

轻金属基复合材料

Light Metal
Matrix Composites

金培鹏 韩 丽 王金辉 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

轻金属基复合材料

金培鹏 韩丽 王金辉 唐彬彬 著
陈逢源 费维栋 郑明毅 王黎东

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

近年来,随着节约能源、减轻环境污染的呼声越来越高,以镁、铝、钛金属等为代表的轻金属基复合材料的研究越来越热,由于轻金属基复合材料具有高比强度、高比模量,尺寸稳定性和耐热性等主要特点,在航空、航天、汽车等领域的应用也越来越广泛。在此背景下,作者将本团队在轻金属基复合材料研究方面的最新研究成果并结合国内外最新动态撰写成书。本书介绍了轻金属基复合材料的发展和研究趋势,总结了轻金属基复合材料的常见实用的制备技术和复合材料的界面行为及界面优化,重点分析了镁、铝、钛基复合材料的微观组织和相关性能,特别是对镁铝基复合材料的性能改善方法进行了详述。同时,本书还介绍了复合材料的微观表征方法和分析方法。

本书可供从事轻金属基复合材料研究的科技人员参考,也可作为高等学校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

轻金属基复合材料 / 金培鹏,韩丽,王金辉著.

—北京:国防工业出版社,2013.12

ISBN 978-7-118-09199-1

I. ①轻... II. ①金... ②韩... ③王...

III. ①轻有色金属-金属复合材料 IV. ①TB331

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 277486 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售



*

开本 710×1000 1/16 印张 21½ 字数 418 千字

2013 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 89.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

《轻金属基复合材料》是一本反映近 30 年轻金属基复合材料的制备、组织结构、性能、界面设计、表征和应用的一本专业著作。轻金属基复合材料作为结构轻量化材料,对许多工业领域有着重要的影响,对于减重、节能、减排有着十分重要的意义。

本书以物理冶金原理、界面化学、应力—应变分析和制备及成型工艺科学为基础,介绍了非连续增强镁基、铝基和钛基复合材料的制备方法、显微组织、界面设计和结构、性能、服役行为、成型能力和使用,并在每一章中对这个领域当前的研究现状进行了评价。在本书中对基本知识和基本原理进行了介绍,并结合大量的实例进行了讲述和分析。在讨论过程中,重点放在了涉及到的概念和机制上,同时在必要的时候也介绍分析了相关的数学和物理背景。

本书主要是针对从事金属基复合材料科学家和工程师编写的,也可作为研究生和本科生课程的参考书。

本书较简短的第 1 章作为总论对轻金属基复合材料的发展、分类、研究趋势和展望进行了阐述。第 2 章主要对轻金属基复合材料的基体及增强相进行了分类介绍。第 3 章介绍了金属基复合材料的界面热力学和动力学,并结合轻金属基复合材料界面研究中的实例进行了界面行为和优化方面的系统讲述,对轻金属基复合材料的界面设计的研究有很好的指导和借鉴作用。第 4 章对复合材料的制备、生产方法和技术进行了叙述,尤其是对于成熟和使用较多的液态浸渗方法以及有很好发展前景的自生复合方法中的各种具体技术和工艺进行了详细的讲述。第 5 章用大量篇幅对轻金属基复合材料的微观组织进行了叙述,主要分为镁基、铝基和钛基进行了讲述,并通过许多实例讲解了制备技术对组织的影响,其中的许多分析和讨论都涉及到基本概念、理论和原理,也对组织与性能之间的关系做了探讨。第 6 章对金属基复合材料的性能的各种原理和理论进行了系统的描述,尤其是高温性能和热加工性能以及变形机制进行了阐述,由于金属基复合材料优异的耐磨性,还结合实例讲述了近年来铝基复合材料在摩擦磨损方面的研究进展。第 7 章对金属基复合材料的表征方法做了详细介绍,利用轻金属基复合材料实例讲述了物相、界面、缺陷和断口分析的各种表征分析方法。

其中第 1 章由金培鹏撰写,第 2 章和第 4 章由王金辉撰写,第 3 章和第 7 章由韩丽撰写,第 5 章由唐彬彬和金培鹏撰写,第 6 章由陈逢源和金培鹏撰写。费维栋、郑明毅和王黎东对全书进行了修改,全书由金培鹏最后修改和通稿,以便形成

