



“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学技术著作丛书

金属基复合材料设计引论

武高辉 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学技术著作丛书

金属基复合材料设计引论

武高辉 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

金属基复合材料研究的科学与技术问题主要所涉及高品质制备技术、材料性能设计、界面控制三个方面。本书围绕这三方面的问题,介绍压力浸渗工艺的技术原理及其实验分析过程;介绍金属基复合材料热物性设计和尺寸稳定性设计的原理与方法;介绍 C-Al 界面、自润滑功能性界面以及高强韧固溶体界面等的界面设计原理与方法。本书对金属基复合材料的基本概念和未来发展趋势也进行了描述。

本书适合从事金属基复合材料研究的学者和相关领域的教师、学生阅读,也可以作为工程材料课程的参考教材,也可供航天器结构设计、惯性仪表设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属基复合材料设计引论/武高辉著. —北京:科学出版社,2016.9

(材料科学技术著作丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-049953-0

I. 金… II. ①武… III. ①金属基复合材料-设计 IV. ①TB333.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 225830 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 9 月第一次印刷 印张:14

字数:265 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《材料科学技术著作丛书》编委会

顾 问 师昌绪 严东生 李恒德 柯 俊
 颜鸣皋 肖纪美

名誉主编 师昌绪

主 编 黄伯云

编 委 (按姓氏笔画排序)

千 勇	才鸿年	王占国	卢 柯
白春礼	朱道本	江 亮	李元元
李光宪	张 泽	陈立泉	欧阳世翕
范守善	罗宏杰	周 玉	周 廉
施尔畏	徐 坚	高瑞平	屠海令
韩雅芳	黎懋明	戴国强	魏炳波

前 言

金属基复合材料大多是将粉末、纤维、晶须等不同形态的无机非金属作为增强体,将金属作为基体,采用人工的方法复合而成的新材料。无机非金属陶瓷材料通常与金属之间是不润湿的,要将互不润湿的陶瓷与金属材料用人工的方法复合到一起,就要解决两个问题:一是制备工艺问题,它决定了材料能否做得出来,是否可用;二是材料设计的问题,即选择哪种物质去复合。此外,金属基复合材料设计不单纯需要根据使用性能对基体与增强体组元进行选择和优化,更要求界面性能的设计和组成成分的调控。因此高品质制备技术、材料性能设计、界面控制是金属基复合材料研究的三大基础和核心问题。作者围绕这三类科学与技术问题,做了三十余年的工作,走过弯路、吃过苦头,然而更多的是收获。将收获与读者分享是一种快乐,也是责任。本书选择了作者研发的一种制备技术及五种复合材料与读者展开讨论,这五种材料分别针对五类不同的设计问题,其设计理论与经验均经过了工程实践的考核。

本书第1章对金属基复合材料的基本概念及其内涵做较为深入的分析 and 解释。第2章阐述作者发明的复合材料制备专利技术,即目前我国独有的自排气压力浸渗技术。本章通过实验检测金属溶液的浸渗过程,发现缺陷形成的原因,从而提出自排气压力浸渗的工艺方法,着重介绍分析过程与工艺原理。第3章和第4章介绍两类针对使用性能的材料设计方法与实践:一种是以电子封装材料为背景的复合材料热物性设计原理与方法,另一种是复合材料尺寸稳定性设计方法。第4章还将分析材料尺寸稳定性的金属学原理,介绍针对惯性仪表高精度及精度长期稳定性的需求而发展的材料设计理论和技术。复合材料界面设计与控制的问题较为复杂,分别在第5、6、7章进行分类讨论。其中第5章以碳纤维增强铝复合材料为背景介绍界面有害反应控制方法。作者推崇用工艺方法(而非纤维表面化学处理方法)抑制有害反应并将有害界面反应转化为有益界面反应,体现了作者用简单方法解决复杂问题的科研思想。第6章以自润滑为目标,通过功能性界面的设计,制备出 TiB_2/Al 自润滑复合材料,从宏观和微观上分析自润滑功能的设计原理和临界条件。第7章介绍一种高强韧性界面的获得方法,提出固溶体界面的设计思想,并以 W/Cu 复合材料为背景进行界面设计的实践。本书各章的内容均结合实际应用的案例。

