

金属基复合材料

# 金属基复合材料

张国定 赵昌正 编著

上海

TS331

版社

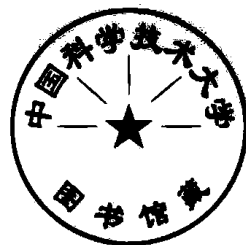
上海交通大学出版社

TB 231

Z. 14

# 金属基复合材料

张国定 赵昌正 编著



上海交通大学出版社

## 内 容 提 要

本书系统地介绍了金属基复合材料，全书共分十章，内容包括材料设计的基本原则、基体材料和增强材料、性能的复合准则、界面、破坏机理、制造方法和二次加工、性能和应用、分析测试方法。

本书可作有关专业的教材，也可供从事金属基复合材料研究和开发的科技人员及其他有关人员参考。

## 金属基复合材料

张国定 赵昌正 编著

上海交通大学出版社·出版

(上海市华山路1954号 邮政编码200030)

新华书店上海发行所·发行

江苏常熟文化印刷厂·印刷

开本：787×1092(毫米)1/16 印张：14.25 字数：353000

版次：1996年7月 第1版 印次：1996年7月 第1次

印数：1—1600

ISBN 7-313-01595-x/TG·028 定价：16.40元

# 前 言

现代科学技术的迅速发展对材料性能的要求日益提高,除了优异的力学性能外,常希望材料具有某些特殊性能和良好的综合性能。单一的金属、陶瓷、高分子等工程材料已难以满足这些性能要求,金属基复合材料便是迅速发展起来的高性能材料之一。经过多年的努力,已经成功地制造了很多品种的金属基复合材料,由于他们的性能优异,在世界上引起了越来越广泛的注意。金属基复合材料因价格比较昂贵,首先应用于航空、航天和军事领域。新的制备技术的研究成功及廉价的增强物的开发,金属基复合材料已开始用于汽车等民用工业部门。随着科学技术的不断发展,新的制造方法的出现,高性能增强物价格的降低,相信金属基复合材料在各方面将有越来越广阔的应用前景。

根据我们十几年来在教学上的体会和经验,在原有教材的基础上,收集了各种参考资料中的有关材料,并结合我们从事金属基复合材料科学研究上取得的部分成果编写了这本供大学本科有关专业学生使用的教材,它也可作研究生及从事金属基复合材料研究的科技人员的参考书。

本书第一、三、四、八、十章由张国定编写,第二、五、六、七、九章由赵昌正编写,张帆、陈煜同志也参加了部分内容的编写工作。

由于编者水平有限,本书的错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者 1995.7

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 复合材料的定义、金属基复合材料的分类 .....	1
1.2 金属基复合材料的性能特点 .....	3
<b>第二章 金属基复合材料设计的基本原则</b> .....	7
2.1 金属基复合材料体系选择及材料设计 .....	7
2.1.1 结构复合材料的体系选择及材料设计 .....	7
2.1.2 功能复合材料的材料设计 .....	9
2.2 金属基复合材料工艺方法的选择 .....	9
<b>第三章 基体材料</b> .....	11
3.1 选择基体的原则 .....	11
3.1.1 金属基复合材料的使用要求 .....	11
3.1.2 金属基复合材料组成的特点 .....	12
3.1.3 基体金属与增强物的相容性 .....	12
3.2 结构复合材料的基体 .....	13
3.2.1 用于 450°C 以下的轻金属基体——铝、镁合金 .....	14
3.2.2 用于 450~700°C 的复合材料的金属基体 .....	14
3.2.3 用于 1000°C 以上的高温复合材料的金属基体 .....	14
3.3 功能用金属基复合材料的基体 .....	15
<b>第四章 增强物</b> .....	16
4.1 增强物的分类 .....	17
4.1.1 纤维类增强物 .....	17
4.1.2 颗粒类增强物 .....	17
4.1.3 晶须类增强物 .....	17
4.1.4 金属丝 .....	18
4.2 碳纤维 .....	18
4.2.1 碳纤维的生产 .....	19
4.2.2 碳纤维的结构 .....	22
4.2.3 碳纤维的性能 .....	24
4.3 硼纤维 .....	26
4.3.1 硼纤维的制造 .....	26
4.3.2 硼纤维的性能 .....	27
4.4 碳化硅纤维 .....	27
4.4.1 烧结法碳化硅纤维 .....	28
4.4.2 气相法碳化硅纤维 .....	28