一个完整的体系。在过去的 20 年里,轻金属基复合材料的研究在青海大学和哈尔滨工业大学很活跃,我们参与了这些工作,在 2011 年下半年我们决定合著本书,实际写作是在 2012 年和 2013 年完成的。

首先要感谢国家重点基础研究发展计划(项目编号:2011CB612200)对该书的经费资助。金培鹏感谢导师许广济教授的培养。非常感激青海省科学技术厅、发展和改革委员会和经济贸易委员会对我们多年来研究工作的支持和鼓励。感谢青海大学和哈尔滨工业大学的同事和来访者与我们进行讨论,其中与奥克兰大学高唯院士、朱天平研究员,佐治亚理工学院李默教授以及兰州理工大学丁雨田教授的交流使我们受益匪浅。特别要感谢我们组内过去和现在的研究生对该书出版所做出的贡献。

最后,感谢金培鹏妻子郭小欧、王金辉妻子赵仲茜,没有她们的支持,该书难以完成。

本书的某些内容难免随着时间的推移会过时,但是本书所阐述的基本科学原理将会长期适用。由于我们的知识和经验所限,书中难免有错漏之处,希望广大读者批评指正,使得本书再版时得以完善。

目 录

第 1 章 总论	1
1.1 轻金属基复合材料的发展及分类	1
1.1.1 轻金属基复合材料的发展	1
1.1.2 轻金属基复合材料的分类和特征	2
1.2 轻金属基复合材料的研究趋势和展望	3
1.2.1 轻金属基复合材料的研究趋势	3
1.2.2 轻金属基复合材料展望	3
参考文献	4
第 2 章 轻金属基复合材料基体和增强体	5
2.1 轻金属基复合材料的基体	5
2.1.1 铝合金	5
2.1.2 镁合金	6
2.1.3 钛合金	6
2.2 轻金属基复合材料的增强体	7
2.2.1 颗粒类增强体	7
2.2.2 纤维类增强体	8
2.2.3 晶须类增强体	10
2.3 轻金属基复合材料强度的影响因素	11
2.3.1 基体对强度的影响	12
2.3.2 增强体对强度的影响	13
2.3.3 增强体的类型对强度的影响	14
2.3.4 增强体的体积分数对强度的影响	15
2.3.5 增强体的分布状态与形状对强度的影响	16
2.3.6 基体和增强体的相容性对强度的影响	16
2.3.7 界面对强度的影响	16
2.3.8 工艺对强度的影响	17
参考文献	18

第 3 章 轻金属基复合材料的界面行为及界面优化	22
3.1 界面的基本概念	22
3.1.1 界面的定义	22
3.1.2 界面的分类	24
3.1.3 界面结合类型	27
3.1.4 界面效应	28
3.2 轻金属基复合材料的界面反应	30
3.2.1 界面反应的热力学和动力学	30
3.2.2 界面反应的分类	37
3.2.3 常见轻金属基复合材料的界面反应	40
3.3 轻金属基复合材料的界面行为	57
3.3.1 轻金属基复合材料的界面特点	57
3.3.2 轻金属基复合材料的界面对性能的影响	57
3.3.3 复合材料的界面对残余应力的影响	60
3.4 轻金属基复合材料的界面优化	64
3.4.1 界面优化的方法	64
3.4.2 增强体表面涂层的种类	66
3.4.3 增强体表面涂层方法	70
参考文献	75
第 4 章 轻金属基复合材料制备方法	80
4.1 粉末冶金法	80
4.1.1 P/M 轻金属基复合材料的工艺特点	80
4.1.2 P/M 轻金属基复合材料的主要品种	82
4.2 液态浸渗法	85
4.2.1 挤压浸渗技术	85
4.2.2 无压渗透法	85
4.2.3 真空浸渗技术	86
4.2.4 熔模铸造浸渗技术	87
4.2.5 气体压力浸渗技术	87
4.2.6 离心铸造浸渗和消失模铸造浸渗技术	88
4.2.7 其他液态浸渗技术	88
4.2.8 液态浸渗制备工艺存在的问题	88

