



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 金属基复合材料

赵玉涛 戴起勋 陈刚 ○ 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

TB323/12

2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 金属基复合材料

主编 赵玉涛 戴起勋 陈刚  
主审 孙国雄 陶杰

机械工业出版社

随着科学技术的进步,对材料性能的要求不断提高,因此复合材料的发展与应用受到国内外的关注,而“金属基复合材料”又是现代复合材料的一个重要分支。

本教材《金属基复合材料》给出了金属基复合材料的体系和框架,分别论述了增强体材料,金属基复合材料的设计、制造技术、加工成形、界面及特征、性能,损伤与失效,应用与发展趋势。其内容新颖,具有系统性和实用性,反映了国内外的科研新成果。

本教材可作为高等教育材料类专业本科生使用,也可作为研究生的参考教材及从事材料工作技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

金属基复合材料/赵玉涛等主编. —北京:机械工业出版社, 2007.6  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-111-21477-9

I. 金… II. 赵… III. 金属复合材料—高等学校—教材 IV. TB331

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第067295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:董连仁 版式设计:霍永明  
责任校对:刘志文 封面设计:王伟光 责任印制:洪汉军  
北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市明辉装订厂装订)  
2007年8月第1版第1次印刷  
184mm×260mm·15印张·368千字  
标准书号:ISBN 978-7-111-21477-9  
定价:23.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
销售服务热线电话:(010) 68326294  
购书热线电话:(010) 88379639、88379641、88379643  
编辑热线电话:(010) 88379715  
封面无防伪标均为盗版

# 前 言

随着各种科学技术的发展,对材料性能的要求也不断提高。复合材料具有许多优异的性能,所以材料的复合化是材料发展的必然趋势之一。现在复合材料已经与金属材料、无机材料、有机高分子材料并列成为四大主要材料。

复合材料是由两种或两种以上物理和化学性质不同的物质以一定的制备方法组合而成的一种多体材料。金属基复合材料是以金属及其合金为基体,与一种或几种金属或非金属增强体人工结合而成的复合材料。金属基复合材料与聚合物基复合材料、陶瓷基复合材料以及碳/碳复合材料一起构成现代复合材料体系。

全国设置材料类专业或学科的高校很多,虽然学科、专业的名称是相同的,但是在不断改革的共同趋势下,各校的培养计划和设置方向或侧重点不尽相同。结合学科专业的发展,各校都开设了一些新课程,如功能材料、复合材料、纳米材料与技术等课程。

编者在金属基复合材料的科学研究和技术开发方面已取得了较显著的成果,先后承担国家自然科学基金、教育部科学技术重点基金、江苏省“十五”科技攻关、江苏省重大科技成果转化等十余项,特别是在原位合成颗粒增强铝基复合材料方面的研究成果已经产业化,取得了显著的社会效益和经济效益。并且作者在复合材料的课程教学中也已积累了多年的经验,在教学过程中不断地整改内容和凝炼思路,形成了一定的体系和特点。编写本书的基础是:在参考现有有关复合材料著作教材的基础上,结合自己的研究成果和多年的教学经验,设计了现在的金属基复合材料的体系和框架。其特点是:内容的新颖性,结构的系统性和教学的实用性。如第4章新型制造技术中的原位合成技术;第7章金属基复合材料的性能方面均介绍了国内外最新技术和成果。本书的结构是以材料设计——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,系统性较强。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,也是江苏省金属材料工程品牌专业和江苏省材料成形与控制特色专业建设的重要内容之一。本书第1、2、4、5、6、9章由江苏大学赵玉涛教授编写,第3章由戴起勋教授编写,第7章由陈刚教授编写,第8章由林东泽老师编写。全书由赵玉涛教授统稿,由东南大学孙国雄教授和南京航空航天大学陶杰教授主审。本书在编写过程中参考了许多文献资料,主要文献列于书后,在此谨向所有参考文献的作者诚致谢意。另外,孙洪强、苏大为、许可等研究生承担了部分文稿的打印等工作,机械工业出版社对本书的出版付出了辛勤的劳动,在此一并表示衷心的感谢。

本教材的教学学时可设定为30h,根据各校不同的情况,可有重点地组织教学内容。该教材不但是材料类各本科专业的教材,也可以作为研究生参考教材和从事材料工作技术人员的参考书。限于作者水平,书中难免有误,恳请同行和读者批评指正,以利于今后的补充、修改和完善。

编 者

# 目 录

## 前言

## 第 1 章 绪论 ..... 1

- 1.1 复合材料的定义与分类 ..... 2
- 1.2 金属基复合材料概述 ..... 3
- 1.3 金属基复合材料特性 ..... 5

## 第 2 章 增强体材料 ..... 8

- 2.1 增强体的分类 ..... 9
  - 2.1.1 纤维类增强体 ..... 9
  - 2.1.2 颗粒类增强体 ..... 9
  - 2.1.3 晶须类增强体 ..... 9
  - 2.1.4 其他增强体 ..... 10
- 2.2 纤维类增强体 ..... 11
  - 2.2.1 碳纤维 ..... 11
  - 2.2.2 硼纤维 ..... 13
  - 2.2.3 碳化硅纤维 ..... 14
  - 2.2.4 氧化铝纤维 ..... 17
- 2.3 晶须及颗粒类增强体 ..... 20
  - 2.3.1 晶须增强体 ..... 20
  - 2.3.2 颗粒增强体 ..... 22
- 2.4 金属丝 ..... 22

