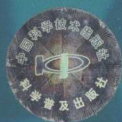


赵浩峰 卫爱丽 游志勇 王 玲/编著

金属基复合材料

—— 制备及在力学环境中的作用



中国科学技术出版社

金属基复合材料—— 制备及在力学环境中的作用

赵浩峰 卫爱丽 游志勇 王 玲 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

金属基复合材料:制备及在力学环境中的作用/赵浩峰等编著. —北京:中国科学技术出版社,2009.7

ISBN 978-7-5046-5471-7

I. 金… II. 赵… III. ①金属复合材料-制备-研究②金属复合材料-材料力学-研究 IV. TB331

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第110843号

自2006年4月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街16号 邮政编码:100081

电话:010-62103210 传真:010-62183872

<http://www.kjpbooks.com.cn>

北京长宁印刷有限公司印刷

*

开本:850毫米×1168毫米 1/32 印张:12 字数:307千字

2008年12月第1版 2008年12月第1次印刷

定价:30.00元

ISBN 978-7-5046-5471-7/TB·77

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

前 言

金属基复合材料由于自身的一些特殊优点,如金属基复合材料具有高的比强度、高的比模量、良好的高温性能、低的热膨胀系数、良好的尺寸稳定性、优异的导电导热性,因此其用途十分广泛,有着十分广阔的市场前景,对高技术产业获得突破性和跨越性的发展具有重要的推动作用。

铝、镁、钛是金属基复合材料的主要基体,而增强材料一般可分为纤维、颗粒和晶须三类。碳纤维增强铝、镁基复合材料在具有高比强度的同时,还有接近于零的热膨胀系数和良好的尺寸稳定性,成功地用于制作人造卫星支架、L 频带平面天线、空间望远镜、人造卫星抛物面天线等;碳化硅颗粒增强铝基复合材料具有良好的高温性能和抗磨损的特点,可用于制作火箭、导弹构件,红外及激光制导系统构件,精密航空电子器件等;碳化硅纤维增强钛基复合材料具有良好的耐高温和抗氧化性能,是高推重比发动机的理想结构材料,目前已进入先进发动机的试车阶段。特别是在军事领域,金属基复合材料可用于大口径尾翼稳定脱壳穿甲弹弹托,反直升机/反坦克多用途导弹固体发动机壳体等零部件,以此来减轻战斗部重量,提高作战能力。可见,金属基复合材料是一种重要的先进材料,具有大的应用潜力。

本书结合作者近年来关于金属基复合材料研究和实践,介绍了金属铝、镁及锌铝基复合材料及加工中的理论和实践问题,同时对金属基复合材料在力学环境中的作用做了讨论。全书共分为五

章。第1章为复合材料的概念,第2章为复合材料制造的理论基础,第3章为复合材料制备方法,第4章为浸渗制备的理论与实践,第5章为复合材料在力学环境中的行为。

本书由南京信息工程大学和太原理工大学的老师共同撰写完成,其中第1章,第2章的第2.1节、第2.2节、第2.3节和第2.5节由赵浩峰撰写,第2章的第2.4节和第2.6节、第3章、第4章由卫爱丽撰写,第5章由游志勇撰写,前言和参考文献由王玲整理撰写。全书由南京信息工程大学的王玲教授统稿。本书撰写中相关实验数据的采集及分析来自许多作者的研究成果,在此表示感谢。