4.3	搅拌铸造法	88
4.4	喷射沉积法	89
4.5	自生复合法	90
4.5.1	气-液反应法	90
4.5.2	Lanxide 法	91
4.5.3	反应喷射沉积法(RAD)	92
4.5.4	固-液反应法	92
4.5.5	液-液反应法	93
4.5.6	固-固反应法	93
	参考文献	95
第5章	轻金属基复合材料的微观组织	98
5.1	镁基复合材料的微观组织	98
5.1.1	镁基复合材料基体合金	99
5.1.2	镁及镁合金的动态再结晶	102
5.1.3	镁合金的组织分析	104
5.1.4	增强相对组织的影响	106
5.1.5	低体积分数的镁基复合材料的组织	110
5.1.6	高体积分数镁基复合材料的组织	123
5.1.7	镁基复合材料的组织演变	133
5.2	铝基复合材料的微观组织及性能	159
5.2.1	铝基复合材料的研究现状	159
5.2.2	铝基复合材料组织特点	163
5.2.3	铝基复合材料的性能	171
5.2.4	铝基复合材料的组织演变	180
5.3	钛基复合材料的微观组织及性能	196
5.3.1	钛基复合材料组织特点	197
5.3.2	钛基复合材料的性能	207
	参考文献	212
第6章	轻金属基复合材料的性能	216
6.1	引言	216
6.1.1	金属基复合材料的性能	216
6.1.2	基体和增强体之间的相互作用及载荷传递理论	218

6.2	强度	220
6.2.1	材料强度基础知识	220
6.2.2	材料强度预测的 Eshelby 方法	224
6.2.3	材料的抗弯强度	232
6.3	刚度与弹性模量	234
6.3.1	颗粒增强复合材料的弹性模量	239
6.3.2	晶须增强复合材料的弹性模量	239
6.3.3	复合材料的刚度预测	240
6.4	轻金属基复合材料的高温性能	241
6.4.1	热应力和热应变	241
6.4.2	等温蠕变	243
6.4.3	热循环蠕变	246
6.4.4	常见的热变形手段	248
6.4.5	轻金属基复合材料高温变形的流变应力	249
6.4.6	热加工图	251
6.4.7	轻金属基复合材料的高温变形机制	256
6.5	轻金属基复合材料的摩擦磨损性能	256
6.5.1	研究摩擦磨损的意义	256
6.5.2	实验方法及要求	260
6.5.3	不同增强体增强铝基复合材料的摩擦磨损性能	263
6.5.4	变形机制研究	278
	参考文献	279
第 7 章	复合材料的表征	282
7.1	复合材料的物相分析	282
7.1.1	X 射线衍射物相分析	282
7.1.2	透射电镜物相分析	285
7.1.3	选区电子衍射花样的标定	290
7.2	复合材料的界面分析	295
7.2.1	界面微观结构观察和分析	295
7.2.2	界面成分分析	298
7.2.3	界面结合强度的测定	304
7.2.4	界面残余应力测定	308
7.2.5	界面区域位错分布	308

7.3	复合材料的缺陷分析	309
7.3.1	位错的基本概念	309
7.3.2	柏氏矢量 b 的基本性质	312
7.3.3	测定位错柏氏矢量 b 的判据	314
7.3.4	柏氏矢量 b 和位错密度测定	317
7.4	复合材料的断口分析	320
7.4.1	断口分析内容和依据	320
7.4.2	断口分析的技术和方法	321
7.4.3	断裂模式、断口特征形貌与微观断裂机理的研究	325
7.4.4	扫描电子显微镜在断口分析上的应用	329
	参考文献	331

第 1 章 总 论

1.1 轻金属基复合材料的发展及分类

1.1.1 轻金属基复合材料的发展

随着科技的进步,航空航天、军事工业及交通运输等领域有了飞速的发展,这些领域对材料的性能有了更高的要求,例如质量轻,比强度和比模量高,优良的热稳定性,良好的耐疲劳性能等。传统材料,尤其是传统的金属材料,已经越来越难以满足这样的要求,因此,开发性能优良、价格低廉的新型复合材料已经成为当前各国材料行业的重要目标。轻金属基复合材料(LMMC)是新型材料的重要一种,自 20 世纪 80 年代初日本丰田汽车公司首次将陶瓷纤维增强铝基复合材料试用于制造柴油发动机活塞以来,轻金属基复合材料的研制与开发工作取得了迅猛的发展。

先进复合材料是由两种或多种材料(如颗粒或纤维作增强体与基体合金材料)通过某种方法复合而成,以便于最大限度地发挥各种材料的特长,并赋予单一材料所不具备的优良特殊性能和功能,同时复合材料的性能还具有可设计性的重要特征。其中的轻金属基复合材料由于具有较高的比强度和比刚度,良好的热稳定性和尺寸稳定性以及抗疲劳、耐磨损等一系列优异性能而得到极大的关注。

