



国家出版基金资助项目  
“十二五”国家重点图书  
材料研究与应用著作

# 铜基复合材料及其制备技术

COPPER MATRIX  
COMPOSITES AND  
ITS PREPARATION  
TECHNOLOGY

湛永钟 著

哈尔滨工业大学出版社  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金资助项目  
“十二五”国家重点图书  
材料研究与应用著作

# 铜基复合材料及其制备技术

COPPER MATRIX  
COMPOSITES AND  
ITS PREPARATION  
TECHNOLOGY

湛永钟 著

哈尔滨工业大学出版社  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 提 要

本书是作者从事铜基复合材料科研与教学工作的总结,全书系统地反映了新型铜基复合材料的设计原理、制备技术、发展和应用情况,涵盖了非连续增强铜基复合材料、连续增强铜基复合材料、原位反应合成铜基复合材料、原位形变铜基复合材料等几大类材料的结构、性能与合成方法,并对铜基复合材料的界面及特征进行了介绍。

本书可供从事新型铜基复合材料研究和生产的科技人员参考,也可作为材料类专业学生的教学参考书。

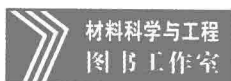
### 图书在版编目(CIP)数据

铜基复合材料及其制备技术/湛永钟著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2015.8

ISBN 978-7-5603-4289-4

I. ①铜… II. ①湛… III. ①铜基复合材料—研究  
IV. ①TB331

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 158591 号



责任编辑 许雅莹 张秀华

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司

开 本 660mm×980mm 1/16 印张 14.5 字数 210 千字

版 次 2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-4289-4

定 价 78.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

# 前 言

铜基复合材料是金属基复合材料中既年轻又很重要的一个门类,近 10 年来取得了快速发展。该类材料以颗粒、晶须、纤维等为增强体,既能保持铜合金良好的传导和抗强磁场性能,又具有耐磨、减摩、低膨胀等新的功能特性,其室温和高温力学性能优异,因此成为发展新型高导电、高强度功能材料的重要方向之一。目前正朝着多组元混杂增强、原位自生、增强体纳米化等方向发展,新材料体系和合成工艺不断涌现。

作者自 2000 年起开始接触并从事铜基复合材料的科研与教学工作,一直密切关注国内外该领域的科研进展,在自身工作的基础上吸收消化国内外同行的研究成果,撰写了本书,目的是反映新型铜基功能复合材料的原理、技术和应用情况。本书可供从事新型铜基复合材料研究和生产的科技人员参考,也可作为材料类专业学生的教学参考书。

在本书撰写过程中得到上海交通大学张国定教授的悉心指导;广西大学杨文超和黄金芳女士参与了部分内容的整理和图表修改,谨此致谢。

热忱期待读者对本书的评教与指正。

湛永钟

2015 年 3 月于南宁

# 目 录

第1章 绪 论 .....	1
1.1 金属基复合材料简述 .....	1
1.1.1 复合材料概述 .....	1
1.1.2 金属基复合材料的发展 .....	3
1.1.3 金属基复合材料的分类 .....	4
1.1.4 金属基复合材料的性能 .....	6
1.1.5 金属基复合材料的制备工艺 .....	9
1.2 铜基复合材料的发展 .....	13
1.3 铜基复合材料分类与设计原则 .....	17
1.3.1 铜基复合材料分类与性能特点 .....	17
1.3.2 铜基复合材料设计原则 .....	19
参考文献 .....	21
第2章 非连续增强铜基复合材料 .....	24
2.1 颗粒增强铜基复合材料 .....	24
2.1.1 常用颗粒增强体 .....	24
2.1.2 颗粒增强铜基复合材料 .....	29
2.2 短纤维增强铜基复合材料 .....	62
2.3 铜基纳米复合材料 .....	66
2.3.1 纳米碳管增强铜基复合材料 .....	67
2.3.2 晶须增强铜基复合材料 .....	70
2.4 非连续增强铜基复合材料的制备方法 .....	71
2.4.1 粉末冶金法 .....	71
2.4.2 机械合金化法 .....	71

