

研究生规划教材

# 金属基复合材料制备 新技术导论

陶杰 赵玉涛 潘蕾 骆心怡 编著



化学工业出版社

研究生规划教材

# 金属基复合材料制备新技术导论

陶杰 赵玉涛 潘蕾

骆心怡 编著



化学工业出版社

·北京·

本书以国内外前沿的材料制备理论为基础,结合金属基复合材料制备工艺特点,较系统地介绍了国内外有关金属基复合材料的先进制备技术,包括制备原理、制备过程、材料性能等,并涉及声学、电化学、电磁学、材料物理学等领域的知识。重点介绍了机械合金化技术、原位反应复合技术、高能超声辅助制备技术、半固态搅拌复合技术、气孔/金属基复合材料制备技术、纳米晶与纳米颗粒增强复合材料涂层制备技术及液相浸渗制备技术等方面。本书具有体系全、覆盖面广、理论与实践并重等特点,比较适合作为研究生学位课程的教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

金属基复合材料制备新技术导论/陶杰编著. —北京:化学工业出版社, 2007.4  
ISBN 978-7-122-00154-2

I. 金… II. 陶… III. 金属复合材料-制备  
IV. TB331

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 038187 号

---

责任编辑: 杨 菁  
责任校对: 凌亚男

文字编辑: 林 丹  
装帧设计: 潘 峰

---

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 15 $\frac{1}{4}$  字数 399 千字 2007 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

金属基复合材料是 21 世纪发展潜力最大的高性能结构材料之一。金属基复合材料的制备技术相对复杂和困难，这是由金属熔点较高、对增强基体表面润湿性差等因素造成的，因此，对有效而实用的金属基复合材料制备技术的研究是决定此类复合材料能否广泛应用的关键问题。世界各国都投入了大量人力、物力开展金属基复合材料制备新技术的研究。目前开发出的新技术有原位反应复合技术、高能超声辅助制备技术、气孔/金属基复合材料制备技术、纳米晶复合材料制备技术等。这些新技术有效地解决了传统制备工艺中存在的复合材料界面润湿性差、增强体分布不均匀等缺陷，所制备的材料结构稳定、性能优良，在航空、航天等高科技领域具有广阔的应用前景。

虽然国内外关于金属基复合材料制备新技术领域的研究成果较多，但大都以期刊论文的形式出现，尚未形成系统的论著，这不利于金属基复合材料制备新技术在工程技术人员中的普及和推广。同时，国内许多高校材料专业的研究生教学中，普遍开设了“金属基复合材料”课程，但目前尚无关于金属基复合材料制备新技术方面的教材。因此，编者参考了中、外相关的科技文献，并结合作者们多年从事金属基复合材料的教学和研究成果，编著了本书。

同时，编者还采用了国内外有关专家、学者公开出版物中的数据和资料（见本书各章节的参考文献），由于联络上的困难，未能征求原作者的意见。借本书出版之际，向本书引用的所有参考文献的原作者以及支持和帮助本书出版的专家和同仁们表示由衷的谢意。

本书由南京航空航天大学陶杰、潘蕾和骆心怡等教授，江苏大学赵玉涛教授编著。具体分工如下：陶杰教授编写第一章和第六章；赵玉涛教授编写第二章和第五章；骆心怡副教授编写第三章和第七章；潘蕾副教授编写第四章和第八章。全书由陶杰和潘蕾统稿。本书体系全、理论新、实践性强，在国内相关研究领域具有一定的前瞻性，可作为高等院校复合材料专业研究生的教材，对从事复合材料研究的专业技术人员也具有一定的参考价值。

由于编著者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

编著者

2006 年 12 月于南京

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 复合材料概论 .....	1
1.1.1 复合材料的定义和分类 .....	1
1.1.2 复合材料的结构 .....	2
1.1.3 复合材料的性能特点与复合效果 .....	3
1.1.4 金属基复合材料的分类与性能特点 .....	5
1.2 金属基复合材料设计的基本原则 .....	7
1.2.1 基体材料的选择 .....	7
1.2.2 增强体的选择 .....	10
1.2.3 复合材料性能的复合准则 .....	13
1.3 金属基复合材料的制备工艺 .....	17
1.3.1 概述 .....	17
1.3.2 金属基复合材料常用制备方法 .....	18
1.3.3 金属基复合材料成型方法的研究进展 .....	20
参考文献 .....	22
<b>第 2 章 原位反应合成技术</b> .....	24
2.1 原位反应合成技术发展概论 .....	24
2.2 原位反应合成技术 .....	24
2.2.1 XD <sup>TM</sup> 技术 .....	24
2.2.2 Lanxide 技术 .....	25
2.2.3 VLS 技术 .....	26
2.2.4 反应喷射沉积成型技术 .....	27
2.2.5 反应机械合金化技术 .....	28
2.2.6 自蔓延高温合成法 .....	29
2.2.7 其他方法 .....	30
2.3 原位反应复合技术的应用 .....	32
2.3.1 原位铝基复合材料的制备 .....	32
2.3.2 原位铜基复合材料的制备 .....	35
2.3.3 原位镁基复合材料的制备 .....	38
2.3.4 原位铁基复合材料的制备 .....	41
2.3.5 其他原位金属基复合材料的制备 .....	44
参考文献 .....	49
<b>第 3 章 机械合金化制备技术</b> .....	52
3.1 机械合金化技术概论 .....	52
3.1.1 机械合金化技术的发展概况 .....	52
3.1.2 机械合金化技术简介 .....	54