金属基复合材料发展经历了五十余年,但材料性能设计与制备工艺还远远没有形成系统的理论,而仍然以经验型为主。本书基于金属学和金属工艺学的知识

结构提出金属基复合材料设计方面的一些观点,描绘金属基复合材料设计的理论与技术雏形。作者在写作过程中力图展现研究分析方法、创新性思维方法,望与金属基复合材料研究的同仁共同商榷。

本书的读者对象为从事金属基复合材料研究的科学技术人员、材料工程专业本科生及研究生,也可以作为工程材料课程的参考教材,也可以供航天器结构设计人员、惯性技术领域设计人员参考。

本书是由作者和作者指导的学生们共同完成的,大家长期努力的成果成就了本书。参与与本书内容直接相关研究工作的博士研究生有(按照时间顺序):赵永春、马森林、杨峰、姜龙涛、张强、王秀芳、栾伯峰、赵敏、陈国钦、修子扬、张云鹤、陈苏、王旭、吴哲、田首夫、王玺、李文君等,还有众多的硕士研究生、本科生的毕业论文为本书提供了有价值的数据和基本素材,硕士研究生(按照时间顺序)主要有邵华、张强、栾伯峰、孔海宽、陈剑锋、李晓玲、修子扬、张素梅、范瑞军、姜瑞娇、李冰、李艳、冯硕、王玺、宋卫涛、徐丽敏、王博、王平平、刘书涛、董蓉桦、王晨充、刘钧、赵永峰、关敬涛等,本科生主要有宋泉宇、张建宏、曲寿江、杨卫国、谭大斌、王东、修发贤、程刚、平夷、李志峰、陈苏、苟华松、朱晔、宋涛、徐培炎、王宁、李文照、杨文澍、张贵一、池海涛、柯慧彬、朱子晨、邹君玉、袁雨等。实际上远不止这些同学,还有许多同学的工作直接或间接地为本书提供了支援。当欣赏每一张图片、每一个公式的时候,他们的音容笑貌便浮现在眼前,一起艰苦奋斗、节假日加班的场景更是历历在目,在此表达作者由衷的感谢!

本书第1章、第2章由武高辉执笔,第3~7章分别由张强、姜龙涛、陈国钦、田首夫、吴哲执笔,全书由武高辉统稿。写作过程中杨文澍以及博士研究生王玺、王平平、丁伟、董蓉桦、徐中国、王雪丽,以及硕士研究生刘钧、王晨充等同学做了大量工作,在此表示感谢。

感谢杨德庄教授在本书规划过程中的具体指导和细致的审阅,感谢赵连城院士、周玉院士为本书提出的宝贵意见,他们的意见和建议对本书的完成起到了至关重要的作用。

由于本人的学识有限,书中难免出现谬误及不妥之处,如读者发现并能通过邮件(gaohui_wu@126.com)告知作者,这对作者将是莫大的帮助,作者会在未来再版时予以参考更正。

目 录

前言

第 1 章 金属基复合材料概论	1
1.1 金属基复合材料的基本概念	1
1.2 金属基复合材料的分类	2
1.2.1 按增强体类型分类	2
1.2.2 按基体类型分类	3
1.2.3 按材料特性分类	3
1.3 金属基复合材料的产生与发展	4
1.3.1 国外金属基复合材料应用技术的发展	5
1.3.2 我国金属基复合材料的发展	10
1.4 金属基复合材料研究的科学与技术问题.....	13
1.5 金属基复合材料设计的基本原则.....	14
1.6 金属基复合材料的发展趋势.....	16
1.6.1 材料仿生设计	17
1.6.2 纳米尺度增强体的应用	18
1.6.3 超常性能复合材料.....	19
1.6.4 高强度、高韧性复合材料	20
1.6.5 制备技术的低成本化	20
1.6.6 废料再利用和回收技术	21
参考文献	21
第 2 章 金属基复合材料压力浸渗工艺原理	25
2.1 金属基复合材料的主要制备方法.....	25
2.1.1 固态法	25
2.1.2 液态法	26
2.1.3 气态法	30
2.2 液态浸渗的一般问题.....	30
2.3 压力浸渗的典型工艺及缺陷形式.....	35
2.3.1 普通压力浸渗工艺与气孔缺陷	36
2.3.2 自排气压力浸渗工艺过程与缺陷形式	37
2.4 自排气压力浸渗工艺原理.....	39

