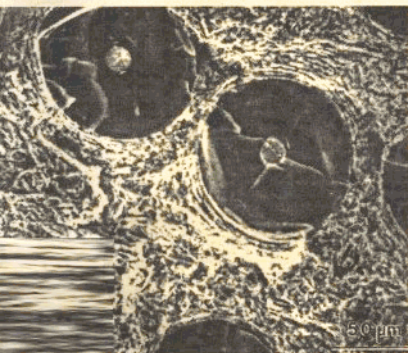
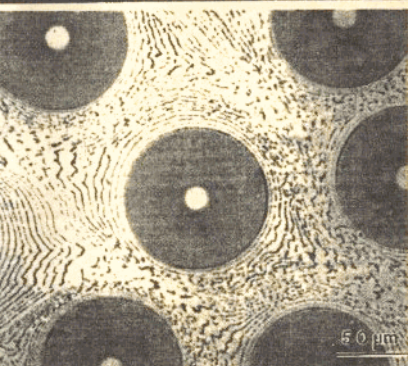
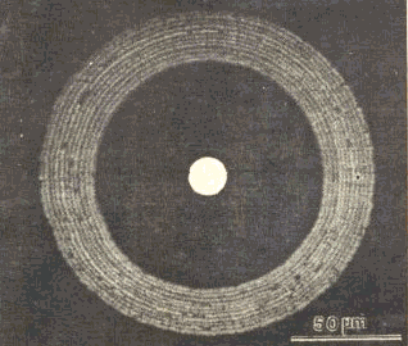


Preparation and
Mechanical Properties of
Metal Matrix Composites



金属基 复合材料的制备 及力学性能

王广欣 刘惠民 编著

浙江大学出版社

金属基复合材料的制备及 力学性能

王广欣 刘惠民 编著

浙江大学出版社

金属基复合材料的制备及力学性能

王广欣 刘惠民 编著

责任编辑 董德耀

* * *

浙江大学出版社出版

(杭州玉古路 20 号 邮政编码 310027)

浙江大学出版社电脑排版中心排版

杭州金融管理干部学院印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

* * *

787×1092 16 开 12 印张 307 千字

1996 年 5 月第 1 版 1996 年 5 月第 1 次印刷

印数: 001-500

ISBN 7-308-01768-0/TG·013 定价: 12.00 元

前 言

材料是一切技术发展的重要物质基础,它与信息、能源并列为现代文明的三大支柱。现代技术,特别是航空、航天和海洋工程技术,要求材料兼具高强度、高刚度、高韧性和低比重等良好的综合性能,并能经受各种极端环境因素,如超高温、超高压、超高真空、氧化、腐蚀性介质等的考验。传统的单一材料往往不能同时满足这些要求。比如金属材料的力学性能固然不错,但多数不耐很高的温度;陶瓷材料虽然既耐高温又耐腐蚀,但脆性大,韧性低;高分子材料密度低,韧性也好,但强度、刚度和耐热能力却有限。因此,设法通过某种工艺把两种或两种以上性质不同的材料结合起来,很有必要。这样,复合材料这门学科就应运而生了。

近三四十年来,复合材料的发展很快。首先是玻璃纤维增强塑料(俗称玻璃钢)应用于工业、建筑、家用器具,甚至制造滑翔飞机。之后,碳纤维、硼纤维与有机纤维的相继问世,使复合材料发展到一个崭新的阶段。从80年代开始,碳纤维增强环氧树脂复合材料开始用于飞机、火箭和卫星。除了聚合物基复合材料取得长足进步之外,金属基复合材料也受到人们的日益重视,有关的研究进展日新月异。

与目前广泛使用的聚合物基复合材料相比,金属基复合材料具有横向机械性能好、层间剪切强度高、工作温度高、耐磨损、导电导热、尺寸稳定、不吸湿、不放气、不老化的优点,是制造飞机和卫星的各种构件、涡轮喷气发动机的风扇叶片和涡轮叶片等许多重要部件的理想材料。虽然金属基复合材料由于工艺复杂,价格较高,目前尚处于研制和试用阶段,但随着科学技术的发展,金属基复合材料一定会像聚合物基复合材料那样,得到越来越广泛的应用。这必将大大推动宇航技术以及其它重要技术的发展。

为了使更多有志于金属基复合材料研究的我国材料科学工作者、工程技术人员以及高等院校有关专业的研究生、本科生方便地学习一些金属基复合材料基础知识,更好地了解和掌握相关的研究动向及发展趋势,我们写了《金属基复合材料的制备及力学性能》这本书。