3.1.3	机械合金化扩展固溶度机制	65
3.1.4	机械合金化过程中的非晶化机理	68
3.1.5	机械合金化纳米晶形成机制	69
3.2	机械合金化镁基储氢复合材料	69
3.2.1	镁基储氢复合材料的研究背景	69
3.2.2	镁基储氢复合材料的制备和性能	70
3.2.3	镁基储氢复合材料的应用	73
3.3	机械合金化颗粒增强铜基复合材料	73
3.3.1	铜基复合材料研究背景	73
3.3.2	颗粒增强铜基复合材料的制备和性能	74
3.3.3	颗粒增强铜基复合材料的应用	75
3.4	机械合金化颗粒增强铝基和锌基复合材料	76
	参考文献	80
<b>第4章</b>	<b>高能超声辅助制备技术</b>	<b>82</b>
4.1	高能超声辅助制备技术发展现状	82
4.2	高能超声对金属液/颗粒(纤维)混合熔体的作用	84
4.2.1	高能超声的基本原理	84
4.2.2	高能超声在高温金属液/颗粒混合熔体中的基本声学效应	89
4.2.3	高能超声基本效应对金属液/颗粒混合熔体的作用	97
4.2.4	高能超声促进界面润湿的机制	100
4.3	高能超声辅助机械搅拌技术	104
4.3.1	高能超声辅助制备陶瓷颗粒/金属复合材料技术	104
4.3.2	高能超声辅助制备金属粒子/金属复合材料技术	110
4.3.3	高能超声辅助制备纤维/金属复合材料技术	112
4.4	高能超声结合原位反应复合技术	113
4.4.1	高能超声稀释原位反应烧结块技术	113
4.4.2	高能超声促进原位反应技术	124
	参考文献	127
<b>第5章</b>	<b>半固态搅拌复合技术</b>	<b>130</b>
5.1	半固态搅拌的概念与特点	130
5.1.1	半固态搅拌概念	130
5.1.2	半固态搅拌特点	131
5.2	半固态搅拌复合技术	132
5.2.1	半固态机械搅拌复合技术	132
5.2.2	半固态电磁搅拌复合技术	133
5.2.3	原位反应-半固态搅拌复合技术	137
5.3	半固态搅拌复合技术的应用	138
5.3.1	铝基复合材料的制备及性能	138
5.3.2	铁基复合材料的制备及性能	139
5.3.3	铜基复合材料的制备及性能	142
5.3.4	其他复合材料的制备	143
	参考文献	146

<b>第 6 章 气孔/金属基复合材料 (多孔金属) 制备技术</b> .....	148
6.1 多孔金属的结构特征和特性 .....	148
6.1.1 多孔金属结构特征的定义 .....	148
6.1.2 多孔材料的显微组织表征 .....	150
6.1.3 多孔金属的力学性能 .....	150
6.1.4 多孔金属的电热和声学性能 .....	151
6.1.5 Gasarite 多孔材料的性能特点 .....	152
6.1.6 多孔金属材料的应用 .....	154
6.2 多孔金属的制备技术 .....	158
6.2.1 液相法制备多孔金属 .....	158
6.2.2 粉末状固相法制备多孔金属 .....	160
6.2.3 固体-气体共晶凝固结 (Gasars 法) .....	160
6.2.4 金属沉积法 .....	161
6.3 多孔金属膜和金属表面多孔膜的制备 .....	161
6.3.1 多孔金属膜的制备 .....	161
6.3.2 金属表面多孔膜的制备 .....	162
6.4 多孔镍的电沉积法制备 .....	167
参考文献 .....	168
<b>第 7 章 纳米晶与纳米颗粒/金属基复合涂层制备技术</b> .....	170
7.1 电沉积纳米晶镀层技术 .....	170
7.1.1 纳米晶镀层的形成机理 .....	170
7.1.2 纳米晶电沉积工艺特点 .....	171
7.1.3 纳米金属膜及多层膜的制备 .....	171
7.2 纳米颗粒/金属基复合涂层电沉积原理与制备工艺 .....	173
7.2.1 纳米颗粒/金属基复合涂层材料设计的一般原则 .....	175
7.2.2 纳米颗粒/金属基复合涂层成分与性能设计 .....	176
7.2.3 纳米颗粒/金属基复合涂层电沉积原理 .....	177
7.2.4 纳米颗粒/金属基复合涂层电沉积工艺方法 .....	182
7.2.5 纳米颗粒/金属基复合涂层电沉积工艺影响因素 .....	186
7.3 电沉积纳米颗粒/金属基复合涂层的组织与性能 .....	189
7.3.1 电沉积纳米颗粒/金属基复合涂层的组织 .....	189
7.3.2 电沉积纳米颗粒/金属基复合涂层的性能 .....	190
7.3.3 电沉积纳米颗粒/金属基复合涂层的应用与发展趋势 .....	193
7.4 纳米颗粒/金属基复合涂层化学沉积制备技术 .....	195
7.4.1 纳米复合化学镀及其特点 .....	195
7.4.2 纳米复合化学镀层的沉积机理 .....	196
7.4.3 纳米复合化学镀工艺 .....	197
7.4.4 纳米复合化学镀层的研究进展 .....	198
7.5 贵金属/介孔模板自组装技术 .....	200
7.5.1 介孔固体 .....	200
7.5.2 介孔组装体系 .....	201
7.5.3 贵金属/介孔模板组装体系 .....	202