本书可以作为材料专业高年级本科生或硕士研究生的参考教学用书。

目 录

第1章 金属基复合材料的概念	(1)
1.1 复合材料的概念	(1)
1.2 复合材料的类型	(7)
第2章 金属基复合材料制造的理论基础	(11)
2.1 金属基复合材料制造的流体力学基础	(11)
2.2 润湿热力学及接触角的概念	(14)
2.3 金属基复合材料的界面问题	(17)
2.4 金属基复合材料的传热特点	(21)
2.5 金属基复合材料的凝固问题	(31)
2.6 复合材料的设计理论	(69)
第3章 金属基复合材料制备方法	(84)
3.1 复合材料制备的原材料准备基础	(84)
3.2 复合材料的制备方法	(121)
第4章 金属基复合材料浸渗制备的理论与实践	(189)
4.1 浸渗中的金属流动行为	(189)
4.2 浸渗过程流体流动数值模拟的数学模型	(193)
4.3 金属浸渗过程的压力	(201)
4.4 浸渗过程控制	(235)
4.5 纤维复合丝界面	(245)
4.6 功率超声液相浸渗适应性的研究	(246)
第5章 金属基复合材料在力学环境中的行为	(250)
5.1 材料的硬度	(250)

5.2	金属基复合材料材料在静拉伸时的 强度和塑性	(254)
5.3	金属基复合材料拉伸的韧性和断裂	(282)
5.4	金属基复合材料的在扭转时的力学性能	(320)
5.5	金属基复合材料的弯曲试验	(322)
5.6	金属基复合材料的磨损	(326)
5.7	金属基复合材料的高温力学性能	(358)

第1章 金属基复合材料的概念

1.1 复合材料的概念

1. 材料的概念

材料是指人类社会所能接受的、可经济地制造有用器件(或物品)的物质,是组成生产工具的物质基础。在人类的生产和生活中,材料是必需的物质基础。材料具有十分鲜明的应用目的,是人类进行生产的最根本的物质基础,也是人类衣、住、行及日常生活用品的原料。随着科技的发展,对材料的性能不断提出了更高的要求。以材料为研究对象的科学是材料科学。材料科学与工程是发展国民经济和实现国防现代化的具有全局性的重要科学技术领域之一。

材料的种类很多。按材料的物理性质分有导电材料、超导材料、半导体材料、绝缘材料、压电铁电材料、磁性材料、光电材料和敏感材料等。按照使用领域的不同,又可将它们分为建筑材料、电子材料、医用材料、仪表材料、能源材料等等。电子材料按应用功能又可分为微电子材料、电器材料、电容器材料、磁性材料光电子材料、压电材料、电声材料等。按材料的化学键分,材料有金属、无机非金属和有机高分子材料三大类。

材料按发展时间划分,可分为新材料和传统材料。新材料是指那些新出现或已在发展中的、具有传统材料所不具备的优异性能和特殊功能的材料。新材料与传统材料之间并没有截然的分界,新材料在传统材料基础上发展而成;传统材料经过组成、结构、

设计和工艺上的改进从而提高了材料性能,即出现新的性能都可发展成为新材料。人类过去的历史按传统材料划分可分为石器时代、铜器时代、铁器时代等。新材料的使用对人类历史的发展起了重要的作用。20 世纪 70 年代以来人们把材料、信息、能源、生物称为现代文明的四大支柱,把信息技术、生物技术、能源技术和新型材料作为新技术革命的重要标志。

2. 材料的发展

在人类文明的进程中,材料大致经历了以下五个发展阶段。

一是使用纯天然材料的初级阶段。这一阶段,人类所能利用的材料都是纯天然的。在这一阶段的后期,虽然人类文明的程度有了很大进步,在制造物件方面有多种技巧,但都只是纯天然材料的简单加工和形成。

二是材料的火取阶段。这一阶段主要是人类利用火来对天然材料进行煅烧、冶炼和加工的时代。该阶段横跨人们通常所说的新石器时代、铜器时代和铁器时代。它们分别以人类的三大人造材料即陶、铜和铁为象征。人类用天然的矿土烧制陶器、砖瓦和陶瓷,以后又制出玻璃和水泥,并且从各种天然矿石中提炼铜、铁等金属材料。

三是材料的合成阶段。随着物理学和化学等科学的发展以及相应检测技术的出现,人类开始从化学角度出发,研究材料的化学组成、化学键、结构及合成方法并从物理学角度出发开始研究材料的物理性质。该阶段使用的原料有可能是天然原料,也有可能是合成原料。