2.4.1	压力曲线的物理意义与内涵	39
2.4.2	复合材料压力浸渗工艺原理	42
2.5	压力浸渗条件下复合材料缺陷形成原因分析	50
2.6	自排气压力浸渗方法对材料品质的提高效果	53
	参考文献	56
第3章	金属基复合材料热物理性能设计原理与应用	58
3.1	引言	58
3.2	电子封装复合材料设计基础	61
3.2.1	低膨胀设计	61
3.2.2	高体积分数铝基复合材料设计	62
3.2.3	高导热性设计	64
3.2.4	多种粒径增强复合材料导热性能计算	68
3.2.5	复合材料界面设计	69
3.3	电子封装复合材料应用实例——SiC _p /Al 复合材料	71
3.3.1	材料选择	71
3.3.2	材料制备	72
3.3.3	界面状态	73
3.3.4	热物理性能	76
3.3.5	热阻评价	79
	参考文献	80
第4章	金属基复合材料尺寸稳定性设计与应用	82
4.1	材料尺寸稳定性基本概念及其表征	82
4.1.1	尺寸稳定性的概念	83
4.1.2	尺寸稳定性的评价方法	85
4.2	金属基复合材料尺寸稳定性设计原理	95
4.2.1	高精度仪器仪表对结构材料的基本要求	95
4.2.2	基体铝合金的尺寸稳定性	96
4.2.3	复合材料的相稳定性	98
4.2.4	复合材料的应力稳定性	103
4.2.5	复合材料的组织稳定性	106
4.3	基于尺寸稳定性的复合材料微观构型设计	109
4.4	材料尺寸稳定性对惯性仪表精度的作用机制	115
	参考文献	119
第5章	碳纤维增强铝复合材料界面反应控制与应用	124
5.1	引言	124

5.2 C-Al 界面反应热力学及其控制方法	127
5.2.1 碳纤维石墨化度对 C-Al 反应热力学的影响	127
5.2.2 Mg 元素对 C-Al 反应热力学的影响	130
5.2.3 抑制 C-Al 界面反应的基体合金化控制方法	138
5.3 C-Al 界面反应动力学及工艺控制原理	140
5.3.1 C-Al 界面反应动力学问题	140
5.3.2 界面反应控制的工艺原理	142
5.3.3 用工艺方法控制界面反应的优势分析	148
5.4 C_f /Al 复合材料薄壁构件的评价实例	149
5.4.1 C_f /Al 复合材料薄壁筒形开口构件的结构刚度特性	150
5.4.2 C_f /Al 复合材料薄壁筒形开口构件的结构强度特性	153
参考文献	156
第 6 章 自润滑复合材料设计与应用	158
6.1 概述	158
6.1.1 自润滑材料概述	158
6.1.2 自润滑材料润滑原理	159
6.1.3 自润滑材料存在的问题	162
6.2 自润滑复合材料设计要点	163
6.2.1 外部条件	163
6.2.2 自润滑复合材料设计要点	164
6.3 自润滑 TiB_2 /Al 复合材料制备工艺原理	165
6.3.1 TiB_2 预氧化原理与工艺技术	165
6.3.2 TiB_2 /Al 复合材料的界面控制	167
6.4 TiB_2 /2024Al 复合材料自润滑现象及规律	170
6.4.1 自润滑特性与润滑膜的成分	170
6.4.2 硼酸的晶体结构与摩擦学特性	173
6.4.3 自润滑物质的来源	175
6.4.4 B_2O_3 、 TiO_2 的稳定性问题讨论	175
6.4.5 TiB_2 /2024Al 复合材料润滑机理的微观分析	177
6.5 TiB_2 /2024Al 复合材料自润滑临界条件	181
6.5.1 自润滑条件分析	181
6.5.2 临界体积分数计算过程	183
参考文献	187
第 7 章 金属基复合材料固溶体界面设计与应用	190
7.1 引言	190

