

JINSHUJI FUHE CAILIAO JIQI JINSHEN

ZHIBEI DE LILUN YU SHIJIAN

金属基复合材料及其浸渗制备的 理论与实践

王玲 赵浩峰 等编著

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书从金属基复合材料的概念出发,介绍了金属基复合材料浸渗制备的基本理论、实践和应用。全书共分四章,分别介绍了金属基复合材料的基本概念、金属基复合材料的原材料处理及液态浸渗的基本方式、金属基复合材料浸渗制备的润湿及界面问题、浸渗及凝固的基本理论及实践。本书不仅可以作为高等院校本科生的教材或参考书,也可作为生产部门的工程师及技术工人的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

金属基复合材料及其浸渗制备的理论与实践/王玲
等编著. —北京:冶金工业出版社,2005.4

ISBN 7-5024-3622-7

I. 金… II. 王… III. 金属复合材料—浸渗烧结—
设备 IV. TF066

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 089032 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 杨盈园 美术编辑 李心

责任校对 刘倩 李文彦 责任印制 牛晓波

北京百善印刷厂印刷,冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2005 年 4 月第 1 版,2005 年 4 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 15.875 印张; 425 千字; 498 页;1-2000 册

45.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

复合材料由于其具有独特的优点而成为 21 世纪人们重点研究的对象,而金属基复合材料又由于其独特的优势成为人们倍加关注的材料。金属基复合材料制造方法有多种,其中浸渗制造法成为目前金属基复合材料制造的一种有效的、有潜力的好方法。

作者在长期研究特种合金及功能复合材料的基础上,承担了山西省归国留学人员基金项目及企业项目有关金属基复合材料的研究及开发工作,并作为课题组的主要成员参加了有关浸渗制备金属基复合材料的欧盟研究项目工作。本书正是作者在从事这些教学及科研工作中,参考大量文献并总结、贯穿部分试验研究的结果。

全书共分 4 章。第 1 章为概述,主要介绍了复合材料的基本概念,其中包括复合材料及金属基复合材料的定义、复合材料的一些基本概念、金属基复合材料的基本类型及发展;金属基复合材料的制备及加工方法,包括金属基复合材料的一次成形和二次加工方法;金属基复合材料的特点、性能及复合原理等。第 2 章介绍了金属基复合材料的原材料处理及液态浸渗的基本方式,讨论了复合材料的相容性及对复合材料制备用原材料的基本要求、基体材料、增强体材料、增强体预制型及基本浸渗方法,其中基本浸渗方法简要介绍了金属基复合材料的挤压铸造浸渗、金属基复合材料的气体压力浸渗、金属基复合材料的超声浸渗、金属基复合材料的电磁浸渗、溶剂浸渗技术、无压浸渗技术、真空浸渗技术、熔模铸造浸渗技术、离心铸造浸渗及消失模铸造等。第 3 章介绍了金属基复合材料浸渗制备的润湿及界面问题,其中讨论了润湿热力学及接触角的概念、复合材料的基体与

增强材料之间的相互作用及界面过程、复合材料的界面结构及表征、复合材料的界面强度及复合材料的断裂、金属基复合材料界面优化及界面反应控制的途径等。第4章介绍了浸渗及凝固的基本理论与实践,其中讨论了多孔介质及金属浸渗流动的特性、金属浸渗过程的压力、压渗动力学与浸渗过程控制及金属基复合材料浸渗中的传热和凝固。

本书由太原理工大学、西安交通大学、南京信息工程大学和太原职工钢院的老师们合作编写,其中第1章的1.1、1.2、1.3、1.4节及第二章的2.2.4节由王玲撰写。第1章的1.5、1.6节由谷锦梅撰写。第2章(除2.1及2.2.4节外)由宋秀安撰写。第2章的2.1节及第4章由蔚晓嘉撰写。第2章的2.2.3节由赵浩峰、宋秀安、谷锦梅、蔚晓嘉撰写。第3章由林万明撰写。全书由郭胜利教授、王玲副教授与赵浩峰教授统稿。