全书共八章,可分为三个部分。第一部分由前三章组成,先简单介绍复合材料,特别是金属基复合材料的一些特点和发展概况,然后对其两大组元——增强体和金属基体——的有关基本知识作了介绍。第二部分包括第4、5、6三章,主要讲述金属基复合材料的制备方法,在制备过程以及以后的高温使用过程中,可能出现的浸润问题和界面反应问题,并对界面的作用进行了比较深入的探讨。最后两章为本书的第三部分,主要内容是有关金属基复合材料的力学性能,包括拉伸、压缩、断裂和疲劳性能。

考虑到实用及内容新颖两个方面,在不影响读者理解的前提下,书中尽量避免了大量繁琐的数学推导。并从大量参考文献,特别是新近发表的文献中,选择了最重要、较成熟的理论介绍给读者。

由于本书的很多内容正处于不断创新发展阶段,并且限于作者的知识水平和工作经验,不妥之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编著者
1995年5月

目 录

1. 复合材料简介	1
1.1 复合材料的基本类型	1
1.2 几种特殊的复合材料	2
1.2.1 梯度复合材料	3
1.2.2 MT 复合材料	4
1.2.3 混杂复合材料	4
1.3 复合材料的一些基本特点	6
1.4 复合材料的重要性	7
1.5 金属基复合材料的发展概况	8
2. 几种重要的基体金属材料	11
2.1 金属的结构与缺陷	11
2.1.1 金属的晶体结构	11
2.1.2 合金的晶体结构	13
2.1.3 晶体缺陷	13
2.2 金属材料的强化	16
2.2.1 冷加工变形强化	16
2.2.2 细晶强化	16
2.2.3 固溶强化	17
2.2.4 有序强化	18
2.2.5 多相强化	18
2.2.6 提高比模量、比强度的有效途径——复合强化	21
2.3 几种轻金属及其合金	23
2.3.1 铝及铝合金	23
2.3.2 镁和镁合金	27
2.3.3 钛和钛合金	29
3. 常用增强体的制备及性能	31
3.1 增强纤维的制备及性能	31
3.1.1 金属纤维	31
3.1.2 碳纤维	32
3.1.3 硼纤维和碳化硅纤维	34
3.1.4 氧化铝纤维	36
3.2 纤维强度的评价	39
3.2.1 纤维拉伸实验	39
3.2.2 纤维拉伸强度统计分析	40

3.2.3	提高纤维强度的一些途径	46
3.3	非连续增强体	49
3.3.1	短纤维的临界长度	49
3.3.2	晶须的强度	49
3.3.3	SiC 晶须和颗粒的制备	52
4.	金属基复合材料的制造	53
4.1	非连续增强复合材料的制造	54
4.1.1	熔铸法	54
4.1.2	粉末冶金法	61
4.1.3	雾化喷射复合沉积法	63
4.2	连续增强复合材料的制造	64
4.2.1	长纤维增强复合材料的制造	65
4.2.2	层状复合材料的制造	70
4.3	原位复合材料的制造	73
4.3.1	共晶合金凝固	73
4.3.2	原位反应合成	77
4.4	复合材料的后处理	84
4.4.1	复合材料中的常见结构缺陷	84
4.4.2	复合材料的热加工	87
4.4.3	共晶复合材料的冷加工强化	89
5.	金属熔液对陶瓷增强体的浸润性	91
5.1	金属熔液对陶瓷固体的湿润	91
5.1.1	湿润方式	91
5.1.2	改善浸润性的意义	95
5.1.3	改善浸润性的可能性	96
5.2	研究浸润性的一些方法	97
5.2.1	座滴法	97
5.2.2	门框压力法	99
5.2.3	结合时间法	101
5.3	一些铝基复合材料系统的浸润性	103
5.3.1	Al-SiC 系统的浸润性	103
5.3.2	Al-C 系统的浸润性	113
5.3.3	Al-Al ₂ O ₃ 系统的浸润性	113
6.	增强体与基体金属之间的界面	115
6.1	界面化学反应与反应层	115
6.1.1	界面反应的热力学与动力学	115
6.1.2	界面反应对复合材料性能的影响	117
6.1.3	限制界面反应的措施	121