参考文献 .....	204
<b>第 8 章 液相浸渗制备技术 .....</b>	<b>207</b>
8.1 液相浸渗工艺概论 .....	207
8.1.1 液相浸渗工艺发展 .....	207
8.1.2 液相浸渗工艺分类及特点 .....	208
8.1.3 预制件的制备工艺 .....	212
8.1.4 浸渗及凝固的基本理论 .....	215
8.2 无压浸渗制备技术 .....	219
8.2.1 无压浸渗原理 .....	220
8.2.2 无压浸渗法制备复合材料的体系及工艺特点 .....	225
8.3 高体积分含量的颗粒增强金属基复合材料的液相浸渗制备技术 .....	229
8.3.1 高体积分含量预制体的制备 .....	229
8.3.2 高体积分含量颗粒增强金属基复合材料的制备及其特点 .....	235
8.4 超声辅助浸渗技术 .....	239
8.4.1 超声辅助浸渗原理 .....	239
8.4.2 超声辅助浸渗工艺 .....	240
参考文献 .....	240



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 复合材料概论

### 1.1.1 复合材料的定义和分类

复合材料是由两种或两种以上异质、异形、异性的原材料通过某工艺组合而成的一种新的材料。它既保留了原组分材料的主要特性，又通过复合效应获得了原组分所不具备的新性能。现代复合材料可以通过设计使各组分性能互相补充并彼此关联，从而获得新的优越性能，它与一般材料的简单混合有本质的区别。

从复合材料的定义中可以看出，一般材料的简单混合与复合材料的本质区别主要体现在两个方面：其一是复合材料不仅保留了原组分材料的特点，而且通过各组分的相互补充和关联可以获得原组分所没有的新的优越性能；其二是复合材料的可设计性，如结构复合材料不仅可根据材料在使用中受力的要求进行组元选材设计，更重要的是还可以通过调整增强体的比例、分布、排列和取向等因素，进行复合结构设计。

复合材料是由基体、增强体和两者之间的界面组成，复合材料的性能取决于增强体与基体的比例以及三个组成部分的性能。

复合材料有多种分类方法，按照使用功能要求分为两类：结构复合材料和功能复合材料。结构复合材料主要是作为承力结构使用的复合材料，它基本上是由能承受载荷的增强体组元与能连接增强体成为整体承载同时又起分配与传递载荷作用的基体组元构成。结构复合材料的特点是根据材料在使用中受力的要求进行组元选材和增强体排布设计，从而充分发挥各组元的效能。功能复合材料具有某种特殊的物理或化学特性，如声、光、电、磁、热、耐腐蚀、零膨胀、阻尼、摩擦或换能等。

复合材料按增强体的几何形态分为纤维增强复合材料、颗粒增强复合材料、薄片增强复合材料和叠层复合材料<sup>[1~4]</sup>。纤维增强复合材料又分为连续纤维增强复合材料和非连续纤维（包括晶须和短切纤维）增强复合材料。

颗粒增强复合材料的增强体是不同尺寸的颗粒（球形或者非球形）。颗粒增强复合材料按照分散相的尺寸大小和间距又分为弥散增强复合材料（颗粒等效直径为  $0.01\sim 0.1\mu\text{m}$ ，颗粒间距为  $0.01\sim 0.3\mu\text{m}$ ）和粒子增强复合材料（颗粒等效直径为  $1\sim 50\mu\text{m}$ ，颗粒间距为  $1\sim 25\mu\text{m}$ ）。还有一类颗粒增强体是空心微球（微球直径  $10\sim 30\mu\text{m}$ ，壁厚  $1\sim 4\mu\text{m}$ ），分为有机微球、无机微球和金属微球三种，主要用作热固性与热塑性高聚物的增强体或填料。颗粒型增强体的主要作用是调节复合材料的导电性、导热性，改善摩擦磨损性、降低热膨胀系数、提高耐热温度及调节复合材料的密度。

薄片增强复合材料的增强体是长与宽尺寸相近的薄片。薄片增强体由天然、人造和在复合材料工艺过程中自身生长三种途径获得。天然的片状增强体的典型代表是矿产云母，人造的片状增强体是有机玻璃（又称玻璃鳞片）、铝、铍、银、二硼化铝（ $\text{AlB}_2$ ）等。自身生长薄片增强体的实例为二元共晶合金  $\text{Al-Cu}$  中的  $\text{CuAl}_2$  片状晶。天然和人造片状增强体的含量可以在较大范围内变动。当金属薄片紧密堆叠时，还可在片的平面方向提供导电和导热