为了便于读者阅读,本书从基本概念出发,注意了内容的实用性及通俗性,同时注意到一定水平的理论分析及讨论。因此,本书不仅可以作为高等院校本科生的教材或参考书,也可作为生产部门的工程师及技术工人的参考书,同时也可以作为企业管理工作者了解新材料发展的入门书。

本书在编著中参考了许多金属基复合材料工作者与相关企业在试验、研究及生产中所积累的经验、数据和文献。本书在进行数据收集、文献资料整理中得到西安交通大学苏俊义教授、资深铸造专家赵忠昌先生的指导、支持及帮助。本书的出版得到了山西省归国留学人员基金委员会、山西省有色金属学会、西安交通大学、奥地利工业研究所及国内部分生产企业等单位领导及同事的支持。在此,对上述部门的专家、领导及同事,在本书编著及出版中所给予的支持及所付出的辛勤劳动表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限,书中有不当之处敬请读者提出宝贵意见。

作 者

2005年2月

目 录

1 金属基复合材料的基本概念	1
1.1 复合材料的基本概念	1
1.1.1 复合材料及金属基复合材料的定义问题	1
1.1.2 复合材料科学与工程中所接触到的一些基本概念	3
1.2 复合材料的基本类型	6
1.3 复合材料的发展	12
1.3.1 工程复合材料的发展	12
1.3.2 纤维的研究与发展	15
1.4 金属基复合材料的制备及加工方法	20
1.4.1 金属基复合材料的一次成形方法	20
1.4.2 金属基复合材料的二次加工	48
1.5 金属基复合材料的特点	51
1.6 金属基复合材料的性能复合原理	56
1.6.1 纤维复合材料的性能复合原则	56
1.6.2 用力学方法考虑连续纤维复合材料的 模量及强度	63
1.6.3 短纤维复合材料的性能复合原则	69
1.6.4 颗粒增强复合材料的应力与应变关系	76
1.6.5 其他性能	80
主要参考文献	82

2 金属基复合材料的原材料处理及液态浸渗的基本方式	87
2.1 复合材料的相容性及对复合材料制备用原材料的基本要求	87
2.1.1 复合材料的相容性	87
2.1.2 对增强体材料选择的共同要求	89
2.2 基体材料	90
2.2.1 铝及铝合金	92
2.2.2 锌及锌合金	97
2.2.3 镁及镁合金	100
2.2.4 镍及镍合金	110
2.2.5 铜及铜合金	127
2.2.6 钛及钛合金	130
2.3 增强体材料	135
2.3.1 颗粒增强(添加)材料	135
2.3.2 纤维增强体的制备及性能	141
2.3.3 晶须增强体	178
2.4 增强体预制型	179
2.4.1 增强物的去胶	179
2.4.2 增强物的预制成型	185
2.5 基本浸渗方法	193
2.5.1 浸渗技术的发展	193
2.5.2 金属基复合材料的挤压铸造浸渗	197
2.5.3 金属基复合材料的气体压力浸渗	201
2.5.4 金属基复合材料的超声浸渗	215
2.5.5 金属基复合材料的电磁浸渗	218
2.5.6 溶剂浸渗技术	219
2.5.7 无压浸渗技术	219
2.5.8 真空浸渗技术	222
2.5.9 熔模铸造浸渗技术	225

2.5.10 离心铸造浸渗及消失模铸造	226
主要参考文献	227
3 金属基复合材料浸渗制备的润湿及界面问题	237
3.1 润湿热力学及接触角的概念	237
3.1.1 润湿基本概念	237
3.1.2 附着功	252
3.2 基体与增强物之间的相互作用及界面过程	258
3.2.1 界面的概念	258
3.2.2 界面反应	262
3.3 复合材料的界面结构及表征	267
3.3.1 复合材料的界面结构	267
3.3.2 复合材料的界面结构表征	274
3.4 复合材料的界面强度及复合材料的断裂	284
3.4.1 界面强度	284
3.4.2 复合材料的损伤及破断现象	296
3.5 金属基复合材料界面优化及界面反应控制的途径	320
3.5.1 金属基复合材料的界面优化	320
3.5.2 金属基复合材料增强界面润湿性、控制界面反应的途径	326
主要参考文献	350
4 浸渗及凝固的基本理论及实践	359
4.1 多孔介质及金属浸渗流动的特性	359
4.1.1 多孔介质及其特性	359
4.1.2 多孔介质中流体的性质	365
4.1.3 金属浸渗中的流动行为	378
4.1.4 浸渗过程流体流动数值模拟的数学模型	394
4.2 金属浸渗过程的压力	396
4.2.1 加压浸渗的过程	396