4.5 陶瓷纤维及金属丝 .....	30
4.5.1 氧化铝纤维 .....	30
4.5.2 金属丝 .....	31
4.6 晶须及颗粒类增强物 .....	32
<b>第五章 复合材料性能的复合准则</b> .....	<b>34</b>
5.1 力学性能的复合准则 .....	34
5.1.1 连续纤维增强复合材料力学性能的复合准则 .....	35
5.1.2 非连续纤维增强复合材料力学性能的复合准则 .....	40
5.1.3 颗粒增强复合材料的弹性特性和强度 .....	43
5.2 物理性能的复合准则 .....	44
5.2.1 密度 .....	44
5.2.2 热膨胀系数 .....	44
5.2.3 导热率 .....	46
5.2.4 比热 .....	47
5.2.5 电导率 .....	47
5.2.6 其他物理性能 .....	48
<b>第六章 金属基复合材料中的界面</b> .....	<b>49</b>
6.1 界面的基本概念 .....	49
6.1.1 界面的定义 .....	49
6.1.2 界面的效应 .....	49
6.1.3 界面的分类 .....	50
6.2 界面的物理化学特性 .....	51
6.2.1 润湿现象 .....	51
6.2.2 基体与增强物之间的化学相容性 .....	54
6.2.3 界面结合力和界面结合类型 .....	67
6.2.4 界面的稳定性 .....	68
6.3 界面的力学特性 .....	70
6.3.1 基体与增强物之间的力学相容性, 界面的力学环境 .....	70
6.3.2 界面的力学理论 .....	74
6.4 金属基复合材料的界面设计 .....	86
<b>第七章 金属基复合材料的破坏机理</b> .....	<b>88</b>
7.1 脆性纤维增强金属基复合材料破坏过程的特点及微观机制分析 .....	88
7.2 复合材料各组元的力学相互作用 .....	90
7.2.1 纤维和基体的共同变形 .....	91
7.2.2 复合材料组元间的应力再分配 .....	91
7.3 复合材料破坏过程的发展阶段 .....	103
7.3.1 研究复合材料破坏过程的概率方法 .....	103
7.3.2 损伤统计累积时复合材料的承载能力 .....	103
7.3.3 损伤累积函数和短纤维段的强度分布 .....	105

7.3.4	向复合材料完全破坏过渡	106
7.3.5	组元的物理化学相互作用对金属基复合材料的破坏机理及强度的影响	109
7.4	长纤维增强金属基复合材料的破坏机制	111
7.5	短纤维增强复合材料的破坏机制	113
7.5.1	等长纤维增强复合材料	113
7.5.2	不等长纤维增强复合材料	114
<b>第八章</b>	<b>金属基复合材料的制造方法</b>	<b>117</b>
8.1	金属基复合材料制造的难点及解决的途径	117
8.2	金属基复合材料制造方法的分类	121
8.2.1	固态法	123
8.2.2	液态法	129
8.2.3	其他复合制造方法	140
8.3	金属基复合材料制造方法的比较和发展前景	142
8.4	金属基复合材料的二次加工	143
8.4.1	铸造成型	143
8.4.2	挤压、模锻等塑性成型	144
8.4.3	机械切削加工	145
8.4.4	焊接	146
<b>第九章</b>	<b>金属基复合材料的性能和应用</b>	<b>147</b>
9.1	金属基复合材料的性能	147
9.2	铝、镁基复合材料的性能及应用	149
9.2.1	长纤维增强铝基复合材料的性能	149
9.2.2	短纤维增强铝基复合材料的性能	166
9.2.3	晶须和颗粒增强铝基复合材料的性能	168
9.2.4	铝基复合材料的应用	175
9.2.5	镁基复合材料的性能和应用	176
9.3	钛基复合材料的性能和应用	186
9.4	耐高温金属基复合材料的性能和应用	189
9.5	其他金属基复合材料的性能和应用	192
<b>第十章</b>	<b>金属基复合材料的分析测试方法</b>	<b>194</b>
10.1	金属基复合材料的力学性能测试	194
10.1.1	强度控制设计参数的测试	194
10.1.2	断裂控制设计性能参数的测试	201
10.1.3	界面强度的测试	204
10.1.4	残余应力的测试	206
10.2	金属基复合材料的物理性能的测试	208
10.2.1	热膨胀系数的测定	208
10.2.2	导热系数的测定	210
10.2.3	内耗的测定	212