7.2	材料设计目标分析	191
7.3	材料性能设计的主要考虑	192
7.4	钨纤维增强铜基复合材料界面的设计	194
7.5	W _T /CuAlNiFe 复合材料的固溶体界面形成规律	197
7.6	固溶体界面对材料力学性能的影响	199
7.6.1	固溶体界面的界面强度	199
7.6.2	固溶体界面对动态压缩性能的贡献	201
7.6.3	固溶体界面对弹体的侵彻性能的贡献	203
	参考文献	207
	后记	210

第 1 章 金属基复合材料概论

1.1 金属基复合材料的基本概念

复合材料是由不同成分、不同形态的材料构成的复合体。构成复合体的材料分为基体和增强体两类组分,基体(matrix)是复合材料中被强化的母材,增强体(reinforcement)是复合材料组分中以改善基体性能为目的的添加材料。按照基体的材料类别不同,复合材料分为聚合物基复合材料(polymer matrix composite, PMC)、金属基复合材料(metal matrix composites, MMC)和陶瓷基复合材料(ceramic matrix composites, CMC)三大类,统称为先进复合材料(advanced composite)。金属基复合材料是以金属为基体,其中添加无机非金属(或金属)增强体的复合材料^[1]。金属基复合材料与普通的合金材料相比,其特征在于基体与增强体在复合材料中各自保持原有的物理与化学特性,不会完全地相互溶解或融合,可以被物理识别出来,相互之间存在界面;金属基复合材料的增强体可以为不同种类、不同尺寸的长纤维、短纤维、晶须、颗粒等金属、陶瓷材料(或碳材料),与金属或合金相复合后,能够保持各组分材料性能的优点,又具有单一组分不具备的综合特性,复合材料的性能具有可设计性。

关于复合材料的基本概念,《美国复合材料手册》^[2]和《日本金属基复合材料用语工业规范》^[1]分别做了较为清晰、准确的描述。以下几点是需要强调的:一是基体。基体是复合材料中增强体尚未加入之前的母材或基材,多数情况下为连续相。例如,碳化硅颗粒增强铝复合材料(SiC_p/Al), SiC 是分散的,颗粒之间有一定间隙,而作为基体的铝合金是三维连续的。随着复合材料研究的发展,近期出现了增强体也是三维连续的情况。例如,在多孔石墨中渗入铝合金的耗散耐热材料^[3]中,铝合金是连续的,石墨也是连续的,但是按照“尚未加入增强体的母材”的理解,石墨应属于基体的范畴,按照“被增强”的材料去理解,石墨也属于基体的范畴。二是增强体。复合材料研究初期是以改善金属的强度为目标的,所以把向合金中添加的材料叫做增“强”体,但是一些新型复合材料的添加物质未必是起增强作用的。例如,在铝合金中加入钨酸锆获得的是超低膨胀性能^[4],此时强度不增加甚至弱化,但是约定俗成,通常仍将后期添加的材料(如钨酸锆,以改善铝合金的膨胀特性为目的添加材料)称为增强体。有些文献中将增强体称为“增强相”,事实上,这里所说的“相”是人工添加的第二种材料,与基体金属中析出的“相”、界面反应生成的“相”是完全不同的概念,有必要将这两类“相”加以区分,以免讨论问题时产生混

淆,所以本书将复合材料基体中人工添加的材料称为增强“体”。三是金属“基”的概念。基体随着复合材料研究的发展也有变化。例如,不锈钢与低碳钢复合的层叠板,哪一方为基体与设计者的初衷有关,如果是不锈钢放在构件的表面以改善低碳钢耐腐蚀性的不足,低碳钢是“被增强”的母材,仍然承担构型的功能,所以将低碳钢称为基体是恰当的。广义上,这种复合材料也可以称为金属复合材料(没有“基”字)。四是,在工程上不把传统的强化型合金列入复合材料范畴,如沉淀强化合金、析出强化合金、双相钢等。不过在科学研究中打破这个限定对于拓展创新性思维是十分有益的。