4.2.2 金属浸渗过程的作用力分析	398
4.2.3 金属浸渗过程的临界压力分析	404
4.2.4 浸渗过程中的压力分布	422
4.3 压渗动力学及浸渗过程控制	425
4.3.1 压渗动力学	425
4.3.2 饱和度	436
4.3.3 浸渗过程控制	439
4.4 金属基复合材料浸渗中的传热和凝固	444
4.4.1 复合材料浸渗中的传输现象	447
4.4.2 金属基复合材料的凝固	464
主要参考文献	495



金属基复合材料的基本概念

1.1 复合材料的基本概念

1.1.1 复合材料及金属基复合材料的定义问题^[1~7]

现代社会的发展对材料的要求越来越高。在结构材料方面,不但要求有高的强度等力学性能,而且还要求重量轻。在有些情况下,结构材料还要求具有功能材料的特性。因此,对更佳材料的要求越来越迫切。复合材料作为一种人为设计的材料,能够很好地满足这种发展的要求。复合材料的学术概念出现在 20 世纪 50 年代。关于复合材料有许多种定义。有人认为复合材料是由两个独立相组成的,其中一个为连续相,其体积分数大于 50%,另一个相的体积分数小于 50%。也有人认为,复合材料是由有机高分子、无机非金属或金属等几类不同材料通过复合工艺组合而成的新型材料,它既能保持原组成材料的主要特色,又通过复合效应获得原组分所不具备的性能,这种材料与一般材料的混合有本质的区别。还有人认为,复合材料是由两种异质、异形、异性的材料复合而形成的新型材料,其中增强体有纤维、片状和粒状材料,基体有聚合物、金属、陶瓷等材料。尽管复合材料有许多种定义,但归纳起来可以认为复合材料是由两种以上具有不同物理及化学性质、不同形态的材料经人工复合制成的一种新的多相材料。

复合材料(composites)一般由基体和增强物(也称增强相或增强体)两部分组成,连续的一相为基体,处于基体中的不连续相为增强物。根据材料的性质不同,基体可以是金属或合金,可以是高分子材料,也可以是陶瓷材料,主要起连接增强物和承载作用。增强物根据其外观形态不同分成纤维(长纤维、短纤维)、晶须(细

小单晶)、片状及球状或颗粒状。这些增强物可以由石墨、陶瓷及金属构成,在结构复合材料中主要起承载作用。实际上,基体和增强物的界面往往具有不同于基体和增强物的相结构,因此在复合材料中还存在第三相,即界面。界面是增强相和基体相连接的桥梁,同时是应力及其他信息的传递者。因此可以讲,复合材料是一种不均匀的多相材料,它由增强相、基体相和它们的中间相——界面组成。三者都有自己独特的结构、性能与作用。

