将铝基复合材料的强度提高约 100MPa，这种增强效率甚至优于碳纳米管。近年来，随着纳米碳材料的宏量制备及其价格的一路降低，纳米碳增强金属基复合材料日渐成为研究的焦点，Al、Cu、Mg、Ti、Fe 等基体都有涉及，Al 基和 Cu 基的研究相对更集中。总体来说，高性能纳米碳增强金属基复合材料的研究正处于一个快速发展时期，相关研究和生产还不成熟：一是纳米碳很难均匀分散；二是纳米碳很难与金属基体形成有效的界面结合。目前所制备的纳米碳增强金属基复合材料的性能提高并不是很大，特别是在力学性能方面，远没有达到理想值。

3. 泡沫金属基复合材料

泡沫金属基复合材料是近年发展起来的一种结构功能材料。作为结构材料，它具有轻质和高比强度的特点；作为功能材料，它具有多孔、减振、阻尼、吸声、散热、吸收冲击能、电磁屏蔽等多种物理性能。由于其满足了结构材料轻质、多功能化及众多高技术的需求，已经成为交通、建筑、航空及航天等领域的研究热点。目前研究较多的是泡沫铝基、镁基复合材料，大致可分为两个范畴：一是泡沫本身是含有增强体的金属基复合材料；二是泡沫虽然由金属基体构成，但在其孔洞中引入黏弹性体、吸波涂料等功能组分。泡沫金属基复合材料（开孔和闭孔）的制备方法很多，目前应用较多的有直接吹气法、熔体发泡法和粉体发泡法等。直接吹气法是首先向金属液中加入增黏剂，以提高金属液的黏度，然后向熔体中吹入气体（如空气、氢气和氮气），气体滞留在金属液中，待温度下降之后形成孔隙。熔体发泡法是利用发泡剂受热在高温下分解、释放出气体，滞留于熔体中，凝固后成为泡沫金属基复合材料。粉体发泡法是将金属粉末与发泡剂充分混合，然后压制得到密实的半成品，进一步在接近基体金属熔点附近的温度进行热处理，发泡剂分解释放的气体导致压实体膨胀，形成高度多孔的结构。DST 公司和纽约大学共同研发了碳化硅空心颗粒增强的镁合金基复合材料，其密度低于水，仅为 $0.92\text{g}/\text{cm}^3$ ，同时这种材料的强度也足以应对严苛的海洋环境。单个球体的壳体在破碎前能够承受超过 1723MPa 的压力，这大约是消防软管可以承受的最大压力的 100 倍。

1.3.3 金属基复合材料制造新技术

金属基复合材料的性能在很大程度上受到制备工艺的影响，对于具有相同材料组分和含量的体系，采用不同的制备工艺，最终得到的复合材料的微观组织和性能往往存在明显的差异。为了进一步改善复合材料的组织和性能，国内外研究人员不断对复合材料制造技术进行改进，形成了增材制造、微波烧结、等径角挤压、搅拌摩擦加工等一系列新技术。

1. 增材制造技术

增材制造 (Additive Manufacturing, AM) 技术是一项综合了数字建模、机电控制、材料科学等多个领域的新兴技术, 其发展迅猛, 被誉为“具有第三次工业革命重要标志意义”的制造技术。增材制造技术通过计算机辅助设计三维立体构型 (3D-CAD), 结合快速成型 (Rapid Prototyping, RP) 技术将材料逐层叠加起来, 最后形成三维物体。根据所利用的热源不同, 金属基复合材料增材制造主要分为激光、电子束、电弧束和金属固相增材制造技术等。增材制造打破了传统制造方式模具的限制, 复合材料产品形状的复杂程度对加工难度几乎没有影响, 实现了实体的高自由度近净成形; 对于复合材料的性能而言, 增材制造过程中冷却速度极快, 可以减少或避免基体和增强体之间的界面反应, 极大地细化基体晶粒, 从而提高材料的塑性、强度及耐蚀性能。

2. 微波烧结技术

微波烧结是指采用微波辐射来代替传统的外加热源, 材料通过自身对电磁场能量的吸收 (介质损耗) 达到烧结温度而实现致密化的过程。与常规烧结相比, 微波烧结具有烧结速度快、高效节能以及改善材料组织、提高材料性能等一系列优点, 被誉为“21 世纪新一代烧结技术”。由于材料可内外均匀、快速地整体吸收微波能并被加热, 不会引起试样开裂或在试样内形成热应力, 更重要的是快速烧结可使材料内部形成均匀的细晶结构和较高的致密性, 从而改善了复合材料性能。同时, 由于材料内部不同组分对微波的吸收程度不同, 因此可实现有选择性烧结, 从而制备出具有新型微观结构和优良性能的复合材料。E. Breval 等人对比了微波烧结与传统烧结制备的 WC/Co 复合材料的组织, 发现在相同温度下, 微波烧结的试样晶粒更细小, 试样中的 Co 分布更加均匀。中国科学技术大学基于同步辐射 CT 技术研究 Al-SiC 混合粉末烧结过程, 证明烧结体系中加入合适的陶瓷颗粒可以提高热效率, 加快烧结过程。

3. 等径角挤压技术

等径角挤压 (Equal Channel Angular Pressing, ECAP) 是在一个特制的模具中进行的, 如图 1-4 所示, 在压力的作用下, 试样从模具的上端压入, 右端压出, 在挤压的过程中, 与模具中的上下通道紧密配合且与管壁良好润滑。试样在通过通道的交叉处时, 经受了近似理想的纯剪切变形而横截面不发生改变。等径角挤压与传统的剧烈塑性加工工艺相比具有以下优点: 能够使挤压材料承受很高的塑性应变, 同时不改变样品横截面面积, 并不会产生破坏; 经多道次挤压后试样的组织均匀性得到提高; 可通过热加工与动态回复、动态再结晶达到晶粒细化。随着金属基复合材料在工程中应用逐渐增多, 近年来人们开始采用等径角挤压这一近似纯剪切变形技术来进一步改善金属基复合材料的显微组织及力学性能, 使其更好地满足实际应用需要。例如, 经过四道次等径角挤压变形后, 碳纳米管/AZ31 镁基复合材料晶粒平均直径尺寸达到约 $2\mu\text{m}$, 伸长率明显提高。

4. 搅拌摩擦加工技术

搅拌摩擦加工 (Friction Stir Processing, FSP) 技术是基于搅拌摩擦焊接 (Friction Stir Welding, FSF) 技术发展而成的材料改性技术。其基本思想是利用旋转搅拌针在加工区产生的摩擦热和机械力作用使材料发生剧烈塑性变形、混合、破碎, 实现微观组织的细化、均

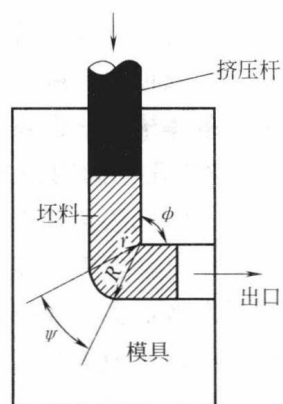


图 1-4 等径角挤压原理