6.2	界面应力和界面强度	124
6.2.1	界面应力和界面强度	125
6.2.2	界面强度的测定	125
6.3	界面的断裂韧性	133
6.3.1	界面裂纹扩展和界面断裂判据	133
6.3.2	界面断裂韧性的测定	134
6.4	界面力学性能和复合材料的力学性能	135
6.4.1	界面强度和复合材料的力学性能	135
6.4.2	“强”界面和“弱”界面复合材料的力学性能	136
7.	金属基复合材料的一般力学性能	138
7.1	长纤维增强复合材料	138
7.1.1	板块模型 (slab model)	138
7.1.2	轴向拉伸强度	141
7.1.3	偏轴拉伸强度	142
7.1.4	轴向压缩强度	145
7.2	短纤维增强复合材料	146
7.2.1	弹性模量	146
7.2.2	拉伸强度	147
7.2.3	拉压变形不对称性	148
7.3	颗粒增强复合材料	149
7.3.1	屈服强度	150
7.3.2	弹性模量	153
7.4	影响力学性能的一些因素	154
8.	金属基复合材料的断裂韧性与疲劳性能	156
8.1	损伤机制和损伤过程的能量吸收	156
8.1.1	纤维断裂	156
8.1.2	纤维脱粘	158
8.1.3	纤维拔出	158
8.1.4	基体塑性变形和开裂	160
8.1.5	应力再分布	160
8.1.6	纤维桥接	161
8.2	断裂韧性	161
8.2.1	断裂韧性的概念	162
8.2.2	长纤维复合材料的断裂韧性	163
8.2.3	非连续增强复合材料的断裂韧性	164
8.3	复合材料的疲劳性能	166
8.3.1	长纤维复合材料	167
8.3.2	非连续增强复合材料	171
	参考文献	174

1. 复合材料简介

顾名思义,复合材料是由两种或两种以上性质不同的单一材料组合而成的一种新材料。按照这一定义,在自然界中就可以找到很多天然复合材料。例如,木材是柔软的纤维素和刚硬的木质素组合起来的复合材料,骨骼是柔软的胶原蛋白和又硬又脆的矿物质磷灰石组成的复合材料。天然复合材料具有很复杂的微观构造,是经过长期演变和进化而成的高度优化复合材料。尽管天然复合材料不属于现代复合材料的范畴,但它们的构造和复合机理却可以给人们很多深刻的启示,有助于研究和发性能优异、种类繁多的先进复合材料。另外,有些合金也可以看作是复合材料,例如珠光体钢就是软而韧的铁素体和硬而脆的渗碳体层状相间的复合材料。但是,现代的复合材料,主要是指人工特意裁制的复合材料,不包括天然复合材料以及合金和陶瓷之类的多相体系。通常所讲的复合材料,是把两种或两种以上不同性能的材料经人工复合在一起,所形成的具有特殊性能的新型材料。

明确了复合材料的定义后,就可以对各种各样的复合材料进行归类,并归纳总结出复合材料的一些特点。这是本章前三节的内容。在本章最后一节,将针对本书的对象,金属基复合材料的发展概况作一简单介绍,以便读者对金属基复合材料先有一个初步了解。

1.1 复合材料的基本类型

复合材料一般有两个相:一相是连续相,称为基体;另一相是分散相,称为增强体(图 1-1)。这两相可能是金属-金属,金属-陶瓷,金属-有机物,陶瓷-陶瓷,陶瓷-有机物,有机物-有机物等等。由于复合材料种类很多,着眼点不同,分类方法也不同。

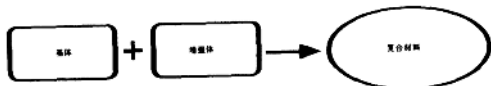


图 1-1 复合材料的主要组成

按照基体的种类,可将复合材料分为金属基复合材料,陶瓷基复合材料,聚合物基复合材料,水泥基复合材料等。

按照增强体的几何尺寸,可将复合材料分为微观和宏观复合材料两种。前者的增强体尺寸较小,肉眼观察不到;而后的增强体较大,往往能用肉眼分辨。例如混凝土中的砂砾,肉眼可见,混凝土就是一种宏观复合材料。

如果照增强体的形状分类,那么复合材料可以分为弥散增强、颗粒增强、纤维增强、薄片增强等几类复合材料(图 1-2)。弥散增强复合材料中,增强体是很细的粉末,其直径约为 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 。在这类材料中,基体是主要承载部分,而那些细小的颗粒起阻碍基体中位错运动的作用。颗粒增强复合材料中的颗粒,比弥散增强复合材料中的颗粒大 $1 \sim 2$ 个数量级。在颗粒增强复合材料中,基体和颗粒共同承受载荷。另外颗粒还能起到约束塑性复合材料的基体变形,使脆性复合材料的基体硬化的作用。纤维增强复合材料包括长纤维和短纤维(或晶须)复合材

料两种。在纤维增强复合材料中,特别是长纤维复合材料中,纤维是主要承载部分。基体的作用,一是把纤维粘结起来,并将复合材料上所受的载荷传递和分布到纤维上去。二是保护纤维免受环境因素的化学作用和物理损伤,以免诱发造成复合材料破坏的裂纹。同时基体也像隔膜一样,把纤维与纤维隔开。这样即使有个别纤维断裂了,裂纹也不容易从一根纤维迅速扩展到另一根纤维。除了以图 1-2c、d 所示的排列形式存在于基体之中,纤维还常以有规则编织物形式存在^[1]。