本书所指的复合材料是指工程复合材料,包括天然复合材料及人工复合材料,是用于工业用途的特种材料。工程复合材料的特征是:复合材料的组元是人们有意选择和设计的,本身是由人工制造,而不是天然形成的,至少包括两种独立的不相同的化学相,其性能取决于每种具有相当含量的组元相(体积分数不小于5%),组元必须具有重复的几何形状,这样材料可在相当大的范围内被看成是均匀的,应具有单个组元没有的优良性能。也就是说复合材料的性能并不是组分材料性能的简单迭加,而是形成了一种复合效应。复合效应的本质是组分材料及其所形成的界面相互作用、相互依存、相互补充的结果。复合效应包括混合效应和协同效应。混合效应也称平均效应,它是组分材料性能取长补短的结果。协同效应反映的是组分材料的原位特性。混合效应往往与复合材料的刚度有关,协同效应往往与复合材料中的强弱、疲劳、损伤、破坏等现象有关。有人认为复合材料具有线性效应、非线性效应和乘积效应。线性效应是指复合材料的性质与增强组元(功能组元)的含量有线性关系。线性效应的内容有:平均效应、平行效应、相补效应、相抵效应等。很多结构复合材料的性能,都用线性效应来估计并作为设计的依据,如常用平均效应“混合定律”来估算增强体与基体进行复合后材料的性能。相补效应一般和相抵效应同时存在。如有一种强度和刚度良好的增强体,其缺点是韧性较差,在选择韧性较好的基体材料后,由于增强体与基体间的互补和相抵效应,可获得符合设计要求、满足使用性能的复合材料。非线性效应指的是复合材料的性质与增强组元的含量并非简单的直

接关系,复合后可能产生一些新的性质。非线性效应有:乘积效应、诱导效应、共振效应和系统效应等。增强体(或功能相)附近的晶体会通过界面,导致基体结构发生变化(可能形成界面相),这就是诱导效应。再如两个相邻物体,在特定条件下发生共振现象,在复合材料中表现出的则是共振效应。乘积效应是指把一种具有 X/Y 转换功能的材料与另一种具有 Y/Z 转换功能的材料进行复合后,会产生 $(X/Y) \times (Y/Z) = X/Z$ 的功能。虽然目前还没有普遍接受的复合材料定义,但通常认为,在外力作用下,基体和增强物间有载荷传递,即在复合材料承受外力时,由于增强体的存在,基体转移出相当一部分载荷到增强体上,就认为是复合材料。在这个概念下,通常所见的弥散强化或沉淀强化的材料不是复合材料。因为它一般含有不到体积分数为 1% 的或更少第二相,这样的比例含量是不足以承受基体压力负荷的。

金属基复合材料(metal matrix composites,简称 MMCs)就是以金属或合金为基体,以不同材料的纤维或颗粒为增强物的复合材料。对于所有金属基复合材料而言,其特点是有一个连续的金属或合金基体,而其他组元相均匀分布在金属基体中。金属基复合材料就是最常用的工程复合材料。

需要指出,有些材料是否也可以称为复合材料,如 Al-Si 合金、铸铁及双相钢(约有 20% 的马氏体颗粒在铁基体中),目前还没有一个准确的结论。但可以肯定,根据前面的概念,这些材料已非常近于普通的金属基复合材料范畴。

1.1.2 复合材料科学与工程中所接触到的一些基本概念^[2,6,8~10]

在复合材料科学与工程中会接触到如下一些概念。

原材料(ingredient materials):是组成复合材料的原始材料,其性质可以是金属的或非金属的,其形态可以是块状、粉状或粒状的。在制造中,这些材料将转变成为金属基复合材料中的组元。

增强物(reinforcement):也称增强体,是金属基复合材料中的关键组元,在复合材料中能与金属或合金基体良好结合,其形态可

以是纤维状、晶须状、颗粒状等,其材质可以是金属或非金属的。其化学成分、形态、大小、原材料的性质、在基体中的分布形态及所占比例将对复合材料的性能产生决定性作用。

非连续增强物(discontinuous reinforcement):是以单体形式嵌于基体中而不穿过基体的增强物。

连续增强物(continuous reinforcement):是指至少在一个方向上穿过基体的增强物,如长纤维。图 1-1-1 所示为氧化铝长纤维。

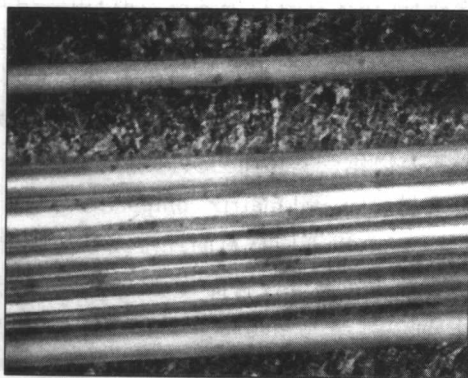


图 1-1-1 氧化铝长纤维(1000×)