性，而在片的法线方向提供电磁波屏蔽。

叠层复合材料指复合材料中的增强体是分层铺叠的，即按相互平行的层面配置增强体，而各层之间通过基体材料连接。叠层复合材料中的“层”，可以是单向无纬布、浸胶纤维布，如玻璃纤维布、碳纤维布或棉布、合成纤维布、石棉布等，也可以是片状材料，如纸张、木材以及铝箔（在混杂叠层复合材料中）。也有人将双金属层合片、涂覆金属和夹层玻璃归于叠层复合材料。叠层复合材料在其层面方向可以提供优良的性能。

高性能复合材料按照其基体材料的性质通常分成两类：金属基复合材料（metal matrix composites，简记为 MMCs）和非金属基复合材料。后者又可以分为两类：聚合物基复合材料（polymer matrix composites，简记为 PMCs）和陶瓷基复合材料（ceramic matrix composites，简记为 CMCs）。金属基复合材料包括铝基、镁基、铜基、钛基、高温合金基、金属间化合物基和难熔金属基复合材料。

按照增强体和基体材料的金属和非金属性质，又可将复合材料归纳为如下几类：非金属增强体与非金属基体复合；非金属增强体与金属基体复合；金属增强体与非金属基体复合、金属增强体与金属基体复合。此外，增强体也可能由金属与非金属两种混杂于非金属基体中。

### 1.1.2 复合材料的结构

复合材料是由两种或两种以上的组分相所组成。组分相由其性质、形态和分布状态的不同，可形成几种不同结构类型的复合材料。

在复合材料中，基体通常是三维连续的物质，也就是将不同组分相形成整体材料的物质。而另一个（或几个）以独立的形态分布于整个连续相中的相称为分散相，组成分散相的物质称为分散质。对于结构复合材料，分散相的强度、模量通常高于基体相，分散相的加入往往使复合材料的力学性能高于基体相，故人们习惯地把这类分散相称为增强体。在功能复合材料中，分散相往往赋予复合材料以特殊的化学或物理机械功能，故称之为功能体。

复合材料的性质取决于各组分特性、含量和分布情况。对不同类型的复合体系，需引入“连通性”的概念<sup>[1,5]</sup>。其基本思想是，复合体系中的任何相，在空间的零维、一维、二维或三维方向上是相互连通的，因而任意弥散和孤立的颗粒的连通性为 0，是零维材料（0 维），而包围它们的介质是网络体状的连续材料，连通性为 3，即是三维材料（3 维）；纤维状材料的连通性为 1，是一维材料（1 维）；相应的片状材料连通性为 2，即二维材料（2 维）。根据增强体或功能体和基体以不同联结方式复合时所得到的连通性，可以得到：对两相复合体系有 10 种可能的连通性复合材料结构（0-0、0-1、0-2、0-3、1-1、1-2、1-3、2-2、2-3、3-3）；由三个相组成的复合体系结构有 20 种可能存在的连通性。复合体系有四个相时，它可能存在 35 种连通性。

下面介绍几种常见的两相结构复合材料的连通结构形态（图 1-1）。

（1）0-3 型结构 这是以基体为三维连续相，而增强体或功能体以不连续相的微粒状分布在基体中的结构状态。这种复合材料结构是一种常见的材料结构，如钙塑材料、部分黏结磁铁（磁性复合材料）、 $\text{PbTiO}_3$  型压电复合材料、部分导电复合材料等。

（2）1-3 型结构 这种结构的基体仍为三维连续相，而增强体则为纤维状一维材料。常见的短纤维增强复合材料、连续纤维增强复合材料均属此类结构。这类复合材料结构中，当长度有限的短纤维状增强体随机分布于基体时，复合材料性能显示出各向同性；而当增强体呈一定的取向分布时，材料则显示各向异性。

（3）2-2 型结构 两种组分材料呈层状叠合而成的复合材料中无一组分呈三维连续相状

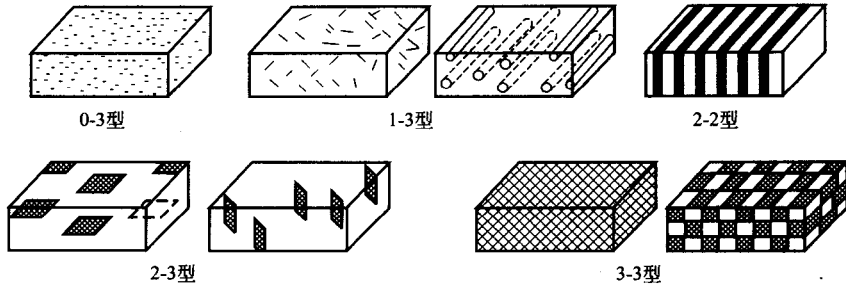


图 1-1 几种典型复合材料结构

态,例如,由多层金属和聚合物复合而成的薄板状复合材料。在这种均为二维连续相组成的材料中,垂直于组分相和平行于组分相的方向上,性能显著不同。

(4) 2-3型结构 基体相为三维连续相,而增强体或功能体为二维结构的片状材料。后者可以随机分布于基体中,也可以以一定的取向方向分布于基体中。由云母和聚合物构成的复合材料是典型的2-3型结构。