2.4.3	真空搅拌铸造法 .....	72
2.4.4	复合电铸技术 .....	73
	参考文献 .....	73
<b>第3章</b>	<b>连续增强铜基复合材料 .....</b>	<b>80</b>
3.1	单向长纤维增强铜基复合材料 .....	80
3.1.1	碳纤维增强铜基复合材料 .....	80
3.1.2	碳化硅纤维增强铜基复合材料 .....	92
3.1.3	金属纤维增强铜基复合材料 .....	98
3.2	二维及三维增强铜基复合材料 .....	103
3.2.1	二维连续增强铜基复合材料 .....	103
3.2.2	三维织物及其复合材料 .....	105
3.3	三维网络结构陶瓷增强铜基复合材料 .....	107
3.3.1	三维网络结构陶瓷/金属复合材料概述 .....	107
3.3.2	三维网络结构陶瓷/铜基复合材料的制备 .....	108
3.3.3	三维网络陶瓷/铜基复合材料的组织与性能 .....	111
3.4	连续增强铜基复合材料的制备方法 .....	111
3.4.1	热压固结法 .....	112
3.4.2	热等静压法 .....	114
3.4.3	液态金属无压浸渗法 .....	115
3.4.4	真空压力浸渍法 .....	115
3.4.5	挤压铸造法 .....	116
	参考文献 .....	117
<b>第4章</b>	<b>原位反应合成铜基复合材料 .....</b>	<b>122</b>
4.1	原位反应合成金属基复合材料概述 .....	122
4.1.1	原位反应合成金属基复合材料的发展 .....	122
4.1.2	原位反应合成金属基复合材料的制备方法 .....	123
4.2	原位反应合成铜基复合材料体系的热力学分析及其机理 .....	128
4.2.1	Cu-Ti-C 体系 .....	128

4.2.2	Cu-B-Ti 体系 .....	130
4.2.3	Cu-Ti-B <sub>4</sub> C 体系 .....	131
4.2.4	Cu-Ti-Si 体系 .....	132
4.2.5	Cu-Al-CuO (Cu <sub>2</sub> O) .....	133
4.3	原位反应合成铜基复合材料的结构与性能 .....	134
4.3.1	原位反应合成氧化物增强铜基复合材料 .....	134
4.3.2	原位反应合成碳化物增强铜基复合材料 .....	140
4.3.3	原位反应合成硼化物增强铜基复合材料 .....	141
4.3.4	多相混杂原位反应合成铜基复合材料 .....	143
4.4	原位反应合成铜基复合材料的发展方向 .....	144
	参考文献 .....	145
<b>第 5 章</b>	<b>原位形变铜基复合材料 .....</b>	<b>150</b>
5.1	原位形变铜基复合材料的设计及制备原理 .....	150
5.1.1	设计原理 .....	150
5.1.2	制备原理 .....	151
5.2	原位形变铜基复合材料微观结构的形成和演变 .....	153
5.2.1	微观组织形成机理与特点 .....	153
5.2.2	形变原位铜基复合材料微观组织的热稳定性 .....	157
5.3	原位形变铜基复合材料的强化机制 .....	159
5.3.1	修正的位错强化模型 .....	160
5.3.2	相界面障碍模型 .....	161
5.3.3	修正的混合模型 .....	162
5.4	原位形变铜基复合材料的传导机理 .....	163
5.5	主要的原位形变铜基复合材料体系 .....	166
5.5.1	Cu-Nb 系原位形变复合材料 .....	166
5.5.2	Cu-Fe 系原位形变复合材料 .....	169
5.5.3	Cu-Cr 系原位形变复合材料 .....	172
5.5.4	Cu-Ag 系原位形变复合材料 .....	175
	参考文献 .....	177