颗粒(particulates):是基本等轴的物体,通常颗粒的长径比不大于 4,平均直径不大于 $1\mu\text{m}$,它可以是单晶体,也可以是多晶体,其形状可以是球形、多角形或片状。

片粒(plateletes):是径厚比大于 2 的片状增强物。当该比值小于 5 时可以认为是颗粒增强物的一种。

短纤维(short fiber):是一种短柱状增强物。其长径比大于 4,直径大于 $0.8\mu\text{m}$ 。

晶须(whiskers):是长径比大于 8、直径小于 $1\mu\text{m}$ 的长形单晶体。

长纤维(continious fiber):是连续生产工艺生产出的柱形增

强物,直径为 $3\sim 30\mu\text{m}$,工业用长纤维通常成束成卷供货,一般纤维表面覆盖有树脂。

单丝(monofilaments):是长纤维中的一种特殊类型,其直径一般大于 $100\mu\text{m}$,如图 1-1-2 所示。工业上非成束供货。值得注意的是,纤维束中也有单丝,是指每一根独立的细丝。纤维中的原纱是指多根单丝汇集成的束丝。股数是指一束纤维的原纱数,捻度是指 1m 长原纱合股时捻的圈数,细度是单丝粗细的度量。原纱粗细可用重量法及定长法确定。重量法是指 1g 原纱的长度,用支数表示,如 90 支是指 1g 原纱的长度为 90m 。定长法是指 1000m 长的原纱的支数,单位为 Tex , Tex 值越大,单丝就越粗。

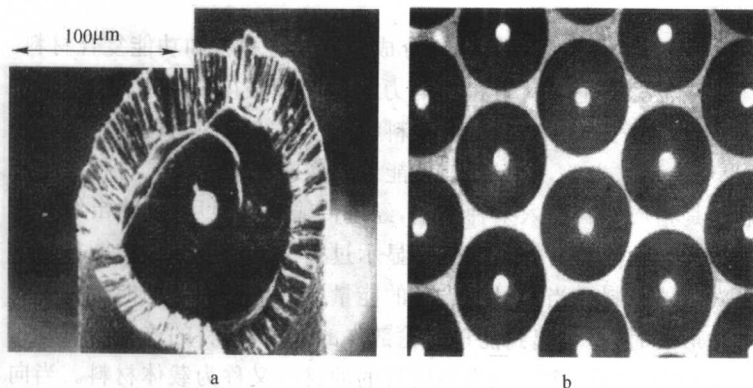


图 1-1-2 单丝^[2]

a—立体形貌;b—金相照片

弥散物增强金属基复合材料(dispersoid reinforced MMCs):是金属基体中具有极为细小的颗粒(小于 $0.1\mu\text{m}$),其体积分数大于 $4\%\sim 5\%$ 的复合材料。如果体积分数小于 $4\%\sim 5\%$ 常被视为合金。

普通颗粒增强金属基复合材料(particulate reinforced MMCs):是在金属基体中颗粒增强物的体积分数大于 $4\%\sim 5\%$ 的复合材料。如果颗粒的体积分数小于 $4\%\sim 5\%$,颗粒被视为夹杂。颗粒复合材料包含弥散复合材料和普通颗粒复合材料。

复合材料的增强物常用 p 表示颗粒,用 s 表示短纤维,用 w 表示晶须,用 f 表示长纤维,用 m 表示单丝。金属基复合材料的命名方式为:基体/增强物缩写/分布方式及体积分数。如镁合金 AM10 用东丽公司生产的长碳纤维 T300 增强,体积分数为 60%,则该复合材料表示为:AM10/C-T300/65f-0/90。

1.2 复合材料的基本类型^[11~18]

在生产及生活中,会遇到许多复合材料,如颗粒增强复合材料、连续纤维增强复合材料及不连续纤维增强复合材料、压电复合材料、磁性复合材料等等。复合材料的种类很多。在此,简单进行归类。