金属基复合材料的命名方式目前尚不统一。例如,对于“体积分数为 25% 的碳化硅颗粒增强 6061 铝复合材料”,《美国复合材料手册》以基体合金/增强体/体积分数、类型、形态来命名。美国空军研究实验室的 Daniel B. Miracle 的习惯表述是“6061/SiC/25p”^[5],这种表述被许多学者采纳,其中 p 指的是含量(percent)。这个表述没有直观地显示加入的 SiC 是颗粒还是纤维。国内多数学者对于这种材料常用 25vol%SiC_p/6061Al 来表示,符号表述与语言表述的顺序一致,多数情况下简洁地表示为 25%SiC_p/6061Al,其中 SiC 的下角标 p 是指颗粒(particle),如果是碳化硅纤维,可以由 SiC_f 来表示,下角标的 f 指纤维(fibre)。这些表示方法普遍存在的问题是没有表示出制备方法、热处理状态、纤维的取向等信息。本书为叙述准确,采用增强体尺寸-体积分数-增强体-基体的逻辑关系表示。例如,体积分数 30% 的 150nm Al₂O₃ 颗粒增强 6061 铝合金复合材料,表示为 150nm-30vol%Al₂O_{3p}/6061Al,在不至于引起误解的特定场合,给以简化描述:30%Al₂O_{3p}/6061Al。

1.2 金属基复合材料的分类

可以作为基体的金属及其合金的种类繁多,增强体的种类也很多,加之纤维、晶须、颗粒等不同形态的组合就更多了。由此可以看出,金属基复合材料具有多样性特点,于是相应出现了多种分类方法,近年来似乎有复杂化的倾向。复杂的分类并无助于材料研究,反而容易给工程界和初学者带来不必要的麻烦。从材料研究和工程应用的角度,按照以下方式分类有利于把握复合材料的基本属性和适用范围。

1.2.1 按增强体类型分类

复合材料的强化机理强烈依赖于增强体,与增强体的种类、形态、体积分数、分散方式直接相关。因此,金属基复合材料可以按增强体类型分类,可分为连续增强型、非连续增强型和弥散增强型三大类。三类材料的强化数学模型与物理模型有所不同。连续增强型主要指纤维增强金属基复合材料,这种材料主要由纤维承受载荷。连续纤维增强复合材料展现了最好的强度、刚度和断裂韧性。然而,由于纤

纤维是定向排列的,材料存在力学性能和物理性能的各向异性。非连续增强型的增强体包括短纤维、晶须和颗粒三种,金属基体和增强体共同承担载荷(不是平均分配),非连续增强体的加入主要是为了弥补金属基体的刚度、热膨胀、高温性能等的不足。单晶体的晶须比短纤维具有较高的强度和断裂韧性,颗粒增强容易获得力学性能和物理性能的各向同性特征,其性能与颗粒的形状、物理化学性质有关,但主要依赖于增强体的尺寸和体积分数。弥散增强型主要指原位增强复合材料和纳米复合材料。原位增强复合材料是在基体中析出亚微米或纳米尺寸的金属间化合物,形成弥散强化,而金属基纳米复合材料的纳米增强体是依靠工艺方法加入到基体合金中的。纳米复合材料的强化机理尚不十分明确,但是普遍认为以弥散强化为主,被强化的基体承受更多的载荷。

1.2.2 按基体类型分类

金属基复合材料的适用范围很大程度上由基体的物理特性所决定。金属基复合材料设计的初衷是为改善基体合金的某些物理性能、力学性能(特别是高温力学性能)的不足而添加增强体的,复合材料仍然遗传着原始基体的物理化学特性,所以其适用对象也往往与基体合金所代表的一类合金相似。常见的有铝基、镁基、铜基、铁基、钛基、镍基以及金属间化合物基等等。例如,铝基复合材料保持了铝合金的低密度、高导热特性,而改变的主要是膨胀系数、弹性模量、屈服强度等;镁基复合材料遗传了镁合金的轻质和阻尼等特性,因此比铝基复合材料有更高的比强度、比刚度和较好的阻尼性能;钛基复合材料可以发挥出更加优异的高温强度并保持低密度等特点。