第 6 章 铜基复合材料界面 .....	184
6.1 复合材料界面概述 .....	184
6.1.1 复合材料界面研究现状简述 .....	184
6.1.2 复合材料界面组织结构及其表征 .....	187
6.1.3 复合材料界面力学行为 .....	188
6.2 铜基复合材料界面特征 .....	190
6.2.1 纤维增强铜基复合材料界面 .....	190
6.2.2 非连续增强铜基复合材料界面 .....	201
6.2.3 原位反应合成铜基复合材料界面 .....	206
6.2.4 原位形变铜基复合材料界面 .....	208
参考文献 .....	213
索引 .....	217



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 金属基复合材料简述

### 1.1.1 复合材料概述

复合材料是以一种材料为基体,另一种或多种材料为增强体组合而成的材料。由于各种组成材料在性能上互相取长补短,产生协同效应,从而使复合材料的综合性能或某些方面的特性优于原来的组成材料,因此可以满足各种不同的要求<sup>[1]</sup>。

实际上人类使用复合材料已经有很长的历史,按照发展阶段的不同可分为古代复合材料和现代复合材料两个阶段。不论是国内还是国外,“复合”的思想很早就被人们用来指导各类材料的开发与改进,因此古代复合材料早已渗透在生活和生产的许多领域之中。在国内,发现最早的复合材料的例子是,古代人使用草茎增强土坯来制作住房墙体材料。此外从古至今的漆器,使用的是以漆为基体、麻绒或丝绢织物作增强体的复合材料;并且韧性和耐蚀性优异的金属包层复合材料制品(例如越王剑),也是复合材料的一大应用。国外使用复合材料的例子也比比皆是,比如 5000 年前中东地区的人们就已用芦苇增强沥青复合材料来造船;古埃及人则使用石灰、火山灰等作黏合剂并混合砂石等形成颗粒增强复合材料,用来修建金字塔,等等,这些均是现代复合材料的雏形。

现代复合材料的发展始源于 20 世纪 40 年代,合成树脂和玻璃纤维被大量地商品化生产以后,纤维复合材料逐步发展成为具有重要工程意义的材料。采用铂坩埚生产连续玻璃纤维的技术促进了在世界范围内大规模生产纤维的活动,推动了纤维增强复合材料的发展,主要里程碑包括 1964

年的碳纤维增强树脂基复合材料、1965年的硼纤维增强树脂基复合材料、1969年的碳/玻璃混杂纤维增强树脂基复合材料和1970年的碳/芳纶混杂纤维增强树脂基复合材料。由于现代复合材料技术不断发展成熟,在许多领域逐渐取代了金属材料,例如,在航空、航天领域,它可满足韧性、耐热、比强度、比模量、抗环境能力和加工性能等多方面的要求,因而获得了广泛应用。树脂基复合材料是最先被开发并获得产业化推广的一种复合材料,根据基体的受热行为可分为热塑性树脂基复合材料和热固性树脂基复合材料。目前热固性树脂基复合材料已在建筑、防腐、轻工、交通运输、航空、航天、造船等工业领域获得广泛应用<sup>[2]</sup>。

此后,其他结构用的先进复合材料逐渐受到重视,发达国家纷纷提出了各自的研制和开发目标,于是陆续出现了碳基、金属基和陶瓷基先进复合材料。尤其碳基复合材料自20世纪60年代发展以来,它以碳纤维或石墨纤维作为增强体,由可碳化或石墨化的树脂浸渍,或用化学气相沉积碳作为碳基体,通过特定的工艺制成碳/碳复合材料。该材料可在超过2700℃的高温环境下保持良好的强度、模量和耐烧蚀性,因此被用来制造导弹尖锥、发动机喷管、航天飞机机翼的前缘部件等关键结构。

金属基复合材料是20世纪70年代末期发展起来的,是以高强度、高模量的耐热纤维与金属(尤其是轻金属)复合而成的复合材料。该类材料不但具有金属基体良好的塑性、导电和导热性,而且纤维增强体的加入进一步提高了材料的强度和模量,同时降低了密度。此外,这种材料还具有高阻尼、耐磨损、耐疲劳、不吸潮、不放气和膨胀系数低等特点,克服了树脂基复合材料的许多不足。因此,金属基复合材料首先发展成为航天、航空、军工等尖端技术领域理想的结构材料。目前人们又研发了针对不同结构和功能应用的、由多种基体和增强体组成的金属基复合材料新体系,使其成为材料科学的重要分支之一。