按用途分,复合材料可以分成结构复合材料和功能复合材料。结构复合材料主要利用材料的力学性能如强度、刚度等在工作中承受载荷或变形。功能复合材料利用材料特殊的物理或化学性能如声、电、磁、光等,以实现某种能量变换或功能利用。材料的功能显示是指向材料输入某种能量,经过传输或转换后,再输出给外部的过程。功能材料按其功能的显示过程又可分为一次功能材料和二次功能材料。当向材料输入的能量和从材料输出的能量属于同一种形式时,材料起到能量传输部件的作用,材料的这种功能称为一次功能。以一次功能为使用目的的材料又称为载体材料。当向材料输入的能量和从材料输出能量属于不同形式时,材料便成为能量的转换部件,材料的这种功能称为二次功能或高次功能。有人认为这种材料才是真正的功能材料。一次功能主要有:力学功能,如黏性、超塑性、恒弹性、高弹性、振动性等;声功能,如隔音性、吸音性等;热功能,如传热性、隔热性、吸热性和蓄热性等;电功能,如导电性、超导性、绝缘性和电阻等;磁功能,如硬磁性、软磁性、半硬磁性等;光功能,如遮光性、透光性、折射光性、反射光性、吸光性、偏振光性、分光性、聚光性等;化学功能,如吸附作用、气体吸收性、催化作用、生物化学反应、酶反应等;放射特性;电磁波特性等。二次功能按能量的转换系统可分为光能与其他形式能量的转换,

如光合成反应、光分解反应、光化反应、光致抗蚀、化学发光、感光反应、光致伸缩、光生伏特效应和光导电效应等；电能与其他形式能量的转换，如电磁效应、电阻发热效应、热电效应、光电效应、场致发光效应、电化学效应和电光效应等；磁能与其他形式能量的转换，如光磁效应、热磁效应、磁冷冻效应和磁性转变等；机械能与其他形式能量的转换，如形状记忆效应、热弹性效应、机械化学效应、压电效应、电致伸缩、光压效应、声光效应、光弹性效应和磁致伸缩等。因此相应的复合材料有阻尼复合材料、导电复合材料、导磁复合材料、压电复合材料、摩擦功能复合材料、热功能复合材料、光功能复合材料、声功能复合材料、机敏复合材料、仿生及生物复合材料、屏蔽复合材料等。当然，目前也出现了既能承受力学载荷，又具有特殊功能的结构功能复合材料。如较为成功的一种颗粒增强铝基结构功能复合材料 SiCp/LY12 就有两方面应用领域。以美国 Alcan 公司的 DuralanTM 为代表的结构材料，用在对重量要求较苛刻的结构件上，制备如航天飞机上的支撑架、卫星结构件及汽车上的活塞、刹车盘等零部件，发挥其比强度、比模量高及抗磨损的优点。以美国先进复合材料公司的 SXATTM 为代表的功能级材料，用于电子封装、惯性导航及惯性制导、坦克火控系统反射镜、超轻型天文望远镜等光学构件及对材料物理性能、尺寸稳定性要求很高的领域。SiCp/LY12 在用于反射镜这类光学级构件时，常需在表面涂敷一层反射能力高的中间层合金。为使两者热膨胀系数相匹配。要求复合材料中颗粒体积分数控制在一定范围(30%~35%)。电子封装外壳是功能复合材料在电子工业中应用的一个例子。随着集成电路制造业的发展，更多的器件被组装在更小、更轻的封装壳中，这些器件材料的一个基本要求是迅速散热。因为，温度升高 10℃ 将使芯片的寿命减少 33%~40%。因此提高封装材料的热传导性至关重要。碳纤维复合材料可以用来增加封装材料的热传导性。降低热疲劳问题的方法之一是调整复合材料的线膨胀系数使之与硅相匹配。这样，在将硅芯片装配到外壳中时，热应力减小，所以能够提高芯片的寿命。外壳材料经常采用 Kovar