## 第 3 章 金属基复合材料的设计 ..... 24

- 3.1 金属基复合材料的可设计性 ..... 24
  - 3.1.1 复合材料的可设计性 ..... 24
  - 3.1.2 复合材料设计的研究方法 ..... 25
  - 3.1.3 复合材料的虚拟设计 ..... 27
- 3.2 金属基复合材料的基体选择 ..... 28
  - 3.2.1 选择基体的原则 ..... 29
  - 3.2.2 结构件金属基复合材料的基体 ..... 30
  - 3.2.3 功能件金属基复合材料的基体 ..... 33
- 3.3 金属基复合材料的增强体选择 ..... 33
  - 3.3.1 连续纤维 ..... 33
  - 3.3.2 晶须 ..... 34
  - 3.3.3 颗粒 ..... 35
- 3.4 金属基复合材料的界面设计 ..... 35
  - 3.4.1 界面的特征与设计 ..... 35
  - 3.4.2 界面优化设计的系统工程 ..... 36
- 3.5 金属基功能复合材料的设计特点 ..... 37

- 3.5.1 功能复合材料调整优值的途径 ..... 38
- 3.5.2 利用复合效应创造新型功能复合材料 ..... 39
- 3.6 金属基复合材料的力学性能设计 ..... 40
  - 3.6.1 连续纤维增强复合材料的力学性能设计 ..... 40
  - 3.6.2 纤维增强金属基复合材料的特点 ..... 45
  - 3.6.3 短纤维及颗粒增强金属基复合材料 ..... 47
  - 3.6.4 复合材料的结构设计 ..... 52
- 3.7 金属基复合材料的物理性能设计 ..... 52
  - 3.7.1 有效弹性模量 ..... 52
  - 3.7.2 热膨胀系数 ..... 54
  - 3.7.3 热防护梯度功能材料的设计 ..... 56
  - 3.7.4 阻尼特性 ..... 58

## 第 4 章 金属基复合材料的制造技术 ..... 60

- 4.1 概述 ..... 60
  - 4.1.1 金属基复合材料制造方法的分类 ..... 60
  - 4.1.2 制造技术应具备的条件 ..... 60
  - 4.1.3 金属基复合材料制造的关键性技术 ..... 61
- 4.2 固态制造技术 ..... 61
  - 4.2.1 粉末冶金技术 ..... 61
  - 4.2.2 热压和热等静压技术 ..... 62
  - 4.2.3 热轧、热挤压和热拉拔技术 ..... 64
  - 4.2.4 爆炸焊接技术 ..... 64
- 4.3 液态制造技术 ..... 65
  - 4.3.1 真空压力浸渍技术 ..... 65
  - 4.3.2 挤压铸造技术 ..... 66
  - 4.3.3 液态金属搅拌铸造技术 ..... 67
  - 4.3.4 液态金属浸渍技术 ..... 69
  - 4.3.5 共喷沉积技术 ..... 71
  - 4.3.6 原位自生成技术 ..... 72
- 4.4 表面复合技术 ..... 81
  - 4.4.1 物理气相沉积技术 ..... 81