1.2.3 按材料特性分类

不同的基体合金与不同的增强体的组合可以获得不同的材料特性,同一类材料组分,采用不同的制备方法所获得的复合材料特性也大不相同。按材料特性分类可将金属基复合材料分为结构复合材料、功能复合材料和智能(机敏)复合材料三大类。结构复合材料以高比强度、高比模量、耐热为主要性能特征,其细分还很多。例如,可以将结构复合材料分为仪表级复合材料、光学级复合材料、结构级复合材料等几类。其中仪表级复合材料主要特征是尺寸稳定、热膨胀系数适中、高比刚度、易精密加工,用于精密机械零件;光学级复合材料主要特征是尺寸稳定、低膨胀、高比刚度、高致密度,用于光学反射镜、红外反射镜基底材料;结构级复合材料主要特征是高比强度、高强韧性和一定的塑性,主要用于高比强度、高比刚度、耐高温结构件,在航空航天、地面运输领域有广泛的用途。功能复合材料以高导热、高阻尼、吸声、电磁屏蔽、微波反射、抗辐照等物理性能为主要特征。例如,其中的电子级复合材料用于电子封装、大功率电子器件热沉等部位。智能复合材料(也称为

机敏复合材料)是能够对外界载荷变化产生感知并自适应调整自身性能的材料,如自修复复合材料^[6]等。

金属基复合材料的分类不是绝对的,不同种类的复合材料之间有交叉。不过希望读者不要被这种复杂的分类搅乱思路。

1.3 金属基复合材料的产生与发展

材料是推动人类文明的动力,人类文明也以材料为标志。例如,人类古代文明是以石器、陶器、青铜器为标志,近代文明以钢铁为标志,现代文明是以人工合成材料为标志,如橡胶、塑料等。进入 20 世纪,出现了传统材料间技术相融合的研究思路,将两种或两种以上的材料用人工的方法复合成一体,从而得到各组成材料所不具有的优异性能。1942 年美国 Marco 化学公司制备出一种由玻璃纤维和不饱和聚酯树脂经过碾压形成的材料,与传统的金属材料相比,显示出突出的低密度、高强度、耐腐蚀特征,很快将其用于飞机雷达罩和远航副油箱,在 50 年代发展很快,成为第一代复合材料。60 年代初期新型的碳纤维、硼纤维与晶须的出现,使得用这些纤维(晶须)作增强体制成的复合材料在力学性能上发生了极大的进步,当时将其称之为先进复合材料(advanced composites, ACM)。60 年代末,研发成功聚丙烯腈碳纤维并实现批量生产,从此开始了碳纤维增强复合材料在航空、航天领域应用的历程。同时,人们预测用高模量高强度纤维与金属复合可以克服树脂基复合材料的使用温度低(低于 80℃)、容易老化、空间环境下容易放气、耐粒子辐照性能差等方面的不足,开始设计并制备新型的以金属或陶瓷为基体复合材料。金属基复合材料的起源可以追溯到 20 世纪 50 年代末到 60 年代初期。1959 年, Gatti 采用粉末冶金工艺将 Al_2O_3 颗粒添加到纯铁中,实验表明 Al_2O_3 颗粒含量(质量分数)为 8% 和 16% 时屈服强度分别是纯铁的 2 倍和 4 倍,高温蠕变抗力也得到提高^[7]。不过当时作者没有将其称为复合材料,而称为铁-氧化铝材料,但这的确就是铁基复合材料。1963 年,美国国家航空宇航局(NASA)的 McDanel 等成功地利用液相浸渗的方法制备出 10% 钨丝增强铜基复合材料,比铜基合金强度提高了 90% 以上,而热导率仅下降 4%^[8]。目前多数学者将这一工作作为金属基复合材料研究的标志性起点^[9]。

金属基复合材料是在航空航天技术发展的驱动下,传统合金材料不能满足要求而发展起来的。研究者用人工的方法将陶瓷、硼、碳等的纤维、晶须或者颗粒加入到传统的金属中,发挥出陶瓷与金属的各自的优点,改善金属的特性,获得了传统合金所不具备的高比强度、高比刚度、低膨胀、高导热、耐高温、抗磨损等特殊性能与功能。显而易见,金属添加物可以从不同尺寸、不同形态、不同物理化学性质的陶瓷中选择一种或几种与某种金属相复合,所以金属基复合材料具有丰富的材

料性能与功能的设计空间,其多样性明显优于传统合金和其他复合材料。这样诱人的潜力获得了世界技术发达国家的高度重视,被认为是“21世纪”的材料。2003年美国“面向21世纪国防需求的材料”研究报告中指出:“到2020年,只有复合材料才有潜力获得20%~25%的性能提升”^[10],这种观点得到国际上的广泛认同。