四是材料的复合化阶段。20 世纪 50 年代金属陶瓷的出现标志着复合材料时代的到来。从有意识的应用方面看,在飞机上采用复合材料较早,第一代航空复合材料是玻璃纤维增强塑料(玻璃钢),其弹性模量低,刚度不足。但在第二代,即高强度、高模量的碳纤维、碳纤维复合材料,其强度、疲劳特性与破损安全性等都

比金属材料优越,能使飞机重量减轻,费用减少,且便于复杂型面的加工与组装。

五是材料的智能化阶段。近年来,智能材料的研究取得了进展,但是离理想的目标还相距较远。该阶段的研究领域实际十分广泛,如涉及电子陶瓷薄膜、超晶格材料、纳米陶瓷材料及机敏材料等。

可见,复合材料和智能材料都属于新材料。材料的复合化是现代材料科学发展的趋势之一。通过不同结构、不同组成、不同功能的材料复合,可以使材料的基本特性得到互补、优化以及协同增强,产生新性能,形成新材料。

3. 复合材料的概念

复合材料是由两种以上具有不同物理及化学性质、不同形态的物质经人工复合工艺制成的一种新的多相材料。复合材料包含六个方面的内容:一是复合材料的组元是人们有意选择和设计的;二是复合材料本身是人工制造的,而不是天然形成的;三是复合材料至少包括两种独立的不相同的化学相;四是复合材料的性能取决于每种具有相当含量的组元相(体积百分比不小于5%);五是复合材料的组元应具有重复的几何形状,这样可在相当大的范围内把材料看成是均匀的;六是复合材料应具有单个组元没有的优良性能。也就是讲,复合材料是将两种或两种以上性质截然不同的物质加以优化组成的新材料,它结合各自的优点,避免各自的缺点。

复合材料概念的提出始于20世纪40年代,由于当时对复合材料的基础理论研究甚少,再加上制备工艺不完善,所以复合材料的发展比较缓慢。到20世纪60年代,由于高性能的纤维如碳纤维、氧化铝纤维的研制成功,同时由于航空、航天等高科技领域对具有综合性能优异的材料的需求,极大地促进了树脂基复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料等先进复合材料的发展。现代技术对材料的要求越来越高,在动力结构方面,不但要求强度高,

还要求重量轻,因此对更佳材料的要求尤为强烈。复合材料作为一种人为设计的材料,可以很好的满足这些要求。

复合材料一般由基体和添加物两部分组成,连续的一相为基体,为基体所包围的相为添加物。起增强作用的添加粉也叫增强物,或叫增强体。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应第三个组元即界面相。界面是增强物和基体连接的桥梁,同时是应力及其他信息的传递者。复合材料中界面层的厚度通常在亚微米以下,但界面层的总面积在复合材料中很大,且复合材料的界面特征对复合材料的性能、破坏行为及应用效能有很大影响。所以,人们以极大的注意力开展对复合材料界面的研究。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。而添加增强物可以根据其外观形态不同分成纤维(长纤维、短纤维)或晶须状(细小单晶)、片状及球状或颗粒状。这些添加增强物可以由各种材料如石墨、陶瓷及金属或半导体材料构成。图 1-1-1 为长纤维增强金属复合材料,图 1-1-2 是复合材料中纤维和金属基体的界面。图 1-1-1 和图 1-1-2 的金相组织是用金相砂纸磨光后在 P-2 型金相试样抛光机上抛光(用抛光粉),用 5% 硝酸酒精腐蚀,再通过 NiKO 金相显微镜、电子扫描显微镜、EDS 电子能谱分析仪分析硅相形貌和磨损痕迹与腐蚀痕迹。