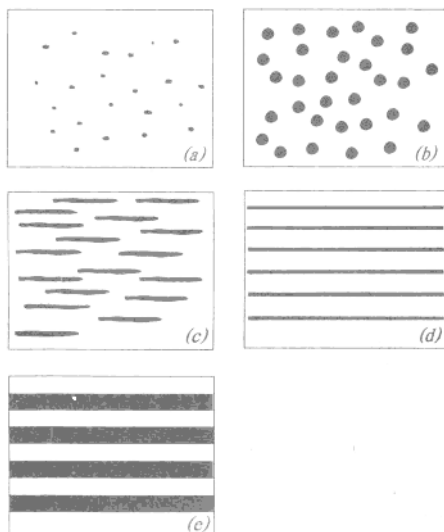


图 1-2 复合材料的几种基本形式

(a)弥散增强复合材料,(b)颗粒增强复合材料,

(c)短纤维或晶须增强复合材料,(d)长纤维增强复合材料,(e)多层夹板复合材料

按照使用情况,复合材料又可以分为功能复合材料和结构复合材料两大类。前者具有各种独特的物理性能,如换能特性、阻尼特性、摩擦特性、导磁、导电、导热等方面的特性;后者则是用于制造工程结构,能够承受一定外加载荷的复合材料。

表 1-1 总结了各种分类的情况。

1.2 几种特殊的复合材料

前面讲到的复合材料的一些基本类型,有一个共同特点,即增强体的分布是均匀的(在实际工作中,很难使增强体分布完全均匀,所以这里所说的分布均匀是相对的,是理想化了)。但是也有一些复合材料,人们在其设计和制造过程中,都力图使增强体分布遵循一定规定,而不是均匀一致地出现在基体中。常见的这类复合材料包括梯度复合材料和 CM¹ 复合材料。另外还有一些复合材料,可以看作是两种或多种复合材料的组合体。这类复合材料叫混杂复合材

料。

表 1-1 复合材料的分类

分类标准	名称
基体类型	金属基复合材料 陶瓷基复合材料 树脂基复合材料 水泥基复合材料
增强体尺寸	微观复合材料 宏观复合材料
增强体形状	弥散增强复合材料 颗粒增强复合材料 长纤维增强复合材料 短纤维/晶须复合材料 薄板复合材料
实际应用	结构复合材料 功能复合材料

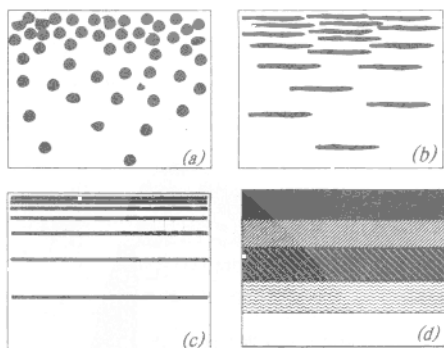


图 1-3 梯度复合材料的几种形式

(a)颗粒增强,(b)短纤维或晶须增强,(c)长纤维增强,(d)多层板梯度复合材料

1.2.1 梯度复合材料

顾名思义,梯度复合材料中,增强体的分布应呈现一定梯度。比如材料内部增强体的量少,而离材料表面越近,增强体的量越多。图 1-3 给出梯度复合材料的几种可能形式。图 1-3a、b、c

中,增强体的局部含量由材料表面到材料内部,逐渐减少。而图 1-3d 所示的复合材料是由多层薄板叠压而成,每层板中的增强体分布均匀,但增强体的含量不同,从 A 到 B 依次递减。所以图 1-3d 所示的复合材料,其中增强体的分布呈阶梯状。

1.2.2 MT 复合材料^[2]

MT 是英文 Microstructurally toughened 的缩写。MT 复合材料即微观增韧复合材料。发展这种复合材料的主要目的,是为了改善复合材料的韧性。通常是将简单复合材料,比如颗粒增强

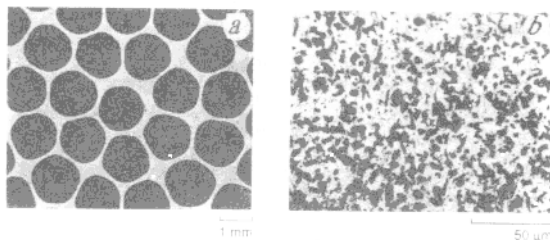


图 1-4 MT 复合材料的组织

(a)低倍放大,显示细丝在基体中的排列,(b)高倍放大显示细丝的微观组织^[1]

的复合材料,挤压、拉拔成细丝。然后把这些细丝作为增强体埋置在基体内。图 1-4 是一种 MT 复合材料的显微组织。宏观上来看,这种 MT 复合材料和一般的长纤维复合材料一样(图 1-4a)。但从微观上来看,MT 复合材料中的增强体本身就是复合材料(图 1-4b)。如果细丝的基体和 MT 复合材料的基体相同,则也可以把这种复合材料叫做 CM³(Common Matrix Micro-Macro)复合材料。