陶瓷基复合材料的发展始于20世纪80年代,其思路是采用纤维补强陶瓷基体以提高材料的韧性,目前已在航空和军事领域取得一定的应用。例如,美国开发了三维编织增强陶瓷热结构件、陶瓷基复合材料燃气轮机发动机转子、叶片和燃烧室涡形管等;法国则采用陶瓷基复合材料作为火箭

试验发动机的结构材料,使其重量减轻了 50%。目前陶瓷基复合材料仍在发展之中,在未来航天、国防、能源、汽车、化工等领域的新材料竞争中将起关键的作用<sup>[3]</sup>。

### 1.1.2 金属基复合材料的发展

金属基复合材料是以金属或合金作为基体,并以纤维、晶须、颗粒等具有不同形态和性能的组元为增强体所制成的复合材料。由于这类材料最早是为满足航空、航天工业用结构材料所开发的,需要满足高强度和低密度的要求,因此以 Al, Mg 等轻金属为基体的复合材料最先被研究和应用。以碳纤维和硼纤维连续增强的金属基复合材料首先获得了快速发展,但是该类金属基复合材料的生产工艺复杂、成本较高,为其研究带来了一定障碍。随着涡轮发动机中高温部件对于耐高温材料的需求,近 30 年来的金属基特别是钛基复合材料的研究获得了复苏的机会。特别是 20 世纪 80 年代日本丰田公司将陶瓷纤维增强铝基复合材料用于柴油发动机活塞的制造上,推动了金属基复合材料的研制与开发。

与此同时,非连续增强金属基复合材料也得到迅速发展,研究的重点特别集中在碳化硅或氧化铝颗粒、短纤维增强铝基复合材料上。这类材料的基体和增强体的构成尺度、承载能力和变形能力等介于弥散强化和连续纤维强化两者之间,并兼具它们的性能优点,还具有优良的加工性能和可设计性。而且与传统的合金材料相比其性能优势比较显著,所以在许多应用领域里具有很大的吸引力,受到高度重视<sup>[4]</sup>。例如,原来的许多航空、航天材料的性能已经接近了极限,研制出工作温度更高,比刚度和比强度大幅度增加的金属基复合材料已经成为发展高性能材料的一个重要方向。目前,美国已在航天推进系统领域形成了一个增长率稳定的金属基复合材料市场。

民用方面,陶瓷颗粒和短纤维增强金属基复合材料在汽车、电子等领域的应用得到普遍关注。例如,顶部由氧化铝短纤维或氧化铝和二氧化硅短纤维混杂增强铝基复合材料所制成的局部增强内燃机活塞,与常规的 Al-Si 铸造合金相比,其使用性能和制造工艺方面均有明显的优势。

### 1.1.3 金属基复合材料的分类

金属基复合材料品种繁多,根据用途、基体种类、增强体形态及加入(形成)方式等的不同,又有多种分类方式。

#### 1. 根据用途不同分类

根据用途不同,金属基复合材料可分为金属基结构复合材料和金属基功能复合材料。金属基结构复合材料具有高的比强度、比模量、尺寸稳定性和耐热性等特点,用于制造各种高性能结构件。金属基功能复合材料则是除机械性能外,还提供导电、超导、半导、磁性、压电、阻尼、吸波、透波、摩擦、屏蔽、阻燃、防热、吸声、隔热等某一种或多种功能。