合金或 Si 颗粒强化的铝合金来制造,这样可以使其具有优异的热传导特性,并且还明显地减轻重量。作为实例,航空航天飞行器上所用的加速度测量仪,是在非常小的密封腔内安装一测量摆来进行工作,其外壳材料由硅材料与玻璃组成,玻璃中含有多种元素而且其线膨胀系数与硅相接近。

复合材料的性能不仅取决于组成相的性能,而且与组成相的几何形状、尺寸等因素密切相关。复合材料按增强物的形态划分,又可以分为颗粒状分散相复合材料、连续纤维复合材料及不连续纤维复合材料(如晶须增强复合材料)。其中颗粒状分散相复合材料包括片状增强复合材料、颗粒增强复合材料及弥散增强复合材料。表 1-2-1 为 SiC 颗粒增强铝基合金的力学性能。连续纤维复合材料包括单向纤维复合材料、二向编织纤维复合材料及三向和多向编织纤维复合材料。按增强纤维的材料不同可分为金属纤维(如不锈钢纤维、钨丝及钎纤维等)、有机高分子纤维(如芳香族聚酰胺纤维、芳香族聚酯纤维及高强度聚烯烃纤维等)及无机非金属纤维(如氧化铝纤维等)。在金属基复合材料中主要使用的是无机非金属纤维,其次是金属纤维。也有可能使用某些耐火材料、玻璃、金属间化合物或半导体作增强体。

表 1-2-1 SiC 颗粒增强铝基合金的力学性能^[16]

复合材料	模量/GPa	屈服应力/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
25% SiC6061	122.7	434	498	3.91
25% SiC7090	117	686	805	2.0
25% SiC2124	115.5	420	574	5.4
20% SiC2014	107.8	479	497	2.5
15% SiC7050	99.4	581	610	2.5

按基体材料不同复合材料可分为金属基、陶瓷基、高分子材料基及水泥基复合材料等。金属基复合材料所用的金属或合金范围很宽。但常用的有铝、镁、铜、钛、钛化铝、镍基合金以及铁合金等。

金属基复合材料的增强相一般多为较硬的陶瓷材料,但有时也用相对软的或能配合的相作为增强相,如石墨片、铝粒甚至还有气体。泡沫塑料及泡沫金属(cellular metals)可以称为含有气相的复合材料,其中泡沫金属是以金属作为基体,以气体作为第二相的材料。图 1-2-1 所示为金属泡沫复合材料的照片。但此处的第二相并非为增强物。另外还有一种金属陶瓷(cermets),它也是金属基复合材料中的一种,由陶瓷和金属组成,微细的陶瓷在三维空间均匀分布,其中陶瓷所占的体积远大于金属。不同金属或合金板相间结合的复合板也属于金属基复合材料,这种材料的制备可以采用多种方法如爆炸成形、层压成形等。如爆炸成形制备的 1Cr18Ni9Ti/16Mn 复合钢板的两层材料之间具有很好的冶金结合。目前,金属基复合材料可以按增强物形态划分,如图 1-2-2 所示。图 1-2-2a 为连续增强方式,图 1-2-2b,c 两图为非连续增强方式。非连续增强方式存在短纤维和颗粒形式。图 1-2-3 所示为氧化铝纤维增强铝基复合材料。图 1-2-4 所示为碳纤维/Al 复合材料。另外还有功能梯度复合材料,其特点与异类结构复合材料不同,性能不会发生突变。图 1-2-5 所示为功能梯度材料的概念示意图。

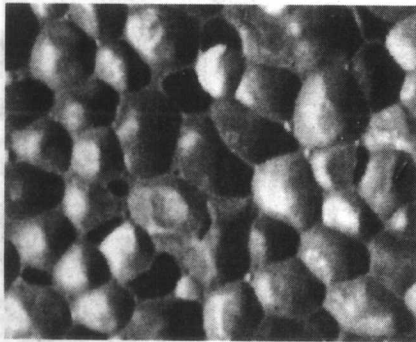


图 1-2-1 金属泡沫复合材料^[2]