图 1-5a 是 SiC 颗粒增强的 Al 基复合材料(简单复合材料)冲击试验后的断口形貌。图 1-5b 是相同成分(相同基体、相同 SiC 颗粒含量)的 MT 复合材料的冲击断口的形貌。比较两者,可以明显地发现,MT 复合材料的结构可以大大改善复合材料抵抗断裂的能力。

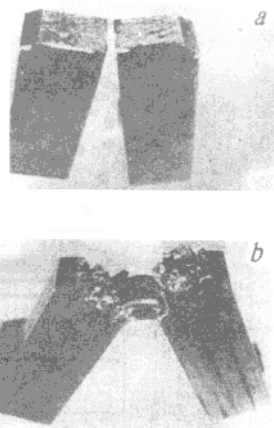


图 1-5 简单复合材料(a)和 MT 复合材料(b)的冲击断口形貌^[1]

1.2.3 混杂复合材料

混杂复合材料可分为原材料混杂和结构混杂两种。比如使用两种不同纤维制成的复合材料就属于原材料的混杂(图 1-6a)。而将不同复合材料层板叠合起来,则得到结构混杂复合材料。这种叠合可以是交替叠合(图 1-6b)、单面贴层(图 1-6c)、双面对称贴层(图 1-6d)、双面不对称贴层(图 1-6e)、或表面嵌条(图 1-6f)等。其中嵌条型适用于大型结构。一般面层均采用高强度、高模量增强材料,这对提高整体对承受弯曲变形的刚度极为有利。

实践证明,混杂是获得高性能复合材料有效而且经济的方法,因为混杂可以兼顾两种或多

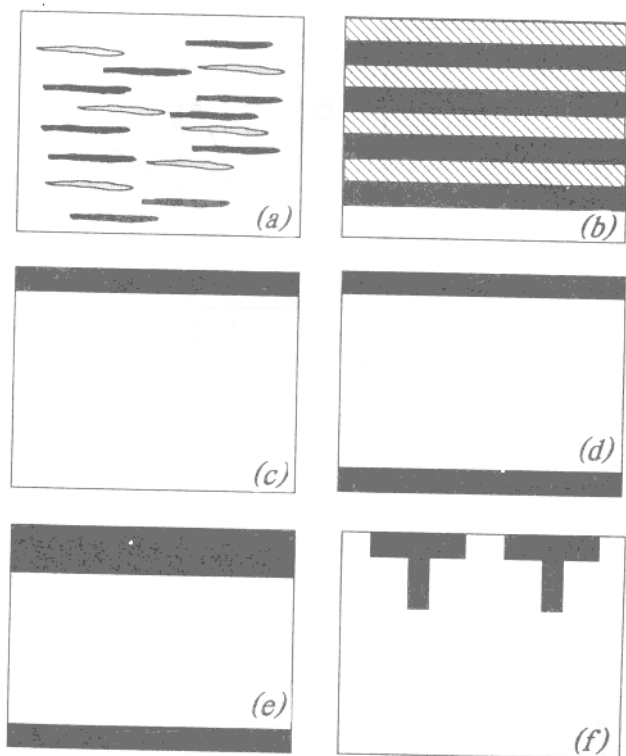


图 1-6 原材料混杂复合材料

(a)和结构混杂复合材料,(b)交替叠合,(c)单面贴层,

(d)双面贴层,(e)双面不对称贴层,(f)表面嵌条

种复合材料的特点,使之起到互相弥补的作用,从而扩大材料设计的自由度。另外,由于可以采用价格昂贵的高性能纤维(如碳纤维)与一般性能的廉价纤维(如玻璃纤维)混合使用,能够收到较好的经济效果。

混杂复合材料最明显的特点,表现在弯曲模量上。如图 1-7 所示,使用 50%左右的碳纤维与玻璃纤维混合,即可取得相当于 100%碳纤维的效果^[3]。混杂的另一种明显效果是可以改善高性能复合材料的冲击性能。由于高性能复合材料的加强纤维(如碳纤维)断裂伸长率小,韧性低,加入玻璃纤维等高应变材料后,冲击强度可以提高一倍以上。另外,混杂也可以在一定的程度上改善复合材料的疲劳性能。

混杂复合材料常显示一种混杂效应。这种混杂效应最初是从混杂复合材料的应力应变测定实验中发现的(图 1-8^[3])。按实验前的设想,当试样达到纯碳纤维复合材料的应变值 ϵ' 时,曲

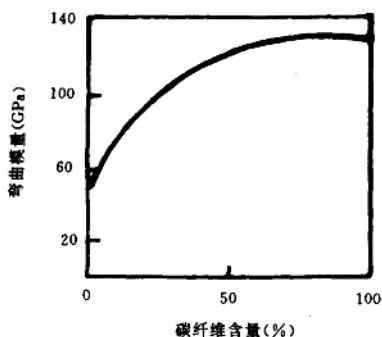


图 1-7

碳纤维/玻璃纤维混杂复合材料的弯曲模量^[2]