#### 2. 根据基体种类不同分类

根据基体种类的不同,金属基复合材料可分为铝基、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。

铝基复合材料具有良好的塑性、韧性、易加工性、工程可靠性等优点,且价格低廉,尤其是比强度和比刚度高,因而应用最为广泛,发展前景良好。

钛基复合材料是比强度最高的金属基复合材料,由于钛在中温使用时比铝合金能够保持更高的强度,因此是航空和航天领域结构材料的理想用材。

铜基复合材料可发挥铜基体优良的导电、导热性能,而增强体可赋予其耐磨、减摩、低热膨胀、耐热等功能特性,因此是新型的结构功能一体化复合材料。

镁基复合材料除了具有铝基复合材料的性能特征之外,还有更低的密度,近年来作为轻质结构材料备受重视,在航空、航天、汽车制造、电子信息等领域前景良好。

镍基复合材料主要用于制造高温下工作的零部件(如燃汽轮机叶片),可进一步提高机构的工作温度,目前着重改善其制造工艺及服役的可靠性。

### 3. 根据增强体形态不同分类

按增强体形态的不同,金属基复合材料可分为连续纤维增强金属基复合材料和非连续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模量、高强度、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)丝等作为增强体,与金属基体复合而形成高性能的复合材料。同时为了获得所需要的各种优良性能可通过对基体、纤维类型和纤维排列方向、含量、方式等进行优化设计的方法实现。在纤维增强金属基复合材料中,纤维因具有很高的强度和模量而成为复合材料的主要承载体,而金属基体主要起固定纤维、传递载荷和部分承载的作用。这类复合材料中纤维的排列具有方向性,因此复合材料的性能有明显的各向异性——通常在沿纤维轴向上的强度和模量较高,而横向上的性能较差,因此需要通过调整不同方向上纤维的排布来控制复合材料构件的性能。由于这类复合材料纤维的排布、含量、均匀分布等对于材料设计和制备工艺的选择有较大的影响,因此其制备成本较高。

非连续增强金属基复合材料是由颗粒、短纤维、晶须等作为增强体与金属基体组成的复合材料。非连续增强体可降低材料的热膨胀系数,明显提高材料的耐热性、耐磨性、高温力学性能和弹性模量。由于增强体在基体中随机分布,因此复合材料的性能是各向同性的。该类材料可以用很多方法制造,比如可用常规的粉末冶金、液态金属搅拌、液态金属挤压铸造、真空压力浸渍等方法制造,同时还可以用铸造、挤压、锻造、轧制等传统的金属加工成型方法获得,这些制造方法均操作简便、成本低,适合大批量生产,目前已在许多领域获得很好的应用<sup>[5]</sup>。

近年来,为了改变单一增强金属基复合材料性能的不足,以及实现多种增强体之间优势互补的协同作用,人们根据不同领域对性能的需要发展了混杂增强金属基复合材料,其中增强体的混杂组合包括颗粒-颗粒、颗粒-短纤维(或晶须)、连续纤维-颗粒、连续纤维-连续纤维等形式。

### 4. 根据增强体加入(形成)方式不同分类

根据增强体的加入(形成)方式不同,可分为外加增强金属基复合材

料和原位自生增强金属基复合材料两种。前者是在熔铸、粉末冶金、机械合金化等工艺过程中,往金属基体中添加预定成分和含量的晶须、纤维和颗粒等增强体,从而获得所需成分的复合材料。原位自生增强金属基复合材料则是在金属基体内通过反应或定向自生的途径生长出一种或几种颗粒、晶须、纤维状增强体原位增强金属基复合材料,它具有以下优点:

(1)因为增强体是从金属基体中原位形核、长大而成的热力学稳定相,因此其表面无污染,从而与基体相容性较好,同时复合材料的界面结合强度比较高;

(2)可通过合理选择反应元素或化合物的类型、成分及其反应性有效地控制原位自生增强体的种类、大小、分布和数量等,从而获得材料所需的使用性能,材料的设计性良好;

(3)由于增强体的合成、处理和加入等工序与复合材料的制备是同步进行的,省去了增强体合成的阶段,因此该复合材料的制备工艺相对简单,成本较低;