10.3 金属基复合材料组织结构分析方法 .....	214
10.3.1 纤维 .....	214
10.3.2 界面 .....	216
<b>参考文献</b> .....	219



# 第一章 绪 论

金属基复合材料学科是一门相对较新的材料科学，涉及材料表面、界面、相变、凝固、塑性形变、断裂力学等，仅有 30 余年的发展历史。金属基复合材料的发展与现代科学技术和高技术产业的发展密切相关，特别是航天、航空、电子、汽车以及先进武器系统的迅速发展对材料提出了日益增高的性能要求，除了要求材料具有一些特殊的性能外，还要具有优良的综合性能，有力地促进了先进复合材料的迅速发展。如航天技术和先进武器系统的迅速发展，对轻质高强结构材料的需求十分强烈。由于航天装置越来越大，结构材料的结构效率变得更为重要。宇航构件的结构强度、刚度随构件线性尺寸的平方增加，而构件的重量随线性尺寸的立方增加。为了保持构件的强度和刚度就必须采用高比强度、高比刚度和轻质高性能结构材料。又如电子技术的迅速发展，大规模集成电路器件的发展，集成度越来越高，功率也越来越大，器件的散热成为阻碍集成电路迅速发展的关键，需要热膨胀系数小、导热系数高的电子封装材料。

单一的金属、陶瓷、高分子等工程材料均难以满足这些迅速增长的性能要求。为了克服单一材料性能上的局限性，充分发挥各种材料特性，弥补其不足，人们已越来越多地根据零、构件的功能要求和工况条件，设计和选择两种或两种以上化学、物理性能不同的材料按一定的方式、比例、分布结合成复合材料，充分发挥各组成材料的优良特性，弥补其短处，使复合材料具有单一材料所无法达到的特殊和综合性能，以满足各种特殊和综合性能需求，也可以更经济地使用材料。如用高强度、高模量的硼纤维、碳(石墨)纤维增强铝基、镁基复合材料，既保留了铝、镁合金的轻质、导热、导电性，又充分发挥增强纤维的高强度、高模量、获得高比强度、高比模量、导热、导电、热膨胀系数小的金属基复合材料，在航天飞机和人造卫星构件上应用，取得了巨大成功。B/Al 复合材料管材用于航天飞机主仓框架，节省重量 44%。Gr/Mg 复合材料用于人造卫星抛物面天线骨架，使天线效率提高 539%。

航空、航天、先进武器系统等军事技术的发展对早期金属基复合材料的研究发展起了巨大的推动作用。电子、汽车等民用工业的迅速发展又为金属基复合材料的应用提供了广泛的前景。预计到 21 世纪金属基复合材料将会得到大规模的生产和应用。

## 1.1 复合材料的定义、金属基复合材料的分类

复合材料是人们运用先进的材料制备技术将不同性质的材料组分优化组合而成的新材料。一般定义的复合材料需满足以下条件：

- 1) 复合材料必须是人工的，是人们根据需要设计制造的材料；
- 2) 复合材料必须由两种或两种以上化学、物理性质不同的材料组分，以所设计的形式、比例、分布组合而成，各组分之间有明显的界面存在；
- 3) 复合材料保持各组分材料性能的优点，并增加单一组成材料所不能达到的综合性能。

满足以上条件的材料称为复合材料。因此，复合材料的性能就取决于所选用的组成材料的性能、相互的比例、分布的方式和界面结构性能。通过优化设计、选择和控制复合材料的组分、分布、比例、界面结构，以及合理的复合制备技术，可制备出具有优异综合性能、性能范围广的新材料、满足各种特殊的需要，更合理、经济地使用材料。