线应发生转折,然后沿纯玻璃纤维复合材料的应力应变曲线进行。但实测情况却是到(ϵ'')时曲线才发生转折, ϵ'' 比 ϵ' 大 40%左右。这个现象引起人们的广泛注意。人们一方面研究发生这种现象的机理,同时也系统地研究其它性能的混杂效应。经研究发现,在一定条件下仅有一小部分性能符合混合律的估算结果,而大部分出现或正或负的偏差,即所谓混杂效应。

混杂复合材料由于可以调节材料的性能和价格,在经济效益要求很高的汽车、造船等工业已经得到了一定应用。如用混杂复合材料制造汽车弹性钢板和传动轴,以及船壳和气垫船风扇等。

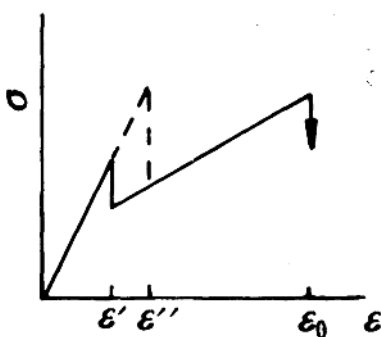


图 1-8

碳纤维/玻璃纤维混杂复合材料的混杂效应^[3]

1.3 复合材料的一些基本特点

如前所述,复合材料一般是由基体和增强体两相组成的。通过选择合适的基体和增强体,控制它们的比例及增强体在基体中的分布与取向,或改变增强体的大小或形状,可以在很宽的范围内灵活地调节复合材料的性能,使它在性能上不仅具有所选定的各材料的优点,又能克服或削弱各单一材料的弱点。甚至可以改变同一构件不同部位的性能,这是各向同性的金属材料所不能达到的。这些都为新材料的研制和使用提供了更大的自由度,开辟了广阔的应用前景。

图 1-9 比较了复合材料与钢和铝的几种使用性能^[4]。由图 1-9 可见,与传统的金属材料相比,复合材料有比重轻,热膨胀系数小,比强度、比模量高,疲劳强度高优点。此外,复合材料还具有耐高温及良好的隔热性能(如一些纤维增强金属基材料能在 600 C 左右工作,大大高于对应的基体金属材料,见图 1-10^[5]);耐蚀性好(如玻璃钢有良好的化学稳定性,在 60 C 以下有很高的耐酸耐碱性能);还有耐冲击、减振性好、容伤性(即发现裂纹后仍可承载,断裂破坏前有征兆,可进行检查和维修)以及特殊的电、磁、光等性能。因此可以说,复合材料既可以在一般条件下提高产品性能,又可满足许多特殊要求,同时可设计性很强,是一类较为理想的材料。

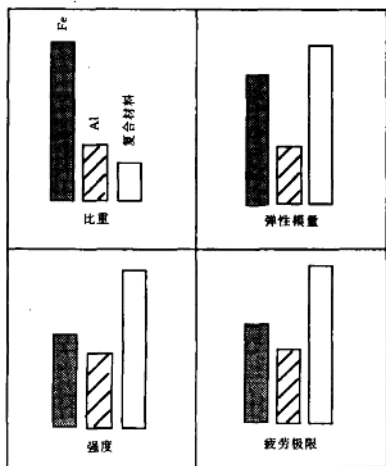


图 1-9

复合材料与钢和铝的性能比较^[1]

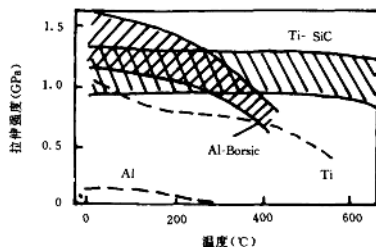


图 1-10

几种金属基复合材料与合金耐温性的比较^[1]

1.4 复合材料的重要性

由于复合材料本身具有轻质高强等优异性能,这类材料在当今高技术发展中占有重要地位。复合材料的重要性可以从能源技术、信息技术以及航天等方面说明。在能源方面,目前迫切需要解决避免使用不可再生的矿物能源及储存能源等问题,复合材料可以广泛地被用于能源技术的各个方面,如表 1-2 所示。在信息技术中的检测、传输、处理和执行各项主要环节上,复合材料也占有重要地位。例如信息检测需要各种换能器,使用功能复合材料能达到比单一材料更高的效率。像锆钛酸铅/树脂体系的功能复合材料,其压电电压效率就比单一的锆钛酸铅高出一个数量级。传输信息的光导纤维缆,需要用复合材料制造缆芯和护套管。存储信息的磁盘和磁光盘本身就是由功能复合材料构成。处理信息的计算机新型屏蔽罩和电路板都是用复合材料制成的。信息的执行机械,如机械手和机器人等,都需要用轻质高强的结构复合材料来制造运动臂,以保证高速、准确地执行信息指令。航天技术中的运载火箭壳体、卫星、航天飞机、空间站的结构件都需要轻质高强的复