4.4.2	化学气相沉积技术 .....	81	6.3.3	界面强度的表征 .....	145
4.4.3	热喷涂技术 .....	82	6.3.4	界面残余应力的测定 .....	147
4.4.4	电镀、化学镀和复合镀技术 .....	83	6.3.5	界面结构的高分辨观察及其原子 模拟 .....	148
4.5	金属基复合材料制造技术的发展 趋势 .....	84	<b>第7章 金属基复合材料的性能</b> .....		152
<b>第5章 金属基复合材料的成形加工</b> .....		85	7.1	概述 .....	152
5.1	铸造成形 .....	85	7.2	颗粒增强金属基复合材料 .....	154
5.1.1	铸造成形方法与特点 .....	85	7.2.1	颗粒增强铝基复合材料 .....	154
5.1.2	铸造成形的技术问题 .....	86	7.2.2	颗粒增强镁基复合材料 .....	157
5.2	塑性成形 .....	89	7.2.3	颗粒增强锌基复合材料 .....	158
5.2.1	铝基复合材料的力学性能 .....	89	7.2.4	颗粒增强铜基复合材料 .....	159
5.2.2	金属基复合材料的高温压缩 变形 .....	90	7.2.5	颗粒增强钛基复合材料 .....	161
5.2.3	铝基复合材料的轧制塑性 .....	91	7.3	晶须增强金属基复合材料 .....	162
5.2.4	铝基复合材料的挤压塑性 .....	92	7.3.1	晶须增强铝基复合材料 .....	162
5.2.5	金属基复合材料的蠕变性能 .....	93	7.3.2	晶须增强镁基复合材料 .....	166
5.2.6	非连续增强金属基复合材料的超 塑性 .....	94	7.4	短纤维增强金属基复合材料 .....	168
5.3	连接 .....	96	7.4.1	短纤维增强铝基复合材料 .....	168
5.3.1	应用于 MMCs 的常规连接技术 .....	97	7.4.2	短纤维增强锌基复合材料 .....	170
5.3.2	各种常规 MMCs 连接技术的特点 与比较 .....	100	7.4.3	短纤维增强镁基复合材料 .....	171
5.3.3	新型 MMCs 连接技术 .....	101	7.5	长纤维增强金属基复合材料 .....	171
5.4	机械切削加工 .....	103	7.5.1	碳纤维增强铝基复合材料 .....	174
5.4.1	SiC <sub>w</sub> /Al 复合材料的切削加工 .....	104	7.5.2	碳纤维增强银基复合材料 .....	175
5.4.2	(Al <sub>3</sub> Zr + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>p</sub> /ZL101A 原位 复合材料的切削加工 .....	109	7.5.3	碳纤维增强铜基复合材料 .....	175
<b>第6章 金属基复合材料的界面及其 表征</b> .....		117	7.5.4	碳纤维增强铅基复合材料 .....	176
6.1	MMCs 界面的定义 .....	117	7.5.5	碳化硅纤维增强钛基复合 材料 .....	176
6.2	MMCs 的界面特征 .....	117	7.5.6	碳化硅纤维增强金属间化合物基 复合材料 .....	177
6.2.1	界面的结合机制 .....	118	7.6	内生增强金属基复合材料 .....	179
6.2.2	界面分类及界面模型 .....	119	7.6.1	内生增强铝基复合材料 .....	179
6.2.3	界面的物理化学特性 .....	122	7.6.2	内生增强钛基复合材料 .....	182
6.2.4	界面的稳定性 .....	135	7.7	混杂增强金属基复合材料 .....	183
6.2.5	界面结构及界面反应 .....	136	7.7.1	室温力学性能 .....	183
6.2.6	界面对性能的影响 .....	140	7.7.2	耐磨性能 .....	184
6.2.7	界面优化与控制界面反应的 途径 .....	142	7.7.3	热物理性能 .....	185
6.3	MMCs 的界面表征 .....	143	7.7.4	高温性能 .....	186
6.3.1	界面组成及成分变化 .....	144	<b>第8章 金属基复合材料的损伤与 失效</b> .....		187
6.3.2	界面区的位错分布 .....	144	8.1	金属基复合材料损伤的基本理论 .....	187
			8.1.1	基体损伤模型 .....	187
			8.1.2	脆性材料的失效准则 .....	188
			8.1.3	界面损伤模型 .....	188

8.2	金属基复合材料的拉伸性质及其损伤机制 .....	188
8.3	典型金属基复合材料的损伤分析 .....	189
8.3.1	连续纤维增强金属基复合材料 .....	189
8.3.2	短纤维/晶须增强金属基复合材料 .....	191
8.3.3	颗粒增强金属基复合材料 .....	193
8.4	脆性纤维增强金属基复合材料失效特点 .....	195
8.5	复合材料失效过程的发展阶段 .....	197
8.5.1	研究复合材料失效过程的概率方法 .....	198
8.5.2	损伤统计累积时复合材料的承载能力 .....	198
8.5.3	损伤累积函数和短纤维段的强度分布 .....	200
8.5.4	复合材料完全失效的过渡 .....	201
8.5.5	组元物理化学相互作用的影 响 .....	203
8.6	长纤维增强金属基复合材料的失效机制 .....	205

## 第9章 金属基复合材料的应用与发展趋势 .....

9.1	金属基复合材料的应用 .....	207
9.1.1	航天领域的应用 .....	207
9.1.2	航空领域的应用 .....	210
9.1.3	汽车工业上的应用 .....	213
9.1.4	电子封装领域的应用 .....	216
9.2	金属基复合材料的再生与回收 .....	218
9.2.1	金属基复合材料的再生 .....	218
9.2.2	金属基复合材料的回收 .....	221
9.3	金属基复合材料应用的制约因素 .....	222
9.3.1	增强体的成本 .....	222
9.3.2	制备方法 .....	222
9.3.3	生产数量 .....	223
9.3.4	局部增强手段 .....	223
9.3.5	二次加工性能 .....	223
9.3.6	回收能力 .....	224
9.3.7	质量控制体系 .....	224
9.4	金属基复合材料的发展趋势 .....	224
	参考文献 .....	227

# 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。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像空间，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，它们通常都是在不同尺度、不同层次上结构设计、结构优化的结果，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。

在发展历程上，先进结构复合材料起源于 20 世纪 50~60 年代航空、航天和国防等尖端技术领域的需求，至今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 反映了复合材料与其他单质材料力学性能的比较。因复合材料具有可设计性和性能优异等特点而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、体育器材等方面应用，且应用前景极为广阔。当今 21 世纪将是复合材料的快速发展和应用的年代。