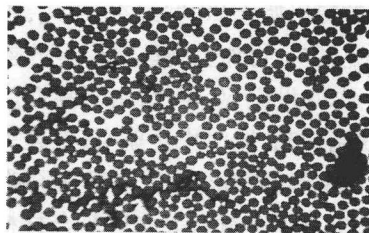


图 1-1-1 长纤维增强复合材料的断面组织

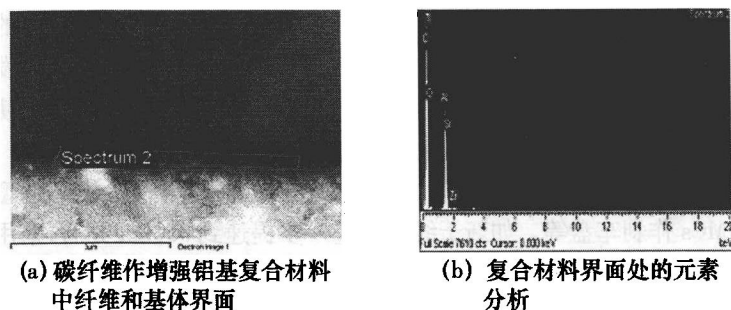


图 1-1-2 复合材料的界面

4. 金属基复合材料的应用

以金属为基体的复合材料称为金属基复合材料。与其他复合材料相比,金属基复合材料因具有高温性能好、耐磨损、抗老化等一系列特有性能,所以备受人们青睐,在汽车、航空、航天领域得到了广泛应用。国内外的科研院所竞相在这一领域展开深入研究,并取得了丰硕的成果。1981 美国的“哥伦比亚”号航天飞机的货舱桁架首次使用了 B/Al 金属基复合材料,其刚性好,重量轻。NASA 公司的卫星波导管使用了 DWC 特种复合材料公司制造的 Gr/Al 复合材料,其热膨胀系数小导电性好,比原来使用的石墨/环氧树脂波导管要轻 30%。俄罗斯航空材料研究所将 B/Al 复合材料用于安-28 飞机的机体结构上,零件重量减小了 25%。此外,Al 基复合材料的高弹性模量和低膨胀系数的特性还有望用于制造光学和电子封装壳体零件。

汽车工业是国家标志性产业之一。金属基复合材料在汽车上主要用于制造活塞等其他汽车零部件(见表 1-1-1)。一个有名的例子就是本田公司在发动机缸体的缸套采用 FRM,取代传统的铸铁缸套,它用 Al_2O_3 与 C 纤维的混合物作为增强物,在 Al 合金缸体的内表层形成 2mm 厚的 FRM 层,其中纤维体积含量为 12%~15%,使用后缸体的滑动摩擦性、汽车的操作性及回转响应等性

能大大提高。日产汽车公司采用了 10% 的 Al_2O_3 短纤维增强的 Mg 合金活塞,汽车重量减轻了 40%。英国 AE 公司制造了柴油发动机用的金属基复合材料缸套,其热变形和机械变形减小,从而使缸套的冷却效率提高,油耗降低,活塞的磨损减少。

MMCs 在汽车上的应用还有用纤维强化的连杆,颗粒增强型 MMCs 作刹车盘等。如新干线列车进一步提速到 350km/h 后,采用了 SiC 颗粒增强的 Al 合金刹车盘,减轻了重量,并且提高了耐磨性。

表 1-1-1 金属基复合材料在汽车工业上的应用

制造(研制)单位	基体材料	增强体	增强体 Vol%	应用
Martin	Al2219	TiC	15 ~ 20	活塞、连杆
3M	Al - 2wt% Cu	Al_2O_3	65	刹车盘
Honda	Al2024	Al_2O_3	10 ~ 20	连杆
Dural	Al6061	Al_2O_3	10 ~ 20	活塞
3M	Al	Al_2O_3	45	飞轮
DWA	Al2124	SiC	10 ~ 20	活塞连杆