在复合材料中又将其组分称为基体和增强物，通常将其中连续分布的组分称为基体，如聚合物(树脂)基体、金属基体、陶瓷基体。将纤维、颗粒、晶须等称为增强物。

不同的基体材料和增强物可组合成品种繁多的复合材料。通常将复合材料分成三大类：树脂基复合材料、金属基复合材料和陶瓷基(含碳基)复合材料。

**树脂基复合材料：**是由玻璃纤维、碳纤维、硼纤维、芳纶纤维、碳化硅纤维、晶须、颗粒等与热固性、热塑性树脂组成的复合材料，研究发展最早，技术上比较成熟，并具有比强度、比模量高、热膨胀系数小、耐磨性、阻尼性好等特点。目前已广泛应用于航空、航天、建筑、化工、机械、电子通讯、体育等领域。特别是航天领域已广泛地选用碳纤维增强树脂基复合材料制作运载火箭、导弹、人造卫星构件、卫星天线、仪器仓构件、太阳能电池帆板、导弹级间段等重要构件，能大大减轻构件的重量，提高构件的结构效率、承载能力，有力地促进了航天技术的发展，产生了巨大的能效，现已成为复合材料中最主要的品种。

**陶瓷基复合材料：**是由碳纤维、碳化硅纤维、晶须、金属丝与陶瓷基体组成的复合材料。陶瓷材料具有很高的耐高温性能、耐高温、抗氧化、耐腐蚀、耐磨等特点，但存在严重的脆性。用纤维、晶须、金属丝与陶瓷基体复合，目的在于改善陶瓷材料的韧性，希望用于发动机的耐热构件，提高热机效率。目前技术上尚不成熟，处于研究阶段。晶须增韧陶瓷在刀具应用上取得了重要进展。陶瓷基复合材料的主要应用方向是制作高性能燃气轮机构件。

**金属基复合材料：**以金属及合金为基体的复合材料。有以高性能增强纤维、晶须、颗粒等增强的金属基复合材料；金属基体中反应自生增强复合材料；层板金属基复合材料等品种。这些金属基复合材料既保持了金属本身的特性，又具有复合材料的综合特性。通过不同基体和增强物的优化组合，可获得各种高性能的复合材料，具有各种特殊性能和优异的综合性能。

金属基复合材料品种繁多，有各种分类方式，归纳为以下三种：

#### (一) 按增强物类型分

- 1) 连续纤维增强金属基复合材料；
- 2) 非连续增强金属基复合材料(包括颗粒、短纤维、晶须增强金属基复合材料)；
- 3) 自生增强金属基复合材料(包括反应自生和定向自生)；
- 4) 层板金属基复合材料。

#### (二) 按基体类型分

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、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。

#### (三) 按用途分

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结构件。

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。

不同类型的复合材料其性能特点有很大差别,以下简要讨论按增强物分类的各种类型复合材料的特点:

**连续纤维增强金属基复合材料:**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。连续纤维增强金属基复合材料要考虑纤维的排布、含量、均匀分布等,制造过程难度大、制造成本高。

**非连续增强金属基复合材料:**由短纤维、晶须、颗粒为增强物与金属基体组成的复合材料。增强物在基体中随机分布,其性能是各向同性。非连续增强物的加入,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。非连续增强金属基复合材料最大的特点是可以常规粉末冶金、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,并可用铸造、挤压、锻造、轧制、旋压等加工方法进行加工成型,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。

**层板复合材料:**将两种或两种以上优化设计和选择的层板相互完全粘结在一起组成层板复合材料。它具有单一板材所难以达到的综合性能,如抗腐蚀、耐磨、抗冲击、高导热、导电性、高阻尼等性能特点。层板复合材料可由金属与金属板、金属与非金属板组合而成,品种繁多,可满足各种应用的需求。其中金属层板复合材料、金属-聚合物层板复合材料发展迅速,已有批量生产,逐渐发展成一类工程材料,在汽车、船舶、化工、仪表等工业中有广泛应用。