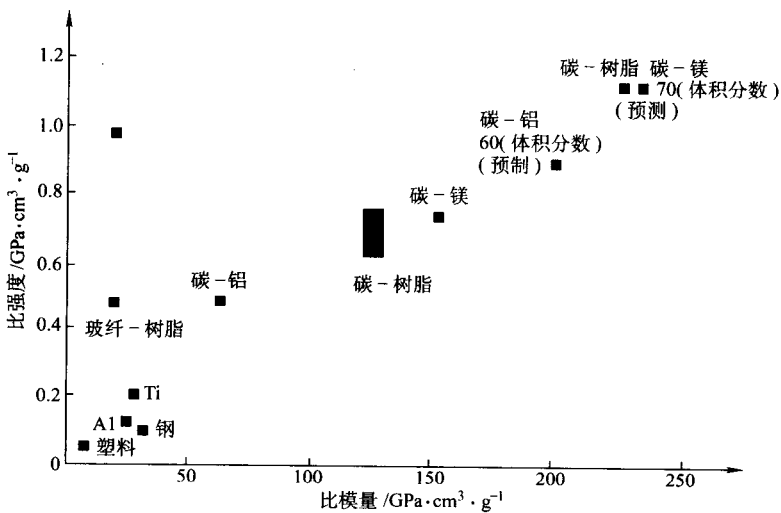


图 1-1 复合材料与其他材料的比强度与比模量的对比



## 1.1 复合材料的定义与分类

根据国际标准化组织（International Organization for Standardization）对复合材料的定义，复合材料是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。这些具有不同物理和化学性质的物质，以微观、细观或宏观等不同的结构尺度与层次，经过复杂的空间组合而形成的一个材料系统。复合材料一般由基体组元与增强体或功能组元所组成。复合材料可经设计，即通过对原材料的选择、各组分分布设计和工艺条件的保证等，使原组分材料优点互补，因而呈现了出色的综合性能。

复合材料按性能高低分为常用复合材料和先进复合材料。先进复合材料是以碳、芳纶、陶瓷等纤维和晶须等高性能增强体与高聚物、金属、陶瓷和碳（石墨）等基体构成的复合材料。这类材料往往用于各种高技术领域中性能要求高的场合。复合材料按用途可分为结构复合材料和功能复合材料。目前结构复合材料占绝大多数，而功能材料有广阔的发展前途，21世纪将出现结构复合材料与功能复合材料并重的局面，而且功能复合材料更具有与其他功能材料竞争的优势。

结构复合材料主要用作承受力和次承受力结构，要求它质量轻、强度和刚度高，且能耐一定温度，在某种情况下还要求膨胀系数小、绝热性能好或耐介质腐蚀等其他性能。

结构复合材料基本上由增强体与基体组成。增强体承担结构使用中的各种载荷，基体则起到粘接增强体予以赋形并传递应力的作用。结构复合材料通常按不同的基体来分类，如图1-2所示。在某些情况下也以增强体的形状来分类，这种分类适用于各种基体，如图1-3所示。