1.3.1 国外金属基复合材料应用技术的发展

1978年,美国采用扩散连接法制备了碳纤维增强6061铝复合材料管材,碳纤维直径为 $140\mu\text{m}$,管材长度在23.8~89.8in之间,应用于航天飞机机身主体框架和翼肋支撑件、框架稳定支架等243个管状构架^[11]。框架的主体结构照片参见图1-1。与传统的铝合金管相比,复合材料的应用减轻了约320lb的重量,同时改善了飞行器内部的通道,节省了空间*。

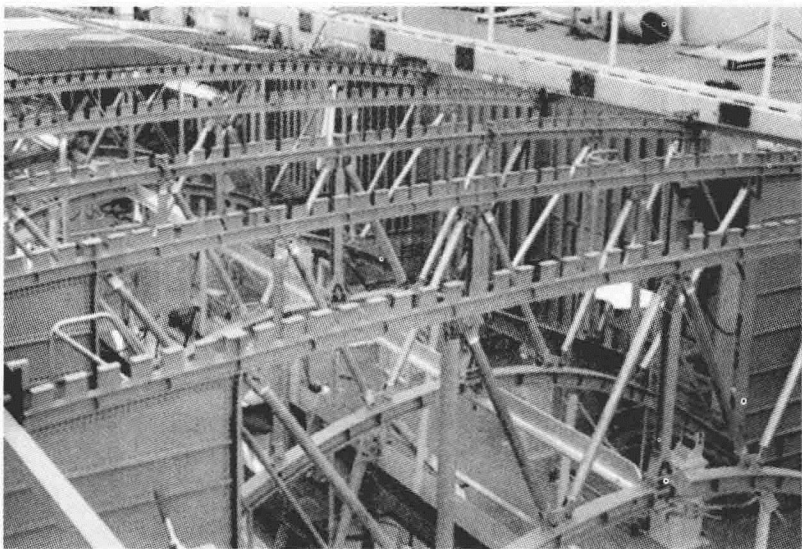


图1-1 航天飞机轨道器中硼/铝复合材料管构件^[11]

20世纪80年代以后,航空航天和核能利用等技术的发展,对材料提出了更高的性能要求,如高比强度、高比刚度、耐磨损、耐腐蚀、耐高温,并在温度剧烈变化时具有较好的化学和尺寸稳定性等。在这个需求的推动下,金属基复合材料的研究和应用进入了前所未有的快速发展时期,产生了多种增强材料、多种基体材料和多种复合方法。金属基复合材料优越的性能一开始就引起了民用生活领域的关注,随着在航空航天领域的经验积累,人们开始在汽车、电子领域进行大胆尝试。1983年,日本丰田汽车公司在涡轮增压发动机的活塞上采用了MMC局部强化技术,其复

* $1\text{in}=2.54\text{cm}$, $1\text{lb}\approx 0.454\text{kg}$ 。

合材料是采用压力浸渗方法制成的^[12],如图 1-2 所示,活塞顶部的凹形板和环型槽采用 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 短纤维增强铝复合材料,以替代镍基铸造材料,起到了减重和增加发动机效率的作用。丰田公司的这一技术进步,标志着在金属基复合材料在汽车行业中开始得到应用。

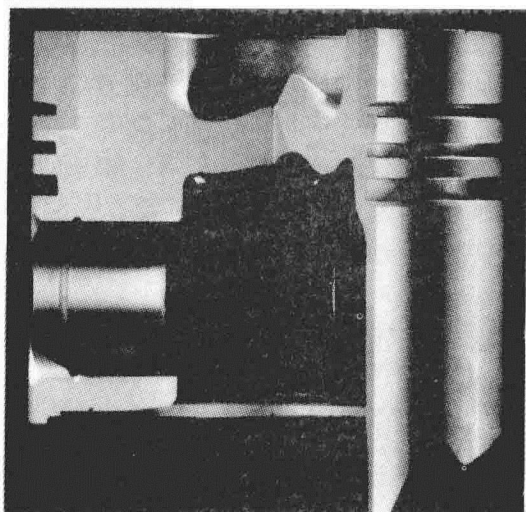


图 1-2 短纤维增强轻金属柴油机活塞^[12]