**自生增强金属基复合材料:**在金属基体内通过反应、定向凝固等途径生长出颗粒、晶须、纤维状增强物、组成自生金属基复合材料。

## 1.2 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。综合归纳金属基复合材料有以下性能特点:

### (一) 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、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。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,石墨纤维的最高模量可达 $91\text{ GPa}$ ,硼纤维、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1.1所示为典型的金属基复合材料与基体合金性能的比较。

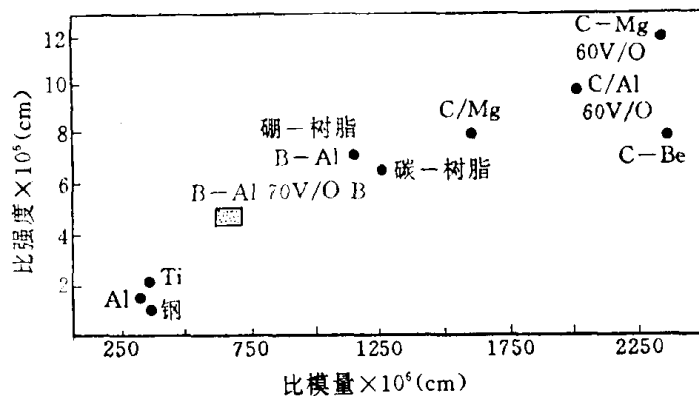


图 1.1 典型金属基复合材料与基体合金性能的比较

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

#### (二) 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，因此仍保持金属所持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物还可以进一步提高金属基复合材料的导热系数，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、金刚石颗粒增强铝基、铜基复合材料的导热率比纯铝、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。

#### (三) 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物，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。图 1.2 所示为一些典型金属基复合材料和金属材料的尺寸稳定性和比模量。可见石墨/镁复合材料具有最高的尺寸稳定性和最高的比模量。

#### (四) 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有很

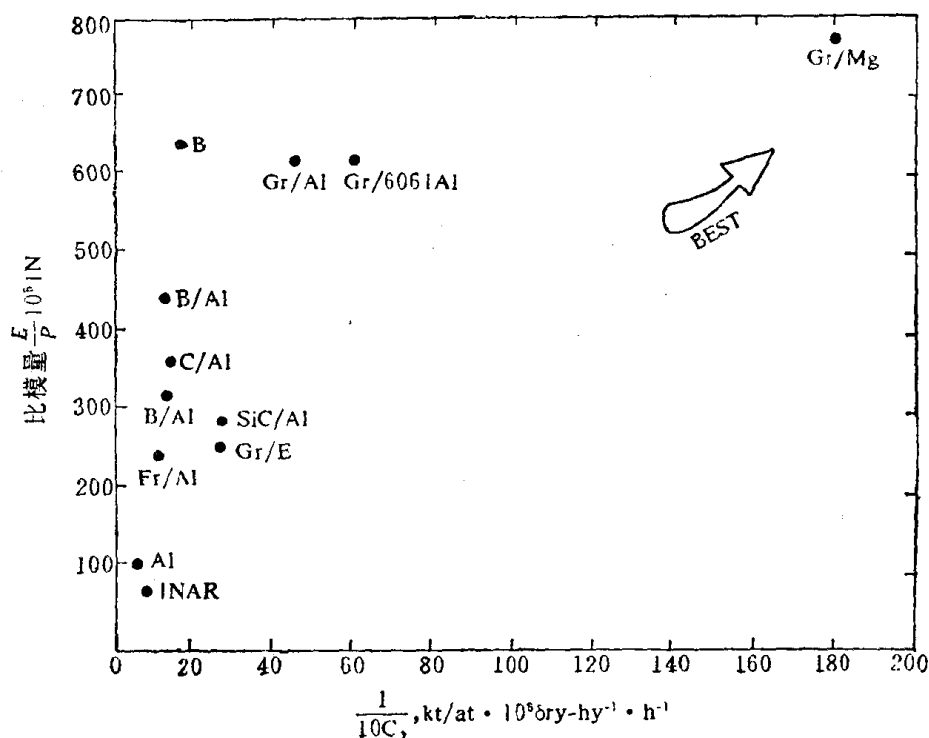


图 1.2 不同材料的尺寸稳定性和比模量

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，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°C、100 小时高温持久强度为 207 MPa，而基体合金的高温持久强度只有 48 MPa；又如石墨纤维增强铝基复合材料在 500°C 高温下，仍具有 600 MPa 的高温强度，而铝基体在 300°C 强度已下降到 100 MPa 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。