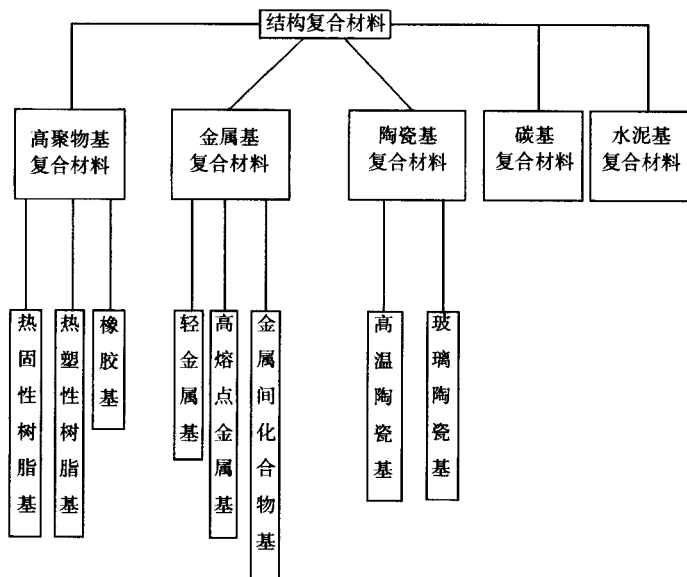


图 1-2 结构复合材料按不同基体分类

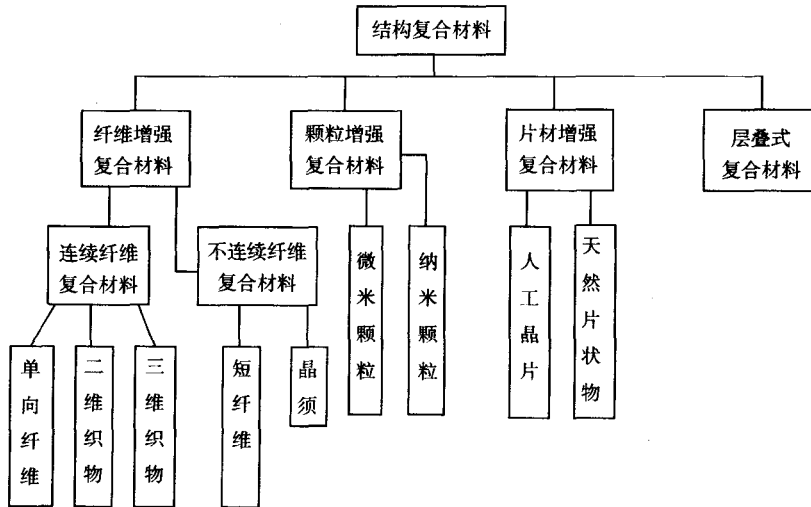


图 1-3 结构复合材料按不同增强体形式分类

## 1.2 金属基复合材料概述

金属基复合材料 (Metal matrix Composite, 简称 MMCs) 是以陶瓷 (连续长纤维、短纤维、晶须及颗粒) 为增强材料, 金属 (如铝、镁、钛、镍、铁、铜等) 为基体材料而制备的。MMCs 问世至今已有 40 余年, 由于具有高的比强度、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物理性能和力学性能, 克服了树脂基复合材料在宇航领域中使用时的缺点, 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。对金属基复合材料的研究和应用目前处于世界领先的国家主要是美国和日本。美国从 20 世纪 60 年代就开始对金属基复合材料进行了研究, 70 年代转入实用化阶段, 到了 80 年代就开始大量在航天、航空工业中应用。日本在金属基复合材料的研究和发展是起步较晚的, 日本工业界大约在 20 世纪 80 年代初期, 才开始对 MMCs 的研究投入兴趣, 但发展速度却很快, 只用了 20 年左右的时间就迅速在世界金属基复合材料的生产和应用研究领域占据了非常重要的地位。日本不仅成功地大规模制造出了长纤维、晶须等多种类型的 MMCs 的增强体, 而且仅在美国实际应用金属基复合材料两年后, 日本的本田汽车公司就首先在气缸体活塞上应用了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  短纤维增强铝合金基复合材料, 并实现了大规模工业化生产。从而使日本在 90 年代末期迅速地走到了 MMCs 领域的前列。目前, 据不完全统计, 日本至少有 40 家左右的公司都在进行金属基复合材料的开发与研究。

目前, 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加工工艺不够完善、成本较高, 还没有形成大规模批量生产, 因此仍是当前研究和开发的热点。

金属基复合材料品种繁多, 有各种分类方式, 但可归纳为以下三种:

### 1. 按用途分类

(1) 结构复合材料 高比强度、高比模量、尺寸稳定性、耐热性等是其主要性能特点, 用于制造各种航天、航空、汽车、先进武器系统等高性能构件。

(2) 功能复合材料 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是其主要特性,用于电子、仪器、汽车等工业。

## 2. 按基体分类

有铝基、镁基、锌基、铜基、钛基、铅基、镍基、耐热金属基、金属间化合物基等复合材料。目前以铝基、镍基、钛基复合材料发展比较成熟,已在航空、航天、电子、汽车等工业中应用。下面将对上述的铝基、镍基、钛基复合材料首先作介绍。

(1) 铝基复合材料 这是在金属基复合材料中应用最广的一种。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,再加之它所具有的易加工性、工程可靠性及价格低廉等优点,为其在工程上应用创造了有利的条件。

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作为基体,则往往根据对复合材料的性能需要来决定。

(2) 镍基复合材料 这种复合材料是以镍及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,即是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,因而还未能取得满意的结果。

(3) 钛基复合材料 钛比任何其他的结构材料具有更高的比强度。此外,钛合金在中温时比铝合金能更好地保持其强度。因此,对飞机结构来说,当速度从亚音速提高到超音速时,钛合金比铝合金显示出了更大的优越性。随着飞行速度的进一步加快,还需要改变飞机的结构设计,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,这是由于钛与硼的热膨胀系数比较接近,见表 1-1。

表 1-1 基体和增强体的热膨胀系数

基 体	热膨胀系数 $\times 10^{-6}/K^{-1}$	增 强 体	热膨胀系数 $\times 10^{-6}/K^{-1}$
铝	23.9	硼	6.3
钛	8.4	涂 SiC 硼	6.3
铁	11.7	碳化硅	4.0
镍	13.3	氧化铝	8.3

## 3. 按增强体分类

(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、氧化铝纤维等增强体与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、含量、方式的优化设计组合,可获得各种高性能。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,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,可通过在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。由于原材料连续纤维价格昂贵,制造工艺

复杂,因而成本很高,阻碍了它们的实际应用。

(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。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。根据非连续增强体的来源可分为外加(Ex-situ)和内生(In-situ)两种。外加增强的金属基复合材料是指其增强体是从外部加入,并使其均匀分布于金属基体中。内生增强的金属基复合材料的基本原理,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,在金属基体内原位自生成一种或几种高硬度、高弹性模量的陶瓷增强相,从而达到强化金属基体的目的。与外加增强的金属基复合材料相比,内生增强的金属基复合材料具有如下特点:

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。

综上所述,非连续增强金属基复合材料最大的特点是,可以用常规的粉末冶金、液态金属搅拌、液态金属挤压铸造、真空压力浸渍、原位反应合成等方法制造,并可用铸造、挤压、锻造、轧制、旋压等加工方法进行加工成形,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 这种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,因此不包括各种包复材料。

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

由于薄片增强的强度不如纤维增强相高,因此层状结构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,这与纤维单向增强的复合材料相比具有明显的优越性。

由于层状复合材料方面已有相关专业书籍论述,本书不作详细论述。

### 1.3 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或合金基体和增强体的特性、含量、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。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，特别是高性能连续纤维——硼纤维、碳（石墨）纤维、碳化硅纤维等增强物，具有很高的强度和模量。密度只有  $1.85\text{g/cm}^3$  的碳纤维的最高强度可达到  $7000\text{MPa}$ ，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  $2300 \sim 8000\text{MPa}$ ，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  $3000 \sim 4500\text{MPa}$ ，模量为  $350 \sim 450\text{GPa}$ 。加入 30% ~ 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 1-4 所示为典型的金属基复合材料与基体合金性能的比较。

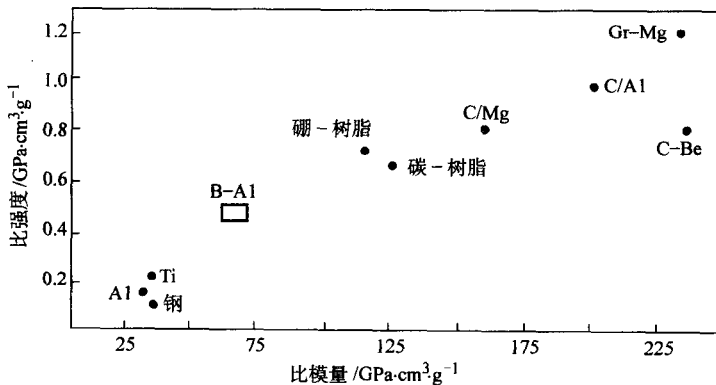


图 1-4 典型金属基复合材料与基体合金性能的比较

用高比强度、高比模量复合材料制成的构件质量轻、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纯金属基体还高。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、金刚石颗粒增强的铝基、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有效迅速地把热量散去，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物碳纤维、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。加入相当含量的增强体不仅大幅度提高材料的强度和模量，也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,当石墨纤维的体积分数达到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发生热变形,这对人造卫星构件特别重要。

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,可得到导热性好、热膨胀系数小、尺寸稳定性好的金属基复合材料。

#### 4. 良好的高温性能

由于金属基体的高温性能比聚合物高很多,增强纤维、晶须、颗粒在高温下又都具有很高的高温强度和模量。因此金属基复合材料具有比基体金属更高的高温性能,特别是连续纤维增强金属基复合材料。在复合材料中纤维起着主要承载作用,纤维强度在高温下基本上不下降,可保持到接近金属熔点,并比金属基体的高温性能高许多。如钨丝增强耐热合金,其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℃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零构件比金属材料、聚合物基复合材料零件能在更高的温度条件下使用。

#### 5. 耐磨性好

金属基复合材料,尤其是陶瓷纤维、晶须、颗粒增强的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陶瓷增强体,特别是细小的陶瓷颗粒所致。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1-5是碳化硅颗粒增强铝基复合材料的耐磨性与基体材料和铸铁耐磨性的比较,可见SiC<sub>p</sub>/Al复合材料的耐磨性比铸铁还好,比基体金属高出几倍。

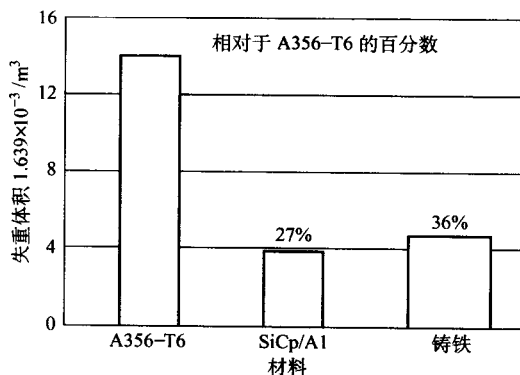


图 1-5 材料耐磨性的比较

SiC<sub>p</sub>/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。

#### 6. 良好的疲劳性能和断裂韧度

金属基复合材料的疲劳性能和断裂韧度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,提高材料的断裂韧度。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,金属性质稳定、组织致密,不存在老化、分解、吸潮等问题,也不会发生性能的自然退化,这比聚合物基复合材料优越,在空间使用也不会分解出低分子物质污染仪器和环境,有明显的优越性。

总之,金属基复合材料所具有的高比强度、高比模量、良好的导热性、导电性、耐磨性、高温性能、低的热膨胀系数、高的尺寸稳定性等优异的综合性能,使金属基复合材料在航天、航空、电子、汽车、等领域均具有广泛的应用前景。