十几年来,航空航天、自动化和体育产品工业的发展极大推动了轻金属基复合材料的研究和应用,使轻金属基复合材料越来越显示出强大的生命力。发达国家如美国、日本等已经将这类材料列为 21 世纪新材料开发的重点。我国在“七五”和“八五”期间以及国家“863”计划中均将金属基复合材料列为材料科学领域的一个主要研究方向。

轻金属基复合材料由于自身的一些特殊优点,在航空、航天和军事部门备受青睐,应用十分广泛,轻金属基复合材料也在导航器系统、地面车辆系统、建筑及与结构有关的民用系统中得到应用,并越来越显出强大的生命力,相关理论研究也有了较大的发展。

例如,DWC 特种复合材料公司制造的 Cr/Al 复合材料就使用在了 NASA 公司的卫星导波管上,其导电性好,热胀系数小,比原来使用的石墨/环氧树脂导波管要轻 30% 左右。俄罗斯航空材料研究所将 B/Al 复合材料用于“安一 28”飞机的机体结构上,零件质量减小了 25% 左右。此外,铝基复合材料的低膨胀系数和高弹性

模量的特性还有望用于制造光学和电子封装壳体零件。

一个国家重要的标志性产业之一是汽车工业。轻金属基复合材料在汽车生产上主要用于制造活塞以及其他汽车零部件。例如本田公司在发动机缸体的缸套采用了 FRM, 替换了传统的铸铁缸套, 它用 Al_2O_3 与 C 纤维的混合物作为增强物, 在铝合金缸体的内表层形成 2 mm 厚的 FRM 层, 其中纤维体含量为体积的 12% ~ 15%, 使用后, 缸体的滑动摩擦性, 回转响应性等性能以及汽车的操作性能大大提高。日产汽车公司采用了轻金属基复合材料后, 使汽车质量减轻了 40% 左右。英国 AE 公司制造的柴油发动机用的轻金属基复合材料缸套, 其机械变形和热变形减小, 从而使缸套的冷却效率提高, 活塞的磨损减小, 油耗降低。MMCs 在汽车上的应用还有用颗粒增强型 MMCs 做刹车盘、纤维强化的连杆等。日本新干线列车由于采用了 SiC 颗粒增强的铝基复合材料刹车盘, 不仅减轻了质量, 而且提高了耐磨性, 进一步提速到 $350\text{kg} \cdot \text{h}$ 。其他方面, 轻金属基复合材料还用于制造高尔夫球杆头、自行车链轮以及医疗上的假肢等。近年来, 电力行业也使用了轻金属基复合材料, 例如法国的 EDF 公司和美国的 3M 公司联合研制的一种新型纤维增强铝基复合材料导线, 因其导电性好, 环境适应性好, 耐腐蚀等特点, 在电力传输方面应用前景良好。

1.1.2 轻金属基复合材料的分类和特征

金属基复合材料分为两类, 即长纤维和非长纤维增强金属基复合材料。非连续增强复合材料包括短纤维 (Chopped Fiber)、晶须 (Whisker) 和颗粒 (Particulate) 增强三种复合材料。

(1) 长纤维增强 (连续纤维) 复合材料: 作为分散相的纤维, 每根纤维的两个端点都位于复合材料的边界处。

(2) 短纤维/晶须增强复合材料: 短纤维/晶须无规则地分散在基体材料中制成的复合材料。

(3) 颗粒增强复合材料: 微小颗粒状增强材料分散在基体中制成的复合材料。

金属基复合材料的微观组织可大致分为如图 1.1 所示的几类。图 1.1 只是反

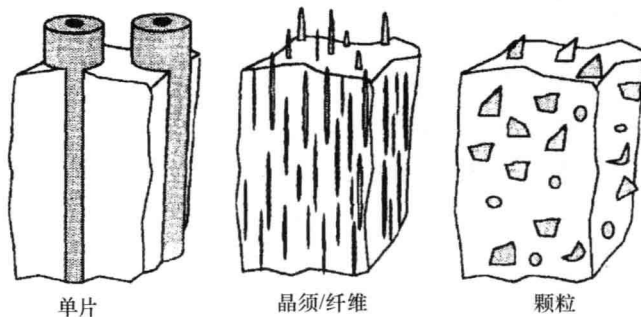


图 1.1 根据增强相形状分类的复合材料微观组织示意图

映了增强相在基体中分布的结构图,复合材料的具体微观组织要复杂得多,且其组织和材料的加工工艺、热处理工艺等密切相关。当复合材料受到外部的力或热等作用时,材料整体的微观组织在形状和弥散程度等方面会有较明显的变化。