#### (五) 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和刚度，也提高了复合材料的硬度和耐磨性。图 1.3 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。

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、刹车盘、活塞等重要零件，能明显提高零件的性能

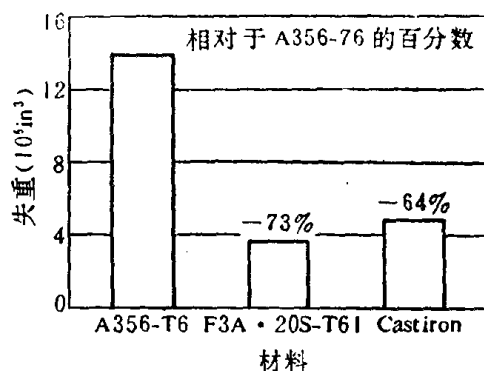


图 1.3 SiC<sub>P</sub>/Al 的耐磨性

和寿命。

(六) 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物与金属基体的界面结合状态，增强物在金属基体中的分布以及金属、增强物本身的特性，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。

(七) 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、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。

# 第二章 金属基复合材料 设计的基本原则

本章主要介绍作为结构材料的金属基复合材料的材料设计基本原则，对于既有一定的结构特性要求，又有某些功能特性要求的材料设计作更简要的分析。

金属基复合材料综合了作为基体的金属结构材料的优点和增强物的优点。他们具有高的强度性能和弹性模量、良好的疲劳性能。与聚合物基复合材料相比，他们在较宽的温度范围内能保持其性能的稳定性，导热、导电性能好，对热冲击和表面缺陷不敏感，剪切强度高，以及还具有其他很多优点。金属基复合材料优异性能的获得，特别是要求若干综合性能时，必须进行合适的材料设计才能达到。

## 2.1 金属基复合材料体系选择及材料设计

金属基复合材料都在高温下制造，采用液态法时，绝大多数液态金属对目前已有的高性能的增强物，如碳(石墨)纤维、硼纤维、碳化硅纤维(包括晶须和颗粒)、氧化铝纤维(包括短纤维和颗粒)等润湿性差，并且基体和增强物之间有高的化学反应性，容易生成对材料性能有严重影响的化合物。这是金属基复合材料制造上的两大问题。即使用固态法制造，在常规的工艺参数下相互之间的反应仍不可避免，金属基体在固态有高的抗变形阻力，加之基体与增强物之间的弹性性能和热膨胀系数的不匹配，因此基体与增强物之间的化学上和力学上的相容性是金属基复合材料的两个严重问题，必须采取综合的措施，从科学上和实际上进行解决。鉴于目前还没有完善的方法，不存在完全相容的基体—增强物体系，只能采取权宜的折中办法，在一定程度上改善相容性，以得到能满足某些性能要求的金属基复合材料。这些方法是增强物的表面处理，基体合金化，强化的或先进的制备工艺。

### 2.1.1 结构复合材料的体系选择及材料设计

根据金属基复合材料可能使用的最高温度范围可以选用三类金属基体，即低于 350~400°C 使用的铝、镁及他们的合金，低于 650°C 使用的钛及钛合金，高于 1000°C 使用的高温合金(超合金)。有关各种基体合金的性能请参阅第三章。对于铝和铝合金基体第四章中所列的各种增强物均可使用，针对材料的性能要求，选用合适的增强物及取向。硼纤维在热力学上与铝不相容，在较高温度下互相发生化学反应，生成有害化合物。但硼纤维的直径较粗，较易进行表面处理，涂覆扩散阻挡层，合适的表面涂层有  $B_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $BN$  三种。或采取固态法，控制优化的工艺参数以制得性能优异的复合材料。碳(石墨)纤维是高性能纤维中价格最便宜的一种，而且其中的某些类型的力学性能在各类纤维中居首位，但是液态铝对他们的润湿性差，温度高于 450°C 时与铝发生化学反应，尤其是未经石墨化处理的碳纤维，生成极其有害的化合物  $Al_4C_3$ 。纤维的表面处理、基体合金化、采用强化的工艺方法及严格控制工艺参数，可以制得具有一定性能的复合材料，但离预期值还有很大的差距。市售的碳纤维每束中有数千到上万根单丝，给表面处理及复合材料的制造带来很大的困难。 $SiO_2$  纤