21 世纪是信息时代,在信息技术领域中,集成电路的集成度将不断提高,而其散热问题已成为制约集成度提高的关键因素,因此需要寻找具有高导热系数的材料作为封装的基材,但是这种材料还要同时满足与电路硅片及其绝缘陶瓷基板的热膨胀系数(CTE)相匹配的要求,否则会因热失配形成残余应力而损坏电路。目前美国已用真空压力浸渍法进行了碳化硅颗粒增强铝封装器件的小批量生产,国内也开始用无压浸渗法进行该类封装材料的试验。此外,由于铝基 MMCs 的比刚度高、尺寸稳定性好,因此适合制造各种天线及抛物线反射板等。

在其他方面,金属基复合材料还用于自行车链轮、高尔夫球头以及医疗上的假肢等。近年来,金属基复合材料的应用又扩展到了电力行业,如美国 3M 公司和法国 EDF 公司联合研制的一种新

型纤维增强铝基复合材料导线,其导电性好,耐腐蚀,环境适应性好,在电力传输方面应用前景良好。

功能用金属基复合材料随着电子、信息、能源、汽车等工业技术的不断发展,越来越受到各方面的重视,面临广阔的发展前景。高技术领域的发展要求材料和器件具有优良的综合物理性能,如同时具有高力学性能、高导热、低热膨胀、高电导率、高抗电弧烧蚀性、高摩擦系数和耐磨性等。单靠金属与合金难以具有优良的综合物理性能,而要靠优化设计和先进制造技术将金属与增强物做成复合材料来满足需求。例如,电子领域的集成电路,由于电子器件的集成度越来越高,单位体积中的元件数不断增多,功率增大,发热严重,需用热膨胀系数小、导热性好的材料做基板和封装零件,以便将热最迅速传走,避免产生热应力,来提高器件的可靠性。又如,汽车发动机零件要求耐磨、导热性好、热膨胀系数适当等,这些均可通过材料的组合设计来达到。目前功能金属基复合材料主要用于微电子技术的电子封装、用于高导热、耐电弧烧蚀的集电材料和触头材料、耐高温摩擦的耐磨材料、耐腐蚀的电池极板材料等

1.2 复合材料的类型

复合材料的种类有很多,可以从不同的角度进行分类。

1. 按形成方式进行分类

复合材料按形成方式可分为自然成形及人工成形复合材料。来自自然成形的复合材料最典型的例子有植物的木材和生物的骨骼。中国的漆器,它是以丝、麻等天然纤维作增强材料,用火漆作黏结剂而制成。

人工成形复合材料也称工程复合材料,是通过人工操作使增强物按设计要求分布在基体中形成的复合材料。人工成形复合材料又可以分成外加成形及原位成形复合材料。外加成形是指通过

人工操作将增强体自基体外加到基体中的成形方式,而原位成形是指在制造中由基体内部自生形成增强体的方法。外加成形又可以分为液态成形及固态成形。

2. 按制造方法进行分类

当前,制备纤维增强金属基复合材料的工艺方法分为固相法和液相法。

固相法有扩散结合、热压法以及粉末冶金法。液相法有挤压铸造法、真空加压铸造法、常压铸造法或无压浸渗法。

(1) 固相法

扩散结合法属于固相法,它是把处理过的碳纤维制成中间原料,然后将这些中间原料重叠起来,在真空中加热制得纤维增强金属复合材料。中间原料有两种,一种是排好的长纤维上充分黏附基体金属,制成的箔状预浸料,另一种是长纤维束连续浸透熔融的液态金属形成的线状原料。扩散结合法利用了金属的塑性变形和自身扩散作用,可制得质量较好的纤维增强金属基复合材料。

粉末冶金法也是一种固相成形方法,它是预先将纤维和基体粉末充分均匀混合,而后经成型干燥热压,制成纤维增强金属材料。

(2) 液相法

液相法源于上世纪 60 年代,80 年代末到 90 年代中期得到了空前发展。与固相法相比,液相法制造纤维增强金属基复合材料具有工艺简单、一次成型、质量稳定、成本低廉等优点,被认为是最具潜力和最成功的方法。