## 第2章 增强体材料

增强体是金属基复合材料的重要组成部分，它起着提高金属基体的强度、模量、耐热性、耐磨性等性能的作用，随着复合材料的发展和新的增强体品种的不断出现，被选用于金属基复合材料的增强体的范围不断扩大，主要有高性能连续长纤维、短纤维、晶须、颗粒等。连续长纤维具有很高的强度、模量和低的密度，是高性能复合材料选用的主要增强体，如硼纤维、碳（石墨）纤维、碳化硅纤维等。其中发展最快，已大批量生产和应用的增强纤维是碳及石墨纤维，碳纤维的最高抗拉强度已达 7000MPa（T1000 碳纤维），密度只有 1.8g/cm<sup>3</sup>，断后伸长率为 2%；石墨纤维的最高模量已达到 900 GPa（P130 石墨纤维），密度为 2.1g/cm<sup>3</sup>，导热性比铜高 3 倍，热膨胀系数为  $-1.5 \times 10^{-6}/K$ 。这样优良的力学、物理性能，将对复合材料的性能起重要的作用。图 2-1 示出了各种增强体的力学性能。

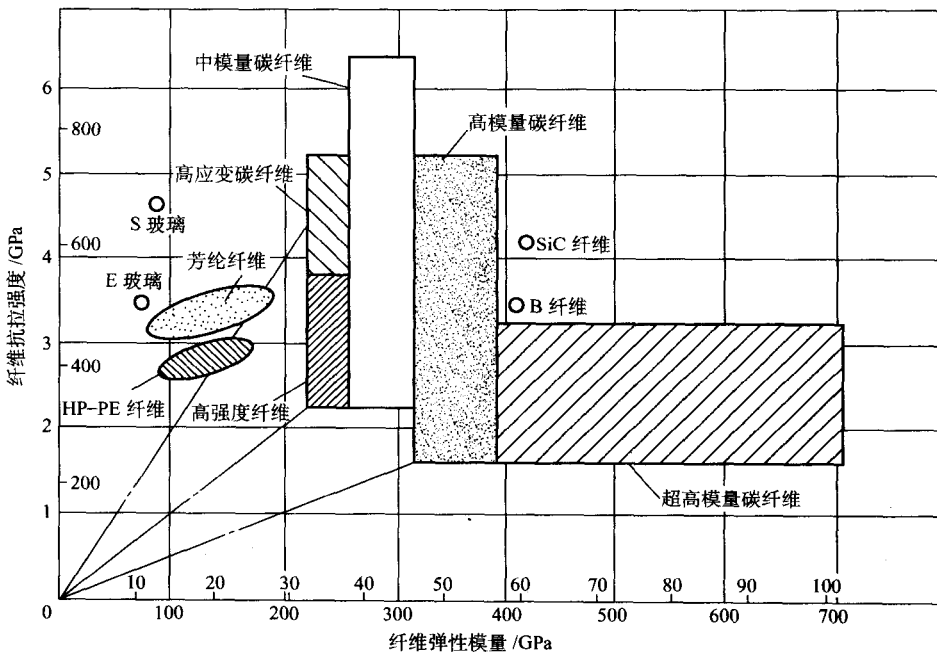


图 2-1 各种增强体的力学性能比较

作为金属基复合材料的增强体应具有以下基本特性：

- 1) 增强体应具有能明显提高金属基体某种所需特性的性能，如高的比强度、比模量、高导热性、耐热性、耐磨性、低热膨胀性等，以便赋予金属基体所需的某种特性和综合性能。
- 2) 增强体应具有良好的化学稳定性。在金属基复合材料制备和使用过程中其组织结构和性能不发生明显的变化和退化，与金属基体有良好的化学相容性，不发生严重的界面

反应。

3) 与金属有良好的浸润性, 或通过表面处理能与金属基体良好浸润、复合和分布均匀。此外, 增强体的成本也是应考虑的一个重要因素。

为了合理地选用增强体, 设计制备高性能金属基复合材料, 就要求对各种增强体的性能、结构、制造方法有一基本的了解和认识。

## 2.1 增强体的分类

用于金属基复合材料的增强体品种繁多, 分类方法也很多, 按增强体的形态主要分纤维类增强体、颗粒类增强体、晶须类增强体等几类, 可根据复合材料性能的需要来选择。

### 2.1.1 纤维类增强体

纤维类增强体有连续长纤维和短纤维两种。连续长纤维的长度均超过数百米, 纤维性能有方向性, 一般沿轴向均有很高的强度和弹性模量。连续长纤维中又分单丝和束丝。碳(石墨)纤维、氧化铝纤维、碳化硅纤维(烧结法)和氮化硅纤维等, 是以 $500 \sim 12000$ 根直径为 $5.6 \sim 14 \mu\text{m}$ 的细纤维组成束丝作为增强体使用。而硼纤维、碳化硅纤维(化学气相沉积法)是以直径为 $95 \sim 140 \mu\text{m}$ 的单丝作为增强体使用。连续长纤维制造成本高, 性能高, 主要用于高性能复合材料制品。