维与硼及碳(石墨)纤维相比较不易与铝发生反应,因此在制造过程中(尤其采用固态制造工艺时)不必担心生成过多的有害化合物。但是液态铝对SiO<sub>2</sub>纤维(包括晶须、颗粒)的润湿性差。用化学气相沉积法制造的有芯(钨芯或碳芯)SiO<sub>2</sub>纤维就其性能特点、复合材料的制造工艺以及价格等方面与硼纤维相比没有明显的优越性。日本开发的、由有机硅烷转变而得的每束有数百根单丝的无芯SiO<sub>2</sub>纤维在价格上虽比有芯SiO<sub>2</sub>纤维便宜,但其性能还比不上有芯纤维,目前除了日本外,其他国家极少应用。氧化铝纤维是铝基复合材料有前景的增强物,它与铝在热力学上相容,通过在基体中添加合金元素的办法可以改善液态铝对纤维的润湿性,但价格还较高,密度也较大。莫来石和硅酸铝短纤维、SiO<sub>2</sub>颗粒和晶须增强的铝基复合材料、特别是前三种增强物并不能使复合材料的常温强度有较大的提高,但弹性模量增加、耐磨性能改善、膨胀系数降低、高温性能变好。这些材料不能用于制作承受主载荷的构件,而非常适合制造需要承受一定载荷、又具备某些功能特性的零部件(如汽车零部件)。这些增强物中应特别提出廉价的莫来石和硅酸铝纤维、SiO<sub>2</sub>颗粒,改善他们与铝的润湿性,提高他们之间的结合强度,是制造性能良好的复合材料的重要条件。

镁和镁合金的增强物曾经研究过很多种(见第九章),但主要是石墨纤维。液态镁对石墨纤维润湿性差,在高温下发生化学反应,可以通过纤维的表面处理(例如用溶胶-凝胶法在纤维上涂覆SiO<sub>2</sub>涂层)来解决这些问题,制得性能良好的石墨/镁复合材料。

在现有的高性能纤维中适合作钛和钛合金基体的只有SiC纤维,特别是含钛的碳化硅纤维,纤维中钛的存在可以改善基体与纤维的相容性和润湿性。

对于高温合金(超合金)基体目前还无廉价的、高性能低密度的、与基体相容性好的增强物,研究较多的是钨丝和钼丝。钨丝和钼丝与绝大多数高温合金不发生化学反应,它们在基体中的溶解问题可用添加合金元素的方法加以解决,但钨丝和钼丝的密度太大,使复合材料的密度超过基体合金,作为在高温下长期使用的高速转动的零部件,本身所消耗的能量不容忽视。金属间化合物基复合材料的研究还处于摸索实验阶段,离实用还有较远的距离。

结构复合材料的力学性能首先与增强物的性能、含量及取向密切相关,根据金属基复合材料破坏机理的分析,发现存在一个最危险的增强物含量范围(见第七章),应该针对材料的使用对象选择合适的纤维含量。其次,界面对于复合材料的性能有着举足轻重的作用,常常困扰着材料科学家们。对于不同的受载要求,往往需要不同的界面结合。在金属基复合材料中的界面结合是以反应结合为主的,即靠基体与增强物之间的化学反应,生成某种化合物达到的,严格控制化合物的生成量以得到需要的界面结合不是一件容易的事情。增强物(纤维)的取向应视在不同方向上承受的载荷而定。