(5) 3-3型结构 基体相为三维连续相,而增强体或功能体为三维网状结构或块状结构镶嵌在基体之中。块状结构镶嵌于基体中时,增强体或功能体仍为不连续相。纤维的三维编织物与基体形成的纤维复合材料是典型的3-3型复合材料。

### 1.1.3 复合材料的性能特点与复合效果

#### 1.1.3.1 复合材料性能特点<sup>[1~5]</sup>

(1) 性能可设计性 通过改变材料的组分、结构、工艺方法和工艺参数来调节材料的性能,就是材料性能的可设计性。复合材料设计的首要步骤是选择构成复合材料的基本组分(增强体和基体)。它包括确定增强体和基体的种类(即确定复合体系),并根据复合体系初步确定增强体在复合材料中的体积分数(即各组元之间的体积比例)。

选材的目的是根据复合材料中各组分的职能和所需承担的载荷及载荷分布情况,再根据所了解的具体使用条件下要求复合材料提供的各种性能,来确定复合材料体系。从几种复合材料体系的候选方案中,经定性和定量分析后确定。

铺层设计是根据受力要求和刚度(变形)要求通过承受指定载荷下各层应力分布、强度与变形(包括若干层失效后层合板强度与刚度退化后的情况),来确定某种铺叠次序下层合板的承载能力与变形,从而确定增强体在复合材料中的理想配置与铺叠次序。除颗粒增强复合材料外,定向的晶须和长纤维复合材料的力学及物理性质是非均质和各向异性的,与可视为均质的和各向同性的传统材料有显著不同,这是复合材料可以进行铺层设计的主要依据。复合材料可以根据结构各处工作环境及载荷类型与大小,分别选用和配置不同的增强体和基体。材料性能梯度变化的思想,使复合材料优化设计更臻完善。发展成熟的均质材料的力学分析和力学原理,以及各向异性材料力学和弹性理论、层合板理论、有限元分析,均可应用于复合材料设计中,成为复合材料性能可设计性的理论依据和工具。

(2) 性能叠加效应 增强体和基体,它们各自具有优点和缺点,但在复合材料之中,由于叠加的结果有可能扬长避短,即每种组分只将自己的优点贡献给复合材料,而避开各自的缺点;或者是由另一组分的优点来补偿该组分的缺点,做到性能互补,从而使复合材料在任何使用环境中增强体与基体之间均能保持协调一致,成为能够在指定的工作环境范围中有效承担预期载荷和发挥预期效能的有机整体。复合材料的性能高于增强体和基体的相应性能中

的较小者，一般等于按 A、B 体积分数  $\varphi$  的加和，即  $C=C_A\varphi_A + C_B\varphi_B$ ，当组分匹配得当和复合工艺适宜时，有可能高于此值；反之则可能低于此值。

叠加效应是复合材料的一种主要复合效应，有关复合材料的设计原理和复合效应详见 1.2.3。

### 1.1.3.2 材料的复合效果<sup>[5]</sup>

对于不同组分形成的复合材料，组分本身特点和复合特点对材料有着不同的复合效果，大致可以归结为以下几个方面。

(1) 组分效果 在复合材料的基体和增强体（或功能体）的物理力学性能确定的情况下，仅仅把相对组成作为变量，不考虑组分的几何形态、分布状态和尺度等复杂变量影响时产生的效果称为组分效果。

复合材料中的相对组成，通常用到体积分数和质量分数等。在上面讨论过的平均效应，即加和特征是组分效果的一级近似，即复合材料的某一性能是各组分性能的按体积分数的平均值。复合材料的某些基本物理参数，如密度、比热容，往往是近似具有加和作用的组分效果。

复合材料中组分 1 的体积分数  $\varphi_1$  或质量分数  $w_1$  是指复合材料中组分 1 的体积  $\bar{V}_1$  或质量  $\bar{w}_1$  与复合材料总体积  $\bar{V}_c$  或总质量  $\bar{w}_c$  的比值。

$$\varphi_1 = \frac{\bar{V}_1}{\bar{V}_c} \quad (1-1)$$

$$w_1 = \frac{\bar{w}_1}{\bar{w}_c} \quad (1-2)$$

在复合材料计算中，用得较多的是体积分数。但有时，特别是计算复合材料密度时，质量分数也是重要的。它们的转换方程为：

$$\varphi_1 = \frac{\frac{w_1}{\rho_1}}{\frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \frac{w_3}{\rho_3} + \dots} \quad (1-3)$$

$$w_1 = \frac{\rho_1 \varphi_1}{\rho_1 \varphi_1 + \rho_2 \varphi_2 + \rho_3 \varphi_3 + \dots} \quad (1-4)$$