1.2 轻金属基复合材料的研究趋势和展望

1.2.1 轻金属基复合材料的研究趋势

镁基复合材料目前的研究是向进一步提高材料的综合性能方向发展,因此,新的复合系的研究,尤其是纳米增强体系和非晶体系的镁基复合材料的研究近年来成为了热点,其中界面设计和优化是非常重要的方面。由于镁的化学性质很活泼,适用于新的镁基复合材料制备方法的探寻也是非常重要的。成形机理和减少成形过程中的缺陷也在近期引起了关注。

铝基复合材料由于发展的历史较长,目前已经逐步进入应用阶段,他的加工性能和使役行为的研究近来比较多,低廉、成熟的生产方法和工艺也将是一个发展方向,尤其是如何通过界面设计和优化提高成形性的工作近年来有一些报道。结合不同增强相优点的混杂增强的铝基复合材料近年来也得到了一定的发展。近年来,原位自生的复合材料体系和纳米增强体系也有一些报道。尤其是在如何提高复合材料刚度方面有人做了一些尝试。

钛基复合材料在原位自生复合方面近年来有所进展,在提高材料的刚度、耐磨性和耐热性方面也已经有了一些研究报道,其中界面行为也还是一个研究的热点领域。

1.2.2 轻金属基复合材料展望

根据上面对研究趋势的分析,在将来的研究过程中,以下方向继续或将成为热点:

- (1) 轻金属基复合材料成熟的低成本生产方法、工艺的研究与开发;
- (2) 提高轻金属基复合材料特定性能的界面设计和优化;
- (3) 新型轻金属基复合材料系的研究;
- (4) 轻金属基复合材料性能的研究;
- (5) 轻金属基复合材料新的表征、分析、测试方法的研究;
- (6) 轻金属基复合材料在制备、成形过程中的多场耦合、多尺度计算机模拟;
- (7) 轻金属基复合材料的物理模拟;
- (8) 轻金属基复合材料的二次加工和成形过程和机理研究;
- (9) 轻金属基复合材料使役行为的评价;
- (10) 轻金属基复合材料成型过程中的组织演变和织构分析;
- (11) 轻金属复合材料组织结构与性能的关联研究;

- (12) 轻金属基复合材料材料数据库的建立；
- (13) 轻金属基复合材料与三维打印技术耦合用于部件加工的研发。

参考文献

- [1] 克莱因 T W, 威恩斯 P J. 金属基复合材料导论 [M]. 北京:冶金工业出版社,1998.
- [2] 肯尼斯·G. 克雷德. 金属基复合材料 [M]. 北京:国防工业出版社,1982.
- [3] 吴人洁. 复合材料[M]. 天津:天津大学出版社,2000.
- [4] Ye He zhou, Liu Xing yang, Hong Han ping. Fabrication of metal matrix composites by metal injection molding—A review [J]. J. Mater. Process. Technol, 2008, 200: 12 – 24.
- [5] 金培鹏. 硼酸镁晶须增强镁基复合材料的性能和界面行为 [D]. 兰州:兰州理工大学,2009.
- [6] Chinmaya R. Dandekar, Yung C. Shin. Modeling of machining of composite materials: A review[J]. Inter J Mach Tool Manu, 2012, 57: 102 – 121.
- [7] Li Nan, Zheng Yu feng. Novel magnesium alloys developed for biomedical application: A review [J]. J Mater Sci Technol, 2013, 29(6): 489 – 502.
- [8] Ravi K R , Pillai R M, Amaranathan K R. Pai B C, Chakraborty M. Fluidity of aluminum alloys and composites: A review [J]. J Alloys Compo. 2008, 456: 201 – 210.
- [9] Chawla N, Chawla K K. Metal-matrix composites [M]. New York, Springer, 2006.
- [10] Sun S, Brandt M. , Dargusch M S. Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials—A review [J]. J Mach Tool Manu, 2010, 50: 663 – 680.
- [11] Suryanarayana C, Nasser Al-Aqeeli. Mechanically alloyed nanocomposites [J]. Progress in Materials Science, 2013, 58: 383 – 502.