短纤维长度一般由几毫米到几十毫米, 排列无方向性, 通常采用生产成本低、生产效率高的喷射方法制造。短纤维性能较长纤维低, 在使用时需先将短纤维制成预制件、毡、布等, 再用挤压铸造、压力浸渗等方法制造短纤维增强金属基复合材料制品。主要的短纤维有硅酸铝纤维(又称耐火棉)、氧化铝纤维、碳纤维(直接制成或将长纤维切短)、氮化硼纤维等, 制成的复合材料无明显各向异性。用于金属基复合材料的增强纤维性能见表2-1。

### 2.1.2 颗粒类增强体

颗粒增强体分为外加和内生两种, 一般是具有高强度、高模量, 耐热、耐磨性好, 耐高温的陶瓷、石墨等非金属颗粒, 如:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiC}$ 、 $\text{TiC}$ 、 $\text{B}_4\text{C}$ 、 $\text{TiB}_2$ 、 $\text{BN}$ 、 $\text{AlN}$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{NbN}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{VC}$ 、 $\text{WC}$ 、 $\text{ZrC}$ 、 $\text{ZrB}_2$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MoSi}_2$ 、 $\text{Mo}_2\text{C}$ 、 $\text{MoS}_2$ 、石墨、细金刚石等。颗粒增强体以很细的粒状( $< 50 \mu\text{m}$ , 外加颗粒一般在 $20 \mu\text{m}$ 以下, 内生颗粒一般在 $2 \mu\text{m}$ 以下)在金属中起提高耐磨、耐热、强度和模量的作用。颗粒增强金属基复合材料主要用粉末冶金法、液态金属搅拌法、共喷法、压力浸渍法、原位合成法等制造。由于颗粒增强体的成本低廉, 制成的复合材料各向同性, 因此在复合材料的应用中发展十分迅速, 特别是在汽车工业中。

### 2.1.3 晶须类增强体

晶须是在人工条件下生长出来的细小单晶。由于细小单晶组织结构缺陷少, 具有很高的强度和模量, 一般直径为 $0.2 \sim 1 \mu\text{m}$ , 长度为几十微米。根据化学成分不同, 晶须可分为陶瓷晶须和金属晶须两类。陶瓷晶须包括氧化物( $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{BeO}$ )晶须、非氧化物( $\text{SiC}$ 、



Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、SiN) 晶须; 金属晶须包括 Cu、Cr、Fe、Ni 晶须等。用于金属基复合材料的晶须是 SiC、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等陶瓷晶须。晶须制造的分选过程较复杂, 成本远比颗粒高, 可通过粉末冶金、挤压铸造等方法制成复合材料。晶须增强金属基复合材料的性能基本上是各向同性。

### 2.1.4 其他增强体

用于金属基复合材料的高强度、高模量金属丝增强体, 主要有铁丝、高强度钢丝、不锈钢丝和钨丝等。由于在高温复合过程中金属之间易扩散、熔解、化合, 以及晶粒长大等, 一般在铝基复合材料中选用不锈钢丝作增强体, 在镍基高温合金中加入钨丝来提高其高温性能。

表 2-1 用于金属基复合材料的增强纤维的性质

纤维类型		直径/ $\mu\text{m}$	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	伸长率 (%)	纵向膨胀系数 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	
硼	B	32 ~ 140	2.4 ~ 2.6	365 ~ 440	2300 ~ 2800	1.9	4.5	
	B/W	100	2.57	410	3570	0.9		
	B/C	100	2.58	360	3280			
	B <sub>4</sub> -B/W	145	2.57	370	4000			
	Borsic	100, 146	2.58	400	8000			
碳化硅	SCS-3	140	3.05	407	3450	0.8		
	SCS-6	142	3.44	420	3400			
	Tyranno	1	2.4	120	2500	2.2		
	Dowconrning	10 ~ 15	2.6 ~ 1.7	175 ~ 310	1050 ~ 1400			
	NicalonNL-201	15	2.55	206	2940	1.4		3.1
	NicalonNL-231	12	2.55	206	3234	1.6		3.1
	NicalonNL-401	15	2.30	176	2744	1.6		3.1
	NicalonNL-501	15	2.50	206	2940	1.4		3.1
碳	Amoco T-300	7	1.76	231	3650	1.4	-0.6	
	Torayca-T1000	5.3	1.82	294	7060			
	Torayca-M46J			451	4210			
	Torayca-M60J	5	1.94	590	3800			
	Thomel P120	10	2.18	827	2370	0.29		-1.45
	Thomel P100	10	2.15	724	2370	0.32		-1.45
氧化铝	Nericl312 (3M)	11	2.7	154	1700	1.95	8.8	
	FP	20	3.95	379	1380 ~ 2100	0.4		
	Saffil	8	3.30	300	2000	1.5		
	Sumika	17	3.2	210	1775	0.8		
	Nextel	13	2.5	152	1720	1.95		
	Dupont	20	4.2	385	2100 ~ 2450			
BN		7	0.90	91	1400			
ZrO <sub>2</sub>			4.84	350	2100			
B <sub>4</sub> C			2.86	490	2300			
TiB <sub>2</sub>			4.48	530	1100			
钨		13	19.4	413	4060			
钢		13	7.74	203	4200			