式中， $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ …为各组分的体积分数； $w_1$ 、 $w_2$ …及  $\rho_1$ 、 $\rho_2$ …为相应组分的质量分数和密度。

(2) 结构效果 所谓结构效果是复合材料性能用组分性能和组成来描述时，必须考虑组分的几何形态、分布状态和尺度等可变因素产生的效果。这类效果往往可以用数学关系描述，分为以下几种类型。

① 几何形态效果（形状效果） 该效果也可表示出相的连续和不连续效果。对于结构效果，其决定因素是组成中的连续相。对于 0 维分散质，若为大小相等的球状微粒，则在复合材料中最紧密填充时的体积分数为 0.74，此时复合材料的性能在不考虑界面效果的情况下，仍决定于连续相（基体）的性质。当分散质为一维连续相时，若其性质与基体有较大差异，分散质性能可能会对复合材料性能起支配作用。

② 分布状态效果（取向效果） 1-3 型、2-3 型、2-2 型乃至 3-3 型复合结构，增强体或功能体的几何取向对复合材料性能有明显的影响。对于 1-3 型结构，在增强体的轴向与径向方向，复合材料性能有明显的差异；而对于 2-3 型和 2-2 型结构的复合材料，在增强体或功

能体的平面平行方向和平面垂直方向其性能则截然不同；3-3型复合材料，主要根据增强体本身在不同方向上的特性显示出取向效果。

对2-2型复合结构的材料而言，在增强体所在平面的垂直方向上施加外力时，成为串联式结构，则弹性模量为：

$$\frac{1}{E_c} = \frac{\varphi_m}{E_m} + \frac{\varphi_f}{E_f} \quad (1-5)$$

而在平行于增强体平面方向上施加外力时，则成为并联式结构，此时的弹性模量为：

$$E_c = E_m \varphi_m + E_f \varphi_f \quad (1-6)$$

上两式中， $E$ 为弹性模量； $\varphi$ 为组分的体积分数；角标 $m$ 、 $f$ 、 $c$ 分别表示基体、增强体和复合材料。

对于1-3型结构的复合材料，短纤维状的增强体在复合材料中的分散状态（取向状态），往往受到复合材料成型过程中的剪切应力的影响。

在分布状态效果中，还存在一种物理性能的取向，同样对复合材料的性能有很大的影响，特别是功能复合材料。例如，磁性复合材料中，磁轴在外加磁场下的取向，将显著导致磁性复合材料磁性的各向异性。

③ 尺度效果 分散质尺度大小的变化，会导致其表面物理化学性能的变化，诸如比表面积、表面自由能的变化以及它们在复合材料中的表面应力的分布和界面状态的改变，从而使复合材料性能发生变化。例如，对于 $\text{SiO}_2$ 粉末分散于聚甲基丙烯酸甲酯中所得的复合材料，通常情况下，粉末经硅烷偶联剂处理后所得材料的强度要大于相同体积含量下的未处理粉末体系，但当 $\text{SiO}_2$ 粉末微粒尺度降低到一定尺度时（约500nm以下），硅烷偶联剂的处理反而会导致材料强度的下降。这是因为 $\text{SiO}_2$ 粒度降到一定尺度后，由于比表面积和表面能的显著提高，增大了表面活性，使之与基体的结合强于硅烷偶联剂对基体和 $\text{SiO}_2$ 的结合。

(3) 界面效果 复合材料的界面效果是基体与增强体或功能体复合效果的主要因素。只有界面效果的存在，才能充分地显示复合材料的各种优越性能。界面结构（物理结构和化学结构）的变化会引起复合材料性能的明显变化。界面除了可以作为复合材料的一个组分而对材料有各种物理性能影响外，其物理结构、化学结构及其尺度的变化都会有不同于其他组分相的作用。

## 1.1.4 金属基复合材料的分类与性能特点

### 1.1.4.1 金属基复合材料的分类<sup>[6,7]</sup>

金属基复合材料是以金属或合金为基体，以高性能的第二相为增强体的复合材料。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) 按增强体类型分类

① 颗粒增强复合材料 指弥散的增强体以颗粒的形式存在，其颗粒直径和颗粒间距较大，一般大于 $1\mu\text{m}$ 。在这种复合材料中，增强体是主要的承载相，而基体的作用则在于传递载荷。硬质增强体造成的对基体的束缚作用能起到一些阻止基体屈服的作用。颗粒复合材料的强度通常取决于增强颗粒的直径、间距和体积比，但基体性能也很重要。除此以外，这种材料的性能还对界面性能及颗粒排列的几何形状十分敏感。

② 片层状复合材料 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、高模量片层状增强物的复合材料。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。

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。

③ 纤维增强复合材料 金属基复合材料中的一维增强体根据其长度的不同可分为长纤维、短纤维和晶须。长纤维又叫连续纤维，它对金属基体的增强方式可以以单向纤维、二维织物和三维织物存在，前者增强的复合材料表现出明显的各向异性特征，第二种材料在织物平面方向的力学性能与垂直该平面的方向不同，而后的性能基本是各向同性的。连续纤维增强金属基复合材料是指以高性能的纤维为增强体，金属或它们的合金为基体制成的复合材料。纤维是承受载荷的主要组元，纤维的加入不但大大改善了材料的力学性能，而且也提高了耐温性能。