第2章 轻金属基复合材料基体和增强体

2.1 轻金属基复合材料的基体

基体材料是轻金属基复合材料的重要组成部分,是增强体的载体,在轻金属基复合材料中占有很大的体积含量,起非常重要的作用,金属基体的力学性能和物理性能将直接影响复合材料的力学性能和物理性能。在选择基体材料时,应根据合金的特点和复合材料的用途选择基体材料。

作为结构材料的轻金属基体主要包括铝基、镁基和钛基,镁基及铝基复合材料使用温度在 450 ℃ 左右。钛合金及其钛铝金属间化合物作基体的复合材料,具有良好的高温强度和室温断裂性能,同时具有良好的抗氧化、抗蠕变、耐疲劳和良好的高温力学性能,工作温度在 650 ℃ 左右。

2.1.1 铝合金

铝合金是以铝为基的合金总称,主要合金元素有铜、硅、镁、锌、锰,次要合金元素有镍、铁、钛、铬、锂等。铝合金是工业中应用最广泛的一类有色金属结构材料,在航空、航天、汽车、机械制造、船舶及化学工业中已大量应用。纯铝的密度小($\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$, 大约是铁的 1/3),熔点低(660 ℃),铝是面心立方结构,故具有很高的塑性($\delta = 32 \sim 40\%$, $\psi = 70 \sim 90\%$),易于加工,可制成各种型材、板材,抗腐蚀性能好;但是纯铝的强度很低,退火状态 σ_b 值约为 8 kgf/mm^2 ,故不宜做结构材料。通过长期的生产实践和科学实验,人们逐渐以加入合金元素及运用热处理等方法来强化铝,这就得到了一系列的铝合金。添加一定元素形成的合金在保持纯铝质轻等优点的同时还能具有较高的强度, σ_b 值分别可达 $24 \sim 60 \text{ kgf/mm}^2$ 。这样使得其“比强度”(强度与比重的比值 σ_b/ρ) 胜过很多合金钢,成为理想的结构材料,广泛用于机械制造、运输机械、动力机械及航空工业等方面,飞机的机身、蒙皮、压气机等常以铝合金制造,以减轻自重。采用铝合金代替钢板材料,结构质量可减轻 50% 以上。

铝合金按加工方法可以分为形变铝合金和铸造铝合金两大类;形变铝合金能承受压力加工,可加工成各种形态、规格的铝合金材,主要用于制造航空部件、建筑用门窗等。形变铝合金又分为不可热处理强化型铝合金和可热处理强化型铝合金。不可热处理强化型不能通过热处理来提高机械性能,只能通过冷加工变形来实现强化,它主要包括高纯铝、工业高纯铝、工业纯铝以及防锈铝等。可热处理强

化型铝合金可以通过淬火和时效等热处理手段来提高机械性能,它可分为硬铝、锻铝、超硬铝和特殊铝合金等。铸造铝合金按化学成分可分为铝硅合金、铝铜合金、铝镁合金、铝锌合金和铝稀土合金,其中铝硅合金又有过共晶硅铝合金、共晶硅铝合金、单共晶硅铝合金,铸造铝合金在铸态下使用。

2.1.2 镁合金

镁合金是航空器、航天器和火箭导弹制造工业中使用的密度最低的轻金属结构材料。镁合金是以镁为基加入其他元素组成的合金。其特点是密度小(1.8 g/cm^3)、比强度高、比弹性模量大、散热好、消震性好且承受冲击载荷能力比铝合金大,耐有机物和碱的腐蚀性能好。主要合金元素有铝、锌、锰、铈、钍以及少量锆或镧等。目前使用最广的是镁铝合金,其次是镁锰合金和镁锌锆合金,主要用于航空、航天、运输、化工、火箭等工业部门。镁的密度大约是铝的 $2/3$,是铁的 $1/4$,它是实用金属中最轻的金属,其加工过程及腐蚀和力学性能有许多特点:散热快、质量轻、刚性好、具有一定的耐蚀性和尺寸稳定性、抗冲击、耐磨、衰减性能好及易于回收;另外还有高的导热和导电性能、无磁性、屏蔽性好和无毒的特点。