液态成型法主要指铸造法,由于成形时存在高温液体的作用,因而在材料的浸润性、相容性及化学反应性方法存在较多的问题。目前金属基复合材料常用的基体材料如铝、镁、钛等与所用的增强材料如 SiC 、 Al_2O_3 等的润湿角均大于 90° 。因此,在液态浸渗成形中,金属液体很难浸入到增强材料(颗粒或纤维)之间。另外,即

使在搅拌成形中也会给金属液体带入气体。结果使材料内部形成大量的孔洞缺陷。此外,增强材料和基体材料往往存在物理性能(如热膨胀性、比重)、化学性能(如电化学势、组元扩散能力)及机械性能(如强度及韧性)方面存在较大差异,这将严重影响复合材料的制造及使用。液态成形中遇到的第三个问题是金属液体和增强材料之间的界面反应,其中包括溶解和吸附反应以及化学反应。溶解和吸附反应在复合材料制造初期是有利的,因为它有助于液体和增强材料的润湿和结合。但是,随着溶解和吸附反应继续进行,增强材料的组分溶入金属液体或者金属液体的组分进入增强材料,都会削弱增强材料本身的力学性能。此外,界面化学反应形成的脆性金属化合物往往成为裂纹源或应力集中源,降低材料的强度及韧性。因此,近年来,国内外都为解决液态成型中存在的上述问题做了大量的工作,发展了许多适用复合材料制造的液体成形技术。目前所应用的有搅拌加铸造,其中包括机械搅拌及电磁搅拌。根据合金熔体的状态可有液态搅拌及半固态搅拌。另外还有压力铸造、挤压铸造、气压浸渗铸造及非直接压力成形。其中非直接压力成形包括离心铸造、负压铸造、喷射成形及自生复合成形。这些方法中不少是对传统的铸造成方法的改进,即在复合材料的制作中增加了新的技术内容。特别是根据复合材料制造的特点,在每种方法中,从造型材料、合金材料、增强材料到合金液温度、模具温度、预制型温度、合金在铸造中的压力等参数都做了相应的调整。

在液相法中,挤压铸造是依零件的形状制作增强体预制块,将预制块放入铸型,在重力或一定附加压力作用下使浇入的液态金属渗入预制块的制备工艺。挤压铸造法小型零部件制造中使用较普遍。采用这种方法时增强体预制型的制作及其相关的模具设计非常重要。对制备方法的研究大量集中在改善工艺参数方面,如预制体的温度、挤压压力等。由于铸造法工艺简单,制品价格相对低廉,因此最适合于规模的工业性生产。

真空压力浸渗法是近年发展起来的制备精细结构复合材料的方法,实质是利用大气压力来促进液体金属与增强体的结合。使用此方法时,先将预制体放入模具内抽真空,然后施加 5 ~ 10MPa 的压力将熔融的金属液体压入模具内,直至金属液完全浸透预制体,待冷却后即可得到纤维增强的复合材料。该方法的压力易控制,强度均匀,不易引起预制体变形、破坏,可以实现近似无余量成型,特别适合于性能要求高的复杂精密制件,但存在设备昂贵、工件尺寸受限制以及生产效率低等缺点。

无压浸渗 (Pressureless Infiltration) 法是 80 年代后期由美国 Lanxide 公司发明的,该工艺使用特殊的渗透气氛 (如 N_2 、 Ar_2) 使金属液体在高温加热过程中自动渗入填料中形成性能优良的复合材料。该方法工艺本质是利用物体的表面能,通过毛细作用将金属熔体吸入由增强体构成的预成型体中。但由于金属熔体和增强体之间的表面张力不同,金属对纤维的润湿性差,制得材料常出现宏观或微观缺陷,使得原材料选择范围受到较大的限制。因此,选用该方法时应尽量选择能相互浸润的匹配体系 (即界面接触角小的体系)。

3. 按基体材料进行分类

复合材料按基体材料可分为金属、无机非金属及有机高分子三大类。