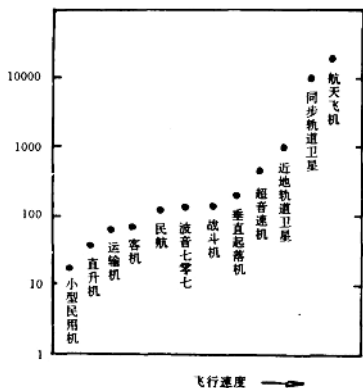


图 1-11 结构减重所得的经济效益与飞行速度的关系^[1]

合材料。如图 1-11 所示,将比强度、比模量高的复合材料用于高速飞行器,可以减轻飞行器本身的重量,从而提高飞行速度,达到极大的经济效益。据说,先进的教练机复合材料占 25~40%,战斗机占 40~50%,垂直起落战斗机可高达 60~65%。特别是空间飞行器,每减少 0.5 公斤重量,就可以节省成本近 2 万美元。

表 1-2 复合材料在能源系统中的应用^[1]

形式	所应用的系统	具体部件	对复合材料的要求	可能应用的复合材料的品种
新能源	太阳能发电	光电机组支架	轻质、高强度、高刚度	高性能纤维增强树脂基复合材料
	太阳能发电	集光镜组支架	轻质、高强度、高刚度	高性能纤维增强树脂基复合材料
	太阳热供暖系统	热交换器	面层选择吸热与刚性结构	纤维增强树脂加吸热填料
	波浪力发电	波浪力传送装置	耐海水腐蚀、高强度、高刚度	高性能纤维增强耐腐蚀树脂
	潮汐力发电	潮汐力传送装置	耐海水腐蚀、高强度、高刚度	高性能纤维增强耐腐蚀树脂
	地热发电	热交换器	耐腐蚀性与结构要求	高性能纤维增强耐腐蚀树脂
	风力发电	风车叶片与塔柱	轻质、高强度、高刚度	高性能纤维增强树脂混杂复合材料
核能源	原子反应堆	核燃料包覆管	耐辐射、耐温与结构要求	碳纤维增强石墨(碳/碳)复合材料
	轴离心分离机	离心机转子	轻质、高强度与高刚度	碳纤维增强耐热树脂
	核融合炉	超导线圈及附件	超导、非磁性、耐热、高强度	超导功能金属基复合材料及高性能结构复合材料
节能	高温气涡轮机	涡轮叶片、喷嘴	耐高温、高强度、高韧性	陶瓷基与金属基复合材料
	磁流体发电	超导线圈与外壳	超导、耐热与结构要求	超导功能与高性能结构复合材料
	废热发电	热交换器	耐腐蚀、耐热与结构要求	含有导热填料的纤维增强树脂
	汽车轻量化	车体、传动轴、钢板保	轻质、高强度与高刚度	高性能纤维增强树脂与金属基复合材料
	供热系统	温管道、容器	轻质、隔热	含有绝热填料的纤维增强复合材料
蓄能	惯性飞轮	飞轮	高强度、高刚度	高性能纤维增强复合材料
	二次燃料电池	电极	耐热、具有固体电解质性能	具有电解质性能(快离子导体)的复合材料

总之,复合材料的发展适应了现代高科技的要求,有一定的必然性。不断研制新型复合材料,注意应用性能优良的复合材料,将会推动高科技的发展,并取得明显的经济效益。

1.5 金属基复合材料的发展概况

近 20 多年来,金属基复合材料一直是人们深入研究的对象^[5,6]。很多种金属被考虑作为可能的基体材料(表 1-3)。它们包括:锂(Li)、镁(Mg)、硅(Si)、铝(Al)、钛(Ti)、铜(Cu)、镍(Ni)、锌(Zn)、铅(Pb)等等。轻金属最具有应用潜力,这主要是因为复合材料的比强度有很重要的实用意义。

由于便宜以及加工容易,铝是最常见的金属基体之一。铝基复合材料多用于温度低于 450 C 的工况。另一个常见基体金属是钛,钛基复合材料能够用于更高的温度。

增强体的种类很多(表 1-4)。用于结构复合材料的有钨(W)、硼(B)、氧化铝(Al_2O_3)、铍(Be)、碳(C)、碳化硅(SiC)、碳化钛(TiC)、氮化钛(TiN)等等。人们最感兴趣的增强体,先是 W、B、 Al_2O_3 、 $Be^{[4-7]}$ 。到了 70 年代初,人们的兴趣又转移到了价格低廉的碳纤维^[8,9]。最近的工作则大多致力于新型 Al_2O_3 和 SiC 纤维^[10-12]。同时, SiC 或 Al_2O_3 晶须或颗粒作为非连续增强体,也受到了广泛、深入的研究^[11]。特别是 SiC、具有高强度、高硬度、高模量、低膨胀系数等许多优良