短纤维和晶须是比较随机均匀地分散在金属基体中，因而其性能在宏观上是各向同性的；在特殊条件下，短纤维也可定向排列，如对材料进行二次加工（挤压）就可达到。

当韧性金属基体用高强度脆性纤维增强时，基体的屈服和塑性流动是复合材料性能的主要特征，但纤维对复合材料弹性模量的增强具有相当大的作用。

(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、镍基、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。

(3) 按用途分类

① 结构复合材料 主要用作承力结构，它基本上由增强体和基体组成，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，这些性能包括电、磁、热、声、力学（指阻尼、摩擦）等。该材料可用于电子、仪器、汽车、航空、航天、武器等。

#### 1.1.4.2 金属基复合材料性能特点<sup>[6]</sup>

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物的特性、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、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、晶须及颗粒等增强物，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。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。

用高比强度、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百分数，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，减少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。

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有效地把热量散去，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、硼纤维等均具有很小的热膨胀系数,又具有很高的模量,特别是高模、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物不仅能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,并可通过调整增强物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,当石墨纤维含量达到48%时,复合材料的热膨胀系数为零,即在温度变化的环境中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强度和模量,因此金属基复合材料具有比基体金属更高的性能,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,纤维增强金属基复合材料的高温性能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 $1100^{\circ}\text{C}\times 100\text{h}$ 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 $500^{\circ}\text{C}$ 高温下,仍具有600MPa的高温强度,而铝基体在 $300^{\circ}\text{C}$ 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。

(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陶瓷增强物,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也提高了复合材料的硬度和耐磨性。

$\text{SiC}_p/\text{Al}$  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、刹车盘、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性 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拉伸强度比为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、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、先进武器系统中均具有广泛的应用前景,对装备性能的提高将发挥巨大作用。

## 1.2 金属基复合材料设计的基本原则

### 1.2.1 基体材料的选择

金属基体在复合材料中所起的主要作用如下:

① 固结增强体,与增强体一起构成复合材料整体,保护纤维使之不受环境侵蚀;

② 传递和承受载荷, 在颗粒增强金属基复合材料中基体是主要承载相, 在纤维增强金属基复合材料中, 基体对力学性能的贡献也远大于聚合物基体和陶瓷基体在复合材料中的贡献;

③ 赋予复合材料一定形状, 保证复合材料具有一定的可加工性;

④ 复合材料的强度、刚度、密度、耐高温、耐介质、导电、导热等性能均与基体的相应性质密切相关。

金属基体在复合材料中占有很大的体积比, 连续纤维增强金属基复合材料中基体约占 50%~70%。颗粒增强金属基复合材料中, 根据不同性能要求, 基体体积比可在 25%~90% 范围内变化, 多数为 80%~90%; 短纤维、晶须增强金属基复合材料中, 基体体积比在 70% 以上, 一般为 80%~90%。

### 1.2.1.1 选择基体的原则<sup>[6,7]</sup>

金属与合金的品种繁多, 目前用作金属基复合材料的金属有铝及铝合金、镁合金、钛合金、镍合金、钢与铜合金、锌合金、铅、钛铝、镍铝金属间化合物等。基体材料成分的正确选择对能否充分组合和发挥基体金属和增强物性能特点, 获得预期的综合优异性能, 满足使用要求十分重要。在选择基体金属时应考虑以下几方面。

(1) 金属基复合材料的使用要求 不同领域使用的金属基复合材料的使用要求各有侧重。

① 航天、航空领域 在航天航空领域, 对基体金属的性能要求有比强度高、比模量高、尺寸稳定性高。作为航天飞行器和卫星的构件时, 基体应选用密度小的轻金属合金, 如镁合金、铝合金; 增强体应选用高强度、高模量的连续石墨纤维、碳纤维等。

② 高性能发动机领域 在高性能发动机领域 (如喷气发动机增压叶片), 对基体金属的性能要求有高比强度、高比模量、优良的耐高温持久性能、能在高温氧化性气氛中长期工作。基体选用钛基合金、镍基合金及金属间化合物, 增强体选用碳化硅纤维 (增强钛合金)、钨丝 (增强镍基超合金) 等。

③ 汽车发动机领域 在汽车发动机领域 (如发动机活塞、缸套、连杆等零件) 对基体金属的性能要求有耐热、耐磨、热膨胀系数小、一定的高温强度、成本低廉和适合于批量生产。基体选用铝合金, 增强体选用碳化硅颗粒、氧化铝短纤维和碳短纤维等。

④ 电子工业领域 电子工业领域 (如集成电路散热元件和基板等) 对基体金属的性能要求有高导电、高导热、低热膨胀系数。基体选用导电、导热性能优异的银、铜、铝等, 增强体选用高模量石墨纤维等。