(4)在液态金属基体中原位形成增强体工艺的复合材料体系,形状复杂、尺寸较大的近净形构件可以通过铸造的方法来制备,进一步简化了材料的加工技术。

#### 1.1.4 金属基复合材料的性能

金属基复合材料的性能由金属或合金基体和增强物的特性、含量、分布等共同决定。可通过对组元的优化组合保持基体的金属特性,同时获得高比强度、比模量、耐热、耐磨等综合性能<sup>[6,7]</sup>。金属基复合材料主要具有以下性能特点:

##### 1. 高比强度、比模量

制备金属基复合材料所用的纤维、晶须、颗粒等增强体通常具有高强度、高模量和低密度,因此可明显提高复合材料的比强度和比模量。例如,高性能的连续硼纤维、碳(石墨)纤维、碳化硅纤维等,其纵向具有很高的强度和模量。碳纤维的密度为  $1.85 \text{ g/cm}^3$ ,而其最高强度可达到  $7\,000 \text{ MPa}$ ,超过铝合金强度的 10 倍以上。碳化硅纤维和硼纤维的密度为  $2.5 \sim$

3.4 g/cm<sup>3</sup>,其强度却达到 3 000 ~ 4 500 MPa,模量达到 350 ~ 450 GPa。采用高比强度、比模量复合材料制成的构件质量小、刚性好、强度高,该类复合材料是航天、航空技术领域理想的结构材料<sup>[8]</sup>。

## 2. 导热、导电性能良好

金属基复合材料的组成以金属基体为主,其体积分数通常超过 60%。因此该类材料保持着金属特有的良好导电和导热性能。优良的导热性可减少构件受热后产生的温度梯度,这对于通信、电子和航空、航天等领域要求构件具有良好的尺寸稳定性尤为重要。例如,为了解决高集成度电子器件的散热问题,可采用具有高导热性的超高模量石墨纤维、金刚石纤维、金刚石颗粒等作为增强体制成铝基或铜基复合材料,其热导率甚至高于纯铝和普通铜合金,将其作为集成电路底板和电子封装部件不但能有效地散发热量,其低而稳定的热膨胀系数还能提高集成电路的可靠性。在航空、航天领域,金属基复合材料良好的导电性能可防止飞行过程中在构件上产生静电聚集,对于提高飞行安全系数有着十分重要的意义<sup>[9]</sup>。

## 3. 热膨胀系数小、尺寸稳定性好

金属基复合材料所用的增强体通常具有很小的热膨胀系数和很高的弹性模量。例如,高模、超高模量的石墨纤维具有负的热膨胀系数,它们不仅可以大幅度提高材料的强度和模量等力学性能,还能通过调整增强体的含量来降低复合材料的热膨胀系数。例如,纤维体积分数为 48% 的石墨纤维增强镁基复合材料可获得的热膨胀系数为零,因此已被用作人造卫星构件,以适应低地球轨道环境下的温度交替变化,保证卫星天线等构件不发生热变形,提高了工作的安全系数和精度。

## 4. 高温性能良好

与聚合物相比,金属本身的高温性能更好,而纤维、晶须、颗粒等增强体又能进一步提高材料的高温综合性能,因此金属基复合材料往往具有良好的高温力学性能。连续纤维增强金属基复合材料中纤维是主要的承载体,它的强度在高温下基本不下降,因此复合材料的高温性能比金属基体提高许多,主要性能指标可保持到接近金属熔点附近。例如,铝基体在 300 ℃ 时强度已下降到不足 100 MPa,而石墨纤维增强铝基复合材料在

500 °C下可保持高达600 MPa的强度。又如,钨丝增强耐热合金的1 100 °C、100 h的高温持久强度为207 MPa,远超过同种基体合金的高温持久强度值(48 MPa)。因此,金属基复合材料是航空发动机叶片、火箭发动机、汽车发动机、核反应堆、能源转换设备等高温零部件的优良结构材料,其可大幅度提高部件的工作性能和能源转换效率。