对于主要承受拉伸载荷的金属基复合材料需要结合适中的界面,如果还要求能承受稍大的横向应力,则要求强的界面结合,此时在纵向拉伸载荷的承受上将作一定的牺牲。如果需承受的横向应力较大,或还在其他角度方向受力,则不能由增强界面结合来解决,需在受力的方向上铺设纤维。如果用金属基复合材料制成的构件主要承受疲劳载荷或需经受温度交变的变化,界面结合应适中偏强。如果复合材料主要受冲击载荷的作用,界面结合必须适中偏弱。如果复合材料构件对强度的要求不高,而需有高的刚性、且在服役过程中保持不变,则要求强的界面结合,因为界面上的一些小缺陷对材料的弹性模量有严重的影响。根据上面的思想进行复合材料界面的设计本身已很困难,而且往往照顾了一方面(或某些方



面)的需要而牺牲了其他方面的性能,实际复合材料中理想的界面又不存在。很多年来人们提出了在纤维上涂覆梯度涂层的思想,即在纤维上涂以化学成分和物理性能渐变的涂层,完全解决基体和纤维的化学和力学(物理)相容性,同时又显著改善基体对纤维的润湿性,已在一定程度上获得了成功(见第六章)。应该指出,这种思路是正确的,但在技术上的难度大、参数要求控制严格,而且成本昂贵。

在金属基复合材料研究开发的早期,人们曾经作过不少努力,对定向凝固共晶进行过很多研究,在基体中生长出定向的纤维状的增强相,后因可供选择的体系不多,增强相的数量受到限制等等原因,得不到有实用价值的材料而基本上终止了这项研究。但这种原位生长的增强相与基体之间有一个理想结合的界面,完全解决了化学相容性和力学相容性。在这种思想的启发下近些年来人们又开始研究原位生长的复合材料,但又进一步的扩大了思路,添加或者混合某些需要的成分,在材料制备过程中产生颗粒、晶须、乃至纤维状增强相。这样界面问题可以完全解决或基本解决,体系可以自由选择,增强相的量可由添加的成分和控制工艺参数来达到。铝基体中原位生长  $\text{TiC}$ 、 $\text{TiN}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  等增强相便是一例。这项工作目前还处于实验室研究阶段。

### 2.1.2 功能复合材料的材料设计

本节所指的功能复合材料是狭义的既要有一定结构性能要求,又要具备某些功能特性的复合材料,对于这类材料界面的要求远不如结构复合材料严格,但也不能结合太弱而不能承受尽管是不很大的载荷,甚至要求界面结合强一些而能满足某些功能要求。汽车发动机上的某些零件,如缸套、活塞、镶圈、刹车盘(片)等,除了需承受一定的载荷外,要求耐磨、膨胀系数小、导热性能好,界面结合以偏强为好。半导体器件中的铜基复合材料除了具备良好的导电导热外,希望有较好的刚性,与半导体材料十分接近甚至相等的膨胀系数,要求有强的界面结合及不同方向上纤维的分布以控制合适的膨胀系数。大型蓄电池中的铅基极板要求减轻自重、强度和刚度适当,除了增强物的数量外,希望有适中偏强的界面。

上面对复合材料的材料设计作了扼要的原则分析,读者在阅读了后面的有关章节后,将会有比较详细和深入的了解。

## 2.2 金属基复合材料工艺方法的选择

制造金属基复合材料的工艺方法与材料的性能密切相关,应该根据材料的使用对象、基体及增强物的种类和特性恰当选择。从上面的分析知道,无论用于何种场合,都不希望复合材料有很强的界面结合。对于具有第Ⅰ类和第Ⅱ类界面的复合材料(见第六章),特别对于第Ⅰ类复合材料,往往由于界面结合强度较弱,需采取措施增强,对于具有第Ⅲ类界面的复合材料,即具有反应结合界面的复合材料,需控制界面反应,防止生成过多的脆性反应产物(包括为防止或减慢反应而人为涂覆的增强物上的表面涂层)。从这一点出发,宜采用固态制造工艺,如固态扩散粘结法、粉末冶金法等。或采用基体虽然处于液态,但与增强物在高温接触时间极短而来不及发生过分的化学反应的方法,如等离子喷涂法。固态扩散粘结法和等离子喷涂法很适用于直径较粗的单丝状增强物,如硼/铝复合材料是用这些方法制造的有代表性的例子。对于一束中有数百根或数千根单丝的纤维增强物,如无心碳化硅纤维