特性^[15-17],是一种理想的增强体。目前,国内外都研究得非常活跃。

表 1-3 常用基体材料的物理与力学性能

材料	密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	熔点 $T_m(\text{K})$	热膨胀系数 $\alpha(\text{K}^{-1})$	泊松比 ν	弹性模量 $E(\text{GPa})$	拉伸强度 $\sigma_s(\text{MPa})$
Al(1100)	2700	933	23.6×10^{-6}	0.33	70	170
Al-Cu (2024)	2800	915	23.6×10^{-6}	0.33	73	470
Al-Mg-Si (6061)	2700	925	23.6×10^{-6}	0.33	70	380
Al-Zn (7075)	2800	925	22.0×10^{-6}	0.33	72	570
Al-Li (8090)	2550	930		0.33	80	
Cu	8900	1356	17.0×10^{-6}	0.34	117	220
Mg	1800	922	26.6×10^{-6}	0.35	45	130
Fe (中碳钢)	7800	1810	17.2×10^{-6}	0.28	208	430
Ti	4500	1940	9.5×10^{-6}	0.36	110	240
Ti-6Al-4V	4400	1920	9.0×10^{-6}	0.36	115	950
Zn	7100	693	31.0×10^{-6}	0.35	105	120
Ni	8900	1728	13.0×10^{-6}	0.31	214	300
Ni	7900	1550	12.0×10^{-6}	0.31	214	1300
Pb	11300	600	30.0×10^{-6}	0.36	14	20

很多制备金属基复合材料的方法被人们提出,并得到发展、完善,以至工业应用^[18-19]。根据基体合金的状态,大致可以分为固态扩散法、粉末冶金法、熔铸法几大类。熔铸法由于工艺成本低,因而得到广泛的研究与应用。常见的较为成熟的工艺主要有挤压铸造,半固态复合铸造,以及浸渗法。

金属基复合材料可以分为两大类,连续增强型和非连续增强型复合材料。有人指出,金属基复合材料发展的未来前景主要在于非连续增强,特别是 SiC 晶须和颗粒增强的 Al 基复合材料^[15]。由于 Al-SiC 复合材料系统的重要性,本书内容很多描写该复合材料系统的地方。另一个本书描写较多的系统是 Ti-SiC。Ti-SiC 复合材料的使用温度高,有很多潜在应用领域,包括航空、航天、动力设备等等。

表 1-4 常用增强材料的物理与力学性能

颗粒	直径 $d(\mu\text{m})$	密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	熔点 $T_m(\text{K})$	热膨胀系数 $\alpha(\text{K}^{-1})$	泊松比 ν	弹性模量 $E(\text{GPa})$	拉伸强度 $\sigma_s(\text{MPa})$
Al_2O_3	1~50	3800	2316	7×10^{-6}	0.24	430	2100
B ₄ C	1~50	2500	2623			480	
SiC	1~50	3200		4.0×10^{-6}	0.17	450	
TiB ₂		4500		8.1×10^{-6}	0.13~0.19	350~570	
TiC		4900			0.19	230~400	
WC		15700				>530	
晶须							
Al_2O_3		4000				500	7000
C		2200				720	20000
Cr		7200				250	9000
Cu		9100				130	3000
Fe		8000				200	13000
Ni		8900				220	4000
SiC	0.1~1	3500			0.17	450~700	20000
Si_3Ni_4	0.1~10	3200				280~385	5000
金属丝							
Fe	150	7800	1800	13.3×10^{-6}	0.28	210	2500
Al	20	2700	930			70	700
Be	127	1800	1550			250	1300
W	12	19300	3670	4.5×10^{-6}	0.29	350~420	3000~4000
CVD 纤维							
B(W 芯)	50~100	2600	2300	5.0×10^{-6}		400	2700~7000
SiC(C 芯)	150	3290		4.0×10^{-6}		345	3800
SiC(W 芯)	100	3290		4.0×10^{-6}		415	3800
纺制纤维							
Al_2O_3 (Saffil)	3	3500	2313	7.7×10^{-6}		285	1500
Al_2O_3 (FP)	20	4000	2313	8.3×10^{-6}		380	1300~2100
SiC(Nicalon)	15	2550		3.0×10^{-6}		180	2400~8300
C	5~13	1700	3950			200	2000
C(高强度)	7	1800	3950			250	3000
C(高模量)		1900				400	2500