镁合金广泛用于携带式的器械和汽车行业中,达到轻量化的目的。镁合金的比重虽然比塑料大,但是,单位质量的强度比塑料高,所以,在同样的强度零部件的情况下,镁合金的零部件能做得比塑料的薄而且轻。另外,由于镁合金的比强度也比铝合金和铁高,因此,在不减少零部件的强度下,可减轻铝或铁的零部件的质量。镁合金比强度(强度与质量之比)最高,比刚度(刚度与质量之比)接近铝合金和钢,远高于工程塑料。在弹性范围内,镁合金受到冲击载荷时,吸收的能量比铝合金件高一倍,所以镁合金具有良好的抗震减噪性能。镁合金熔点比铝合金熔点低,压铸成型性能好。镁合金铸件抗拉强度与铝合金铸件相当,一般可达 250 MPa ,最高可达 600 MPa 以上,屈服强度和延伸率与铝合金也相差不大。镁合金还有良好的电磁屏蔽性能、防辐射性能、可做到 100% 回收再利用。镁合金件稳定性较高压铸件的铸造加工尺寸精度高,可进行高精度机械加工。镁合金具有良好的压铸成型性能,铸件壁厚最小可达 0.5 mm ,适于制造汽车各类铸件。

2.1.3 钛合金

钛是 20 世纪 50 年代发展起来的一种重要的结构金属,钛合金因具有强度高、耐腐蚀性好、耐热性高等特点而被广泛用于各个领域。世界上许多国家都认识到钛合金材料的重要性,相继对其进行研究开发,并得到了实际应用。20 世纪 50 ~ 60 年代,主要是发展航空发动机用的高温钛合金和机体用的结构钛合金,70 年代开发出一批耐蚀钛合金,80 年代以来,耐蚀钛合金和高强钛合金得到进一步发展。钛合金主要用于制作飞机发动机压气机部件,其次为火箭、导弹和高速飞机的结构件。

钛合金是以钛为基础加入其他元素组成的合金。钛有两种同质异晶体:882℃以下为密排六方结构 α 钛,882℃以上为体心立方的 β 钛。

合金元素根据它们对相变温度的影响可分为三类:

(1) 稳定 α 相、提高相转变温度的元素为 α 稳定元素,有铝、碳、氧和氮等。其中铝是钛合金中的主要合金元素,它对提高合金的常温和高温强度、降低密度、增加弹性模量有明显效果。

(2) 稳定 β 相、降低相变温度的元素为 β 稳定元素,又可分同晶型和共析型两种。前者有钼、铌、钒等;后者有铬、锰、铜、铁、硅等。

(3) 对相变温度影响不大的元素为中性元素,有锆、锡等。氧、氮、碳和氢是钛合金的主要杂质。氧和氮在 α 相中有较大的溶解度,对钛合金有显著强化效果,但却使塑性下降。通常规定钛中氧和氮的含量分别在0.15~0.2%和0.04~0.05%以下。氢在 α 相中溶解度很小,钛合金中溶解过多的氢会产生氢化物,使合金变脆。通常钛合金中氢含量控制在0.015%以下。氢在钛中的溶解是可逆的,可以用真空退火除去。

2.2 轻金属基复合材料的增强体

增强体的选择要求与复合材料基体结合时的润湿性较好,并且增强体的物理、化学相容性好,载荷承受能力强,尽量避免增强体与基体合金之间产生界面反应等。

复合材料按增强材料形态分类为:

①连续纤维复合材料;②短纤维/晶须复合材料;③粒状填料复合材料;④编织复合材料。

增强相的选择并不是随意的,选择一个合适的增强体需要从复合材料应用情况、制备方法以及增强体的成本等诸多方面综合考虑。

2.2.1 颗粒类增强体

用于改善复合材料力学性能,提高断裂功、耐磨性和硬度以及增强耐腐蚀性能的颗粒状材料,称为“颗粒增强体”。

颗粒增强体可以通过三种机制产生增韧效果:①当材料受到破坏应力时,裂纹尖端处的颗粒发生显著的物理变化(如晶型转变、体积改变、微裂纹产生与增殖等),它们均能消耗能量,从而提高了复合材料的韧性,这种增韧机制称为“相变增韧”和“微裂纹增韧”;②复合材料中的第二相颗粒使裂纹扩展路径发生改变(如裂纹偏转、弯曲、分叉、裂纹桥接或裂纹钉扎等),从而产生增韧效果;③以上两种机制同时发生,称为“混合增韧”。

按照变形性能,颗粒增强体可以分为刚性颗粒和延性颗粒两种。刚性颗粒主