(2) 金属基复合材料组成特点 由于增强物的性质和增强机理的不同, 在基体材料的选择原则上有很大差别。对于连续纤维增强金属基复合材料, 纤维是主要承载物体, 纤维本身具有很高的强度和模量, 如高强度碳纤维的强度已超过 7000MPa, 超高模量石墨纤维的弹性模量已高达 900GPa, 而金属基体的强度和模量远远低于纤维的性能, 因此, 在连续纤维增强金属基复合材料中基体的主要作用应是以充分发挥增强纤维的性能为主, 基体本身应与纤维有良好的相容性和塑性, 而并不要求基体本身有很高的强度。

但对于非连续增强 (颗粒、晶须、短纤维) 金属基复合材料, 基体是主要承载物, 基体的强度对非连续增强金属基复合材料具有决定性的影响。因此要获得高性能的金属基复合材料必须选用高强度的铝合金为基体, 这与连续纤维增强金属基复合材料基体的选择完全不同。如颗粒增强铝基复合材料一般选用高强度的铝合金为基体, 如 A365、A6061、A7075 等高强铝合金。



总之, 针对不同的增强体系, 要充分分析和考虑增强物的特点来正确选择基体合金。

(3) 基体金属与增强物的相容性 由于金属基复合材料需要在高温下成型, 所以在金属基复合材料制备过程中金属基体与增强物在高温复合过程中, 处于高温热力学不平衡状态下的纤维与金属之间很容易发生化学反应, 在界面形成反应层。这种界面反应层大多是脆性的, 当反应层达到一定厚度后, 材料受力时将会因界面层的断裂伸长小而产生裂纹, 并向周围纤维扩展, 容易引起纤维断裂, 导致复合材料整体破坏。再者, 由于基体金属中往往含有不同类型的合金元素, 这些合金元素与增强物的反应程度不同, 反应后生成的反应产物也不同, 需在选用基体合金成分时充分考虑, 尽可能选择既有利于金属与增强物浸润复合, 又有利于形成合适稳定的界面的合金元素。如碳纤维增强铝基复合材料, 在纯铝中加入少量的 Ti、Zr 等元素明显改善了复合材料的界面结构和性质, 大大提高了复合材料的性能。

铁、镍等元素是促进碳石墨化的元素, 用铁、镍作为基体, 碳(石墨)纤维作为增强物是不可取的。Ni、Fe 元素在高温时能有效地促使碳纤维石墨化, 破坏了碳纤维的结构, 使其丧失了原有的强度, 做成的复合材料不可能具备高的性能。

因此, 在选择基体时应充分注意与增强物的相容性(特别是化学相容性), 并考虑到尽可能在金属基复合材料成型过程中抑制界面反应。例如, 可对增强纤维进行表面处理或在金属基体中添加其他成分, 以及选择适宜的成型方法或条件缩短材料在高温下的停留时间等。

#### 1.2.1.2 结构复合材料的基体<sup>[6,7]</sup>

用于各种航天、航空、汽车、先进武器等结构件的复合材料一般均要求有高的比强度和比刚度, 高的结构效率, 因此大多选用铝及铝合金、镁及镁合金作为基体金属。目前研究发展较成熟的金属基复合材料主要是铝基、镁基复合材料, 用它们制成的各种高比强度、高比模量的轻型结构件, 广泛的用于宇航、航空、汽车等领域。

在发动机, 特别是燃气轮机中所需要的结构材料是热结构材料, 要求复合材料零件在高温下连续安全工作, 工作温度在 650~1200℃, 同时要求复合材料有良好的抗氧化、抗蠕变、耐疲劳和良好的高温力学性质。铝、镁复合材料一般只能用在 450℃左右, 钛合金基体复合材料可用到 650℃, 而镍、钴基复合材料可在 1200℃使用。最近正在研究的金属间化合物为热结构复合材料的基体。

结构复合材料的基体大致可分为轻金属基体和耐热合金基体两大类。

(1) 用于 450℃以下的轻金属基体 目前研究发展最成熟、应用最广泛的金属基复合材料是铝基和镁基复合材料, 用于航天飞机、人造卫星、空间站、汽车发动机零件、刹车盘等, 并形成工业规模生产。对于不同类型的复合材料应选用合适的铝、镁合金基体。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。

(2) 用于 450~700℃的复合材料的金属基体 钛合金具有密度轻、耐腐蚀、耐氧化、强度高特点, 是一种可在 450~700℃温度下使用的合金, 在航空发动机等零件上使用。用高性能碳化硅纤维、碳化钛颗粒、硼化钛颗粒增强钛合金, 可以获得更高的高温性能。美国已成功试制成碳化硅纤维增强钛复合材料, 用它制成的叶片和传动轴等零件可用于高性能航空发动机。

(3) 用于 1000℃以上的高温复合材料的金属基体 用于 1000℃以上的高温金属基复合材料的基体材料主要是镍基、铁基耐热合金和金属间化合物, 较成熟的是镍基、铁基高温合金。金属间化合物基复合材料尚处于研究阶段。镍基高温合金是广泛使用于各种燃气轮机的重要材料。用钨丝、钽钨丝增强镍基合金可以大幅度提高其高温性能——高温持久性能和高