### 5. 摩擦磨损性能良好

与普通的金属及合金相比,金属基复合材料的一个突出优势是耐磨性能好,尤其是采用硬度高且化学性质稳定的陶瓷颗粒增强的金属基复合材料,在耐磨减摩领域受到广泛重视和获得较好的应用。金属基复合材料在摩擦磨损领域的另外一个优势是,可以通过调整增强体的形态、尺寸、含量以及不同种类的配比获得所需的耐磨和减摩性质,从而灵活地适应实际工况条件的接触方式、载荷、滑动速度、润滑条件、温度、化学与导电等,以及配对滑动材料的要求。例如,碳化硅颗粒增强铝基复合材料( $\text{SiC}_p/\text{Al}$ )的室温和高温耐磨性能优于相应的铝基体合金材料和传统的耐磨铸铁材料。因此,在汽车、机械工业中对耐磨性能有较高要求的重要零部件(例如发动机、刹车盘、活塞等)中获得应用,可明显地提高零件的性能和寿命。

### 6. 良好的疲劳性能和断裂韧性

通过选择恰当的组元种类搭配、合理设计增强体在金属基体中的分布以及采用适当的制备和处理工艺,可使增强体与金属基体之间的界面具有良好的结合状态,这些均有助于传递载荷和阻止裂纹的扩展,使金属基复合材料具有良好的断裂韧性和高温疲劳性能。例如,碳纤维增强铝基复合材料的疲劳强度与拉伸强度比达到0.7左右,是理想的室温和高温结构材料。

### 7. 耐候性好

金属材料组织致密、性质稳定,不存在聚合物材料的老化、分解和吸潮等问题。金属基复合材料一般不会发生性能的自然退化,比聚合物及其复合材料具有更加优越的耐候性能,特别是在航天领域的空间环境中使用时不会分解出低分子物质污染仪器和环境,因此可在更多领域和更严苛的工作环境下使用。



### 1.1.5 金属基复合材料的制备工艺

虽然金属基复合材料已在一些尖端技术领域和部分民用领域中获得应用,但其用量还很小,而制备成本是造成这一问题的最重要因素之一。由于需要加入不同形态和含量的增强体,金属基复合材料的成型工艺比传统金属材料更为复杂、技术难度较大,制备成本占其总成本的60%~70%,降低生产制备成本是该类材料获得实用化最为关键的途径。

目前已开发出多种适用于不同金属基复合材料的复合制备技术。根据制备过程中基体的温度不同进行分类可分为三类:液相复合工艺、固相复合工艺和固液两相复合工艺。而近年来快速发展起来的表面复合工艺推动了各类表面复合材料的开发<sup>[10, 11]</sup>。

#### 1. 液相复合工艺

##### (1) 搅拌复合工艺

搅拌复合工艺也称为搅拌铸造法,是通过机械搅拌装置使颗粒增强体与液态金属基体进行混合,然后采用常压铸造、压力铸造或真空常压铸造等方法制成复合材料,同时直接成型为所需尺寸的零件。根据搅拌工艺的不同,又可分为漩涡法和Duralcan法两种。漩涡法是通过机械搅拌在熔体中产生涡流引入颗粒来与液态金属充分混合。Duralcan法是加拿大Duralcan公司开发的,在真空条件下的搅拌熔炼工艺,是搅拌复合工艺发展的新阶段,目前已获得大规模的应用。

搅拌复合工艺可采用常规的熔炼设备来实现,成本低廉,可制备精密复杂的零件。然而,由于该法需要在较高温度下使不同组元进行较长时间的复合,因此金属基体与颗粒之间容易发生界面反应,基体易产生气孔、夹杂物等铸造缺陷;当工艺控制不好时,可能会造成增强体分布不均匀。此外,如果增强体的体积分数过高,例如超过25%,金属熔体的黏度将增大而影响搅拌复合工艺的效果。上述问题是推动搅拌复合工艺制备金属基复合材料需要继续解决的问题。

##### (2) 浸渗复合工艺

浸渗复合工艺是让液态金属在不同的压强环境(高压、气压和无压)