美国通用发动机在 1996 年将氧化铝颗粒增强 6061 复合材料用于制造轿车传动轴(图 1-3),氧化铝颗粒增强 6061 复合材料传动轴的比刚度可达 $34.7\text{km}^2/\text{s}^2$,用其替代传统的钢或者挤压的铝管,可使轴的旋转速度增加 14%,且使车身重量大为减轻^[13]。

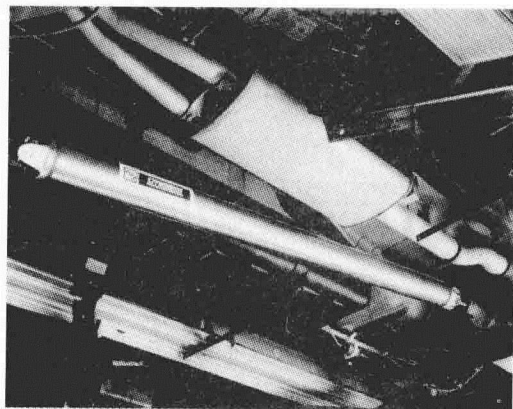


图 1-3 轿车中颗粒增强铝基复合材料传动轴^[13]

在高速铁路和列车方面,德国 ICE(inter city express)列车是第一个应用金属基复合材料刹车盘的^[14],产品照片示于图 1-4。ICE 列车的刹车系统原来采用的是 4 个铸铁刹车盘,每个质量达 126kg,替换为颗粒增强铝基复合材料刹车盘后,每个刹车盘的质量减小到 76kg,带来了较大的减重效益。

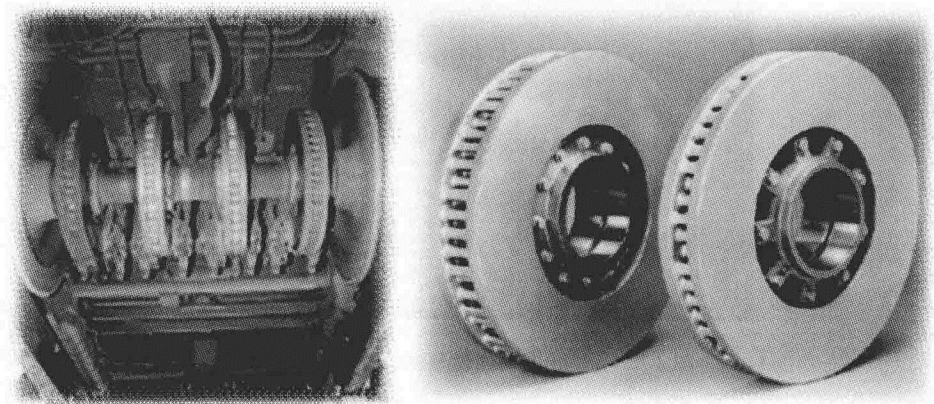


图 1-4 颗粒增强铝基复合材料刹车盘^[14]

20 世纪 90 年代末,碳化硅颗粒增强铝基复合材料在大型客机上获得正式应用。图 1-5 所示的照片是由 DWA 公司生产的挤压态 $\text{SiC}_p/6092\text{Al}$ 复合材料风扇出口导流叶片^[15],用在所有采用 PW4084 系发动机的波音 777 飞机上。这种导流叶片与树脂基复合材料相比具有更好的耐冲击性和抗冲蚀能力,且使成本下降三分之一以上^[16]。

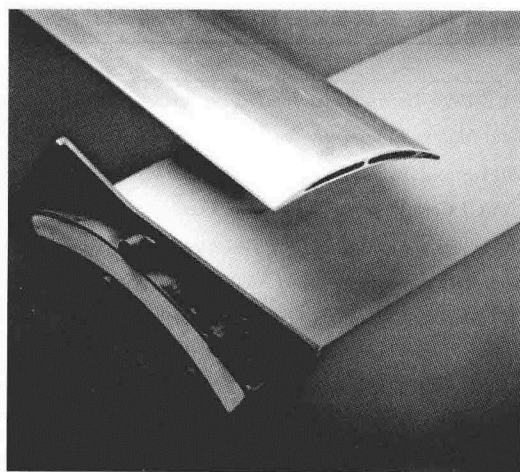


图 1-5 PW4084 航空发动机的风扇出口导流叶片^[15]